

bm:wfk

GZ 10.001/231-Pr/1c/95

Herrn Präsidenten
des Nationalrates
Dr. Heinz Fischer
Parlament
1017 Wien

XIX. GP.-NR
1932 1AB
1995 -12- 01

zu 1992 J

Wien, 30 November 1995

Die schriftliche parlamentarische Anfrage Nr. 1992/J-NR/1995, betreffend Forschung über "sanfte Chemie", die die Abgeordneten Dipl.Ing. Dr. KEPPELMÜLLER und Genossen am 11. Oktober 1995 an mich gerichtet haben, beehre ich mich wie folgt zu beantworten:

1. Haben Sie Untersuchungen über "sanfte" Chemie in Auftrag gegeben?

Antwort:

Ja, "Sanfte Chemie - Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven".

2. Wo in Österreich werden derzeit Forschungen zur "sanften" Chemie betrieben?

Antwort:

Meinem Ressort sind folgende Forschungseinrichtungen bekannt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit), die Forschungen zur "sanften Chemie" betreiben (diese Einrichtungen sind teilweise auch in der Veröffentlichung des Umweltbundesamtes Nr. 23/1995 über die "Bestandsaufnahme von Forschung und Entwicklung im Bereich der Umwelttechnologie in Österreich", erstellt durch die Österreichische Gesellschaft für Biotechnologie angeführt):

Bundesministerium für
Wissenschaft,
Forschung und Kunst

Minoritenplatz 5
A1014 Wien

- 2 -

Universität für Bodenkultur:

Institut für Angewandte Mikrobiologie,
Institut für Lebensmitteltechnologie,
Zentrum für Ultrastrukturforschung,
Interuniversitäres Forschungsinstitut für Agrarbiotechnologie (gemeinsam mit TU Wien und
Veterinärmedizinischer Universität Wien).

TU Wien:

Institut für Biochemische Technologie und Mikrobiologie,
Institut für Botanik, Technische Mikroskopie und organische Rohstofflehre,
Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik (Forschungsprojekt
"Entwicklung von Technologien zur Herstellung chromfreier Leder", ein Fortsetzungsprojekt
ist derzeit in Vorbereitung).

Universität Wien:

Institut für Biochemie und Molekulare Zellbiologie,
Institut für Mikrobiologie und Genetik.

Universität Graz:

Institut für Organische Chemie,
Institut für Biochemie.

TU Graz:

Institut für Verfahrenstechnik,
Institut für Biotechnologie,
Institut für Organische Chemie.

Universität Innsbruck:

Institut für Analytische Chemie und Radiochemie.

Österreichische Akademie der Wissenschaften:

Institut für Molekularbiologie in Salzburg.

- 3 -

Sonstige Einrichtungen:

Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Sektion Österreichisches Lackinstitut (Forschungsprojekt "Ersatz von Glykolen in Lacklösungsmitternsystemen"), diverse Firmenentwicklungsprojekte (Biopack ect.).

3. Haben Sie eine Untersuchung der ökonomischen und ökologischen Chancen der "sanften" Chemie in Auftrag gegeben?

Antwort:

Die ökonomischen Chancen und die ökologische Bedeutung werden zwar in der gegenständlichen Studie angesprochen, nicht aber im Detail behandelt.

4. Wie hoch ist dieser Forschungsauftrag dotiert?

Antwort:

Der unter Punkt 1 genannte Forschungsauftrag ist mit S 1,6 Mio. dotiert.

5. Wer hat diesen Forschungsauftrag erhalten?

Antwort:

Concerned People GesmbH.

6. Ist dieser Auftrag schon fertiggestellt?

7. Wenn ja, sind Sie bereit, die Ergebnisse dem Nationalrat zur Verfügung zu stellen?

Wenn nein, bis wann soll die Arbeit fertiggestellt werden?

Antwort:

Die Fertigstellung dieses Projektes ist im Juni 1996 geplant. Ein 1. Zwischenbericht ist veröffentlicht und steht selbstverständlich auch dem Nationalrat zur Verfügung (Beilage).

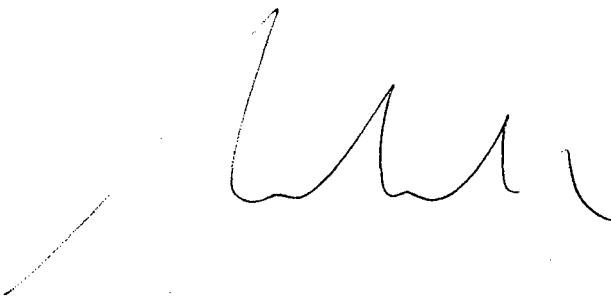
8. Wie definieren sie "sanfte" Chemie im Gegensatz zu "harter" Chemie?Antwort:

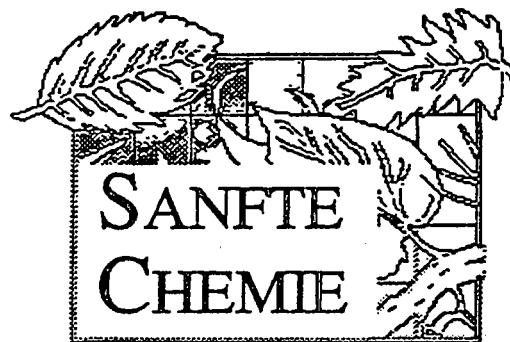
1. "Sanfte Chemie beinhaltet den Einsatz umweltschonender Verfahren bzw. rasch abbaubarer Chemikalien gegenüber kaum bzw. nur sehr langsam abbaubaren toxischen Chemikalien.
2. "Sanfte Chemie trägt dem Prinzip "Vorsorge statt Nachsorge" voll Rechnung (z.B. im landwirtschaftlichen Bereich: Stimulierung der natürlichen Resistenz von Kulturpflanzen anstatt des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln auf breiter Basis).
3. "Sanfte Chemie" trägt dem Prinzip der möglichst umfassenden Recyclierbarkeit voll Rechnung.

