

Der zweite Welt-Gipfel zur nachhaltigen Entwicklung findet dieses Jahr in Johannesburg statt. Im Zentrum stehen die Erhaltung und Bewirtschaftung der Ressourcen. Einen wesentlichen Beitrag dazu müssen die Wissenschaften leisten, wobei es der Zusammenführung natur-, wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse bedarf, um den Herausforderungen der Zukunft zu begegnen.



20. October 1998, 09:00 UTC, © EUMETSAT 1999

10 Jahre nach „Rio“ – Konzepte zum Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung

Marco Eissen, Jürgen O. Metzger,* Eberhard Schmidt und Uwe Schneidewind

In der Erklärung der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro 1992 und in der Agenda 21, dem vor nun zehn Jahren von mehr als 170 Staaten verabschiedeten Arbeitsprogramm für das 21. Jahrhundert, werden die dringlichsten Fragen von heute angesprochen, während gleichzeitig versucht wird, die Welt auf die Herausforderungen dieses Jahrhunderts vorzubereiten. Im Zentrum stehen die Erhaltung und Bewirtschaftung der Ressourcen für die Entwicklung. Einen wesentlichen Beitrag dazu müssen die Wissenschaften leisten, wobei es der Zusammenführung natur-, wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse bedarf. Die Verbände der chemischen Industrien Europas, Japans und der USA haben sich in ihren Zukunftsprogrammen explizit zu ihrer Ver-

pflichtung zu einer nachhaltigen Entwicklung bekannt. Wir untersuchen in diesem Aufsatz beispielhaft Innovativen der Chemie für eine solche Entwicklung in ihrer ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension unter einer integrierten und interdisziplinären Perspektive. Die ressourcenschonende Produktion von Basischemikalien ist aufgrund der großen produzierten Mengen und der darauf aufbauenden Produktlinien für eine nachhaltige Entwicklung von besonderer Bedeutung. Dies wird unter anderem am Beispiel von Propylenoxid und Adipinsäure gezeigt. Langfristig könnten die nachwachsenden Rohstoffe, die katalytisch weiterverarbeitet werden, fossile Rohstoffe ersetzen. Die heute existierenden Trennmethoden müssen wesentlich verbessert werden, damit der Material- und Energie-

verbrauch gesenkt wird. Die Chemie könnte Wegbereiter einer innovativen Energietechnik werden. Die chemischen Produkte müssen so gestaltet werden, dass sie nachhaltig weiterverarbeitet, recycelt und nicht bioakkumuliert werden können. Methoden und Kriterien zur Bewertung ihres Beitrags zu einer nachhaltigen Entwicklung sind notwendig. Die Zeit zur Einführung der neuen Prozesse und Produkte muss durch die enge Verbindung ihrer Entwicklung mit dem betrieblichen Innovationsmanagement und effizienten umweltpolitischen Steuerungsverfahren verringert werden.

Stichwörter: Innovationen • Nachhaltige Entwicklung • Nachwachsende Rohstoffe • Oxidationen • Umweltverträgliche Synthesen

1. Einleitung

„Die Menschen stehen im Mittelpunkt der Bemühungen um eine nachhaltige Entwicklung. Sie haben das Recht auf ein gesundes und produktives Leben im Einklang mit der Natur.“^[1] So lautet der erste Grundsatz der „Erklärung von Rio zu Umwelt und Entwicklung“ (Rio-Deklaration) der

[*] Prof. Dr. J. O. Metzger, Dr. M. Eissen
Fachbereich Chemie der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Postfach 2503, 26111 Oldenburg (Deutschland)

Fax: (+49) 441-798-3329
E-mail: juergen.metzger@uni-oldenburg.de

Prof. Dr. E. Schmidt
Institut für Politikwissenschaften II der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Postfach 2503, 26111 Oldenburg (Deutschland)

Prof. Dr. U. Schneidewind
Institut für BWL I der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Postfach 2503, 26111 Oldenburg (Deutschland)

Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro im Juni 1992. Die Weltbevölkerung wird von gegenwärtig 6 Milliarden – davon 1.2 Milliarden in den industrialisierten Ländern – auf 8 bis 11 Milliarden im Jahr 2050 steigen; der National Research Council der USA nimmt als wahrscheinlichsten Wert eine Bevölkerungszahl von 9 Milliarden an.^[2] Das Wachstum wird nahezu ausschließlich in den heutigen Entwicklungsländern Afrikas, Asiens und Lateinamerikas stattfinden, sodass das Verhältnis der Bevölkerung in den Entwicklungsländern zu der der Industrieländer von heute 4:1 auf 7:1 steigen wird. Der Lebensstandard in den Entwicklungsländern muss wachsen und sich immer mehr dem der Industrieländer, der nicht sinken soll, anpassen, wenn der 3. Grundsatz der Rio-Deklaration einer nachhaltigen Entwicklung erfüllt werden soll: „Das Recht auf Entwicklung muss so erfüllt werden, dass den Entwicklungs- und Umweltbedürfnissen heutiger und künftiger Generationen in gerechter Weise entsprochen wird“ oder in den häufig

zitierten Worten des Brundtland-Berichts „einer Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“^[3] Neben dem Bedarf an Nahrungsmitteln wird auch der an sonstigen Gütern gewaltig ansteigen. Der Bedarf an Gütern wird sich mehr als verdoppeln und bei einer zunehmenden Angleichung des Lebensstandards bald um den Faktor vier und mehr anwachsen. Ressourcen müssen sehr viel effizienter als heute genutzt werden, d.h. mit der gleichen oder sogar einer geringeren Quantität an Ressourcen muss ein Vielfaches an Gütern produziert werden. Es müssen also ganz praktisch die Maßnahmen verstärkt werden, den Ressourcenverbrauch pro Nutzungseinheit beträchtlich zu senken. Dabei wird eine Senkung um den Faktor vier nicht genügen, da die vorhandenen fossilen Ressourcen immer schwerer zugänglich sein werden.^[4, 5] So ist davon auszugehen, dass die Erdölproduktion noch in diesem Jahrzehnt, spätestens aber 2015–2020 ihr Maximum überschritten haben und dann langsam abfallen wird.^[6] Die Steigerung der Effizienz der Ressourcennutzung verweist auf den 8. Grundsatz der Rio-Deklaration: „Um eine nachhaltige Entwicklung und eine bessere Lebensqualität für alle Menschen zu erlangen,

sollen die Staaten nicht nachhaltige Produktions- und Verbrauchsstrukturen abbauen und beseitigen und eine geeignete Bevölkerungspolitik fördern“, wobei als weitere wichtige Konsequenz auch der Schutz der Umwelt berücksichtigt werden muss, der in Grundsatz 4 angesprochen wird: „Eine nachhaltige Entwicklung erfordert, dass der Umweltschutz Bestandteil des Entwicklungsprozesses ist und nicht von ihm getrennt betrachtet werden darf.“

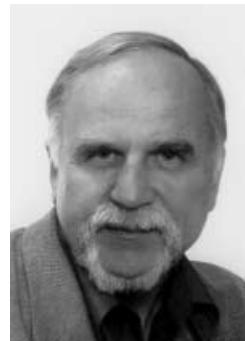
Die Grundsätze der Konferenz von Rio sind in der Agenda 21, dem von mehr als 170 Staaten verabschiedeten Arbeitsprogramm für das 21. Jahrhundert,^[7] konkretisiert. Darin „werden die dringlichsten Fragen von heute angesprochen, während gleichzeitig versucht wird, die Welt auf die Herausforderungen des nächsten Jahrhunderts vorzubereiten“ (Agenda 21, Kap. 1.3). Im Zentrum stehen die „Erhaltung und Bewirtschaftung der Ressourcen für die Entwicklung“ (Agenda 21, Teil II). Dazu müssen die Wissenschaften einen wesentlichen Beitrag leisten. „Die Wissenschaft muss sich permanent mit Möglichkeiten einer schonenderen Ressourcennutzung befassen... Die Wissenschaft wird somit zunehmend als wesentliches Element der Suche nach gangbaren Wegen hin zu einer nachhaltigen Entwicklung verstanden“ (Agenda 21, Kap. 35.2). „Dazu bedarf es der Zusam-



M. Eissen



J. O. Metzger



E. Schmidt



U. Schneidewind

Marco Eissen, geboren 1972, studierte Chemie und Mathematik in Oldenburg, wo er 2001 im Arbeitskreis von J. O. Metzger promovierte. In seiner Dissertation beschäftigte er sich mit der Bewertung der Umweltverträglichkeit organisch-chemischer Synthesen.

Jürgen O. Metzger, geboren 1940, studierte Chemie in Tübingen, Erlangen, Berlin und Hamburg, wo er 1970 über Ziegler-Natta-Katalysatoren promovierte. 1983 habilitierte er sich an der Universität Oldenburg zum Thema „Thermisch initiierte intermolekulare organisch-chemische Reaktionen bei erhöhten Temperaturen und hohen Drücken“. 1991 wurde er zum Professor für Organische Chemie ernannt. Seine Arbeitsgebiete umfassen Nachhaltigkeit in der Chemie, umweltverträgliche organische Synthesen, nachwachsende Rohstoffe, Radikalchemie und Massenspektrometrie.

Eberhard Schmidt, geboren 1939, Studium der Germanistik, Geschichte und Philosophie in Bonn und Tübingen, der Politikwissenschaft und Soziologie in Frankfurt/M. und Marburg. Seit 1974 ist er Professor für Politikwissenschaft mit dem Schwerpunkt Parteien und Verbände an der Universität Oldenburg. Forschungsschwerpunkte: Industrielle Beziehungen und Umweltschutz, Politik der Nachhaltigkeit, Arbeit und Umwelt.

Uwe Schneidewind, geboren 1966, Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Universität Köln, Promotion und Habilitation an der Universität St. Gallen im Bereich des strategischen Umweltmanagements (Schwerpunkt: Ökologie und Wettbewerbsfähigkeit in der chemischen Industrie). Seit 1998 Inhaber des Lehrstuhl für Produktionswirtschaft und Umwelt an der Universität Oldenburg mit dem Forschungsschwerpunkt Stoffstrommanagement.

menführung natur-, wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse“ (Agenda 21, Kap. 35.11c) Das bedeutet nichts anderes als die Aufforderung an die Wissenschaftler, ihre Forschungsthemen in Grundlagen- und angewandter Forschung aus dem gewaltigen Katalog der ungelösten Probleme, die in der Agenda 21 genannt sind, zu entwickeln. Dies gilt natürlich auch – noch unzureichend erkannt und wahrgekommen – für die Chemie.

Wesentliche Aspekte der Rio-Deklaration^[1] und der Agenda 21^[7] wurden in den vergangenen zehn Jahren zunehmend in Angriff genommen. Die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestags hat die „Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen“^[8] und die Umsetzung des Leitbilds Nachhaltigkeit in die gesellschaftliche Realität des 21. Jahrhunderts untersucht und festgestellt: „Zentrales Ziel des Nachhaltigkeitsanliegens ist die Sicherstellung und Verbesserung ökologischer, ökonomischer und sozialer Leistungsfähigkeiten“^[9] Die Chemikaliensicherheit, der in der Agenda 21 ein eigenes Kapitel gewidmet ist (Kapitel 19), wurde durch internationale Vereinbarungen beträchtlich gesteigert,^[10] wozu die weltweite freiwillige Initiative „Verantwortliches Handeln“ der chemischen Industrie wesentlich beiträgt.^[11] Die chemischen Industrien Europas, Japans und der USA haben sich in ihren Zukunftsprogrammen explizit zu dem Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung bekannt.^[12, 13] Allerdings scheint die Beteiligung der chemischen Industrie in den USA an dem Zukunftsprogramm Vision 2020 geringer als erwartet zu sein, und die Synthetic Organic Chemical Manufacturers Association (SOCMA) hat sogar ihre aktive Unterstützung zurückgezogen, da die Interessen kleinerer Unternehmen nicht angesprochen würden.^[13b] Insgesamt ist aber festzustellen, dass die Betriebe der chemischen Industrie versuchen zu verstehen, was nachhaltige Entwicklung für sie bedeutet.^[14] Die Prinzipien des produktions- und produktintegrierten Umweltschutzes werden zunehmend von vielen Unternehmen akzeptiert und umgesetzt.^[15, 16] Grundkonzepte zum umweltorientierten Design chemischer Produkte und Prozesse wurden entwickelt.^[17] „Green Chemistry“ wurde als Orientierung für die Grundlagenforschung in der Chemie vorgeschlagen.^[18]

Wir wollen in diesem Aufsatz Innovationen der Chemie für eine nachhaltige Entwicklung konzeptionell unter einer integrierten und interdisziplinären Perspektive auf fünf Ebenen – Prozessebene, Produktebene, Bewertungsebene, Organisationsebene, soziopolitische Ebene – beispielhaft untersuchen und stützen unsere Ausführungen wesentlich auf Beiträge bei einer entsprechenden Tagung im Februar 2000 an der Universität Oldenburg.^[19a]

Die ressourcenschonende Produktion von Basischemikalien – Chemikalien, von denen weltweit jeweils mehr als 1 Million t/a hergestellt werden – ist aufgrund der großen produzierten Mengen und der darauf aufbauenden Produktlinien, für eine nachhaltige Entwicklung von besonderer Bedeutung.^[19b] Dies macht die Entwicklung neuer Prozesse für bestimmte Basischemikalien oder sogar völlig neue Basischemikalien erforderlich. Die Basischemikalien prägen entscheidend die chemischen Produkte, die daraus über eine oder mehrere Stufen produziert werden, und deren Weiter-

verarbeitung in Industriebereichen, die häufig nicht zur chemischen Industrie gehören. Diese chemischen Produkte müssen so gestaltet werden, dass sie auch nachhaltig weiterverarbeitet werden können. Methoden und Kriterien zur Bewertung ihrer Nachhaltigkeit möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess sind notwendig. Die Zeit zur Einführung der neuen Prozesse und Produkte muss durch die Schaffung der betrieblichen Voraussetzungen und durch umweltpolitische Maßnahmen verringert werden.

In der Diskussion um den Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung wird oft beklagt, dass der Begriff „Nachhaltigkeit“ inflationär verwendet werde und keine Definitionsschärfe mehr habe. Um so dringlicher ist eine klare und eindeutige Begriffsbestimmung. Wir verstehen darunter die Umsetzung der Rio-Deklaration und der Agenda 21 unter Einschluss ihrer ständigen Fortschreibung, wie sie im Jahr 2002 in Johannesburg ansteht. In diesem Aufsatz geht es darum, welchen Beitrag die Chemie dazu beitragen kann und muss.

2. Auf dem Weg zu umwelt- und ressourcenschonenden Synthesen und Prozessen

Das Energie- und Umweltprofil der chemischen Industrie der USA wurde kürzlich detailliert untersucht und beschrieben.^[20] 1997 verbrauchte die chemische Industrie 6650 PJ (Peta = 10^{15}) Energie, das sind 7% des Gesamtenergieverbrauchs der USA und 25% der Energie, die im Produktionsbereich verbraucht wird. Davon wurden ca. 51% als Rohstoff für die chemischen Produkte (nichtenergetischer Verbrauch, Fachtermini sind in einem Glossar am Ende des Textes erklärt) und 49% als Energie für die Durchführung der Prozesse (energetischer Verbrauch) verbraucht. Der Hauptenergieverbrauch mit 2640 PJ geht in die Produktion der organischen Produkte. (Abbildung 1).

Eine Untersuchung der wichtigsten Wertschöpfungsketten, die auf Ethen, Propen, BTX (Benzol, Toluol, Xylol) und Butadien aufbauen sowie anorganische Grundstoffe und Düngemittel umfassen, ergab für diese einen Verbrauch von 1690 PJ Prozessenergie und davon ein geschätztes Einspa-

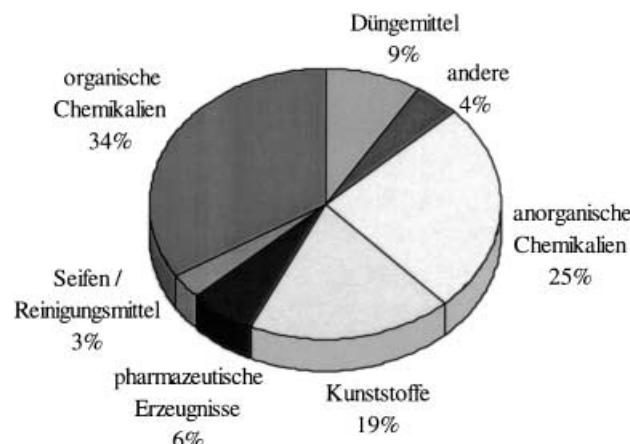


Abbildung 1. Verteilung des kumulierten Energieaufwands (KEA) der chemischen Industrie der USA auf die verschiedenen Produktgruppen.^[20]

rungspotential von etwa 30 %. Die Analyse des Verlaufs von Produktion und Ausstoß der chemischen Industrie von 1974 bis 1997 zeigt aber, dass der Energieverbrauch pro Einheit des Ausstoßes von 1974 bis 1988 zwar um 40 % gefallen ist, seither aber stagniert, wogegen der Gesamtenergieverbrauch von 1974 bis 1997 wegen des kontinuierlichen Wachstums der chemischen Produktion um 80 % gestiegen ist. Daraus wird geschlossen, dass die mit relativ geringen Kosten verbundenen Investitionen zur Energieeinsparung bereits gemacht sind. Weitere Fortschritte werden tiefergehende Veränderungen der Prozesse und innovative Lösungen durch Forschung und Entwicklung erfordern. Sollte der Plan, den Energieverbrauch der chemischen Industrie pro Produkteinheit um 30 % vom Ende des 20. Jahrhunderts bis zum Jahr 2020 zu senken,^[13] realisiert werden, dann wird dies ein wichtiger Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung sein; er wird aber längst nicht ausreichen, da durch die Produktionszunahme der Gesamtenergieverbrauch der chemischen Industrie konstant bleibt, wenn nicht sogar steigen dürfte. Ferner liefert die Chemie auch wichtige Beiträge zu einer effizienteren Bereitstellung der Energie^[21a] und ist Wegbereiter einer innovativen Energietechnik.^[21b]

Für die chemische Industrie in Deutschland zeigte eine Abschätzung der Material-, Energie- und CO₂-Ströme für das Jahr 1995 einen Primärenergiebedarf von etwa 1700 PJ, wovon 830 PJ in synthetischen organischen Produkten gebunden wird.^[22, 23] Dieser Wert umfasst den Rohstoffeinsatz, die gesamte Prozesskette der Verarbeitung und die Abfallbehandlung, entsprechend 44 % des Primärenergieeinsatzes des verarbeitenden Gewerbes bzw. 12 % der gesamten Volkswirtschaft. Es wurden Einsparpotentiale bis zum Jahr 2005 von 250 PJ entsprechend einer Gesamtprimärenergieeinsparung von 14 % ermittelt. Die CO₂-Emissionen betrugen etwa 57 × 10⁶ t, etwa 20 % des verarbeitenden Gewerbes und 6 % der Gesamtemissionen. Das Einsparpotential für das Jahr 2005 wurde auf 16 Mio. t geschätzt.^[23a] Mit der „Selbstverpflichtungserklärung der Deutschen Wirtschaft“ vom 9.11.2000 sollen die spezifischen CO₂-Emissionen sowie der spezifische Energieverbrauch bis 2005 um 20 % gesenkt werden.^[24]

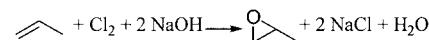
Das Verhältnis des Primärenergieeinsatzes in den USA und in Deutschland entspricht recht gut dem Verhältnis des Chemieumsatzes in beiden Ländern von 733 × 10⁹ bzw. 187 × 10⁹ DM im Jahr 1998. Es ist davon auszugehen, dass analoge Daten für alle entwickelten Industrieländer gelten. Diese Abschätzungen zeigen, dass die gegenwärtig betriebenen Prozesse der chemischen Industrie effizienter werden können, sie zeigen aber auch, dass dadurch nicht das Doppelte oder gar Vierfache der heutigen Menge an Gütern produziert werden kann. Grundlegende Innovationen für die Produktion der notwendigen Güter mit einem wesentlich geringeren Ressourcenbedarf – etwa einem Zehntel – sind notwendig.^[5]

2.1. Katalytische Direktoxidationen

Oxidationen gehören zu den wichtigsten, aber auch die Umwelt am stärksten belastenden Reaktionen der Organi-

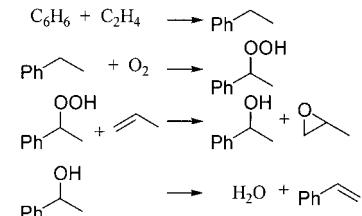
schen Chemie. Es ist bemerkenswert, wie wenig gerade Direktoxidationen mit Sauerstoff verstanden und beherrscht werden.^[25, 26] Ein Durchbruch wäre hier, wie am Beispiel des Propylenoxids gezeigt wird, ein wichtiger Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung.