9. Welche ökologischen Vorteile hat ihrer Auffassung nach die "sanfte" Chemie?Antwort:

Zielsetzung der "Sanften Chemie" ist es, bei möglichst sparsamen Einsatz der natürlichen Ressourcen bzw. Rohstoffe ein Maximum an Umweltschonung zu erreichen bzw. die einzelnen Prozesse im Einklang mit natürlichen Kreisläufen ablaufen zu lassen.

Durch Ansätze der "sanften Chemie" sind neue umweltverträgliche Entwicklungsstrategien zu erwarten, die besser den Nachhaltigkeitskriterien entsprechen.

BeilageA handwritten signature in black ink, appearing to read "Hans-Joachim Schmid", is positioned above a dotted line. The signature is fluid and cursive, with a large, stylized 'H' at the beginning.



**Theoretische Grundlagen,
Chancen und Perspektiven**

FORSCHUNGSPROJEKT
im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung

1. Zwischenbericht

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Projektleiter

Univ. Lektor. Dipl. Chem. Hanswerner Mackwitz

Mitarbeiter/innen

Mag. Dr. Christoph Neumann

stud.oecolog. Reinhard Leeb

stud.chem. Susanne Schemitz

Gewidmet

Herrn Dipl.Chem. Dr. Hermann Fischer

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Aufgabenstellung: Das Wichtigste im Überblick

Die Studie ist der Beginn eines Forschungskonzeptes mit dem Ziel eine neue stoffpolitische Grundlage auf der Basis einer "Sanften Chemie" zu beschreiben. Das Forschungsprojekt referiert die Grundsätze und Zukunftsperspektiven, aber auch die Demarkationslinien und möglichen Fehlentwicklungen, die sich aus der bisherigen 15-jährigen Entwicklung der Sanften Chemie bereits ableiten lassen.

Sanfte Chemie wird im wesentlichen als Adaption einer integrativen Naturstrategie im Leitbild einer neuen Stoffwirtschaft (Kreislaufwirtschaft) definiert. Die Notwendigkeit einer Sanften Chemie ergibt sich aus der kritischen Reflexion des chemo-industriellen Komplexes ausgehend von seiner historischen Entwicklung, Theorie und Methodik. Logische Anknüpfungspunkte lassen sich im Hinblick auf die Störfallrelevanz, Human- und Öko-Toxikologie der klassischen Chemie ableiten, sowie aus der Analyse ihrer gesellschaftlich-sozialen Prinzipien und nicht zuletzt ihrer lokalen wie globalen Auswirkungen.

Eines der Probleme der modernen Petrochemie liegt darin, daß ihre Denk-, Forschungs- und Arbeitsstrukturen kaum einer fundamentalen Kritik 'von innen her' unterliegen. Selbst viele kritische Chemiker haben heute die seit fast 400 Jahren zugrundeliegenden Denk- und Forschungsmuster verinnerlicht und a priori als ihre unmittelbare Existenzgrundlage angenommen. Daher geht die Studie im ersten Teil auch auf historische Aspekte der Chlorchemie ein, die den Industriekomplex wesentlich geprägt hat. In einem weiteren Schritt werden die erkennbaren Folgen dieser Chemie für Umwelt, Gesundheit und Gesellschaft skizziert.

Die Sanfte Chemie erhebt den Anspruch, chemisch-technologische Prozesse in der Weise zu regeln, daß deren Haupt- und Nebenprodukte problemlos in bestehende Ökosysteme eingliederbar sind und gleichzeitig Entropiezuwächse bzw. Energieverluste minimiert werden. Ausgangs-, Zwischen- und Endpunkte sanft-chemischer Produktionsabläufe (inkl. Rohstoffgewinnung und Transport) sollen an ökologische Ansprüche optimal angepaßt sein und auch soziale Faktoren (z.B. den Ausschluß gesundheitsgefährdender Stoffe am Arbeitsplatz oder die Frage der Rohstoffpreise in Schwellenländern) mit berücksichtigen.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Mit dem Aufzeigen von gedanklichen und stofflichen Alternativen sowie Beispiele für deren Umsetzung in die Produktionspraxis wird der thematische Kern der Arbeit vertieft. Beispiele für sanfte Pflanzenchemie aus den Bereichen der Alltagschemie - von Farben, Lacken, Klebern über Wasch- und Körperfleugmittel bis zu ökologischen Faserwerkstoffen - stellen zwar nur den Anfang einer neuen Entwicklung dar, doch die Prinzipien einer echten Nachhaltigkeit in der Stoffverwendung (wie sie bei den konventionellen Produktlinien nahezu ausgeschlossen ist) lassen sich bereits deutlich umreißen. Gleichzeitig soll in diesem Kapitel auch eine Abgrenzung zu anderen Ansätzen neuer Chemiepolitik und Produktionspraxis sowie zu möglicher mißbräuchlicher Verwendung des Begriffes oder seiner Inhalte (insbesonders im Hinblick auf Gentechnik und 'harte Biotechnologie') Stellung bezogen werden.

In der konkreten Umsetzung greift die Sanfte Chemie einerseits auf toxikologisch unbedenkliche und problemlos verfügbare Stoffe und Strukturen des Primär- und Sekundärstoffwechsels im biogenen Kohlenstoffkreislauf zurück, z.B. auf Zellulose, Stärke und Lignin oder das kaum genutzte Chitin. Andererseits stehen "biologisch aktive" Agentien des Sekundärstoffwechsels zur Auswahl, die möglichst gezielt und gemäß ihrer "natürlichen Funktion" zum Einsatz kommen. Dazu zählen u.a. Farbstoffe, Harze, Gerbstoffe, Wachse, ätherische Öle usw. Das Leitbild der Sanften Chemie geht davon aus, daß Vielfalt und Komplexität der aus Naturprozessen entstandenen Stoffe bei intensiver Forschung & Entwicklung einen wesentlichen Teil der stofflichen und energetischen Grundbedürfnisse des menschlichen Lebens ohne einschneidenden Komfortverzicht und ohne Verlust an Lebensqualität zu befriedigen vermag. Das Projekt versteht sich auch als Impuls für die Ausweitung einer solchen vernachlässigten Anwendungsforschung für komplexe Naturstoffe.

Im ersten Abschnitt dieses Projektes wird nach einer Darstellung der ökologischen Kernprobleme das Konzept der Sanften Chemie als integrative Naturstrategie im Hinblick auf die Methoden und Auswirkungen der harten Chemie skizziert. Im Anschluß daran folgt die Präzisierung von wichtigen Arbeitsbegriffen der aktuellen Ökologiediskussion und die Darstellung der theoretischen und verfahrenstechnischen Grundlagen einer sanft-chemischen Produktion von Werkstoffen und Zubereitungen für den täglichen Bedarf.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Danksagung und Hinweise für Rezipienten

Die Grundidee zu dieser Forschungsarbeit geht auf die beinahe 10-jährige Mitarbeit der Projektleiter im Arbeitskreis SANFTE CHEMIE zurück, in dem sich Naturwissenschaftler (Chemiker, Physiker, Biologen, Ökologen, Didaktiker und Publizisten) in regelmäßigen Abständen zum Erfahrungsaustausch und zur Positionsbestimmung des neuen Arbeitsbegriffs zusammenfinden. Armin von Gleich, der vor kurzem an einen Lehrstuhl der Universität Hamburg berufen wurde und der Naturstoffchemiker Hermann Fischer aus Braunschweig haben in dieser jungen Disziplin zweifelsohne die wichtigsten Vorarbeiten geleistet. Hermann Fischer, der vom WWF Deutschland zum Ökomanager des Jahres 1992 gekürt wurde, ist unsere Arbeit gewidmet

Ihnen und allen anderen Mitgliedern des Arbeitskreises möchten wir für die zahllosen Anregungen und praxisbezogenen Erfahrungen herzlich danken. Unser Dank gilt auch dem österreichischen Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, der Arbeiterkammer Salzburg, der Stadt Salzburg sowie der Grünen Bildungswerkstatt, die im April 1990 das 1. Internationale Symposium "Sanfte Chemie" an der Universität Salzburg ermöglicht haben. Wesentliche Inhalte dieses Symposiums sind in dieses Forschungsprojekt eingeflossen und können jetzt dem interessierten Fachpublikum zugänglich gemacht werden.

An den Strukturierungsprozessen für das Forschungsprojekt haben sich auch die Herren Univ. Prof. Dr. Franz Moser und Univ. Doz. Dr. Hans Schnitzer vom Institut für Verfahrenstechnik der TU Graz und Herr Univ. Prof. Dipl. Ing. Alfred Schmidt vom Institut für Verfahrenstechnik der TU Wien, Herr A.o. Prof. Dr. Roland Albert vom Inst.f.Pflanzenphysiologie der Universität Wien und last not least die Herren Dipl. Ing. Michael Paula und Dr. Christian Smoliner vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung engagiert beteiligt. Für ihre Geduld, ihre kritischen Anmerkungen und wertvollen Anregungen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Wir hoffen und wünschen, daß unsere Arbeit nicht dazu führt, daß alte Gräben zwischen Befürworten und Kritikern des "harten Weges" vertieft werden. Sondern wir verstehen dieses Projekt als einen Versuch, neue positive Werte und Einsichten zu vermitteln. Wir sind auf der Suche nach Kolleginnen und Kollegen in- und außerhalb des Wissenschaftsbetriebs, die wissen oder fühlen, daß sich die

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Werte und Notwendigkeiten verändern und verändert haben. Und wir möchten jene, die an einer lebenswerten Zukunft interessiert sind, auf ein machbares und erlebbbares Zukunftsmodell der Welt aus der Sicht des stofflichen Produzenten, aber auch des Nutzers und Anwenders aufmerksam machen.

Dabei ist das Konzept der Sanften Chemie keineswegs als vollständig oder abgeschlossen anzusehen. Im Gegenteil: Wenn wir die letzten 150 Jahre Wissenschaftsgeschichte rückblickend betrachten und dabei in Rechnung stellen, daß Theorie und Praxis der Sanften Chemie kaum 20 Jahre alt sind, müssen wir feststellen, daß diese Zukunft gerade erst begonnen hat.

Im diesen Sinne sind wir für kritisch-konstruktive Anmerkungen, für Hinweise auf ähnliche Entwicklungen, aber auch für Lob und Anerkennung von jeder Seite dankbar.

Wien, im Mai 1994

Reinhard Leeb Hanswerner Mackwitz Christoph Neumann Susanne Schemitz

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Aufgabenstellung: Das Wichtigste im Überblick	1
Danksagung und Hinweise für Rezipienten	3
Verzeichnis der Abbildungen	8
Verzeichnis der Tabellen	9
1. Einleitung	10
1.1. Globale ökologische Entwicklung	10
1.2. Wachstum im Norden versus Armut im Süden	11
1.2.1. Annäherung zum Produkt der Zukunft	11
1.3. Ökologische Aufklärung ohne Selbsttäuschung	16
2. Die Entwicklung der stofflichen Produktionsdynamik	18
2.1. Anlagensicherheit	19
2.2. Alkali und Chlor: Der historische Zusammenhang	21
2.3. Chlorchemie, das Jahrtausendproblem	25
2.3.1. Aufschlüsselung und Umbau der Chlorchemie	26
2.3.2. Umweltorientierte Optimierung der Chemischen Industrie	30
3. Chemie und Erscheinungsbild	36
3.1. Standarddefinition und "Retorte der Gesamtwirtschaft"	37
3.2. Stoffströme im Blickpunkt: Das Beispiel Polyurethan	39
3.2.1. Mögliche Auswirkungen von Isocyanaten	48
3.2.1.1. Toxische Irritationen bei hohen Isocyanatkonzentrationen in der Atemluft	49
3.2.1.2. Unspezifische Beeinträchtigung der Lungenfunktion bei chronischer Belastung mit niedrigen Isocyanatkonzentrationen	50
3.2.1.3. Spezifische Isocyanatüberempfindlichkeit mit Isocyanat - Asthma und allergische Alveolitis als Krankheitsbilder	50
3.2.1.4. Unspezifische bronchiale Hyperreagibilität	51
3.2.2. Zersetzungprodukte im Brandfall	52
3.2.3. Resumé Produktlinie Polyurethan	53
3.3. Sustainable Development - Dauerhafte Entwicklung	56
3.3.1. Rio-Deklaration	56
3.3.2. Agenda 21	57
3.3.3. Das Jahrhundert der Umwelt	57
3.3.4. Trendwende unabdingbar	58