Propylenoxid gehört zu den Top-50-Chemikalien. 1997 wurden in den USA 1.9 × 10⁶ t, in Deutschland etwa 1 × 10⁶ t, weltweit ca. 4 × 10⁶ t produziert. In den USA – und diese Verteilung ist typisch für den Weltmarkt – werden 65–70 % via Polyetherpolyolen zu Polyurethanschäumen und 22 % zu Propylenglykol umgesetzt.^[27] Die Enquête-Kommission des 12. Deutschen Bundestages hat Propylenoxid als Beispiel für ein unter Verwendung von Chlor hergestelltes chlorfreies Endprodukt sehr detailliert untersucht und beschrieben.^[8a] Industriell durchgeführte Prozesse sind das Chlorhydrinverfahren (Schema 1) und das Oxiranverfahren mit Isobutan oder Ethylbenzol (Schema 2).^[27]



Schema 1. Propylenoxid-Herstellung nach dem Chlorhydrinprozess. Bei dem Gesamtprozess werden pro Tonne Propylenoxid 0.763 t Propen, 1.285 t Chlor, 1.4 t Natronlauge und 2.01 t Natriumchlorid umgesetzt, Nebenprodukte: 0.102 t 1,2-Dichlorpropan, benötigtes Prozesswasser: 38 t.^[27]

Beides sind indirekte Verfahren und insbesondere das erste stark umweltbelastend. Das Oxiranverfahren wird auch für die (indirekte) Synthese von *tert*-Butylalkohol und Styrol verwendet; es ist ökonomisch nur zu betreiben, wenn diese Koppelprodukte verkauft werden können (Schema 2). Das ist gegenwärtig bei Styrol der Fall, bei *tert*-Butylalkohol



Schema 2. Propylenoxid-Herstellung nach dem Oxiranprozess mit Styrol als Koppelprodukt. Die Reaktionssequenz beginnt mit der Produktion von Ethylbenzol. Die pro Tonne Propylenoxid umgesetzten Massen der Substrate und des Koppelprodukts Styrol sind: 2.11 t Benzol, 0.7 t Ethen, 0.88 t Propen und 2.54 t Styrol.^[27]

ist dies aber seit dem Wegfall des Zusatzes von *tert*-Butylmethylether zu Benzin nicht mehr möglich. Allerdings ist der zwangsweise Anfall von Koppelprodukten immer nachteiliger als ein direkter Prozess wegen der zusätzlichen Prozessschritte.

In den letzten Jahren wurde ein Epoxidierungsverfahren von Propen mit Titansilicalit/Wasserstoffperoxid (Ausbeute >90 %) entwickelt (Schema 3). Dieser Prozess erfordert Wasserstoffperoxid, einen reaktiveren aber auch teureren Ersatz für Sauer-

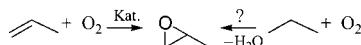


Schema 3. Oxidation von Propylen mit H₂O₂ zu Propylenoxid mit Ti-Silicalit als Katalysator.^[28]

stoff. Wasserstoffperoxid kann durch den Alkylanthrahydrochinon/Alkylanthrachinon-Prozess *in situ* gebildet werden, wobei im Prinzip nur Wasser als „Abfall“ entsteht und bisher Ausbeuten bis zu 57 % an Propylenoxid erhalten wurden.^[28]

Die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags wies in ihrer Untersuchung 1994 daraufhin, dass für die bestehenden Propylenoxidanlagen um die Jahrtausendwende ein neuer Investitionszyklus ansteht.^[28b] Das ist in der Tat der Fall: Die Chlorhydrinanlagen werden überwiegend stillgelegt. Bayer und Lyondell haben den Bau einer Propylenoxidanlage in Europa nach dem Oxiranverfahren angekündigt mit einer Jahresproduktion von 285 000 t Propylenoxid und 640 000 t Styrol.^[29] In den USA werden verschiedene neue Anlagen für dieses Verfahren gebaut und auch in Japan wird dieses Verfahren auf der Basis von Cumol eingesetzt werden.^[29] Die Degussa wird dagegen die katalytische Oxidation von Propen mit Wasserstoffperoxid in den großtechnischen Maßstab überführen.^[30]

Es ist ganz offensichtlich, dass endlich die Direktoxidation von Propen oder, noch besser, von Propan mit Luftsauerstoff für den nächsten Investitionszyklus entwickelt werden muss. Ein interessanter Ansatz, bei dem mit Luftsauerstoff gearbeitet wird, ist die Oxidation von Propen zu Propylenoxid mit Goldkatalysatoren auf Titandioxid als Träger (Schema 4).^[31] Nachteil des Verfahrens ist, dass Wasserstoff zur Bindung des

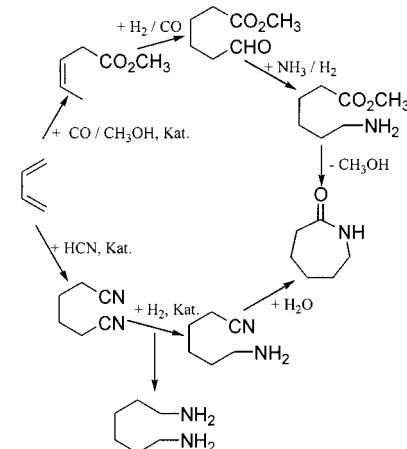


Schema 4. Direktoxidation von Propen und Propan mit Luftsauerstoff zu Propylenoxid.

zweiten Sauerstoffatoms zugegeben werden muss und zudem mehr Wasser, als nach der Stöchiometrie zu erwarten ist, gebildet wird, der Katalysator also auch die Knallgasreaktion katalysiert. Weitere Katalysatoren wie bimetallische Me/Ti-Silicalite (Me = Pd, Pd-Pt, Au) wurden beschrieben.^[32, 33] Für die Direktoxidation von Propan mit Luftsauerstoff zu Propylenoxid, die unter energetischen und Rohstoffgesichtspunkten außerordentlich interessant wäre, scheint es bisher noch keinen Ansatz zu geben. Solange Propylenoxid benötigt wird, ist es dringend erforderlich, die Direktoxidation von Alkenen oder Alkanen grundlegend zu untersuchen, um in den nächsten Jahren einen neuen, nachhaltigeren Prozess einzuführen. Zusätzlich muss aber auch nach Alternativen zu Propylenoxid gesucht werden.

Caprolactam und Adipinsäure sind weitere wichtige Basischemikalien, die durch Oxidation mit großem Ressourcenbedarf und hoher Umweltbelastung gewonnen werden. ϵ -Caprolactam (Weltkapazität ca. 4.4×10^6 t/a) wird auf der C₆-Route über Cyclohexanoxim durch Beckmann-Umlagerung gewonnen, wobei je nach Verfahren 2 mol oder 3 mol Ammoniumsulfat anfallen. Bei dem Enichem-Verfahren der Oxidation von Ammoniak mit H₂O₂ an Titansilicalit wird Hydroxylamin und damit Cyclohexanoxim ohne das nicht gewünschte Koppelprodukt Ammoniumsulfat erhalten.^[34] Der Sumitomo-Prozess ermöglicht die heterogen katalysierte Beckmann-Umlagerung in der Gasphase ebenfalls ohne die Bildung von Ammoniumsulfat.^[35] Die C₄-Route von DuPont führt durch partielle Hydrierung und Gasphasenumlagerung

von Butadien über Adipodinitril zum ϵ -Caprolactam.^[36] Diese Route ermöglicht auch die Produktion von Hexamethylenediamin für Nylon-6,6 durch vollständige Hydrierung des Adipodinitrils. Alternativ kann Butadien in zwei katalytischen Schritten selektiv carbonyliert und hydroformyliert werden. In einem Vierstufenprozess wird so Caprolactam erhalten (Schema 5). Allerdings zeigt eine vergleichende Betrachtung der diversen Prozesse, an deren Umsetzung gegenwärtig gearbeitet wird, nur relativ kleine Innovationsschritte. Der große Durchbruch steht hier noch aus.



Schema 5. C₄-Route von Butadien zu ϵ -Caprolactam und Hexamethylenediamin.^[36]

Adipinsäure wird technisch durch Oxidation eines Gemisches von Cyclohexanon und Cyclohexanol, das durch katalytische Autoxidation von Cyclohexan erhalten wird, mit HNO₃ unter Bildung des Koppelprodukts N₂O und anderer Stickoxide gewonnen.^[35] Sie ist ebenfalls eine Basischemikalie, deren Produktion noch nicht als nachhaltig bezeichnet werden kann (siehe Abbildung 5). Der Prozess wurde verbessert durch Nutzung des Koppelprodukts zur Energiegewinnung^[16b,c] und zur Oxidation von Benzol zu Phenol.^[36] Allerdings sollte Adipinsäure auch durch Direktoxidation von Hexan mit Luft zu gewinnen sein. Hier wurde kürzlich ein erster Durchbruch erzielt: Es gelang mit einem Aluminiumphosphat-Molekularsieb, dotiert mit Cobalt(II) auf den Innenwänden des Käfigs, Hexan mit Luftsauerstoff direkt zu Adipinsäure zu oxidieren.^[37] Große Fortschritte sind auch die katalytischen Oxidationen von Cyclohexan^[38] und Cyclohexen zu Adipinsäure^[39] – die Vorteile des katalytischen gegenüber dem klassischen Prozess wurden kürzlich von Thomas et al. diskutiert.^[40]

Alle diese Beispiele machen deutlich, dass die Entwicklung von effektiveren Katalysatoren und selektiveren katalytischen Prozessen, die möglichst direkt zum gewünschten Produkt führen, eine Schlüsselrolle einnehmen.^[41] Einen Überblick zur Bedeutung der Katalyse für das Kohlenstoff-Management gibt Lit. [26]. Die effektive Entwicklung von Katalysatoren erfordert Techniken für Hochdurchsatz-Synthesen von Katalysatoren und für das schnelle Testen geringster Katalysatormengen für die unterschiedlichen Prozesse. Äußerst viel versprechend für homogen-katalytische Prozesse ist dazu die Elektrospray-Ionisations-Massenspektrometrie.^[42]

2.2. Nutzung der Syntheseleistung und Synthesemethoden der Natur

Ein Ziel der Agenda 21 ist die Förderung der umweltverträglichen Nutzung erneuerbarer natürlicher Ressourcen (Agenda 21, Kap. 4.18, 16.1a) und der Biotechnologie (Agenda 21, Kap. 16), worauf in den nächsten beiden Abschnitten eingegangen wird.

2.2.1. Nachwachsende Rohstoffe

Gegenwärtig beträgt der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen am Rohstoffverbrauch der chemischen Industrie in Deutschland und in den USA etwa 10%; in Deutschland entspricht dies 1.8 Mio. t. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Anteil deutlich erhöhen wird.^[43] Langfristig sind die nachwachsenden Rohstoffe die einzige tragfähige Lösung, wobei es sicherlich ihre katalytische Weiterverarbeitung sein wird, die künftig Erdöl und Kohle als Basisprodukte ersetzen kann.^[41] Der National Research Council der USA hat kürzlich seine Untersuchungen über die voraussichtliche Entwicklung bis 2090 vorgelegt und geht von einem Anteil der nachwachsenden Rohstoffe zur Produktion von organischen Chemieprodukten von 25% im Jahr 2020 aus (Abbildung 2).^[44]

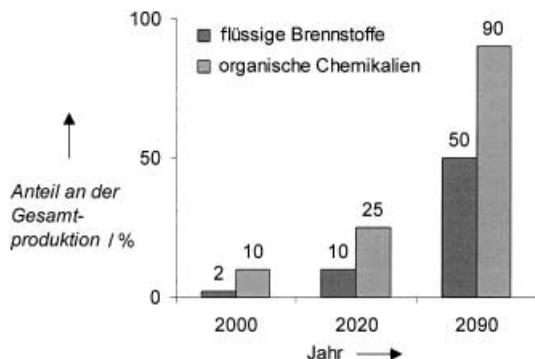


Abbildung 2. Zielvorstellung des National Research Council der USA für die Produktion von organischen Chemikalien und von flüssigen Brennstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bis zum Jahr 2090. Anteil an der jeweiligen Gesamtproduktion in Prozent.^[44]

Von den gegenwärtig eingesetzten nachwachsenden Rohstoffen entfallen ca. 51% auf Fette und Öle. Kohlenhydrate machen mit 43% den zweitgrößten Anteil aus. 6% entfallen auf eine Vielzahl sonstiger nachwachsender Rohstoffe wie Proteine und Proteinhydrolysate.^[43, 23e] Beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Basischemikalien für die organische Synthese muss die Syntheseleistung der Natur genutzt werden, sodass komplexe Moleküle, die petrochemisch nur in vielstufigen Reaktionssequenzen zugänglich sind, in einer oder sehr wenigen Reaktionsschritten aus dem natürlichen chiralen Pool erhalten werden können (siehe Abschnitt 4).

Nachwachsende Rohstoffe sind im Unterschied zu den fossilen Rohstoffen mehr oder weniger hochoxidiert. Es ist daher naheliegend, für Basischemikalien, die auf petrochemischem Weg durch nicht nachhaltige Oxidationen gewonnen

werden, Alternativen aus nachwachsenden Rohstoffen zu entwickeln.^[45, 46] Zahlreiche hochoxidierte Industrieprodukte auf der Basis von Stärke sind verfügbar und werden weiterentwickelt.^[47] Ein gutes Beispiel sind die Alkylpolyglycoside, die als hautverträgliche, umweltfreundliche Tenside im 70000 t/a Maßstab produziert werden.^[48] Neue Synthesen mit Ölen und Fetten als nachwachsende Rohstoffe für die chemische Industrie wurden kürzlich zusammenfassend dargestellt.^[49] Die Übergangsmetall-katalysierte Metathese von ungesättigten Fettsäuren gibt ω -Alkensäuren; z.B. entsteht aus Ölsäure 9-Decensäure und aus Erucasäure 12-Tridecensäure.^[50, 51] Die katalytische oxidative Spaltung von ungesättigten Fettsäuren gibt Dicarbonsäuren wie Azelainsäure.^[52, 53] Alle diese Verbindungen sind potentielle Basischemikalien. Die Epoxidierung von ungesättigten Fettstoffen führt zu Fettepoxiden, die vielfältig als Lackbindemittel und nach Ringöffnung mit Wasser als Polyolkomponente für Polyurethane eingesetzt werden können.^[54] Die oxidative Spaltung von Petroselinsäure (6-Octadecensäure), der Hauptfettsäure des Samenöls von Koriander, erschließt den Zugang zu Adipinsäure, wobei als Koppelprodukt zusätzlich Laurinsäure erhalten werden kann. Adipinsäure ist auch aus Glucose in einem biokatalytischen Prozess zugänglich.^[55]

Die meisten Produkte, die mit diesen Synthesen aus nachwachsenden Rohstoffen erhalten werden, sind gegenwärtig im Vergleich zu den Produkten der Petrochemie noch nicht konkurrenzfähig, was sich aber mit der zunehmenden Verknappung und damit Verteuerung des Erdöls schnell ändern wird. Deshalb ist es allerhöchste Zeit, die grundlegenden Untersuchungen verstärkt durchzuführen, damit Substitutionsprozesse und -produkte zur Verfügung stehen.

2.2.2. Chemische Biotechnologie

Die „chemische Biotechnologie“ ist die rasch wachsende Anwendung der Biotechnologie in der chemischen Produktion.^[56] Der geschätzte jährliche Marktanteil der biotechnologischen Verfahren in der chemischen Industrie liegt in Europa, Japan und den USA bei 1–2%, wobei biotechnologische Verfahren überwiegend für die Herstellung von Feinchemikalien und Pharmazeutika eingesetzt werden.^[57] Die Nutzung der Biokatalyse für die industrielle Synthese von Feinchemikalien wächst rasch.^[58] Hierbei ist die Triebkraft sicherlich nicht der Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit, sondern die einfache Tatsache, dass ein nicht biokatalytischer Prozess nicht möglich oder ökonomisch wesentlich ungünstiger wäre. Zur Produktion von Basischemikalien setzt sich die Biotechnologie nur langsam durch. Außer den klassischen Verfahren für Ethanol – Weltproduktion 1991: 12.6 Millionen Tonnen^[57] –, Sorbit und Citronensäure spielt nur die lipasekatalysierte Hydrolyse von Acrylnitril zu Acrylamid der Nitto Chemical Company mit 30000 t/a eine wichtige Rolle. Die Produktion von Bioethanol wird im Zusammenhang mit dem Ersatz von *tert*-Butylmethylether (MTBA) als Benzinadditiv zunächst in den USA beträchtlich ansteigen von gegenwärtig 6 auf 10.5×10^6 t im Jahr 2003.^[59] Es ist sehr bemerkenswert, dass der Zusatz von Ethanol zu Benzin als Antiklopfmittel bereits 1917 bekannt war, dass 1923 durch General Motors, DuPont und Standard Oil aber

Bleitetraethyl – trotz der lange bekannten Toxizität – aus Patentgründen durchgesetzt wurde.^[60] Es ist davon auszugehen, dass die Biotechnologie im großen Maßstab zur Produktion von Basischemikalien heute wesentlich weiterentwickelt wäre, wenn 1923 die nachhaltige Entscheidung für Ethanol gefallen wäre. Darüber hinaus wäre die feine Verteilung von Millionen Tonnen an Blei – allein 7×10^6 t in den USA – über die Erde verhindert worden, die heute immer noch weiter geht, da Bleitetraethyl nach wie vor produziert und in die Länder der 3. Welt verkauft wird.^[60] Dieses Beispiel zeigt eindrucksvoll wie wichtig die Orientierung an den in der Rio-Deklaration und der Agenda 21 formulierten Zielen der nachhaltigen Entwicklung gerade in den hochentwickelten Ländern ist.

2.3. Trennprozesse

Ein chemischer Prozess besteht aus der Vorbehandlung der Substrate, der Reaktion und der Trennung und Reinigung des Produkts. Die Bedeutung der Trenntechnologien für die chemischen Produktionsprozesse kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden. Die Trennprozesse erfordern in der chemischen Produktion 43 % der verbrauchten Energie und 40–70 % sowohl der Investitions- als auch der Betriebskosten.^[61] Ihre Optimierung ist also von der allergrößten Bedeutung. Der chemische Prozess sollte so entwickelt werden, dass entweder überhaupt keine Trennprozesse notwendig oder aber die Trennprozesse einfach sind und möglichst geringen Energieaufwand erfordern. Eine Möglichkeit ist, Reaktion und Trennung miteinander zu koppeln wie dies bei der Reaktivdestillation und in Absorptions-, Adsorptions- und Membranreaktoren geschieht.