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

3.4.	Die neue Aufgabenstellung: Sanfte Technik	65
3.4.1.	Grundgedanken	65
3.4.2.	Neue Produktionskonzepte	67
3.4.3.	Neue Gebrauchsstoffe	67
3.4.4.	Neue Produktlinien	68
3.4.5.	Querverbindungen Wissenschaft und Gesellschaft	69
3.4.6.	Prävention statt Symptombehandlung	69
3.4.7.	Von der meßbaren Quantität kleiner Größen zur Vernetzungsstrategie	70
3.4.8.	Von der Beherrschung zur Symbiose	71
3.5.	Das Konzept der Sanften Chemie und sein Umfeld	72
3.5.1.	Naturstrategien - Leitbilder/Anstöße einer neuen Stoffwirtschaft	74
3.5.1.1.	Naturstrat. der Sparsamkeit in Bezug auf Energie und Materie	74
3.5.1.2.	Naturstrat. d. Stoff-Recyclings in Verwert.ketten u. -kreisläufen	75
3.5.1.3.	Naturstrategie d. Langsamkeit (zeitl. Streckung und Stetigkeit)	76
3.5.1.4.	Naturstrategie der Vielfalt, Spezialisierung und Selektivität (in überlappender und ergänzender Konkurrenz bei Produkten und Produktionswegen)	76
3.5.1.5.	Naturstrategie der evolutiven Entwicklung, der Fehler- und Reparaturfreundlichkeit	77
3.5.2.	Naturstrategien als Innovationsimpulse d. industr. Produktion	78
3.6.	Die Pflanze als Inbegriff der Sanften Technologie	80
3.6.1	Die Photosynthese: kurzer historischer Exkurs	81
3.6.2.	Leistung und Funktion der Biosphäre	84
3.7.	Sanfte Chemie und Ökologisches Bauen	90
3.7.1.	Naturfarben - Herausforderung für überlebte Konzepte	96
3.7.2.	Pflanzliche Lösemittel aus ökologischer Sicht	100
3.7.2.1.	Der Beitrag pflanzlicher Lösemittel zum stratosphärischen Ozonabbau	104
3.7.2.2.	Der Beitrag pflanzlicher Lösemittel zum bodennahen Ozon	104
3.7.2.3.	Der Beitrag pflanzlicher Lösemittel zur Wasserbelastung	105
3.7.2.4.	Die humantoxikologische Relevanz pflanzlicher Lösemittel	105
3.7.2.5.	Isoaliphaten: Alternative zu BTO und Citrusöl?	106
3.7.2.6.	Pflanzliche Lösemittel nicht völlig harmlos	107
3.7.2.7.	Neugründungen im Naturfarbenbereich erfolgversprechend	108

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

3.8.	Richtlinien für die Gewinnung und Verarbeitung von Produkten der Sanften Chemie	109
3.8.1.	Nachhaltigkeit in der Gewinnung	109
3.8.1.1.	Wildsammlung	111
3.8.1.2.	Kontrolliert biologischer Anbau (kbA)	111
3.8.1.3.	Konventioneller Anbau	112
3.8.2.	Nachhaltigkeit der Produktion	112
3.8.3.	Nachhaltigkeit der Verwendung	113
3.8.4.	Nachhaltigkeit der Entsorgung	115
3.9.	Verfahrensweisen der Sanften Chemie	116
3.9.1.	Physikalische, chemische und biotechnische Methoden	117
3.9.2.	Kriterien zur Rohstoffauswahl	120
3.9.3.	Rohstoffe aus pflanzl. und tierischen Organismen (Auswahl)	120
3.9.4.	Mineralische Rohstoffe (Auswahl)	123
3.9.5.	Thermodynamische Größen	126
3.9.5.1.	Temperatur	127
3.9.5.2.	Druck	128
3.9.6.	Sanfte Chemie und gentechnische Arbeitsmethoden	128
3.9.6.1.	Vorteile	128
3.9.6.2.	Nachteile	129
3.9.6.3.	Versuch einer Abgrenzung	130
4.	Exemplarisches zur Sanften Chemie	131
4.1.	Kohlenstoffbilanz der Biomassenutzung	131
4.2.	Chitin, ein vielseitig einsetzbarer Naturstoff	132
4.2.1.	Medizin - Pharmazie - Kosmetik	133
4.2.2.	Technik - Umwelttechnik - Biotechnologie	134
4.2.3.	Lebensmitteltechnologie - Landwirtschaft	135
4.2.4.	Gewinnungsoptionen von Chitin und Chitosan	136
4.2.5.	Zukunftsperspektiven für Chitin und Chitosan	137
4.3.	Rohstoffe aus dem Regenwald	139
4.3.1.	Daimler Benz entdeckt die Natur	139
Literaturverzeichnis		142

Verzeichnis der Abbildungen	Seite
Abb. 1: Pro-Kopf-Energieverbrauch als tSKE (1989)	12
Abb. 2: Metallverbrauch pro Kopf: hoher Verbrauch in den Industrieländern	14
Abb. 3: 5 Gebote zum Produkt der Zukunft	15
Abb. 4: Produktion organischer Chemikalien (weltweit)	19
Abb. 5: Leblanc-Verfahren zur Sodagewinnung	21
Abb. 6: Solvay-Verfahren zur Sodagewinnung	23
Abb. 7: Alkali-Elektrolyse	24
Abb. 8: Aufschlüsselung des Chlorverbrauchs	27
Abb. 9: Die allgemeine Produktlinie Vom Primärrohstoff bis zum vollständigen Abbau?	41
Abb. 10: Stoff-Flußdiagramm der Massenchemikalie Polyurethan	42
Abb. 11: Vergleich Ökosystem - Wirtschaftssystem	58
Abb. 12: Der natürliche Kohlenstoffkreislauf: Das Prinzip der Sanften Chemie	85
Abb. 13: Biomasseaustausch zwischen Flora und Fauna	86
Abb. 14: Die zwei unterschiedlichen Modelle der Produktionsdynamik	89
Abb. 15: "Zurichtungsgrad" und "Eingriffstiefe": Parameter für bio-ökologische Wertigkeit	91
Abb. 16: Kriterien zur bio-ökologischen Baustoffbewertung	94
Abb. 17: Farben und Lacke: Vergleich aktueller Rohstoffkonzepte	96
Abb. 18: Materialflußdiagramm von Citrusterpenen	100
Abb. 19: Schematischer Vergleich der Lebensläufe von natürlichen und synthetischen Farben-Lösemitteln	103
Abb. 20: Prozeßketten der chemischen Synthese - Lösemittel vom Typus Isoaliphaten	107
Abb. 21: Weltweite Patentanmeldungen in der Chitin - und Chitosan-Technologie	136
Abb. 22: Erzeugung und Verbrauch von Chitin und Chitosan in Japan (1986)	137

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Verzeichnis der Tabellen

Seite

Tab. 1:	Einsatzgebiete und Alternativen halogenierter Kohlenwasserstoffe	29
Tab. 2:	Produktionsintegrierte umweltbezogene Maßnahmen in der Chemischen Industrie	31
Tab. 3:	Produkte, die neben Benzol und Ethylen beim Naphtaprozeß der Erdölraffinerie anfallen	44
Tab. 4:	Akute biologische Effekte von Toluylendiisocyanat	49
Tab. 5:	Abschätzung des Inlandsverbleibs an PUR aufgeteilt auf sieben Anwendungsbereiche für das Jahr 1991 in Deutschland	54
Tab. 6:	Vergleich der Energieäquivalenzwerte und der Verbrennungsenthalpie(unterer Heizwert) für verschiedene Kunststofftypen	55
Tab. 7:	Jährliches Produktionsvolumen Biosphäre - Petrochemie	86
Tab. 8:	Mögliche Quellen von Luftverunreinigungen in Innenräumen und die von ihnen emittierten Schadstoffe	93
Tab. 9:	Das Öko-Haus: Versuch einer Positivliste	95
Tab. 10:	Öko-Punkte Farben und Lacke	99
Tab. 11:	Verfahrensweisen der Sanften Chemie	117
Tab. 12:	Rohstoffe aus pflanzl. u. tierischen Organismen (Auswahl)	120
Tab. 13:	Mineralische Rohstoffe (Auswahl)	123
Tab. 14:	Kurzcharakteristik von Chitin und Chitosan	133

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

1. Einleitung

1.1. Globale ökologische Entwicklung

Täglich

- verhungern auf der Erde 100.000 Menschen,
- sterben 100 Tier- und Pflanzenarten aus,
- werden 86 Millionen Tonnen Erdreich abgeschwemmt,
- werden 55.000 Hektar Tropenwald abgeholt,
- werden 100 Millionen Tonnen Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert,
- geht mehr Ackerboden verloren als in 1.000 Tagen neu entstehen kann.¹

Wenn sich diese Entwicklung weiterhin fortsetzt, ist das Ende für jedes Leben auf dem Planeten Erde absehbar. Ernst zunehmende Umweltwissenschaftler warnen seit schon seit Jahrzehnten vor einer Eskalation der regionalen Öko-Katastrophen in globale Dimensionen.² Dabei geht es um überlebenswichtige Dinge: um den Sauerstoffvorrat, um die Süßwasserreserven, die Gleichgewichtsfunktionen der Ozeane, um die Funktionsfähigkeit der Wälder und Ackerböden, es geht um die notwendigen Grundlagen, die wir Menschen auf diesem Planeten benötigen, um auch in Zukunft ein natürliches und erfülltes Leben führen zu können.

Welche sind jene sechs gefährlichsten Entwicklungen, die nach WORLDWATCH die globale ökologische Entwicklung am gravierendsten beeinflussen?

¹ Präambel zum "Ökologischen Marshallplan Umweltschutz" von Franz ALT, Joschka FISCHER und Jo LEINEN in Anlehnung an den Vorschlag des US-Vizepräsidenten Al GORE zu einem Globalen Ökologischen Marshallplan. Der Ökologische Marshallplan Umweltschutz soll auf der RIO Nachfolgekonferenz 1995 in Deutschland verabschiedet werden.

² ALTNER Günter, BROWN Lester, FLAVIN Christopher, FRENCH Hilary F., WEIZSÄCKER Ernst Ulrich, MEADOWS Dennis und Domella, POSTEL Sandra, STARKE Linda u.a.

Globale Öko-Probleme



Die sechs gefährlichsten Entwicklungen

1. Ozonzerstörung in der Stratosphäre
2. Treibauseffekt und Klimakatastrophe
3. Biotopt- u. Artensterben
4. Freisetzung u. Akkumulation von Umweltgiften
5. Radioaktivitätsrisiko 
6. Bevölkerungswachstum, Bodenzerstörung und Welthunger

Die Reihung ist keine Prioritätenliste. Aber wir sind uns mit WORLDWATCH u.a. namhaften Institutionen einig, daß diese Fehlentwicklungen eines ausser Kontrolle geratenen Systems bereits kurz nach der Jahrtausendwende die global-ökologischen Krisen in einem unerträglichen Ausmaß verschärfen können.