Die Reaktivrektifikation ist im Unterschied zur klassischen Chemieanlage durch die Kombination von Reaktion und rektifikativer Stofftrennung in einer apparativen Einheit gekennzeichnet. Bedingt durch die direkte rektifikative Entfernung der Produkte aus der Reaktionszone können Umsätze weit oberhalb des Gleichgewichtsumsatzes (im Idealfall 100 %) und deutlich höhere Selektivitäten erreicht werden. Damit entfallen im Idealfall weitere Aufarbeitungsschritte und Kreislaufströme.^[62] Besondere Vorteile bietet die heterogen katalysierte Reaktivrektifikation, z. B. von Methylacetat, da hierbei die Abtrennung des Katalysators entfällt.^[63] Auch für alle übrigen Trennmethoden wie Adsorption, Kristallisation, Extraktion, Membranverfahren und Ionen-austausch sind wesentliche Verbesserungen erforderlich, die zu einer Verminderung des Material- und Energieverbrauchs, des Wasserbedarfs sowie von human- und ökotoxischen Emissionen um 30 % bis zum Jahr 2020 führen sollen.^[61]

3. Produkte der chemischen Industrie

Die Produkte der chemischen Industrie zeichnen sich durch eine große chemische Vielfalt aus. Die Agenda 21 geht von etwa 100000 chemischen Substanzen aus, die weltweit von der chemischen Industrie in den Handel gebracht werden, wobei auf etwa 1500 Stoffe 95 % der gesamten Weltproduktion

entfallen (Agenda 21, Kap. 19.11). Die Herausforderung für die Chemie besteht darin, die vielfältigen und unterschiedlichen Produkteigenschaften der Massenprodukte der chemischen Industrie mit möglichst wenigen chemischen Grundstoffen zu realisieren. Denn bei wenigen Grundstoffen sollte eine effektive Rückgewinnung in großem Maßstab möglich und auch ökonomisch sein. Die zahlreichen Fein- und Spezialchemikalien müssen wirkungsvoller werden, d. h., der gewünschte Effekt muss mit deutlich geringeren Substanzmengen erreicht werden. Sie müssen, wenn sie in die Umwelt gebracht werden, schnell mineralisiert werden. Schließlich müssen die Produkte der chemischen Industrie auch umweltverträglich weiterverarbeitet werden können.

3.1. Vergrößerung der Vielfalt chemischer Produkte bei Reduktion der Vielfalt an Stoffen

Gegenwärtig wird zur Synthese von Kunststoffen eine Vielzahl an chemisch unterschiedlichen Monomeren eingesetzt, um die benötigten Materialeigenschaften zu erhalten, dies erschwert die stoffliche Wiederverwertung der Kunststoffe sehr. Darüber hinaus stehen eine Reihe von Monomeren, z. B. Isocyanate, Ethylen- und Propylenglykol, Acrylate, die zur Synthese von Massenkunststoffen eingesetzt werden, bereits relativ hoch in der Wertschöpfungskette. Die Erzeugung einer großen Vielfalt an Materialeigenschaften aus möglichst wenigen Monomeren durch gezielte und neuartige Verknüpfung und durch Kombination von Polymeren untereinander sowie mit andern Werkstoffen wie Naturfasern wäre ein wichtiger Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung.^[64]

Die Polymerisation von Olefinen, insbesondere von Ethen und Propen, mit metallorganischen Katalysatoren entwickelte sich in den letzten Jahren zu einem der größten industriellen Prozesse in der chemischen Industrie. Etwa 66 Millionen Tonnen an Polyolefinen – Polyethylen, Polypropylen, Copolymeren und Polydienen – wurden 1997 weltweit produziert. Das entspricht etwa 44 % der Gesamtproduktion an Kunststoffen, deren Tendenz steigend ist: 1990 waren es noch 43 Millionen Tonnen entsprechend 43 % und 2005 werden es voraussichtlich 100 Millionen Tonnen Polyolefine entsprechend 45 % der Gesamtproduktion an Kunststoffen sein. Die Gründe dafür sind offensichtlich. Die neuen Metallocenkatalysatoren eröffneten die Möglichkeit, die Struktur der Polymere und damit ihre Eigenschaften enorm zu variieren.^[65] Darüber hinaus ermöglichen sie ein detailliertes Verständnis des Mechanismus und der Stereochemie der Polymerisation von Olefinen.^[66, 67, 68, 69] Mit Metallocenkatalysatoren können zum ersten Mal Kunststoffe hergestellt werden, deren Eigenschaften wie Temperaturbeständigkeit, Härte, Stoßfestigkeit und Transparenz präzise und in weiten Grenzen kontrollierbar ist.^[70]

Solche neuen Polyolefine können zunehmend Kunststoffe aus Monomeren, die mit hohem Aufwand und weniger umweltverträglich produziert werden, ersetzen. Ein Beispiel ist Polyvinylchlorid, das gesellschaftlich zunehmend umstritten ist, da es aus einem toxischen Monomer produziert wird, viel Weichmacher enthält, der ausgewaschen werden kann, giftige Abfälle bei der Produktion verursacht und bei der

Entsorgung problematisch ist, da bei der Verbrennung Chlorwasserstoff gebildet wird.^[8c] PVC kann nun zunehmend durch Polyolefine substituiert werden. Dies gilt auch für andere Spezialkunststoffe wie Polycarbonate, Polyaziridine oder Polyimide, deren Produktion sehr material- und energieaufwändig ist.^[65]

3.2. Produktdesign^[17]

Der Schutz der Wasserressourcen, der Gewässergüte und der aquatischen Ökosysteme ist von größter Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung (Agenda 21, Kap. 18). Chemische Stoffe, die von ihrer Produktbestimmung her in die aquatische Umwelt gelangen, dürfen diese nicht gefährden und müssen dort biologisch abbaubar sein. Persistente und semipersistente Chemikalien dürfen in keinem Umweltkompartiment akkumuliert werden.^[71] Die Herausforderung für die Chemie besteht darin, die Moleküle so zu gestalten, dass sie die gewünschte Wirkung bei minimaler Dosis erfüllen und in der Umwelt durch das natürlich vorhandene Potential schnell mineralisiert werden.^[72] Von besonderer Bedeutung ist hier die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen wie Ölen und Fetten,^[49, 73] aber auch Stärkederivate^[47] in Waschmitteln sowie von Ölen und Fetten als Schmierstoffe.^[74]

Wasserlösliche Funktionspolymere und Komplexbildner sind Bestandteile zahlreicher Formulierungen, die sowohl industriell als auch im Haushalt zur Anwendung kommen. Die derzeit als Sequestrier- und Dispergiermittel eingesetzten Homo- und Copolymeren der Acrylsäure (Abbildung 3) sowie

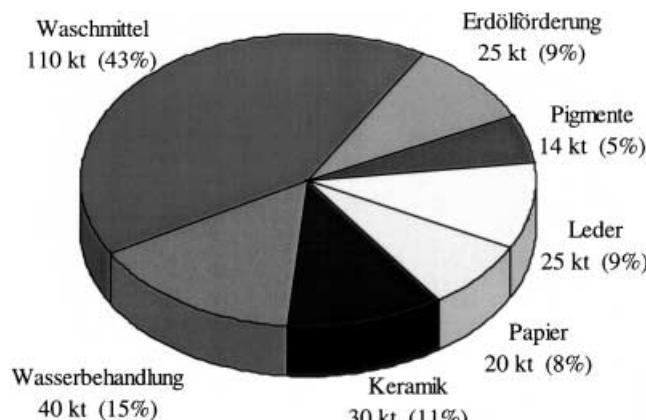


Abbildung 3. Einsatzbereiche von wasserlöslichen Polycarboxylaten. Das Marktvolumen beträgt weltweit 265 000 t/a.^[16b, 75]

die als Komplexbildner weit verbreitete Ethyldiamintetraessigsäure (EDTA) werden biologisch nicht gut abgebaut, sodass eine Kontamination der Oberflächengewässer nicht ausgeschlossen werden kann. Substitutionsprodukte für Polyacrylate sind biologisch abbaubare Polyasparaginsäuren, die durch thermische Polymerisation hergestellt werden.^[16d] Moderne, biologisch abbaubare Komplexbildner vom Typ der Aminopolycarbonsäuren wie

die Iminodibernsteinsäure (IDS) bieten mögliche Alternativen zu persistenten Komplexbildnern.^[75]

3.3. Nachhaltige Weiterverarbeitung chemischer Produkte

Die Produkte der chemischen Industrie werden in der verarbeitenden Industrie zu Produkten für den Endverbraucher weiterverarbeitet, wobei vielfach organische Lösungsmittel eingesetzt werden, die als flüchtige organische Verbindungen (volatile organic chemicals, VOCs) an die Atmosphäre abgegeben werden. In Deutschland waren dies im Jahr 1988 1.197×10^6 t und 1995 1.090×10^6 t.^[76] Für die übrigen industrialisierten Länder sind die Daten ähnlich. Einerseits ist dies eine große Ressourcenverschwendungen und andererseits eine wesentliche Ursache für die Bildung des troposphärischen Ozons, das seinerseits zum Sommersmog beiträgt. Der politisch verbindlich festgelegte Ozongrenzwert von $110 \mu\text{g m}^{-3}$ als Umweltqualitätsziel erfordert, dass die Emissionen organischer Stoffe in die Luft gegenüber dem Bezugsjahr 1988 um 70–80% gesenkt werden müssen. Das bedeutet für die Bundesrepublik Deutschland: Die VOC-Gesamtemission, die auch den Verkehrsbereich u. a. einschließt, muss bis zum Jahr 2007 von 3.241×10^6 t im Jahr 1988 auf $650–950 \times 10^3$ t reduziert werden. Durch die vor allem im Verkehrsbereich seit der gesetzlichen Einführung des Abgaskatalysators bereits erreichten Emissionsminderungen ist die Lösungsmittelverwendung – überwiegend in der verarbeitenden Industrie – insgesamt inzwischen mit mehr als der Hälfte an den Gesamtemissionen beteiligt. Die Hauptemissionen werden bei der Lack-, Druckfarben- und Klebstoffverarbeitung verursacht (Abbildung 4). Die Bereitstellung von chemischen Produkten, die ohne die Verwendung und Freisetzung von VOCs in den genannten und den übrigen Bereichen, die in Abbildung 4 dargestellt sind, weiterverarbeitet werden können, ist eine keineswegs triviale und auf hohem Innovationsniveau liegende Herausforderung für die Chemie. Größere Erfolge in diesem Bereich wären ein wichtiger Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung. Dieser Beitrag würde noch erhöht, wenn diese Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen umweltverträglich produziert und auch unproblematisch entsorgt werden könnten.^[77] In Fällen, in denen auf ein Lösungsmittel nicht verzichtet werden kann, ist flüssiges oder überkritisches CO₂ möglicherweise ein wichtiges Instrument für die Lösung von Umweltproblemen.^[78]

Gegenwärtig werden zur Reduzierung der VOC-Emissionen bei der Entwicklung neuer Lacksysteme überwiegend folgende Wege beschritten:^[79, 80]

- organisch gelöste Bindemittel mit wesentlich höherem Feststoffgehalt (High-Solid-Lacke)
- wasserverdünnbare Lacke mit Restgehalt an organischen Lösungsmitteln
- Pulverlacke ohne Lösungsmittel, aber häufig mit organischen Spaltprodukten bei der Lackhärtung
- strahlenhärtende Lacksysteme, die weitestgehend Lösungsmittel frei sind und auch bei der Härtung keine organischen Spaltprodukte bilden.

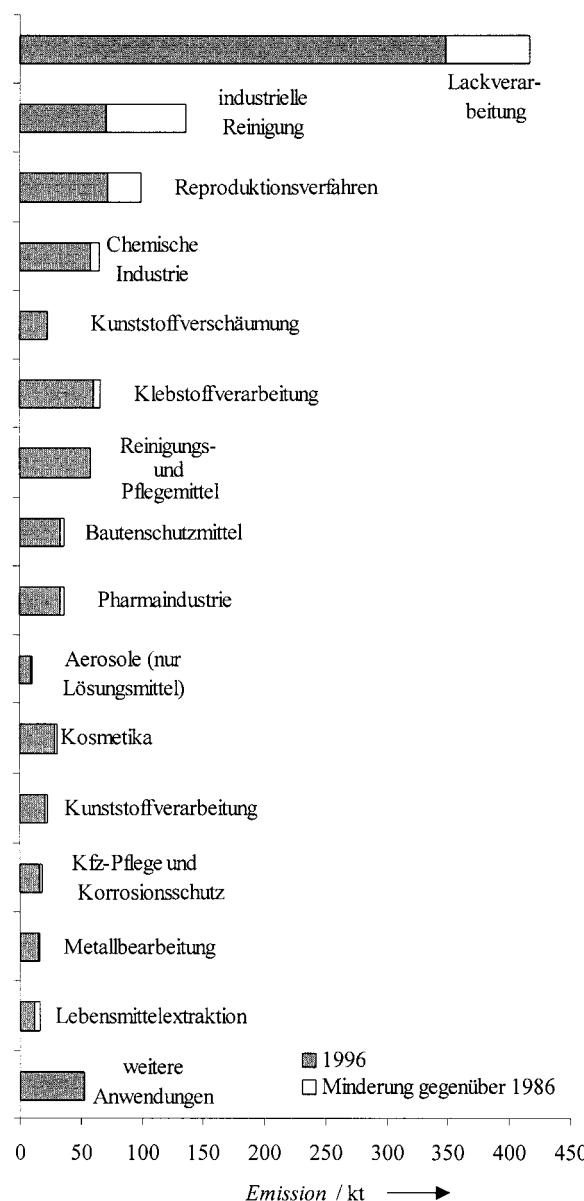


Abbildung 4. Emission von VOCs in Deutschland durch Einsatz von Lösungsmitteln in verschiedenen Industriebereichen (1988: 1.197×10^6 t/a; 1995: 1.09×10^6 t/a). Bis zum Jahr 2007 müssen die VOC-Emissionen auf 650 kt gesenkt werden.^[76]

Bindemittel auf der Basis von Ölen und Fetten scheinen, für die Entwicklung lösungsmittelfreier Lacke sehr viel versprechend zu sein.^[81]

4. Bewertung des Beitrags von chemischen Prozess- und Produktinnovationen zu einer nachhaltigen Entwicklung

Die Agenda 21 fordert „Kriterien und Verfahren zur Prüfung der Umweltverträglichkeit und des Ressourcenverbrauchs während des gesamten Produktzyklus und des Produktionsprozesses“ zu erarbeiten (Kap. 4.20) und formuliert in verschiedenen Kapiteln Ziele und Maßnahmen, zu deren Lösung die Chemie wichtige Beiträge liefern muss, und die

zur Bewertung chemischer Prozesse und Produkte hinsichtlich ihres Beitrags zur nachhaltigen Entwicklung heranziehen sind. Es sind drei grundsätzliche Bewertungsdimensionen im Prinzip integriert zu betrachten:

- eine ökonomische Dimension
- eine soziale Dimension
- eine ökologische Dimension

Betrachtet man den Stand der Operationalisierungen, so stecken diese insbesondere bezogen auf die ökonomische und soziale Dimension erst in den Anfängen.^[9] Die ökonomische Dimension wird in der Regel mit dem betriebswirtschaftlichen Erfolg der betrachteten Unternehmen gleichgesetzt, gesamtwirtschaftliche Nachhaltigkeitskriterien sind erst in Einzelfällen formuliert. Für die soziale Dimension liegen einzelne Indikatorsets vor, die jedoch in sich nur bedingt konsistent sind. Dagegen ist die ökologische Dimension bereits weitgehend operationalisierbar.

4.1. Ökologische Dimension

Die ökologische Dimension des Beitrags der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung und seine Bewertung hat zwei Seiten:

1. Die Belastung der Umwelt und damit der Menschen durch die chemische Produktion und deren Emissionen sowie durch chemische Substanzen, die zu nützlichen Zwecken in die Umwelt ausgebracht werden, dort aber auch eine negative Wirkung entfalten können.^[82]
2. Die effizientere Nutzung der Ressourcen durch neue chemische Prozesse und neue Produkte, um zu ermöglichen, dass 9 Milliarden Menschen auf der Erde unter menschenwürdigen Bedingungen leben können.

4.1.1. Umweltverträglicher Umgang mit Chemikalien

Das Kapitel 19 der Agenda 21 nimmt die Chemiediskussion der letzten 30 Jahre auf und schließt sie grundlegend ab, auch wenn natürlich noch sehr viele Detailprobleme geklärt werden müssen. Es enthält detaillierte Handlungsaufträge zum umweltverträglichen Umgang mit toxischen, d. h. gefährlichen, Chemikalien und verlangt bis zum Jahr 2000 ein weltweit harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien. Mit seiner Umsetzung durch staatliche Regulierungen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene wird ein vollständiger Satz von Stoffberichten, Sicherheitsleitfäden, Sicherheitsdatenblättern und Giftmonographien aller im Handel befindlichen Chemikalien vorliegen. Die Umsetzung des Kapitels 19 wurde von Hildebrandt und Schlottmann zusammenfassend dargestellt.^[10] Bei den Handlungsaufträgen handelt es sich um Einzelstoffbewertungen. Im Hinblick auf die Humantoxizität sollten jedoch auch toxikologische Daten von Zubereitungen und Formulierungen erfasst werden, die eine Entscheidung ermöglichen, ob eine Einzelstoffbehandlung im Gemisch eine ausreichende Basis für einen nachhaltigen Gesundheitsschutz darstellt, oder ob auch spezifische Kombinationswirkungen mit berücksichtigt werden müssen.^[83] Die Responsible Care Initiative formuliert in den leitenden Prinzipien hierzu „to

provide chemicals that can be manufactured, transported, used and disposed of safely.“^[11]

4.1.2. Ansätze zur Bewertung der Nachhaltigkeit chemischer Prozesse

Die Prozessparameter etablierter Prozesse sind (betriebsintern) bekannt und können zur Quantifizierung von Ressourceninanspruchnahme, kumuliertem Energieaufwand (KEA), Abfallaufkommen, Emissionen und zugehörigen Kosten bezogen auf eine Produkteinheit herangezogen werden. In der chemischen Industrie wurden eine Reihe von Kennzahlen entwickelt, die zur Bewertung eingesetzt werden.^[84] So wurde für die zwei gegenwärtig durchgeführten Propylenoxidprozesse der KEA miteinander verglichen. Überraschenderweise lag er für beide Prozesse etwa gleich bei 104 GJ t^{-1} Propylenoxid.^[23c] Weitere Kriterien, die eine Entscheidung zulassen, wie Abfall, Investitionen, Gewinnerwartung, gesellschaftliche Akzeptanz u.a. müssen herangezogen werden. Offensichtlich hat sich in der Abwägung aller Gesichtspunkte das Oxiranverfahren mit Styrol als Kopplungsprodukt gegen das Chlorhydrinverfahren bei den gegenwärtigen Neuinvestitionen durchgesetzt, wobei möglicherweise in Europa die gesellschaftliche Diskussion über die „Chlorchemie“ den Ausschlag gegeben hat.^[8]

Der KEA ist für eine Reihe wichtiger organischer Basischemikalien und Zwischenprodukte für die gegenwärtig durchgeführten Prozesse zugänglich (Abbildung 5); er beträgt z.B. etwa 40 GJ t^{-1} für Acetaldehyd, 80 GJ t^{-1} für Adipinsäure und 104 GJ t^{-1} für Propylenoxid.^[23, 23b] Pflanzenöle wie Rapsöl, Leinöl u.a. erfordern einen KEA von etwa 20 GJ t^{-1} .^[23, 23b, 85] Hier sind die Unterschiede im Ressourcenverbrauch so groß, dass angenommen werden kann, dass Produkte auf der Basis von Pflanzenölen deutlich umweltverträglicher als petrochemische Produkte sein könnten. Der

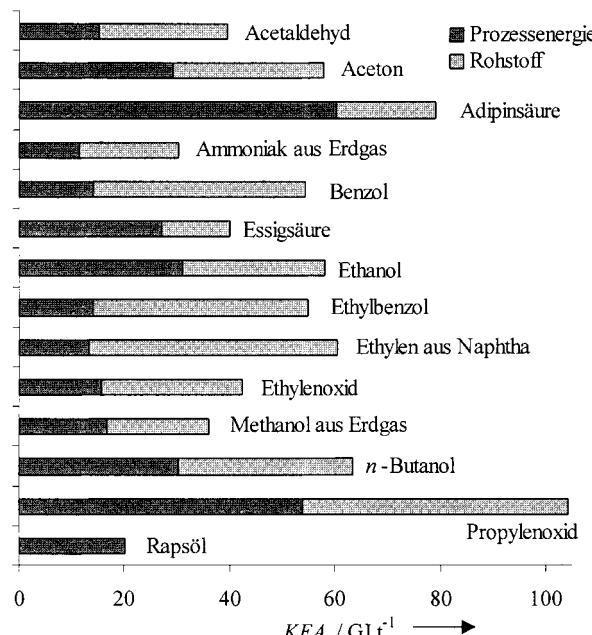


Abbildung 5. Kumulierter Energieaufwand (KEA) für wichtige Basischemikalien.^[22, 23c]

KEA zeigt auch deutliche Unterschiede für wichtige Massenkunststoffe (Abbildung 6). So ist der KEA für eine Tonne Epoxidharz mit 107 GJ t^{-1} beinahe doppelt so groß wie für Alkydharze mit 64 GJ t^{-1} , da letztere einen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen enthalten. Bemerkenswerterweise

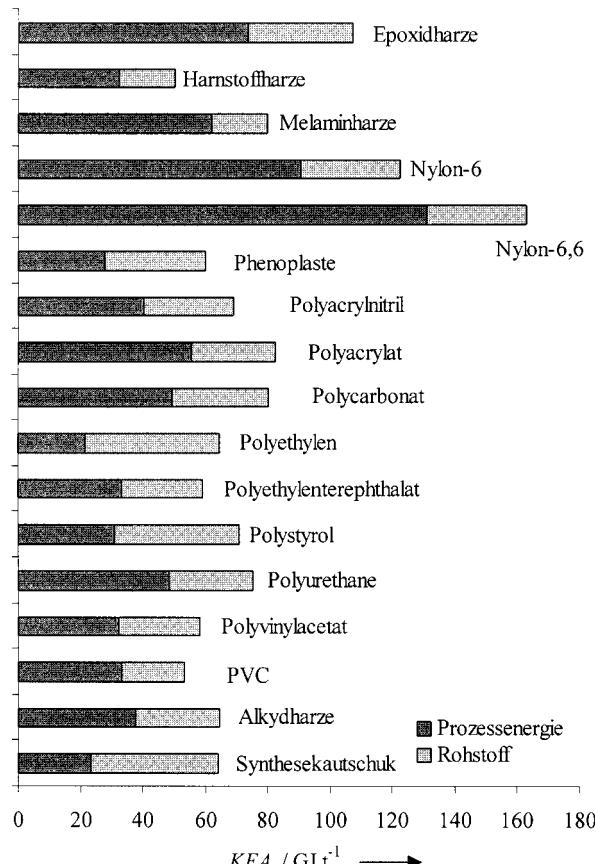


Abbildung 6. Kumulierter Energieaufwand (KEA) für wichtige Massenkunststoffe.^[22, 23c]

hat PVC den geringsten KEA von 53 GJ t^{-1} , deutlich geringer als der KEA von Polyethylen mit 65 GJ t^{-1} . Allerdings ist die Prozessenergie für PVC (32 GJ t^{-1}) um 50% größer als für Polyethylen (21 GJ t^{-1}). Der Wert der in PVC gespeicherten chemischen Energie (20 GJ t^{-1}) ist dagegen auf Grund des hohen Chlorgehalts weniger als halb so groß wie der von Polyethylen (43 GJ t^{-1}). Der KEA in Verbindung mit der Prozessenergie und der im Produkt gespeicherten chemischen Energie ist eine nützliche Kennzahl zur Bewertung von Massenprodukten.

Der quantitative Vergleich von Synthesen von Feinchemikalien und Pharmazeutika im Hinblick auf Ressourcenverbrauch und Umweltverträglichkeit sollte möglichst früh im Entwicklungsprozess,^[86a] möglichst bereits im Labor, durchgeführt werden.^[86b] Einfache Methoden für solche Vergleiche sind von großer Bedeutung für die zielgerichtete Entwicklung nachhaltigerer Prozesse, und einige wurden in den letzten Jahren entwickelt.^[87] Wir folgen hier im Wesentlichen einem Vorschlag von Sheldon,^[88] den Umweltfaktor *E* (Masse des Abfalls, also alle verwendeten Stoffe, die nicht Produkt sind, pro Produkteinheit) eines Prozesses mit substanzspezifischen

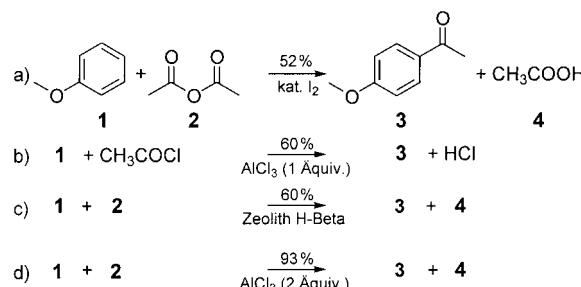
Belastungsfaktoren Q_{output} zu gewichten.^[89] Auf diese Weise erhält man für einen Prozess einen Umweltindex^[87a] EI_{out}, der die potentielle Umweltbelastung pro Kilogramm Produkt (PEI kg⁻¹, PEI: Potential environmental impact^[87f]) durch den Abfall widerspiegelt. Entsprechend wird der Massenindex S⁻¹ mit Q_{input} gewichtet zu dem Umweltindex EI_{in}, der die potentielle Umweltbelastung pro Kilogramm Produkt durch die eingesetzten Rohstoffe wie Edukte, Lösungsmittel, Katalysatoren, Hilfsstoffe für Reaktion und Aufarbeitung quantifiziert (Tabelle 1). Der Belastungsfaktor Q_{input} berücksichtigt die Ressourcen, die zur Synthese der eingesetzten Verbindungen eingesetzt wurden, sowie Faktoren des Arbeitsschutzes und Q_{output} im Wesentlichen die Human- und die Ökotoxizität.^[89b]

Tabelle 1. Kennzahlen für chemische Synthesen zur Bewertung von Ressourcenverbrauch und potentieller Umweltbelastung.

Kennzahlen	Einheit
Massenindex S ⁻¹ = $\frac{\sum \text{Rohstoffe [kg]}}{\text{Produkt [kg]}}$	[kg pro kg]
Umweltfaktor E = $\frac{\sum \text{Abfall [kg]}}{\text{Produkt [kg]}}$	[kg pro kg]
substanzspezifische Belastungsfaktoren $Q_{\text{input}}^{[d]}$ und $Q_{\text{output}}^{[d]}$	[PEI pro kg] ^[a,b]
Umweltindex EI _{in} = $Q_{\text{input}} S^{-1}$	[PEI pro kg] ^[a,c]
Umweltindex EI _{out} = Q_{output}	[PEI pro kg] ^[a,c]

[a] (PEI = Potentielle Umweltbelastung^[87f]). [b] Bezogen auf ein Kilogramm Substanz. [c] Bezogen auf ein Kilogramm Produkt. [d] $1 \leq Q \leq 10$.

Diese Kennzahlen wurden beispielhaft für vier Laborsynthesen von 4-Methoxyacetophenon (Schema 6) mit der Software „EATOS“ (Environmental Assessment Tool for Organic Syntheses^[89a]) schnell und einfach bestimmt (Abbildung 7). Die Zeolith-katalysierte Friedel-Crafts-Acylierung (Schema 6c) bedarf des geringsten Materialinputs, hat deshalb den niedrigsten Massenindex S⁻¹ und dementsprechend



Schema 6. Unterschiedliche Laborsynthesen von 4-Methoxyacetophenon, ausgehend von dem selben Substrat mit unterschiedlichen Acylierungsmitteln, Lösungsmitteln und Katalysatoren.

auch den niedrigsten Umweltfaktor E. Auch die Umweltindizes EI_{in} und EI_{out} sind etwa eine Größenordnung niedriger als bei den andern Synthesen. Offensichtlich belastet diese Synthese von 4-Methoxyacetophenon die Umwelt am wenigsten und ist deshalb am günstigsten. Bemerkenswert ist, dass die Ausbeute, die bevorzugte Kennzahl des Chemikers zur Beurteilung der Qualität einer Synthese, für Synthese c) deutlich niedriger ist als für Synthese d) und vergleichbar mit a) und b) (Schema 6). Die Analyse mit EATOS erlaubt eine detaillierte Bilanzierung der Reaktion unter Einschluss der Lösungsmittel, Katalysatoren und Hilfsstoffe sowie der Nebenprodukte und der Hilfsstoffe bei der Aufarbeitung. So ist unmittelbar zu sehen, dass Synthese a) eine aufwändige Aufarbeitung benötigt, während b) und d) Lösungsmittel bei der Reaktion und Aufarbeitung erfordern, die zu dem hohen Ressourcenbedarf und der hohen potentiellen Umweltbelastung entscheidend beitragen.

Ein Baukastensystem mit Bausteinen der wichtigsten Prozessketten, das Ressourcenbedarf und Umweltbelastung durch die Herstellung von Basischemikalien, Zwischen- und

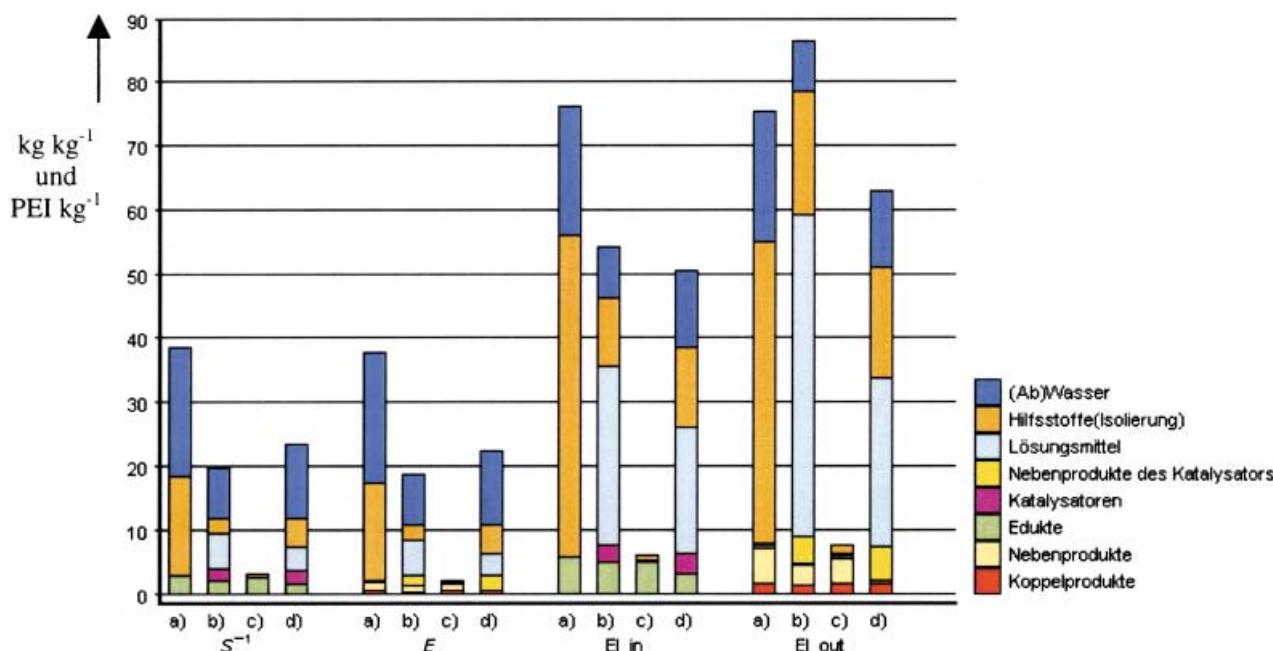


Abbildung 7. Bewertung der Synthesen von 4-Methoxyacetophenon (Schema 6) mit dem Computerprogramm EATOS: Massenindex S⁻¹, Umweltfaktor E, Umweltindizes für Input EI_{in} und Output EI_{out} (siehe Tabelle 1).

Endprodukten mit Hilfe von Kennzahlen quantitativ abzudecken erlaubt und auf einem konsistenten Basisdatensatz beruht, wäre für eine ganzheitliche Bewertung von Synthesen und Prozessen außerordentlich nützlich, steht aber noch nicht zur Verfügung.

4.1.3. Ökobilanzen (LCA)

Eine Ökobilanz^[90] eines Produktes wird von der „Wiege bis zur Bahre“ vorgenommen, also von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung oder Rückführung in den Kreislauf. Eine Ökobilanz besteht aus den Teilen Festlegung des Untersuchungsziels und Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. Die Vorgehensweise ist in der ISO EN DIN 14040-43 beschrieben.^[91] Einen Überblick über die Anwendung der LCA-Methode zur Prozessoptimierung vermittelten Azapagic und Clift.^[92] Für einige Massenkunststoffe wurden bereits Ökobilanzen erstellt.^[93]

Führende Tensid- und Waschmittelhersteller haben die Produktion von Fettalkoholsulfat auf Basis nachwachsender Rohstoffe mit der petrochemischen Herstellung in einer Ökobilanz verglichen.^[87e, 94] Dabei wurde festgestellt, dass Ressourcenverbrauch, Energieverbrauch und Emissionen bei dem auf Palmöl basierenden Tensid deutlich günstiger als bei dem Tensid fossiler Herkunft sind. Der Vergleich von UV-härtenden Lacken mit Leinölepoxyd als Bindemittel mit einem auf petrochemischer Basis produzierten Lackbindemittel ergab deutliche Vorteile für den nachwachsenden Rohstoff Leinöl. Der kumulierte Energiebedarf und die CO₂- und NO_x-Emissionen sind jeweils beinahe eine Größenordnung kleiner. Bei der Herstellung des petrochemischen Lackbindemittels trägt Propylenoxid mehr als die Hälfte zur Umweltbelastung bei (Abbildung 8).^[85]

Auch für einige biotechnologische Prozesse wurden Ökobilanzen durchgeführt.^[57a] Bemerkenswert ist, dass Bioethanol (Weltproduktion 1991: 15.1×10^6 t/a) deutliche ökologische Vorteile gegenüber synthetischem Ethanol (2.5×10^6 t/a) aufweist. So beträgt der Bedarf an fossiler Primärenergie für letzteres 62.3 MJ kg^{-1} , aber nur 4.8 MJ kg^{-1} für Ethanol aus Zuckerrohr und 19.1 MJ kg^{-1} für Ethanol aus Zuckerrüben. Die CO₂-Emissionen betragen 1.88 kg kg^{-1} für Syntheseethanol, während für Bioethanol CO₂-Emissionen gutgeschrieben werden.

4.2. Maße zur ökonomisch-ökologischen Effizienz

Ökonomisch-ökologische Kenngrößen entspringen dem betriebswirtschaftlichen Effizienzgebot, eine vorgegebene Umweltentlastung mit möglichst wenig finanziellem Mittelaufwand zu erreichen oder mit einem festen Mitteleinsatz möglichst eine maximale Umweltentlastung zu erreichen. Einfache ökonomisch-ökologische Effizienzmaße setzen daher konkrete einzelne Umweltentlastungen mit betriebswirtschaftlichen Kenngrößen in Beziehung:^[92, 95] Beispiele sind die SO₂-Reduktionsmenge pro Investitionsvolumen in Filter, Kosten pro reduziertes Kilogramm Abfall, Umsatz in Euro pro Energieverbrauch in kWh. Solche Umweltkennzahlen sind heute in Chemieunternehmen weitgehend etabliert und leicht

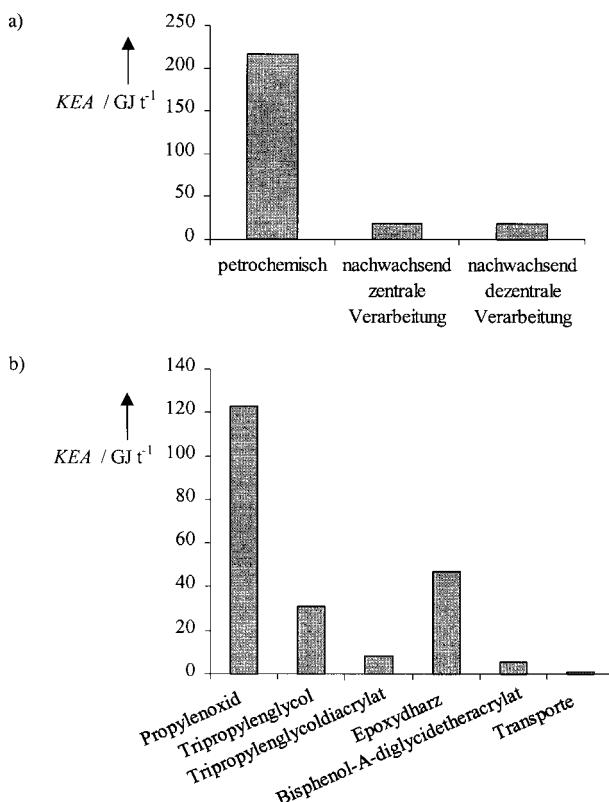


Abbildung 8. a) Vergleich des kumulierten Energieaufwands (KEA) für ein petrochemisches (Tripropylenglykoldiacrylat/Bisphenol-A-diglycidetheracrylat 1:1) und für ein nachwachsendes Lackbindemittel (Leinölepoxyd, zentrale und dezentrale Verarbeitung des Leinsamens). b) Für die Bestandteile des petrochemischen Bindemittels. Für CO₂- und NO_x-Emissionen sind die Relationen ähnlich.^[85]

anwendbar.^[95b] Schwieriger gestaltet sich die Bewertung, wenn eine gesamte Produkt- oder sogar Unternehmensleistung mit einem ökonomisch-ökologischen Effizienzmaß bewertet werden soll, z. B. wenn drei Produktalternativen für einen Farbstoff aus der Perspektive ökonomisch-ökologischer Effizienz gegeneinander abgewogen werden sollen oder den Entwicklungsaufwendungen oder erhöhten Produktionskosten die gesamte ökologische Entlastung gegenüber gestellt werden muss. Es stellt sich damit das von der Ökobilanzierung bekannte Aggregationsproblem (z. B. Aufrechnung von geringerem Abfallaufkommen gegen höheren Energieverbrauch). Den ersten umfassenden Ansatz einer solchen aggregierten ökologischen Effizienzbewertung haben Schaltegger und Sturm 1991 vorgelegt.^[96] Sie stützten sich dabei auf das schweizerische Öko-Punktesystem und wählten als ökonomische Bezugsgröße die Deckungsbeiträge von Produktvarianten. Auf diese Weise konnten sie eine aggregierte ökonomisch-ökologische Effizienz berechnen.

In Deutschland hat sich diese ökonomisch-ökologische Effizienzbewertung lange Zeit nicht durchsetzen können, da die zugrundeliegende Öko-Punkt-Aggregationsmethodik nicht konsensfähig war. Erst in jüngster Zeit sind von Unternehmen Ansätze entstanden, die das von Schaltegger und Sturm entwickelte Konzept aufgreifen, wie die Ökoeffizienz-Analyse der BASF und der Öko-Check „Product excellence“ von Bayer.^[97]

4.3. Sozio-politische Bewertungsdimensionen

Die sozio-politische Bewertung innovativer chemischer Prozesse und Produkte vor dem Hintergrund des Nachhaltigkeitspostulats muss sich an Kriterien orientieren, die auf eine langfristige Gesellschaftsverträglichkeit der geplanten Innovationen zielen. Dazu gehören u.a. die Verminderung von Risikopotentialen, der Schutz der Gesundheit, die Zahl und Qualität von Arbeitsplätzen, die dadurch gewonnen oder abgebaut werden, die Vermehrung sozialer Gerechtigkeit, innerhalb und zwischen den Generationen, eine breite Akzeptanz und Demokratieverträglichkeit. Die Vermittlung dieser Kriterien mit den anderen Dimensionen von Nachhaltigkeit, die die ökologischen und ökonomischen Ansprüche repräsentieren, ist naturgemäß nicht frei von Zielkonflikten und bedarf jeweils der Konkretisierung im Einzelfall.