Daraus folgt eine grundlegende Erkenntnis und Therapie: Nur die Änderung der Konsum- und Produktionsgewohnheiten vermag die Erde für die Enkel bewohnbar zu halten. Die meisten Wissenschaftler, Politiker und informierten Bürger und Bürgerinnen haben diesen Zusammenhang schon seit einiger Zeit verstanden, viele ziehen aber kaum die nötigen Konsequenzen. "Zu allen Zeiten haben Philosophen und religiöse Führer den Materialismus als Weg zur menschlichen Erfüllung abgelehnt. Trotzdem fahren die unterschiedlichsten Gesellschaftssysteme damit fort, Lebensqualität mit steigendem Konsum gleichzusetzen."³

Doch selbst, wenn es in einigen Jahren gelingt, viele Menschen in den Industrieländern für ein positives Umwelthandeln in ihrem Alltagsleben zu gewinnen, wird die globale Ökokrise kaum wirksam entschärft, wenn nicht gleichzeitig die internationale Armut auf der südlichen Halbkugel bekämpft wird. "In einer ökologisch gefährdeten Welt ist der Preis der Armut selbst für die Reichen zu hoch."⁴

1.2. Wachstum im Norden versus Armut im Süden

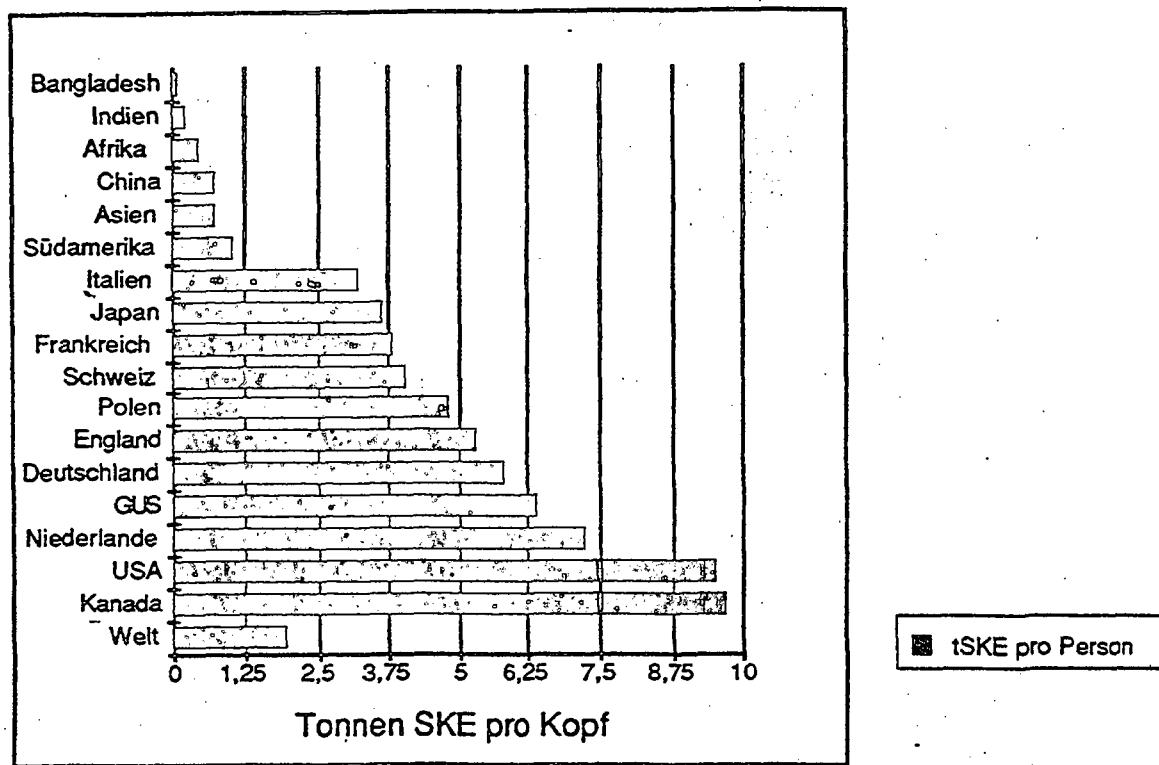
Das globale Profil der Armut wird zunehmend durch den Zustand der Umwelt bestimmt. Die Armen leiden nicht nur unverhältnismäßig stark unter den Umweltschäden, die jene verursachen, denen es besser geht; sie tragen inzwischen auch selbst in erheblichem Maße zum Verfall der Umwelt bei, nachdem sie durch das Bevölkerungswachstum und gesellschaftliche Benachteiligung in verödende Gebiete und Slums vertrieben wurden.

³BROWN 1991, S. 326.

⁴DURNING in WORLDWATCH Institute Report (1990) S. 293.

Abb.1:

Pro-Kopf-Energieverbrauch als tSKE (Tonnen Steinkohleeinheiten) (1989)



Grafik n.BOSSEL CP 1994

Nach WORLDWATCH vergrößerte sich seit 1950 die Lücke zwischen den armen und reichen Ländern vor allem deshalb, "weil die reichen immer reicher wurden. Seit 1980 aber werden auch die Armen in vielen Entwicklungsländern immer ärmer."⁵

Die meisten Lösungsansätze für die Umweltkrise lassen außer acht, daß unser Wohlstand weitgehend mit dem Ruin der Dritten Welt erkauf wird. Andererseits ist es eine Illusion zu hoffen, daß der materielle Wohlstand der reichen Länder auf die ganze Welt ausdehnbar wäre. Der Norden mit einem Fünftel der Weltbevölkerung verbraucht 70 Prozent der Weltenergie, 75 Prozent aller Metalle, 85 Prozent des Holzes und konsumiert 60 Prozent aller Nahrungsmittel. Bei uns gehören Konsumgüter wie Autos, Kühlschränke, TV-Geräte, Waschmaschinen oder Softdrinks in Einweg-PET-Flaschen zum gewohnten Lebensstandard.