Konzepte, die chemiepolitische Innovationen auf ihre soziale Tragfähigkeit hin zu bewerten haben, müssen also von vornherein die anderen Dimensionen von Nachhaltigkeit in ausreichendem Maße mitberücksichtigen, um nicht falsche Weichenstellungen zu begünstigen. Das erfordert Bewertungskonzepte, die, wie die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Umwelt und des Menschen“ in ihrem Abschlußbericht festgehalten hat, nicht von einer Institution dekretiert werden können, sondern in einem diskursiven Prozess von vielen Beteiligten, die ihre unterschiedlichen Interessen einbringen, erarbeitet werden müssen.^[9b] Damit bekommt das Nachhaltigkeitspostulat zusätzlich zu seinem normativen Anspruch den Charakter eines gesellschaftlichen Diskurses, der auf Kooperation und Interessenausgleich angelegt ist.

Da Kosten-Nutzen-Analysen und Risikoanalysen für die Einschätzung der sozialen Nachhaltigkeitsfolgen chemischer Innovationen nur begrenzt aussagefähig sind, kämen als Bewertungsgrundlage am ehesten Szenario-Analysen in Frage, die alternative Entwicklungspfade auf der Basis einer Sammlung und integrierten Aufbereitung von Daten aufzeigen. Der Vorteil von Szenario-Analysen bestünde darin, dass sie in komplexer Weise Zukunftsräume und deren Gestaltungsmöglichkeiten erfassen und es so ermöglichen, Synergien und Konfliktpotentiale zu identifizieren, die der Bewertung nach ökologischen, ökonomischen und sozialen Indikatoren,^[92] eventuell in einem diskursiven Verfahren, zugänglich wären. In ihre Formulierung können die Interessen unterschiedlicher Gruppen eingehen und damit die politischen Optionen, die als durchsetzbar einzuschätzen sind, deutlicher herausgestellt werden. Mit Erfolg sind solche Konzepte in einer Reihe von Studien eingesetzt worden, die sich mit den komplexen Folgen von sozialen Innovationen auseinandergesetzt haben.^[98]

Es gibt jedoch auch erste Versuche, möglichst gut zu operationalisierende Systeme der Handlungsabwägung zu schaffen. Zwei wichtige Beispiele sind hier einmal das in der Kooperation von Dow Chemical mit der Londoner Nachhaltigkeitsagentur „Sustainability“ entstandene Konzept „Who needs it“,^[99] in dem für wichtige Bedürfnisfelder, in denen chemische Produkte zur Anwendung kommen, geklärt wird, inwiefern überhaupt eine globale Verallgemeinerungsfähigkeit der dahinter liegenden Bedürfnisse möglich ist.

Diese Reflexion führt nicht zu einer quantitativen Bewertung einzelner Produkte, gibt jedoch Unternehmen frühzeitig die Möglichkeit, geeignete und bedenkliche Bedürfnisfelder zu identifizieren und die Produkt-Portfolio-Entscheidungen auf eine nachhaltige Entwicklung auszurichten. In eine ähnliche Richtung weist das in einer Kooperation vom Freiburger Ökoinstitut und der Hoechst AG entstandene Instrument PROSA,^[100] mit dem unterschiedliche Produktvarianten (im Pilotprojekt z.B. Dachbahnen aus Kunststoff und Konservierungsstoffe) nicht ausschließlich im Hinblick auf einzelne ökologische Parameter, sondern im Kontext ihres Anwendungsumfeldes (Deutschland vs. China) einer umfassenden Nachhaltigkeitsbewertung unterzogen werden.

5. Organisation und Innovation

Prozess- und Produktinnovationen sind das Ergebnis des kreativen Denkens und Handelns von Menschen in Organisationen. Dies gilt auch für ökologische Innovationen, dabei unterscheiden sich Unternehmen und chemische Teilbranchen im Grad ihrer Innovationsfähigkeit erheblich.^[101] Die Organisationsforschung zeigt, dass eine ganze Reihe von Faktoren das Entstehen von Prozess- und Produktinnovationen beeinflusst. Diese Faktoren werden unter dem Begriff des Innovationssystems^[102] zusammengefasst (Abbildung 9). Neben den politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen

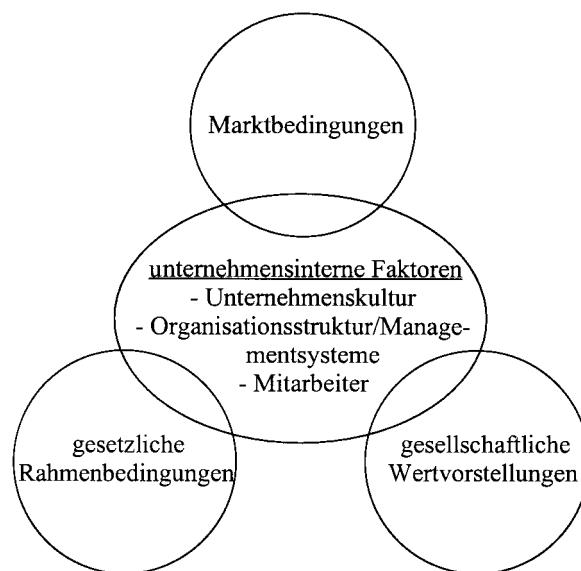


Abbildung 9. Faktoren, die das Innovationsverhalten von Unternehmen beeinflussen.

(Abschnitt 6) sowie gesellschaftlichen Wertvorstellungen gehören dazu die Marktbedingungen (Nachfrage nach ökologisch optimierten Produkten durch Kunden, Wettbewerbsdruck durch ökologische Produktinnovationen von Wettbewerbern) und unternehmensinterne Faktoren. Empirische Studien zeigen, dass die meisten chemischen Innovationen letztlich auf das Engagement einzelner Schlüsselpersonen innerhalb von Unternehmen zurückgehen.^[103] Der vorliegende Abschnitt konzentriert sich auf die internen, von Unter-

nehmen beeinflussbaren Faktoren. Dabei stützt er sich auf Untersuchungen zum Innovationsmanagement in der chemischen Industrie, zu unternehmerischen Umweltinnovationen im Allgemeinen sowie zu unternehmerischen Umweltinnovationen in der chemischen Industrie im Speziellen. Der letzte Bereich steht im Zentrum dieses Abschnittes. Doch gerade hier liegen bisher sehr wenige empirische Studien vor.^[104] Erkenntnisse zu den Erfolgsbedingungen ökologischer Innovationen in der chemischen Industrie müssen sich daher zwangsläufig auch auf Ergebnisse aus den beiden erstgenannten Themenbereichen stützen.

Forschungs- und Entwicklungs(F&E)-Prozesse sind geprägt durch hohes Risiko, enormen Kapitalbedarf sowie der Erfordernis interdisziplinärer und damit schnittstellenintensiver Zusammenarbeit.^[105] Als Konsequenz nehmen Unternehmenskooperationen zur Integration von externem Wissen in den F&E-Prozess zu. Dies umfasst sowohl Kooperationen mit Kunden und Lieferanten, aber auch solche mit Wettbewerbern im Rahmen von F&E-Allianzen sowie zunehmend mit externen Anspruchsgruppen (wie Umweltschutzorganisationen). Gerade letztere sind ein Motor zur Förderung nachhaltiger Prozess- und Produktinnovationen.^[106] Gleichzeitig ist in den besonders forschungsintensiven Segmenten ein Trend zu Unternehmenszusammenschlüssen bei gleichzeitiger Ausrichtung auf spezialisierte Produktfelder zu beobachten.^[103]

Es ist aufschlussreich, diese allgemeinen Innovationscharakteristika mit der Forschung zu unternehmerischen Umweltinnovationen zu verbinden. Dies gibt Auskunft darüber, wie Markt- und Unternehmensrahmenbedingungen auf das ökologische Innovationsverhalten von Unternehmen wirken (Tabelle 2).^[107]

Demnach führen die in der Chemiebranche zu beobachtenden und u.a. durch die F&E-Dynamik ausgelösten Branchenkonzentrationen (d.h. der relative Bedeutungszuwachs großer Unternehmen in der Branche)^[108] nicht zwangsläufig zu einem höheren umweltbezogenen Innovationserfolg. In großen Unternehmen ist der Umweltschutz zwar stärker formalisiert, aber dies korreliert nicht automatisch mit erfolgreichen ökologischen Prozess- und Produktinnovationen. Die in vielen chemischen Teilbranchen zu beobachtende hohe

Tabelle 2. Faktoren, die umweltbezogene Innovationen von Unternehmen bestimmen. Die Tabelle zeigt die wichtigsten Einflussgrößen aus der empirischen Studie von Lee.^[107]

Rahmenbedingungen	Einfluss auf ökologisches Innovationsverhalten
Unternehmensgröße	Höhere Formalisierung des Umweltschutzes in Großunternehmen, kein höherer Innovationserfolg
Branchenzugehörigkeit	Keine signifikanten Unterschiede bei Industrie- und Konsumgüterherstellern
Unternehmenswachstum	Positive Korrelation mit risikoreichen Innovationen, jedoch nicht mit Umweltorientierung
Wettbewerbsintensität	Preiswettbewerb beeinflusst Innovationsverhalten in Richtung Kosteneinsparung/ Effizienzerhöhung
Marktattraktivität (Marktgröße und -wachstum)	Attraktive Märkte fördern erfolgreiche Innovationen, nicht aber unbedingt Umweltorientierung

Wettbewerbsintensität fördert Kosten-einsparende Innovationen.^[109] Dies eröffnet Chancen für ökologische Prozessinnovationen, die mit Kosteneinsparungen im Produktionsprozess einhergehen (geringerer Energieverbrauch oder Abfallanfall, höhere Ausbeuten etc.). In stark wachsenden Märkten (z.B. Pharmazeutika, bestimmte Bereiche der Spezialitätenchemie) verbessern sich auch die Rahmenbedingungen für erfolgreiche Produktinnovationen, diese gehen jedoch nicht zwangsläufig in Richtung von Umweltinnovationen.

Aus der Erforschung von Chemieinnovationen sowie unternehmerischen Umweltinnovationen im Allgemeinen zeigt sich daher deutlich, dass das Entstehen von ökologischen Prozess- und Produktinnovationen nicht alleine durch externe Faktoren erklärt werden kann, sondern durch unternehmensspezifische Faktoren entscheidend beeinflusst wird,^[110] d.h. Faktoren wie die Unternehmenskultur, die Unternehmensorganisation^[111] sowie die konkret verfolgten F&E-Strategien. Dies deckt sich auch mit den wenigen vorliegenden spezifischen empirischen Studien zum ökologischen Innovationsverhalten in der chemischen Industrie.^[104, 112] So hat Kreikebaum in seinen Studien in der chemischen Industrie „langfristige Planungshorizonte, fähige und motivierte Mitarbeiter, interdisziplinäre F&E-Arbeitsgruppen,^[113] eine ungehinderte Kommunikation im Unternehmen, die Beteiligung von Externen an Neuentwicklungen und ein Ökologie-orientiertes F&E-Management“ als unternehmensinterne Einflussfaktoren für erfolgreiche ökologische Innovationen ermittelt.

Studien zur Korrelation von Aktien- und Umweltperformance in der chemischen Industrie unterstreichen die Bedeutung einer Nachhaltigkeitsorientierung für sowohl ökologisch als auch ökonomisch erfolgreiche Innovationen.^[114] Jüngere Arbeiten zeigen die aktive Bedeutung von „weichen“ Einflussfaktoren, von Kooperationen^[115] sowie einem mit geeigneten Kostenrechnungsinstrumenten begleiteten Supply-Chain-Management^[116] (aktive Gestaltung und laufende Mobilisierung von Versorgungsketten in der Wirtschaft) für erfolgreiche ökologische Innovationen auf.

Für Basisinnovationen ist die Auflösung zentraler Konzernstrukturen zugunsten von Kooperationsverbünden mit kleinen innovativen Unternehmen eine erfolgversprechende Strategie: So zeigen empirische Studien aus der Kunststoffindustrie, dass Basisinnovationen häufig von „Outsidern“ erbracht werden, d.h. Personen und Unternehmen, die außerhalb des eigentlichen Branchenfokus stehen. Großunternehmen sind dagegen eher dafür prädestiniert, schrittweise Innovationen effizient zu organisieren.^[117] Diese Erkenntnisse gilt es auch für umweltorientierte Prozess- und Produktinnovationen zu nutzen, z.B. durch die enge Kooperation mit innovativen Biotechnologie-Start-Up-Firmen im Bereich ökologisch orientierter Prozessverbesserungen,^[118] die Integration von unkonventionell arbeitenden und denkenden Forschern in Entwicklungsprozesse sowie ein offenes Kommunikationsklima.

„Weiche“ Einflussfaktoren für Innovationen lassen sich nicht unmittelbar steuern, es lassen sich lediglich organisatorische Bedingungen schaffen, unter denen sie sich besonders gut entwickeln. Eine wichtige Rolle spielen in diesem Zusammenhang Industrieleitbilder und -visionen (wie diese insbesondere von der amerikanischen chemischen Industrie

umgesetzt werden,^[13] sich aber auch im Responsible-Care-Programm^[11] finden) sowie firmenspezifische Visionen (wie die Zero-Waste-Philosophien vieler amerikanischer Unternehmen wie Monsanto oder DuPont). Solche Leitbilder haben im Management die Funktion, strategische Programme auf die gewünschten Ziele zu fokussieren. Ein illustratives Beispiel hierfür ist die „Verbund-Vision“ der BASF AG,^[19] die das Denken in Verbund-Synergien nicht nur auf der Ebene der Produktionsprozesse (Stoffrecycling, Wärmerückgewinnung, effiziente Entsorgung, Einsparung von Transporten u.a.), sondern auch im Verhältnis der BASF zu ihren Lieferanten, Kunden und Anspruchsgruppen unter einem gemeinsamen Leitbild fördert.

5.1. Kooperationen

Zunehmend sind auch Kooperationen ein Schlüsselfaktor für ökologische Innovationen in der chemischen Industrie. Dies gilt einmal für den eigentlichen Innovationsprozess, bei dem möglichst umfassend externes Wissen integriert werden muss (vgl. Abschnitt 5). Aber ebenso wichtig sind Kooperationen für die Durchsetzung von Innovationen in Wertschöpfungsketten: Es zeigt sich, dass viele technisch und betriebswirtschaftlich überzeugende Produktinnovationen, die in einzelnen Pionierunternehmen ökologisch und betriebswirtschaftlich erfolgreich eingeführt wurden, sich häufig nur sehr schwer in der gesamten Anwendungsbranche durchsetzen.^[120]

In den meisten Betrieben liegt eine geringe Innovationsfähigkeit und ein großes Beharrungsvermögen vor. Die Innovationsbereitschaft der Beteiligten wird in der Regel überschätzt. Die geringe Innovationsfähigkeit zeigt sich bei Schlüsselpersonen im Betrieb bis hin zu den Zulieferern und den Brancheninstituten, die die Betriebe beraten. Gerade bei wirtschaftlichen Schwierigkeiten werden Innovationen als zu riskant abgelehnt. Das selbe Bild zeigt sich bei hoher Auslastung der Produktionskapazitäten, da durch Prozessumstellungen eine Gefährdung des reibungslosen Produktionsablaufes gefürchtet wird.^[121] Der Zeitpunkt zur Änderung ist anscheinend immer falsch.

Der Anteil innovativer und beweglicher Betriebe als Träger von Umweltinnovationen ist in den einzelnen Branchen eher gering. Lissner^[122] schätzt den Anteil je nach Branche auf 1–20%. Für den Erfolg dieser Unternehmen ist dabei die Verbreitung neuer Chemikalien von zentraler Bedeutung, da sich die Erfolge bei Dauerhaftigkeit herumsprechen und damit auch andere Unternehmen zu Neuerungen anregen. Die Pionierbetriebe nehmen jedoch ein hohes Risiko auf sich, z.B. die Weigerung von Anlagen-/Maschinenherstellern zur Haftungsübernahme bei der Verwendung neuer, umweltfreundlicherer Hilfs-/Betriebsmittelvarianten. Die Bedeutung interorganisatorischer Zusammenarbeit im Kontext von nachhaltiger Entwicklung ergibt sich noch aus weiteren Gründen: Die meisten chemischen Produkte fließen in Produktionsketten ein, d.h., sie werden nicht isoliert verwendet, wie ein Kunststoff im Automobilbereich zur Reduktion des Gewichtes, z.B. bei der Entwicklung eines Drei-Liter-Autos. Der Ersatz des bisher eingesetzten Materials durch einen solchen Kunststoff ist nur in enger Kooperation von Hersteller und Anwender und gegebenenfalls Normierungsgremien

möglich, um zu gewährleisten, dass das Substitut nicht nur die unmittelbaren Anwendungseigenschaften erfüllt (z.B. Stoßfestigkeit, Dauerhaftigkeit), sondern auch alle weitergehenden rechtlichen Normen und Qualitätsanforderungen.

6. Politische Rahmenbedingungen für den Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung

In Folge der Rio-Deklaration^[1] und der Agenda 21^[7] sind die internationalen politischen Anstrengungen für eine nachhaltige Entwicklung der Chemie beträchtlich verstärkt worden. Die zentralen Forderungen der Agenda an die chemische Industrie und die politischen Institutionen richteten sich auf eine international abgestimmte Risikobewertung, eine Vereinheitlichungen der Kennzeichnungen, den Austausch von Informationen, die Implementierung von Risikominderungsprogrammen und die Schaffung günstiger Voraussetzungen für ein wirksames Gefahrstoffmanagement, vor allem auch in den Ländern der Dritten Welt. Durch die Einrichtung einer Reihe von internationalen Foren (Intergovernmental Forum on Chemical Safety, IFCS), Programmen (International Programme on Chemical Safety, IPCS), Konventionen (Prior Informed Consent, PIC) und diversen Folgekonferenzen wurde versucht, diesen Forderungen zu entsprechen, sodass heute eine breite internationale Diskussion zur Chemikaliensicherheit im Gange ist, die bei der Bewertung der Risiken und der notwendigen Regulierungen zu deutlichen Fortschritten geführt hat.^[10]

Parallel dazu hat das ursprünglich von Kanada (1984) und den USA initiierte Responsible-Care-Programm der chemischen Industrie^[11] inzwischen weltweit zu freiwilligen Verpflichtungen von Unternehmen geführt, die Maßnahmen für Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz, unabhängig von gesetzlichen Vorgaben, ständig zu verbessern. Durch Berichte auf Branchenebene wird dies inzwischen auch dokumentiert.^[123] Insbesondere in den USA hat sich daraus eine enge Verzahnung mit Regierungsprogrammen wie „Green Chemistry Challenge“ ergeben, die Maßstäbe aus dem Programm übernommen haben. In Deutschland hat das Forschungsministerium die Absicht erklärt, mit der Vergabe von Forschungsaufträgen zum Thema „Nachhaltige Chemie“ Zeichen zu setzen.^[124] Derzeit wird das Responsible-Care-Programm um die Einbeziehung sozialer und ökonomischer Elemente unternehmerischer Verantwortung weiterentwickelt und gewinnt damit den Charakter einer Selbstverpflichtung der Industrie zu nachhaltigem Handeln.^[14, 125a]

Soll die Chemie einen substantiellen Beitrag zu einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung leisten, muss sie über den bisher erreichten Stand der Chemikaliensicherheit und Risikominderung hinausgehen. Zum einen muss der mengenmäßige Einsatz von Chemikalien reduziert werden, um eine Schonung der Ressourcen und eine Verminderung des Energieeinsatzes zu erreichen, zum anderen ist die Suche nach risikoärmeren Stoffen voranzutreiben, um den vollständigen Verzicht auf den Gebrauch gefährlicher Substanzen außerhalb der chemischen Produktion anzustreben. Dies kann vor allem dadurch geschehen, dass schon bei der

Entwicklung von Basischemikalien und beim Produktdesign^[17] die nachhaltige Weiterverarbeitung gesichert ist. In diesem Sinne forderte bereits die Agenda 21 von den Regierungen, im Zusammenwirken mit den zuständigen internationalen Organisationen „eine verbindliche wie auch freiwillige Maßnahmen beinhaltende Politik um(zu)setzen, die auf die Bestimmung und weitgehende Reduzierung der von toxischen Chemikalien ausgehenden Belastung durch Ausweichen auf Ersatzstoffe und letztlich völligen Verzicht auf all jene Chemikalien ausgerichtet ist, von denen eine nicht zu vertretende und anderweitig nicht zu beherrschende Gefahr für Umwelt und Gesundheit ausgeht und deren Verwendung aufgrund ihrer Toxizität, ihrer Langlebigkeit und ihres Bioakkumulationsverhaltens nicht ausreichend kontrolliert werden kann“ (Agenda 21, Kap. 19.49c).^[7] Als wirksame Maßnahmen zur Durchsetzung dieser Ziele wurden die Förderung umweltverträglicher Produkte und Technologien vorgeschlagen, die Schaffung finanzieller Anreize, eine Verbesserung bei der Produktkennzeichnung sowie Beschränkungen oder Verbote.

Um die politischen Rahmenbedingungen für Innovationen zu verbessern sind auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene in den letzten Jahren eine Reihe von politischen Konzepten entwickelt worden, denen die Einsicht gemeinsam ist, dass die traditionellen staatsinterventionistischen Steuerungsformen („command and control“) durch kontextorientierte „Bottom-up“-Ansätze ergänzt werden müssen, bei denen prozedurale Regulierungen, ökonomische Anreize, Selbststeuerung und die Partizipation gesellschaftlicher Akteure eine wichtige Rolle spielen.

Das jüngste Weißbuch der Europäischen Kommission „Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik“, die Vorstufe für neue integrierte Chemikalien-Richtlinien, hat Elemente eines solchen Politikmusters aufgenommen. Als ein wesentliches Ziel, das aus dem Vorsorgeprinzip und dem EU-Grundsatz eines hohen Schutzniveaus für die menschliche Gesundheit und die Umwelt resultiert, wird hier „die Schaffung von Anreizen für die Substitution gefährlicher durch weniger gefährliche Stoffe, wo geeignete Alternativen vorhanden sind“ angesehen.^[126] Erfahrungen haben gezeigt, dass das derzeitige Notifizierungssystem Innovationen zur Entwicklung neuer und sicherer Stoffe behindert. Innovationsfördernd könnte sich stattdessen, neben einem verschärften Haftungsrecht, ein für Verbraucher und Öffentlichkeit besserer Informationszugang über Chemikalien auswirken, ebenso aber die Einbeziehung der nachgeschalteten Anwender in die Verantwortung für die Sicherheit der Produkte, ihre Entsorgung und Verwertung. Die veränderten Prüfverfahren, die nun auch alle „Altstoffe“ in einem aufwändigen Verfahren miteinbeziehen sollen, könnten die Nachfrage nach Ersatzchemikalien anregen. Die Kommission schlägt auch vor, „die aktuell für die Notifizierung und Prüfung neuer Stoffe geltenden Schwellenwerte heraufzusetzen, die Bedingungen für Abweichungen für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben auszuweiten und eine flexiblere Verwendung und Einreichung von Prüfdaten zuzulassen“.^[126] Auf einzelstaatlicher Ebene wie auf der Ebene der Europäischen Union sollten entsprechende Forschungsprioritäten gesetzt werden.^[127]

Die chemische Industrie in Europa hat sich zwar mit den grundlegenden Zielen des Weißbuchs einverstanden erklärt, kritisiert aber scharf die praktischen Maßnahmen, die vorgesehen seien, als überbürokratisch und letztlich kontraproduktiv: „Of particular concern is the introduction of an ‘Authorisation’ process that is based on the intrinsic properties of chemicals rather than on the real risks that they may pose. As a result, decisions may be taken that increase the number of chemicals that are restricted or banned arbitrarily.“^[128] Produktionsmenge und Art der Verwendung sollten stattdessen die Basis für die Risikobewertung bilden, nicht die spezifischen Stoffeigenschaften. Zwischen den beiden noch kontroversen Positionen sollte sich ein Ausgleich finden lassen, der eine Regulierung der Risiken gewährleistet ohne die Innovationsfähigkeit der Unternehmen zu untergraben, also genügend Anreize für den Ersatz gefährlicher Stoffe garantiert.

Ökonomische Anreize und die Schaffung von mehr Transparenz sind auch kennzeichnend für das im März 2001 von der Europäischen Kommission veröffentlichte *Grünbuch zur integrierten Produktpolitik*,^[129] das umweltfreundlichen Produkten die Märkte öffnen soll. Die integrierte Produktpolitik soll sich dabei auf die entscheidenden umweltwirksamen Phasen im Lebenszyklus eines Produkts konzentrieren: das Ökodesign, die Berücksichtigung des Verursacherprinzips bei der Festlegung der Produktpreise und die Befähigung der Verbraucher zu einer sachkundigen Entscheidung. Vorgeschlagen wird eine Mischung verschiedener Instrumente, die von der differenzierten Besteuerung über die Ausdehnung der Produzentenverantwortung durch EU-Rechtsvorschriften und die Privilegierung im öffentlichen Beschaffungswesen bis hin zur Verbesserung der Produktinformationen und der Entwicklung von Normen zum umweltgerechten Design reicht. Das *Grünbuch* soll vor allem auch eine öffentliche Debatte über die Produktpolitik anregen, um eine europäische Strategie für produktbezogene umweltpolitische Maßnahmen zu ermöglichen.

Die Diskussion um die Chemikalienregulierung in den USA ist ebenfalls davon geprägt, dass Stoffbeschränkungen durch staatliche Regulierung auf sehr hohe rechtliche Barrieren stoßen, weil strenge Maßstäbe an die Kosten-Nutzen-Abwägungen gestellt werden und der Risikobegriff enger ausgelegt wird. Das Politikmuster entwickelt sich auch hier in Richtung neuer innovationsorientierter Elemente, die Abstimmungs- und Verhandlungsprozessen mehr Raum geben und „weichere“ Instrumente bevorzugen, die auf Freiwilligkeit und Gegenseitigkeit beruhen. Dementsprechend werden bei der Zulassung von neuen Stoffen im Vergleich zu den eher starren Blocktestverfahren der Europäischen Union flexible, stärker risikoabhängige Testverfahren angewandt. Im Ergebnis hat das dazu geführt, dass die Unternehmen in den USA durchschnittlich 425 neue chemische Substanzen pro Jahr angemeldet haben im Vergleich zu durchschnittlich 143 pro Jahr in der EU.^[130] Die US-Umweltpolitik verfolgt insgesamt einen stärkeren Managementansatz und versucht Alternativen vor allem im Konsens mit der Industrie voranzutreiben.^[131] 1998 schloss die US-Regierung, der Environmental Defense Fund (EDF), mit der Chemical Manufacturers Association (CMA) ein Abkommen, das innerhalb von

sechs Jahren Toxizitäts-Tests für 2800 gängige Chemikalien mit hohem Produktionsvolumen (mehr als 500 t/a) vorsieht. Ein ambitioniertes Programm, von dem die CMA sagt, dass es nur mit internationaler Unterstützung von Chemie-Unternehmen im gesamten OECD-Bereich zu leisten sei.^[132]

6.1. Auf der Suche nach dem innovationsfördernden Politikmuster

Die neue, weltweit zu beobachtende Steuerungsphilosophie zielt also im Kern auf politische Verhandlungslösungen durch Konsensverfahren und die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen durch vermehrte Information. Für die Rationalität dieser Verfahren sprechen die Erfahrungen, die mit einem auf Verbote und Stoffbeschränkungen reduzierten Politikmuster in der Praxis gemacht wurden. Stoffbezogene Verbote für umwelt- oder gesundheitsschädliche Substanzen als Auslöser für Substitutionsprozesse sind äußerst selten und nur über lange Zeiträume hinweg mit großen politischen Anstrengungen durchzusetzen, wie das jüngste Beispiel, die Konvention über das Verbot der zwölf am schwersten abbaubaren organischen Schadstoffe (POPs, persistent organic pollutants) vom 23. Mai 2001 zeigt.^[133] Aber auch differenziertere Verbote, Verwendungsbeschränkungen oder Instruktions- und Qualifizierungsverpflichtungen treffen in der Praxis auf erheblichen Widerstand, der eher eine Umgehung der Verordnungen nahe legt, als die Suche nach Ersatzstoffen stimuliert.

Ein erfolgreiches Beispiel, wie das internationale FCKW-Regime vor dem Hintergrund der Montrealer Protokolle von 1987 mit seiner stufenweisen Verschärfung der Regulierungen, zeigt dagegen, wie „die Diffusion neuer Techniken mit einem Minimum an politischen Kosten erreicht wird, wenn den staatlichen Zielvorgaben eine zeitlich gestufte flexible Instrumentierung folgt, die den Anpassungzwang kalkulierbar erhöht, verbindliche Auflagen also erst als letztes Mittel vorsieht.“^[134] Wenn es um die Förderung nachhaltiger Innovationen geht, sind offenbar neue Formen politischer Regulierung gefordert. Tatsächlich bedarf es eines komplexen Politikmusters, bei dem staatliche und nichtstaatliche Akteure zusammenwirken müssen (wie dies übrigens schon in der Agenda 21, Kap. 23 gefordert wurde). Der gesamte Verlauf des Willensbildungsprozesses und nicht nur die gewählte Einzelmaßnahme sind dabei ebenso von Bedeutung, wie der Politikstil, mit dem dies geschieht, die Akteurskonfiguration und der politisch-institutionelle Handlungskontext.

Die international vergleichende Umweltinnovationsforschung hat in den letzten Jahren Determinanten herausgearbeitet, die Anreize für eine nachhaltige Entwicklung durch politisch gesetzte Rahmenbedingungen darstellen. Dazu zählen in erster Linie Faktoren wie die rasche Verbreitung von Umweltinformationen, die Ankündigung von Regelungen oder ihre Verschärfung in Verbindung mit flexibel abgestufter Instrumentierung („threat and control“) und ein kooperativer Politikstil.^[135] Ein innovationsförderndes Politikmuster muss danach mindestens drei Dimensionen abdecken:

- innovationsfreundliche Instrumente, die auf strategischer Umweltplanung und Zielbildung beruhen, müssen kombiniert werden, und vor allem müssen ökonomische Anreize gesetzt und die Innovation in allen Phasen ihres Umsetzungsprozesses unterstützt werden
- einen innovationsfreundlichen Politikstil, der dialogisch und konsensorientiert, kalkulierbar, anspruchsvoll, flexibel und managementorientiert ist
- eine Akteurskonstellation, die die Politikintegration und Vernetzung vieler beteiligter Akteure und Instanzen begünstigt, eine enge Vernetzung der regulierenden sowie der regulierten Gruppen zur Folge hat, wichtige Interessengruppen (Stakeholder) in den Dialog einbezieht und auch die Adressaten der Politik miteinander vernetzt.^[136]

Die internationale Debatte über eine nachhaltige Entwicklung der Chemie, die nach der Rio-Konferenz 1992 einsetzte, hat vor allem zweierlei bewirkt. Sie hat zum einen eine Reihe von institutionellen Vorkehrungen mit sich gebracht, die das Risiko im Umgang mit toxischen Chemikalien vermindert hat. Zum anderen ist die Suche nach einem Politikmuster vorangetrieben worden, das eine nachhaltige Entwicklung der Chemie im Zusammenwirken der zentralen (über-) staatlichen und nichtstaatlichen Akteure bewirken kann. Dabei sind politische Netzwerke entstanden, die sich über die Zielbildung und die Kombination geeigneter politischer Instrumente zu verständigen versuchen und auch erste Erfolge erzielt haben. Die Substitution nicht nachhaltiger Stoffe und Prozesse wird danach erleichtert, wenn „die ökologische Motivation und die Informationslage potentieller Innovatoren verbessert und vor allem ihr Investitionsrisiko durch kalkulierbare Vorgaben verringert“ wird.^[137]

Ansätze solcher Kooperationsbeziehungen gibt es in einigen Ländern bereits seit längerem. In Deutschland hat beispielsweise der sogenannte „Chemiedialog“, an dem sich die chemische Industrie, die Chemiegewerkschaft, Umweltverbände und staatliche Repräsentanten beteiligten, zu einem kooperativen Politikstil beigetragen, der ungeachtet weiter bestehender Interessensgegensätze, einem innovationsfördernden politischen Klima den Weg bereitet hat.^[138] Ein Politikmuster, das den Innovationsprozess am effizientesten begleiten und unterstützen könnte, umfasst mithin sowohl regulierende Maßnahmen und Anreize von staatlicher Seite als auch Selbstregulierungsanstrengungen der chemischen Industrie und einen gemeinsamen Dialog mit der Öffentlichkeit über die anzustrebenden Ziele.

In die Verantwortung des Staates fallen dabei strategische Umweltplanungen in Form nationaler Umweltpläne mit quantitativen Zielvorgaben, einer institutionalisierten Erfolgskontrolle und differenzierter Zielgruppenpolitik, wie sie z. B. in Schweden, Dänemark, den Niederlanden oder Südkorea mit beachtlichem Erfolg implementiert wurden. Auch eine Öffnung des öffentlichen Beschaffungswesens für umweltgerechte Produkte wäre nach europäischem Vergaberecht möglich.^[129b] Für die Vergabe von Mitteln zur Forschungsförderung in sensiblen Bereichen der Entwicklung von Produkten und Verfahren sollten Kriterien entwickelt werden, die es ermöglichen abzuschätzen, ob die Forschungsprojekte einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten.

Darüber hinaus gewinnen Maßnahmen zur Verbesserung der Informationslage und der Produkttransparenz eine immer größere Bedeutung, also Kennzeichnungspflichten, die Lebenszyklus-Bewertungen einschließen (nach ISO 14021 ff.), die Vergabe von Umweltkennzeichen und staatliche Warnhinweise, die dem Verbraucher praktikable Orientierungen vermitteln. Das *Grünbuch* der EU zur integrierten Produktpolitik schlägt vor, im Rahmen des „neuen Ansatzes“ bereits frühzeitig auf das Produktdesign^[17] einzuwirken, indem die Hersteller „harmonisierte Normen“, wie sie von Normungsinstanzen im Auftrag der Europäischen Kommission unter Berücksichtigung umweltrelevanter Merkmale und unter Beteiligung der Bürgergesellschaft erarbeitet werden, anwenden. Die Hersteller wären frei in der Art, wie sie die Einhaltung der grundlegenden Anforderungen nachweisen und hätten den Vorteil, dass die Produkte dann frei im Binnenmarkt verkehren könnten, weil sie den einschlägigen Rechtsvorschriften entsprächen.^[129e]

Maßnahmen der Selbstregulierung der chemischen Industrie sind in Ansätzen bereits erprobt. Es existieren freiwillige Branchenabkommen, etwa zur Reduzierung von gesundheitsschädlichen Emissionen, die Impulse zur kontinuierlichen Verbesserung einzelner Technologien gesetzt haben. In Dänemark hat man mit sogenannten „Produkt Panels“, in denen Hersteller einer Produktgruppe sich auf die Verringerung des Einsatzes gefährlicher Stoffe verständigt haben, erste positive Erfahrungen gemacht.^[129d] Selbstverpflichtungen zur Reduzierung von umweltschädlichen Einträgen in begrenzten Zeiträumen sind seit längerem bekannt, verlangen allerdings nach staatlicher Kontrolle und erforderlichenfalls Sanktionspotentiale. Umweltmanagementsysteme, die Umweltbetriebsprüfungen einschließen (nach EMAS II oder ISO 14001), zielen zwar vornehmlich nicht auf die Produkte, sondern auf die Einrichtung von kontrollierten Betriebsabläufen und ihrer stetigen Verbesserung unter Umweltschutzaspekten, haben aber eine wichtige Funktion bei der Sammlung von Informationen über die Umweltauswirkungen der jeweiligen Produktion. Ein derartiges Politikmuster, das die staatliche Eingriffsintensität erst allmählich steigert, hätte den Vorteil, der Industrie die Chance einzuräumen, ausreichende Selbstregulierungskräfte freizusetzen, sich in einem längeren Zeitraum auf die Umstellung vorzubereiten und sie zu ökonomisch vertretbaren Bedingungen zu realisieren.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir untersucht, welche Aufgaben die Chemie in der Grundlagen- und in der angewandten Forschung bei der Entwicklung von nachhaltigen Konzepten hat. Die Konzepte zu einer nachhaltigen Entwicklung sollten auf den Grundsätzen der Rio-Deklaration von 1992 und der Agenda 21 basieren. Beispielhaft werden einige chemische Prozesse sowie Produkte insbesondere der organischen Chemie diskutiert. Es wird die herausragende Bedeutung der Katalyse – heterogen, homogen, enzymatisch – am Beispiel von Direktoxidationen mit Sauerstoff sowie der Perspektive der chemischen Industrie, nachwachsende Rohstoffe zu nutzen, aufgezeigt. Die Bedeutung der Optimierung

von Trennoperationen zur Einsparung von Prozessenergie wird am Beispiel der Reaktivrektifikation verdeutlicht. Die Herausforderung, die vielfältigen und unterschiedlichen Produkteigenschaften der Massenprodukte der chemischen Industrie mit möglichst wenigen chemischen Grundstoffen zu realisieren, zeigt das Beispiel der Polyolefine. Die neuen Metallocenkatalysatoren eröffneten die Möglichkeit, die vielfältigen Strukturen der Polymere maßzuschneidern und damit die Materialeigenschaften breit zu variieren. Zudem ist beim Einsatz weniger Grundstoffe eine effektive Rückgewinnung in großem Maßstab möglich und auch ökonomisch. Die zahlreichen Fein- und Spezialchemikalien müssen den gewünschten Effekt mit deutlich geringeren Substanzmengen erreichen und eine Bioakkumulation muss durch Molekül- design bereits von der Planung der Synthese her ausgeschlossen werden. Schließlich müssen die Produkte der chemischen Industrie auch umweltverträglich, z. B. ohne VOC-Emissionen weiterverarbeitet werden können.

Chemische Prozess- und Produktinnovationen bringen nicht selbstverständlich einen positiven Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung. Dafür ist es notwendig, Prozess- und Produktinnovationen in ihren betriebswirtschaftlich-ökonomischen Wirkungen, ihren politisch-sozialen Steuerungsmöglichkeiten und ihren ökologischen Effekten zu verstehen. Eine vergleichende Bewertung ist notwendig. Wie bedeutsam eine solche integrierte Sicht ist, zeigt die aktuelle Diskussion des *Grünbuchs* der EU-Kommission zur integrierten Produktpolitik. Das Thema einer chemischen „Produktverantwortung“ kann nur behandelt werden, wenn sowohl die chemischen Eigenschaften von Produkten als auch ihre Verwendungsmuster und die Möglichkeiten zur politischen Steuerung für einzelne Produktklassen zusammenhängend analysiert werden.

Vor der Rio + 10-Konferenz 2002 in Johannesburg ist eine kritische Bestandsaufnahme der Umsetzung der Agenda 21 notwendig. Von den dringlichsten Fragen von heute, die in der Agenda 21 angesprochen werden, hat die Chemie – Wissenschaft und Industrie – einige in Angriff genommen, aber noch keine befriedigend und abschließend beantwortet. Es ist dringend geboten, diese Fragen umfassend aufzugreifen und diejenigen Teilespekte, die die Chemie beantworten kann, wissenschaftlich in interdisziplinärer Kooperation aufzugreifen. Das 5-Ebenen-Modell kann dafür ein Beispiel sein. Ein solches Konzept sollte auch in der Lehre aufgegriffen und Teil der Ausbildung in Schule und Hochschule werden.

8. Ausgewählte Grundsätze der Erklärung von Rio zu Umwelt und Entwicklung vom 3. bis 14. Juni 1992 (Rio-Deklaration)

Grundsatz 1: Die Menschen stehen im Mittelpunkt der Bemühungen um eine nachhaltige Entwicklung. Sie haben das Recht auf ein gesundes und produktives Leben im Einklang mit der Natur.

Grundsatz 2: Die Staaten haben im Einklang mit der Charta der Vereinten Nationen und den Grundsätzen des Völkerrechts das souveräne Recht, ihre eigenen Ressourcen im Rahmen ihrer eigenen Umwelt- und Entwicklungspolitik zu nutzen und haben die Verantwortung, dafür Sorge zu

tragen, dass Tätigkeiten unter ihrer Hoheitsgewalt oder Kontrolle der Umwelt anderer Staaten oder Gebieten außerhalb nationaler Hoheitsgewalt keinen Schaden zufügen.