⁵DURNING bemerkt in diesem Zusammenhang, daß sich die Wirtschaftskrise der achtziger Jahre auf die Menschen in Afrika, Lateinamerika und in Teilen Asiens "verheerend ausgewirkt" hat. "In Burma, Burundi, Gambia, Guinea-Bissau, Jamaika, Niger, Nigeria, Paraguay, den Philippinen, Nicaragua, El Salvador stieg erwiesenermaßen die Zahl der Unterernährten; zweifellos nimmt sie auch in anderen Ländern zu - besonders unter den gesellschaftlich Benachteiligten." in BROWN (Hg.) 1990. S. 265 ff.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Seit Anfang des Jahrhunderts hat sich unser Cadmiumverbrauch vertausendfacht, seit Mitte des Jahrhunderts haben wir unseren Plastikkonsum verfünfacht und unseren Aluminiumverbrauch versiebenfacht.

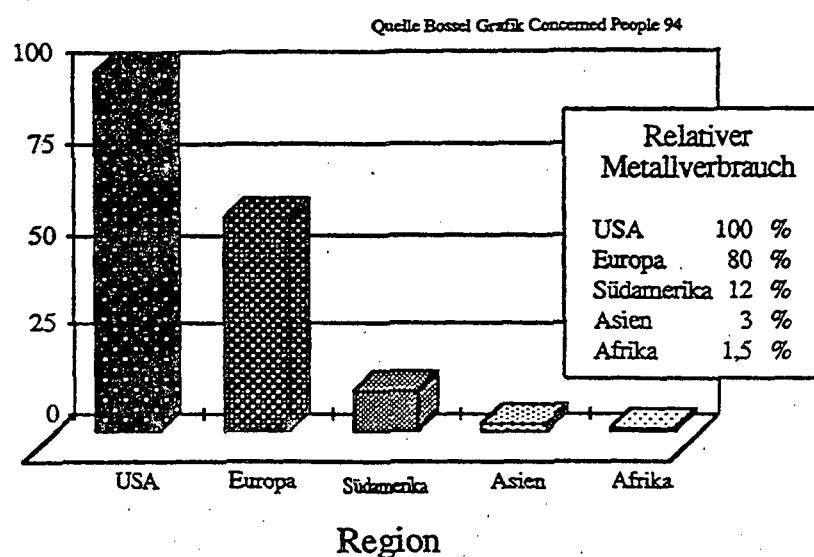
Der Begriff "Rohstoff" hat sich im Lauf der industriellen Entwicklungsgeschichte drastisch verändert: "Aus der kostbaren Materie wurde zunehmend ein alltäglicher Bedarfsartikel, über dessen Woher und Wohin kaum Gedanken verschwendet wurden."⁶

Würden unsere materiellen Standards für den Süden gelten, würde das zehnfache der fossilen Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) und etwa das zweihundertfache der Rohstoffe verbraucht! Mahbub UL HAQ, Sonderberater des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen (UNDP), ehemaliger Finanz- und Planungsminister in Pakistan, ließ anlässlich der RIO-Konferenz verlauten: "Wer die globalen Umweltprobleme lösen will, muß das Armutproblem lösen. Wenn die Armen, um zu überleben, weiter Wälder abholzen und ihre Natur ausbeuten, wird die daraus resultierende Verringerung der Weltsauerstoffreserven alle treffen. Übervölkerung und Überkonsum müssen wegen der immer kostbarer werdenden Ressourcen gleichrangig behandelt werden." WOHLMEYER erkennt klar diesen Konnex, wenn er "*vorbildhafte, globalisierungsfähige Strategien*" fordert, "die sich von der Landwirtschafts über die Energie-, Finanz-, Industrie- und Strukturpolitik bis in den Bildungs-, Gesundheits- und Sozialbereich erstrecken."⁷

⁶VETTERS (1992) S. 37.

⁷WOHLMEYER Heinrich (1992).