Grundsatz 3: Das Recht auf Entwicklung muss so erfüllt werden, dass den Entwicklungs- und Umweltbedürfnissen heutiger und künftiger Generationen in gerechter Weise entsprochen wird.

Grundsatz 4: Eine nachhaltige Entwicklung erfordert, dass der Umweltschutz Bestandteil des Entwicklungsprozesses ist und nicht von diesem getrennt betrachtet werden darf.

Grundsatz 5: Die Beseitigung der Armut als unabdingbare Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung ist eine Aufgabe von grundlegender Bedeutung, die der Zusammenarbeit aller Staaten und aller Völker bedarf, um die Ungleichheit der Lebensstandards zu verringern und den Bedürfnissen der Mehrheit aller Menschen besser gerecht zu werden.

Grundsatz 6: Vorrang gebürt in erster Linie der besonderen Situation und den besonderen Bedürfnissen der Entwicklungsländer, vor allem der am wenigsten entwickelten Länder und der Länder, deren Umwelt am verletzlichsten ist. Internationale Maßnahmen im Bereich Umwelt und Entwicklung sollen auch auf die Interessen aller Länder gerichtet sein.

Grundsatz 7: Die Staaten arbeiten im Geist einer weltweiten Partnerschaft zusammen, um die Gesundheit und die Unversehrtheit des Ökosystems der Erde zu erhalten, zu schützen und wiederherzustellen. Angesichts der unterschiedlichen Beiträge zur Verschlechterung der globalen Umweltsituation, tragen die Staaten gemeinsame, jedoch unterschiedliche Verantwortlichkeiten. Die entwickelten Staaten erkennen ihre Verantwortung an, die sie beim weltweiten Streben nach nachhaltiger Entwicklung im Hinblick auf den Druck, den ihre Gesellschaften auf die globale Umwelt ausüben, sowie im Hinblick auf die ihnen zur Verfügung stehenden Technologien und Finanzmittel tragen.

Grundsatz 8: Um eine nachhaltige Entwicklung und eine bessere Lebensqualität für alle Menschen zu erlangen, sollen die Staaten nicht nachhaltige Produktions- und Verbrauchsstrukturen abbauen und beseitigen und eine geeignete Bevölkerungspolitik fördern.

Grundsatz 9: Die Staaten sollen zusammenarbeiten, um den Ausbau der im Land selbst vorhandenen Kapazitäten für eine nachhaltige Entwicklung zu stärken, indem das wissen-

schaftliche Verständnis durch den Austausch wissenschaftlicher und technologischer Kenntnisse verbessert und die Entwicklung, Anpassung, Verbreitung und Weitergabe von Technologien, einschließlich neuer und innovativer Technologien, gefördert werden.

Grundsatz 11: Die Staaten verabschieden wirksame Umweltgesetze. Umweltnormen, Bewirtschaftungsziele und -prioritäten sollen die umwelt- und entwicklungspolitischen Zusammenhänge widerspiegeln, auf die sie sich beziehen. Normen, die in einigen Ländern Anwendung finden, können in anderen Ländern, insbesondere in Entwicklungsländern, unangemessen sein und zu nicht vertretbaren wirtschaftlichen und sozialen Kosten führen.

Grundsatz 14: Die Staaten sollen tatkräftig zusammenarbeiten, um die Verlagerung und den Transfer in andere Länder von Tätigkeiten und Stoffen, die zu einer starken Umweltverschlechterung führen oder sich für die Gesundheit des Menschen als schädlich erweisen, zu erschweren oder zu verhindern.

Grundsatz 15: Zum Schutz der Umwelt wenden die Staaten im Rahmen ihrer Möglichkeiten weitgehend den Vorsorgegrundsatz an. Drohen schwerwiegende oder bleibende Schäden, so darf ein Mangel an vollständiger wissenschaftlicher Gewissheit kein Grund dafür sein, kostenwirksame Maßnahmen zur Vermeidung von Umweltverschlechterungen aufzuschieben.

Grundsatz 16: Die nationalen Behörden sollen sich bemühen, die Internalisierung von Umweltkosten und den Einsatz wirtschaftlicher Instrumente zu fördern, wobei unter gebührender Berücksichtigung des öffentlichen Interesses und ohne Störung des Welthandels und internationaler Investitionen dem Ansatz Rechnung getragen wird, dass grundsätzlich der Verursacher die Kosten der Verschmutzung trägt.

Grundsatz 17: Als nationales Instrument werden bei Vorhaben, die wahrscheinlich wesentliche nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt haben und der Entscheidung durch eine zuständige nationale Behörde bedürfen, Umweltverträglichkeitsprüfungen durchgeführt.

M. Eissen dankt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung im Rahmen des Stipendienprogramms.

Eingegangen am 9. Juli 2001 [A 484]

Glossar

Basischemikalien: Produkte der chemischen Industrie, die weltweit in einem Maßstab von mehr als 1 Mio. t/a produziert werden.

Chemische Biotechnologie: Anwendung der Biotechnologie zur Produktion von Chemikalien.

Innovationssystem: Der Begriff Innovationssystem beschreibt die unternehmensexternen (wie staatliche Rah-

menbedingungen, Marktbedingungen, Kundenverhalten) und unternehmensinternen Einflussfaktoren, die auf das Innovationsverhalten von Unternehmen wirken.

Integrierte Produktpolitik: Mit dem Konzept der integrierten Produktpolitik wird das Ziel verfolgt, die Umweltauswirkungen von Produkten während ihres gesamten Lebenszyklus vom Abbau der Rohstoffe bis zur Abfallentsorgung zu verringern.

Integrierter Umweltschutz: Bezeichnung für Umweltschutz-Maßnahmen, die durch Wahl der Einsatzstoffe, der Verfahren und Technologien umweltschädliche Einflüsse vermeiden (produktionsintegrierter Umweltschutz) und Bezeichnung für Produkte, bei deren Entwicklung bereits auf niedrigste Umweltbelastungen entlang des Lebensweges hingewirkt wird (produktintegrierter Umweltschutz).

Kennzahl: Kennzahlen wie Massenindex, Umweltfaktor und Umweltindizes sind Verhältniszahlen, die als Maßstab für die Beurteilung einzelner Sachverhalte wie chemische Synthesen verwendet werden können.

Kumulierter Energieaufwand (KEA): Der KEA gibt die Gesamtheit des Aufwands an **Primärenergie** an, der mit der Herstellung eines chemischen Produkts entsteht. Der KEA setzt sich zusammen aus dem energetischen Verbrauch, bei chemischen Prozessen im Wesentlichen die Prozessenergie, und dem nichtenergetischen Verbrauch, der direkten, stofflichen Verwendung fossiler Energieträger wie Erdöl.

Nachhaltige Entwicklung (engl. sustainable development): Begriff, der für ein Konzept steht in dem Umwelt- mit gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungsfragen verbunden wird. Die nachhaltige Entwicklung zielt auf die Sicherung der Naturressourcen als Lebensgrundlage für künftige Generationen bei Erhaltung einer möglichst hohen Lebensqualität des Menschen und der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit. Das Konzept wurde u. a. durch den Brundtland-Bericht formuliert und auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro in 27 Grundsätzen als verbindliche politische Zielbestimmung für die internationale Völkergemeinschaft beschlossen und im Arbeitsprogramm der Agenda 21 konkretisiert.

Nachsorgender Umweltschutz: Bezeichnung für Umweltschutzmaßnahmen, die nach der Entstehung von Emissionen im weitesten Sinne (Ab-

luft, Abwasser, Abfälle, Lärm etc.) ansetzen.

Ökobilanzen (LCA, engl. life cycle assessment): Ökobilanzen analysieren den gesamten Lebensweg (Produktlinie) eines Produktes (Entnahme und Aufbereitung von Rohstoffen, Herstellung, Distribution und Transport, Gebrauch, Verbrauch und Entsorgung), sowie die potentiellen ökologischen Wirkungen und bewerten die längs des Lebensweges auftretenden Stoff- und Energieumsätze und die daraus resultierenden Umweltbelastungen.

Ökonomisch-ökologische Effizienz: Verhältnis von ökologischer Verbesserung zu einer ökonomischen Inputvariable (z. B. Kosten, Gewinn-/Deckungsbeitragsreduzierung).

Politikmuster: Politikmuster bezeichnet im Unterschied zur Reduktion auf die Instrumentenfrage die Gesamtheit der politischen Willensbildungssprozess konstituierenden Faktoren: den politisch-institutionellen Handlungskontext, den Politikstil, die verwendeten Instrumente und das Verhältnis zwischen Staat und Zielgruppen.

Primärenergie: Dieser Begriff bezieht sich auf Energieträger z. B. Erdöl, Steinkohle, Erdgas und Uran in ihrem Zustand bei der Förderung, d. h. ohne nachgeschalteten Umwandlungsschritt.

Produkt Panels: Produkt Panels sind Gruppen von Unternehmen, die gemeinsam ermitteln, wie sich Umweltziele bei ihrer speziellen Produktgruppe erreichen und Hindernisse überwinden lassen.

Ressourcen: Im engeren Sinn werden unter Ressourcen das natürliche Kapital, Rohstoffe, Energieträger und Umweltmedien verstanden, wobei zwischen (bedingt) erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen unterschieden werden kann.

Verantwortliches Handeln (engl. Responsible Care): Bindende Verpflichtung der chemischen Industrie zur Selbstverantwortung in den Bereichen Gesundheit, Sicherheit und Umwelt. Die Selbstverpflichtungen sind in Grundsatzrichtlinien festgelegt und werden durch die nationalen Chemieverbände umgesetzt.

Verbund: Zusammenspiel von Produktionsprozessen und Produktionsstätten sowie die enge Zusammenarbeit des Unternehmens mit Kunden, Lieferanten und Anspruchsgruppen zur Erzielung von ökonomischen und ökologischen Vorteilen.

Vorsorgender Umweltschutz: Vorsorgender Umweltschutz ist die Gesamtheit aller Maßnahmen, die unmittelbar oder mittelbar dazu dienen, Umweltschäden oder -belastungen gar nicht erst entstehen zu lassen (z. B. produkt-, produktionsintegrierter Umweltschutz, Technikfolgenabschätzung).

VOCs (engl. volatile organic chemicals): Flüchtige organische Verbindungen, die eine Vielzahl von Stoffen umfassen, und bei intensiver Sonneninstrahlung zur Bildung des troposphärischen Ozons und damit des Sommersmogs beitragen.

- [1] *Report of the United Nations Conference on Environment and Development*, Rio de Janeiro, **1992**; <http://www.un.org/esa/sustdev>; deutsche Fassung: *Umweltpolitik, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro*, Hrsg.: der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, o.J.
- [2] *Beyond Six Billion: Forecasting the World's Population* (Hrsg.: J. Bongaarts, R. A. Bulatao), Panel on Population Projections, Committee on Population, National Research Council, Washington, DC, **2000**; <http://www.nationalacademies.org>.
- [3] G. Brundtland, *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford, **1987**.
- [4] E. U. von Weizäcker, A. B. Lovins, L. Hunter Lovins, *Faktor vier: Doppelter Wohlstand- halbierter Verbrauch; Der neue Bericht an den Club of Rome*, Droemer Knaur, München, **1995**.
- [5] F. Schmidt-Bleek, *Das MIPS-Konzept, Weniger Naturverbrauch- mehr Lebensqualität durch Faktor 10*, Droemer Knaur, München, **1998**.
- [6] J. Schindler, W. Zittel, *Öffentliche Anhörung von Sachverständigen durch die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“*, Oktober **2000**.
- [7] Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro – Dokumente – Agenda 21 (Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), Bonn, o.J.; s.a.: <http://www.un.org/esa/sustdev>; Vorbereitungspapier der Rio + 10-Konferenz unter http://www.johannesburgsummit.org/web_pages/prepcom1docslist.htm.
- [8] *Die Industriegesellschaft gestalten, Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen* (Hrsg.: Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen

- Bundestages), *Economica*, Bonn, **1994**; a) S. 400–425; b) S. 414–416; c) S. 335–366.
- [9] *Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung* (Hrsg.: Deutscher Bundestag), Bonn, **1998**; a) S. 33; b) S. 360.
- [10] B. U. Hildebrandt, U. Schlottmann, *Angew. Chem.* **1998**, *110*, 1382–1393; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1998**, *37*, 1316–1326.
- [11] *Responsible Care: A Public Commitment* (Hrsg.: Chemical Manufacturers Association), Washington, DC, **1998**; <http://www.cmahq.com>.
- [12] *Chemistry - Europe and the future*, <http://www.cefic.be/allcheme>.
- [13] a) *Technology Vision 2020, The U.S. Chemical Industry*, **1996**, <http://www.ccrhq.org/vision>; b) M. Reisch, *Chem. Eng. News* **2001**, *79*(9), 10.
- [14] M. S. Reisch, *Chem. Eng. News* **2001**, *79*(36), 17–22.
- [15] *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry* (Hrsg.: C. Christ), Wiley-VCH, Weinheim, **1999**.
- [16] a) „Chemie und Umwelt- Ursache oder Lösung der Probleme“: H. Hulpe, H. Wendt, H. Henkel in *Chemie: Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor?* (Hrsg.: U.-H. Felcht), Verlag der Universitätsbuchhandlung Blazek und Bergmann seit 1891, Frankfurt, **2000**, S. 213–253; b) H. Hugl, C. Gürterl, *Chemosphere* **2001**, *43*, 17–20; c) s. Lit. [16a], S. 224–226; d) s. Lit. [16a], S. 231–233.
- [17] a) K. Hungerbühler, J. Ranke, T. Mettier, *Chemische Produkte und Prozesse, Grundkonzepte zum umweltorientierten Design*, Springer, Berlin, **1998**; b) M. Frei, *Öko-effektive Produktgestaltung*, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, **1999**.
- [18] P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, **1998**, S. 11.
- [19] a) *Konzepte zum Beitrag der Chemie zu einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung, Symposium: 21* (Hrsg.: M. Eissen, J. O. Metzger), BIS, Oldenburg, **2000**; Download: <http://www.chemie.uni-oldenburg.de/oc/metzger/>; b) H. Hugl, s. Lit. [19a], S. 34.
- [20] *Energy and Environmental Profile of the U.S. Chemical Industry* (Hrsg.: L. Sousa, Office of Industrial Technologies, US Department of Energy), Washington, DC, **2000**; s. a. J. Johnson, *Chem. Eng. News* **2000**, *78*(30), 31–33.
- [21] a) *Chemistry for the Energy Future* (Hrsg.: V. N. Parmon, H. Tributsch, A. V. Bridgwater, D. O. Hall), Blackwell Science, Oxford, **1999**; b) G. Kreysa in *Chemie: Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor?* (Hrsg.: U.-H. Felcht), Verlag der Universitätsbuchhandlung Blazek und Bergmann seit 1891, Frankfurt, **2000**, S. 153–176.
- [22] M. Patel, *Closing carbon cycles*, Proefschrift Universiteit Utrecht, **1999**; <http://www.library.uu.nl/digiarchief/dip/diss/1894529/inhoud.htm>.
- [23] a) M. Patel, E. Jochem, F. Marscheider-Weidemann, P. Radgen, N. von Thienen, *C-Ströme: Abschätzung der Material-, Energie- und CO₂-Ströme für Modellsysteme im Zusammenhang mit dem nicht-energetischen Verbrauch, orientiert am Lebensweg – Stand und Szenarienbetrachtung, Bd. I*, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, **1999**; b) s. Lit. [23a], S. VIII–IX; c) s. Lit. [23a], S. 109–113; d) s. Lit. [23a], S. A4–9; e) s. Lit. [23a], S. A8–21; f) s. Lit. [23a], S. 123–143.
- [24] *Selbstverpflichtungserklärung der Deutschen Wirtschaft vom 9.11.2000*, <http://www.bmu.de/sachthemen/energie/selbstverpflichtung.php>.
- [25] *Peroxide Chemistry: Mechanistic and Preparative Aspects of Oxygen Transfer* (Hrsg.: W. Adam), Wiley-VCH und DFG, Weinheim, **2000**.
- [26] H. Arakawa, M. Aresta, J. N. Armor, M. A. Bartreau, E. J. Beckman, A. T. Bell, J. E. Bercaw, C. Creutz, E. Dinjus, D. A. Dixon, K. Domen, D. L. DuBois, J. Eckert, E. Fujita, D. H. Gibson, W. A. Goddard, D. W. Goodman, J. Keller, G. J. Kubas, H. H. Kung, J. E. Lyons, L. E. Manzer, T. J. Marks, K. Morokuma, K. M. Nicholas, R. Periana, L. Que, J. Rostrup-Nielsen, W. M. H. Sachtler, L. D. Schmidt, A. Sen, G. A. Somorjai, P. C. Stair, B. R. Stults, W. Tumas, *Chem. Rev.* **2001**, *101*, 953–996.
- [27] D. Kahlich, K. Wiechern, J. Lindner in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 5. Aufl., Vol. A22 (Hrsg.: B. Elvers, S. Hawkins, W. Russey, G. Schulz), VCH, Weinheim, **1993**, S. 239–260.
- [28] M. G. Clerici, P. Ingallina, in *Green Chemistry, Designing Chemistry for the Environment* (Hrsg.: P. T. Anastas, T. C. Williamson), American Chemical Society, Washington, DC, **1996**, S. 59–68.
- [29] M. McCoy, *Chem. Eng. News* **2001**, *79*(43), 19–20.
- [30] *Nachr. Chem.* **2001**, *49*, 259.
- [31] M. Haruta, *Catal. Today* **1997**, *36*, 153–166.
- [32] U. Müller, P. Lingelbach, P. Bassler, W. Harder, E. Karsten, V. Kohl, Dembowski; N. Rieber, M. Fischer (BASF), DE 44 25 672 A1, **1996**.
- [33] R. Meiers, U. Dingerdissen, W. Hölderich, *J. Catal.* **1998**, *176*, 376–386.
- [34] G. Petrini, G. Leofanti, M. A. Mantegazza, F. Pignataro, Caprolactam via Ammonium in *Green Chemistry, Designing Chemistry for the Environment* (Hrsg.: P. T. Anastas, T. C. Williamson), American Chemical Society, Washington, DC, **1996**, S. 33–48.
- [35] M. T. Musser, *Adipic Acid* in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 5. Aufl., Vol. A1 (Hrsg.: B. Elvers, S. Hawkins, W. Russey, G. Schulz), VCH, Weinheim, **1993**, S. 271.
- [36] W. F. Hoelderich, G. Dahlhoff, *Chem. Innovation* **2001**, 29–40; M. Mc Coy, *Chem. Eng. News* **2000**, *78*(40), 32–34.
- [37] R. Raja, G. Sankar, J. M. Thomas, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 2403–2406; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 2313–2316.
- [38] M. Dugal, G. Sankar, R. Raja, J. M. Thomas, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 2399–2402; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 2310–2313.
- [39] K. Sato, M. Aoki, R. Noyori, *Science* **1998**, *281*, 1646–1647.
- [40] J. M. Thomas, R. Raja, G. Sankar, B. F. G. Johnson, D. W. Lewis, *Chem. Eur. J.* **2001**, *7*, 2973–2978.
- [41] W. A. Herrmann in *Chemie: Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor?* (Hrsg.: U.-H. Felcht), Verlag der Universitätsbuchhandlung Blazek und Bergmann seit 1891, Frankfurt, **2000**, S. 97–122.
- [42] C. Adlhart, C. Hinderling, H. Baumann, P. Chen, *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122*, 8204–8214; D. Feichtinger, D. A. Plattner, P. Chen, *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 7125–7126; C. Hinderling, D. Feichtinger, D. A. Plattner, P. Chen, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 10793–10804; C. Hinderling, P. Chen, *Angew. Chem.* **1999**, *111*, 2393–2396; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, *38*, 2253–2256.
- [43] W. Umbach in *Perspektiven nachwachsender Rohstoffe in der Chemie* (Hrsg.: H. Eierdanz), VCH, Weinheim, **1996**, S. IXXX–XL.
- [44] *Bio-based Industrial Products; Priorities for Research and Commercialisation* (Hrsg.: National Research Council) Washington, DC, **2000**; s. a. A. Thayer, *Chem. Eng. News* **2000**, *78*(22), 40.
- [45] *Nachwachsende Rohstoffe, Perspektiven für die Chemie* (Hrsg.: M. Eggersdorfer, S. Warwel, G. Wulff), VCH, Weinheim, **1993**.
- [46] *Perspektiven nachwachsender Rohstoffe in der Chemie* (Hrsg.: H. Eierdanz), VCH, Weinheim, **1996**.
- [47] a) H. Koch, R. Beck, H. Röper, *Starch/Stärke* **1993**, *45*, 2–7; b) H. Koch, H. Röper, *Starch/Stärke* **1988**, *40*, 121–131.
- [48] W. von Rybinski, K. Hill, *Angew. Chem.* **1998**, *100*, 1394–1412; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1998**, *37*, 1328–1345.
- [49] U. Biermann, W. Friedt, S. Lang, W. Lühs, G. Machmüller, J. O. Metzger, M. Rüsch gen. Klaas, H. J. Schäfer, M. P. Schneider, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 2292–2310; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 2206–2224.
- [50] W. A. Herrmann, W. Wagner, U. N. Flessner, U. Volkhardt, H. Komter, *Angew. Chem.* **1991**, *103*, 1704–1706; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1991**, *30*, 1641–1643.
- [51] S. Warwel, P. Bavaj, M. Rüsch gen. Klaas, B. Wolff in *Perspektiven nachwachsender Rohstoffe in der Chemie* (Hrsg.: H. Eierdanz), VCH, Weinheim, **1996**, S. 119–135.
- [52] W. A. Herrmann, D. Marz, J. G. Kuchler, G. Weichselbaumer, R. W. Fischer, DE-A 3902357 A1, **1989** [*Chem. Abstr.* **1991**, *114*, 143714].
- [53] S. Warwel, M. Rüsch gen. Klaas, M. Sojka, *Chem. Commun.* **1991**, 1578–1579.
- [54] A. Westfechtel, R. Grützmacher, A. Heidbreder, R. Höfer, C. W. Blewett, *Fett/Lipid* **1999**, *101*.
- [55] K. M. Draths, J. W. Frost in *Green Chemistry, Frontiers in Benign Chemical Syntheses and Processes* (Hrsg.: P. T. Anastas, T. C. Williamson), Oxford University Press, Oxford, **1998**, S. 150–177.
- [56] W. H. Scouten, G. Petersen, *New Biocatalysts, Essential Tools for a Sustainable 21st Century Chemical Industry*, CCR Vision 2020 Bioprocessing/Biotechnology Work group, **1999**, <http://www.ccrhq/vision.org/index.html>.
- [57] *Biotechnology for Clean Industrial Products and Processes: Towards Industrial Sustainability*, OECD, Paris, **1998**; a) S. 91–122.

- [58] A. Schmid, J. S. Dordick, B. Hauer, A. Kiener, M. Wubbolts, B. Witholt, *Nature* **2001**, *409*, 258–268.
- [59] Renewable Fuels Association, Press Release, June 15, **2001**; <http://www.ethanolrfa.org/pr010615.html>.
- [60] a) L. L. Kitman, *The Nation* **2000**, March 20, <http://www.thenation.com>; b) B. Hileman, *Chem. Eng. News*, **2000**, *78*(16), 29.
- [61] *Separations Roadmap Summary*, http://www.oit.doe.gov/chemicals/separations_roadmap.shtml.
- [62] G. E. Keller II, P. F. Bryan, *Chem. Eng. Prog.* **2000**, *96*, 41–50.
- [63] T. Pöpken, S. Steinigeweg, J. Gmehling, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2001**, *40*, 1566–1574.
- [64] H.-J. Warnecke in *Chemie: Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor?* (Hrsg.: U.-H. Felcht), Verlag der Universitätsbuchhandlung Blazek und Bergmann seit 1891, Frankfurt, **2000**, S. 123–151.
- [65] W. Kaminsky, *Chemosphere* **2001**, *43*, 33–38.
- [66] *Metallocene-based polyolefins-preparation, properties and technology* (Hrsg.: J. Scheirs, W. Kaminsky), Wiley, Chichester, **2000**.
- [67] G. Erker, *Acc. Chem. Res.* **2001**, *34*, 309–318.
- [68] G. W. Coates, R. M. Waymouth, *Science* **1995**, *267*, 217–219.
- [69] H. H. Brintzinger, D. Fischer, R. Mühlhaupt, B. Rieger, R. M. Waymouth, *Angew. Chem.* **1995**, *107*, 1255–1283; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1995**, *34*, 1143–1170 Erratum: *Angew. Chem.* **1995**, *107*, 1368; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1995**, *34*, 1652.
- [70] W. Kaminsky, *Macromol. Chem. Phys.* **1996**, *196*, 3907–3945.
- [71] K. Ballschmiter, *Pure Appl. Chem.* **1996**, *68*, 1771–1780.
- [72] P.-G. Rieger, H. M. Meier, M. Gerle, U. Vogt, T. Groth, H.-J. Knackmuss, *J. Biotechnol.*, im Druck.
- [73] S. G. Wildes, *Chem. Innovation* **2001**, 23–27.
- [74] A. Willing, *Chemosphere* **2001**, *43*, 89–98.
- [75] A. Mitschker, Vortrag auf der GDCh-Tagung „Umwelt- und ressourcenschonende Synthesen und Prozesse“, 4.–6.9.2000, Tagungsband S. 36, Oldenburg, **2000**. Download: www.chemie.uni-oldenburg.de/oc/metzger/.
- [76] T. May, Bedeutung der Lösungsmittelverwendung für die Kohlenwasserstoff-Emissionen und die troposphärische Ozonbildung, in *Gesellschaft Deutscher Chemiker, Umwelttagung 1998, Kurzreferate*, Karlsruhe, S. 42–44; zit. Lit.
- [77] J. O. Metzger, *Chemosphere* **2001**, *43*, 83–87.
- [78] S. L. Wells, J. M. DeSimone, *Angew. Chem.* **2001**, *113*, 534–544; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 518–527.
- [79] Römpf Lexikon, Lacke und Farben (Hrsg.: U. Zorll), Thieme, Stuttgart, **1998**.
- [80] W. Lenhard, Einfluss der europäischen Umweltgesetzgebung auf die Lackentwicklung, Vortrag auf der GDCh-Tagung „Umwelt- und ressourcenschonende Synthesen und Prozesse“, 4.–6.9.2000, Tagungsband S. 31, Oldenburg, **2000**; Download: www.chemie.uni-oldenburg.de/oc/metzger/.
- [81] J. V. Crivello, R. Narayan, *Chem. Mater.* **1992**, *4*, 692–699.
- [82] a) J. Thornton, *Pandora's Poison: Chlorine, Health, and a New Environmental Strategy*, MIT Press, Cambridge, **2000**.
- [83] a) *Toxicology of Chemical Mixtures*, (Hrsg.: R. S. H. Yang), Academic Press, New York, **1994**; b) H. Jacobi, G. Leier, I. Witte, *Chemosphere* **1996**, *32*, 1251–1259; c) M. Hömme, H. Jacobi, U. Juhl-Strauss, I. Witte, *Mutat. Res.* **2000**, *461*, 211–219.
- [84] a) *Industrial environmental performance metrics: challenges and opportunities* (Hrsg.: Committee on Industrial Environmental Performance Metrics, National Academy of Engineering, National Research Council), National Academy Press, Washington, DC, **1999**, S. 85–105; b) J. A. Cano-Ruiz, G. J. McRae, *Annu. Rev. Energy Environ.* **1998**, *23*, 499–536; c) A. Azapagic, S. Perdan, *Trans. Inst. Chem. Eng. Part B* **2000**, *78*, 243–261; d) A. D. Curzons, D. J. C. Constable, D. N. Mortimer, V. L. Cunningham, *Green Chem.* **2001**, *3*, 1–6.
- [85] A. Diehlmann, G. Kreisel, *Farbe + Lack* **2000**, *106*(12), 101–105.
- [86] a) E. Heinzle, K. Hungerbühler, *Chimia* **1997**, *51*, 176–182; b) M. Misono, *C. R. Acad. Sci. Ser. IIc* **2000**, *3*, 471–475.
- [87] a) G. Koller, U. Fischer, K. Hungerbühler, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2000**, *37*, 960–972; b) D. Young, R. Scharp, H. Cabezas, *Waste Manage.* **2000**, *20*(8), 605–615; c) A. A. Linniger, E. Stephanopoulos, S. A. Ali, C. Han, G. Stephanopoulos, *Comput. Chem. Eng.* **1995**, *19*, S7–S13; d) A. Steinbach, R. Winkenbach, *Chem. Eng.* **2000**, *4*, 94–100; e) P. Lepper, D. Keller, M. Herrchen, U. Wahnschaffe, I. Mangelsdorf, *Chemosphere* **1997**, *35*(11), 2603–2618; f) D. M. Young, H. Cabezas, *Comput. Chem. Eng.* **1999**, *23*, 1477–1491.
- [88] R. A. Sheldon, *CHEMTECH* **1994**, *3*, 38–47.
- [89] a) M. Eissen, J. O. Metzger, EATOS—Environmental Assessment Tool for Organic Synthesis; das Programm ist frei zugänglich unter <http://www.chemie.uni-oldenburg.de/oc/metzger/>; b) M. Eissen, Dissertation, Universität Oldenburg, **2001**.
- [90] P. Frankl, F. Rubik, *Life cycle assessment in industry and business: adoption patterns, applications and implications*, Springer, Berlin, **2000**.
- [91] a) DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement, Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen, **1997**; b) DIN EN ISO 14041: Umweltmanagement, Ökobilanz, Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, **1998**; c) Entwurf DIN EN ISO 14042: Umweltmanagement, Ökobilanz, Wirkungsabschätzung, **1998**; d) Entwurf DIN EN ISO 14043: Umweltmanagement, Ökobilanz, Auswertung, **1999**.
- [92] A. Azapagic, R. Clift, *Comput. Chem. Eng.* **1999**, *23*, 1509–1526.
- [93] I. Boustead, Eco-profiles of the European Plastics Industry, Reports for the European Centre for Plastics in the Environment, **1993–1996**, <http://Lca.apme.org/>.
- [94] M. Stalmans, H. Berenbold, J. L. Berna, L. Cavalli, A. Dillarstone, M. Franke, F. Hirsinger, D. Janzen, K. Kosswig, D. Postlethwaite, Th. Rappert, C. Renta, D. Scharer, K.-P. Schick, W. Schul, H. Thomas, R. Van Sloten, *Tenside Surfactants Deterg.* **1995**, *32*, 84–109.
- [95] a) Vgl. zur Übersicht *Handbuch Umweltcontrolling*, 2. Aufl. (Hrsg.: Bundesumweltministerium Umweltbundesamt), Vahlen, München, **2001**, S. 597–623; b) S. 617–619.
- [96] S. Schaltegger, A. Sturm, *Ökologieorientierte Entscheidungen in Unternehmen: Ökologisches Rechnungswesen statt Ökobilanzierung: Notwendigkeit, Kriterien, Konzepte*, 2., aktualisierte und erw. Aufl., Verlag Paul Haupt Bern Stuttgart Wien **1994**. Im Buch wurden Beispiele aus der chemischen Industrie verwendet.
- [97] E. Gärtner, *Nachr. Chem.* **2000**, *48*, 1357–1360.
- [98] Zur Anwendung von Szenarioanalysen auf Nachhaltigkeitsthemen s.u.a. Wuppertal Institut, Deutsches Institut f. Wirtschaftsforschung, Wissenschaftszentrum f. Sozialforschung: Verbundprojekt „Arbeit und Ökologie“. Abschlußbericht, Berlin und Wuppertal, **2000**.
- [99] SustainAbility: Who needs ist? Market Implications for Sustainable Lifestyles, London, **1995**.
- [100] Öko-Institut e.V.: HoechstNachhaltig. Sustainable Development – Vom Leitbild zum Werkzeug, Freiburg, **1997**.
- [101] Zur unterschiedlichen Innovationstätigkeit chemischer Teilbranchen vgl. die Studien des European Innovation Monitoring System (EIMS): EIMS: *Innovation in the European Chemical Industry*. EIMS-Publication No 38, **1996**, unter: <http://www.cordis.lu/eims/src/eims-r38.htm>.
- [102] Vgl. zum Konzept des Innovationssystems a) A. Spielkamp, K. Vopel in *Boosting Innovation. The Cluster Approach* (Hrsg. OECD), OECD Proceedings, Paris, **1999**, S. 91–12, b) A. v. Gleich in *Surfen auf der Modernisierungswelle? Ziele, Blockaden und Bedingungen ökologischer Innovation* (Hrsg.: A. v. Gleich, S. Leinkauf, S. Zundel), Metropolis, Marburg, **1997**.
- [103] H. Albach, D. B. Audretsch, M. Fleischer, R. Greb, E. Höfs, L.-H. Röller, I. Schulz, Berlin, **1996**, WZB-Paper FS IV 96-26; s. a. H.-J. Quadbeck-Seeger, *Faszination Innovation, Wichtiges und Wissenswertes von A bis Z*, Wiley-VCH, Weinheim, **1998**.
- [104] H. Kreikebaum in *Unternehmung und ökologische Umwelt* (Hrsg.: G. R. Wagner), Vahlen, München, **1990**, S. 113–121.
- [105] Vgl. zu den Besonderheiten und den strategischen Konsequenzen für das F&E-Management z. B. K. Brockhoff, *Forschung und Entwicklung – Planung und Kontrolle*, 5. Aufl., Oldenburg, München, **1999**, S. 27.
- [106] Vgl. z.B. die Kooperation der ehemaligen Hoechst AG mit dem Öko-Institut Mitte der 90er-Jahre; siehe Lit. [100].
- [107] Vgl. H. Lee, Dissertation Nr. 2329, Universität St. Gallen, **2000**.
- [108] U.-H. Felcht in *Chemie: Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor?* (Hrsg.: U.-H. Felcht), Verlag der Universitätsbuchhandlung Blazek und Bergmann seit 1891, Frankfurt, **2000**, S. 78.

- [109] Vgl. hierzu auch EIMS: *Innovation in the European Chemical Industry*. EIMS-Publication No 38, **1996**, unter: <http://www.cordis.lu/eims/src/eims-r38.htm>.
- [110] Vgl. zur Notwendigkeit eines solchen auf das einzelne Unternehmen bezogenen Blickes auch R. Landau in *The Chemical Industry in Chemicals and Long-Term Economic Growth* (Hrsg.: A. Arora, R. Landau, N. Rosenberg), Wiley, New York **1998**, S. 139–180.
- [111] Vgl. hierzu z. B. S. A. Böttcher, Dissertation Nr. 2398, Universität St. Gallen, **2000**, S. 44 sowie die dort wiedergegebene Fallstudie der Novartis AG (Bt-Mais), S. 112 ff.
- [112] a) U. Schneidewind: *Chemie zwischen Wettbewerb und Umwelt*, Metropolis, Marburg **1995**; b) A. P. J. Mol, *The Refinement of Production. Ecological Modernization Theory and The Chemical Industry*. Van Arkel, Utrecht **1995**.
- [113] Vgl. auch R. T. Ellington, M. Sharfman, M. Meo, *Corporate Environmental Strategy* **2000**, 7, 62–71 (70).
- [114] *Sustainability und Aktienperformance – Chance für Investoren. Analyse am Beispiel der Chemie- und Pharmaindustrie* (Hrsg.: Sustainable Asset Management/Hamburger Umweltinstitut), Selbstverlag, Zürich, **1997**.
- [115] U. Schneidewind, *Chemie zwischen Wettbewerb und Umwelt*, Metropolis, Marburg, **1995**, S. 251.
- [116] S. Seuring in *Proceedings of the Twelfth Annual Conference of the Production and Operations Management Society*, POM-2001 (Orlando, Florida) **2001**.
- [117] Vgl. R. Landau in *The Chemical Industry in Chemicals and Long-Term Economic Growth* (Hrsg.: A. Arora, R. Landau, N. Rosenberg), Wiley, New York, **1998**, S. 139–180, (S. 176).
- [118] Vgl. zu den entsprechenden Potenzialen OECD[57].
- [119] *Der Verbund*, www.bASF.de/corporate/verbund/.
- [120] a) SPHERE+ : *Substitution Projects for Health and Environment. Lessons from Results and Experiences*, Studien in 12 EU-Ländern 1997–1999, Hamburg, **2000** sowie b) SUBSPRINT: *Innovationsprojekt in der Druckindustrie zum Ersatz von leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen durch VOC-freie hochsiedende Pflanzenölester* in 13 Ländern von 1992–1996, Hamburg, **1997**.
- [121] Vgl. z. B. auch die Durchsetzungsschwierigkeiten eines antimonfreien Katalysators zur Polyester-Produktion in S. Seuring in *Proceedings of the Twelfth Annual Conference of the Production and Operations Management Society*, POM-2001 (Orlando, Florida) **2001**.
- [122] L. Lissner in *Konzepte zum Beitrag der Chemie zu einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung, Symposium: 21* (Hrsg.: M. Eissen, J. O. Metzger), BIS, Oldenburg, **2000**; <http://www.uni-oldenburg.de/chemie/oc/metzger/>.
- [123] z. B. *Responsible Care Report 2000* (Hrsg.: VCI), Frankfurt/M. **2000**.
- [124] E. Bulmahn, in *Chemie: Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor?* (Hrsg.: U.-H. Felcht), Verlag der Universitätsbuchhandlung Blaek und Bergmann seit 1891, Frankfurt, **2000**, S. 255–273.
- [125] *Bausteine für ein zukunftsähnliches Deutschland. Diskursprojekt im Auftrag von VCI und IG CPK* (Hrsg.: IFOK), Wiesbaden, **1997**; a) S. 103; b) S. 9.
- [126] Kommission der EU, *Weißbuch: Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik*, Komm, **2001**, 88 endgültig v. 27.2.2001, S. 5.
- [127] A Sustainable Europe for a Better World: A European Union Strategy for Sustainable Development. Communication from the Commission. COM (2001)264 final, Brussels, 15.5.2001.
- [128] CEFIC News Release , Brussels 13.2.2001: CEFIC supports objectives of the White Paper on the EU Chemicals Policy Review but questions practicabilities.
- [129] Commission of the European Community, *Green Paper on Integrated Product Policy*, Com. **2001**; a) S. 68, S. 11; b) S. 15; c) S. 20; d) S. 22.
- [130] M. Fleischer, S. Kelm, D. Palm, *WZB Mitt.* **2001**, 91, 20–23.
- [131] G. Winter, H. Ginzky, B. Hansjürgens, *Die Abwägung von Risiken und Kosten in der Europäischen Chemikalienregulierung*, UBA-FB 99-094, Berlin, **1999**, S. 198, 199, 217.
- [132] R. S. Rogers, *Chem. Eng. News* **1999**, 77(15), 30–32.
- [133] Text der POP-Konvention: www.bmu.de/fset1024.php.
- [134] I. Kühn, S. Osório-Peters in *Innovation und Umwelt* (Hrsg.: P. Klemmer), Analytica Verlag, Berlin, **1999**, S. 336.
- [135] P. Klemmer, U. Lehr, K. Löbbecke, *Umweltinnovationen. Anreize und Hemmnisse*, Analytica Verlag, Berlin, **1999**.
- [136] J. Blazejczak, D. Edler, J. Hemmelskamp, M. Jänicke, *ZfU* **1999**, 1, 15.
- [137] M. Jänicke, P. Kunig, M. Stitzel, *Umweltpolitik. Politik, Recht und Management des Umweltschutzes*, Dietz, Bonn, **1999**, S. 130.
- [138] E. Weise, H. Friege, K. O. Henseling, J. C. Meerkamp J. C. van Embden, *Chemie erlebt -50 Jahre GDCH*, Frankfurt/M., **1999**; *Chemiepolitik: Gespräche über eine neue Kontroverse* (Hrsg.: M. Held), VCH, Weinheim, **1988**.