Abb.2: Metallverbrauch pro Kopf: zu hoch in den Industrieländern



1.2.1. Annäherung zum Produkt der Zukunft

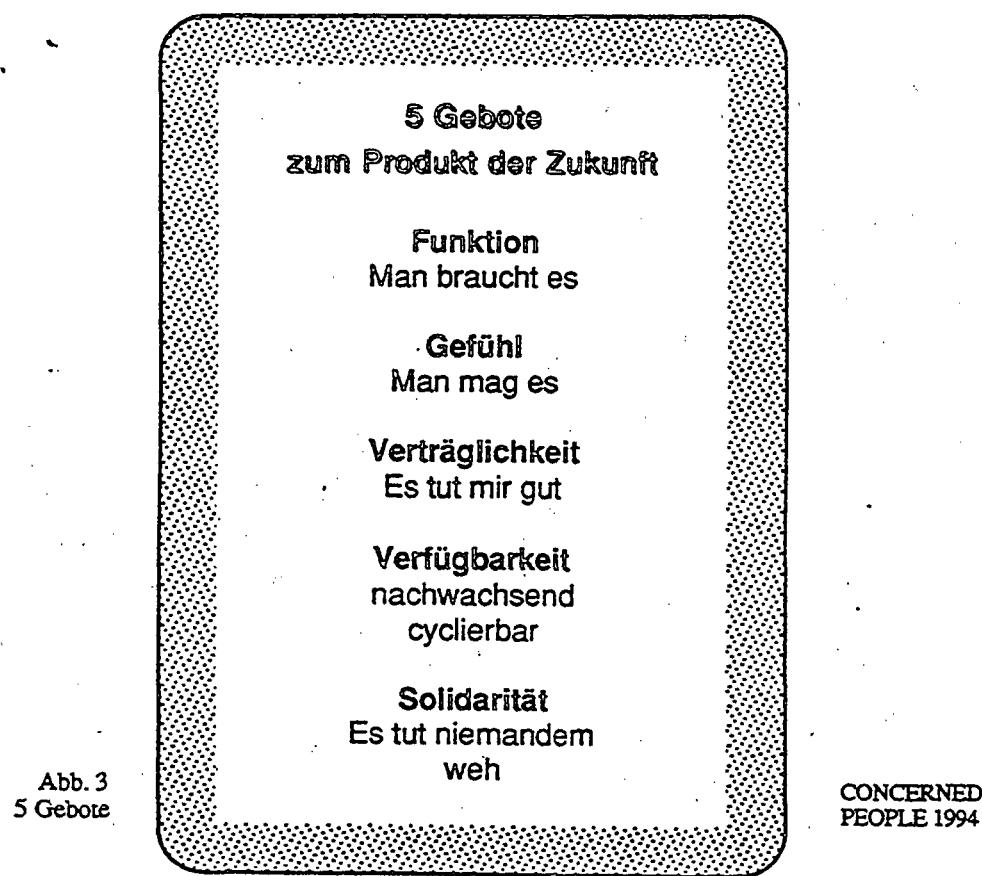
Verantwortungsvolle Szenarien für eine zukunftsverträgliche Entwicklung werden neben den notwendigen neuen technologiepolitischen Optionen in vermehrtem Maße wirtschafts-, sozial- und Entwicklungspolitische Dimensionen zu beachten haben. Beim Suchprozess zur Auffindung von Nachhaltigkeitsprinzipien für künftiges Wirtschaften muß deshalb auch der historische Weg der Industrieländer kritisch überprüft werden.

Es wird notwendig sein, *ein neues Wohlstandsmodell* zu entwerfen, das dieser und künftigen Generationen weltweit die Befriedigung von Grundbedürfnissen und eine chancengleiche Partizipation an den verfügbaren Ressourcen ermöglicht. Es geht dabei um die *Lebens- und Produktionswerterhaltung des Naturvermögens* und um die *Bewahrung und Wiederherstellung des sozialen Friedens* durch eine gerechte Verteilung der Gewinne aus dem Naturvermögen zwischen der Ersten, Zweiten und Dritten Welt und den Generationen, die nach uns kommen.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Ein solches Wohlstandsmodell wird etwa bisher unberücksichtigte Folgekosten in die Produktpreise einbeziehen, insbesondere für Energie, Rohstoffe und Abfallentsorgung; es wird die Notwendigkeit einer ökologischen Steuerreform überzeugend erörtern ebenso wie das Abschiednehmen von steuerlichen Vergünstigungen und (in)direkten Subventionen für umweltbelastende Aktivitäten.

In verkürzter Darstellung lassen sich zum Produkt der Zukunft 5 Gebote formulieren, die als Leitziele bei der ökologisch-sozialen Gestaltung dienen können.



Trotz vielfacher Bemühungen für einen ökologischen Strukturwandel fehlt heute noch eine Strategie, um die divergierenden Interessen und unterschiedlichen Handlungsansätze von Politik, Industrie, Gewerbe, Handel, Verbrauchern und Konsumenten zusammenzuführen.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Die Kluft zwischen grenzenloser Zukunftsgläubigkeit in technische Innovationen einerseits und fundamentaler Ablehnung des Industriestandpunktes bis hin zur Technikfeindlichkeit andererseits, verhindert momentan noch den Durchbruch von umweltgerechten und sozialverträglichen Produkten einer neuen Generation in vielen Bereichen unserer Industriekultur.

Innovationen für das Produkt der Zukunft richten sich dabei vorzugsweise nach den für manche Bereiche bereits ausgearbeiteten Kriterien von ECO-DESIGN (Environmental Conscious Product Development).⁸

Das Anliegen von ECODESIGN ist nach PAULA, durch Information, durch die Entwicklung von Kriterien und methodischen Ansätzen und durch Kooperationsmöglichkeiten den Betrieb bei der umweltbewußten Produktentwicklung zu unterstützen, wobei die ökologischen Wirkungen eines Produktes stets über seinen gesamten Lebenszyklus zu betrachten und zu bewerten sind.⁹

1.3. Ökologische Aufklärung ohne Selbsttäuschung

Lester BROWN, Direktor des Worldwatch-Instituts in Washington hat den Begriff der "ökologischen Revolution" geprägt. Damit wird jener Weg bezeichnet, auf dem weltweite Umweltinitiativen die Erde vor weiterer Zerstörung in Schutz nehmen. Das Konzept vom "sustainable development" besagt, daß eine Gesellschaft nur dann überlebensfähig ist, wenn sie langfristig wirtschaftet. Das heißt, "es kommt darauf an, die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation zu befriedigen, ohne die Entwicklungschancen der zukünftigen Generation zu schmälern" (Brundtland Report).

Es geht heute um eine neue Entwicklung, eine außergewöhnliche Beschleunigung des sozialen und gesellschaftlichen Wandels, um eine Verdichtung von Geschichte. Verdichtung von Geschichte, das heißt: die notwendigen Veränderungen müßten in wenigen Jahrzehnten erfolgreich umgesetzt worden sein. Der ökologische Strukturwandel steht erst am Anfang. Er ist dringlich. Er muß als Chefsache in Wirtschaft und Politik begriffen werden.

⁸ECODESIGN ist eine internationale erfolgreiche Initiative nach dem Motto "von einer nachträglichen Beseitigung von Umweltproblemen zu einer vorsorgenden, umweltbewußten Produktgestaltung", die in Österreich insbesonders vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, vom Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie und der TU Graz (Institut für Verfahrenstechnik) ausgeht.

⁹PAULA Michael (1992) S. 7.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Doch die Zukunft, so viel sei hier vorweggenommen, liegt vorzugsweise nicht im Kommunizieren von Rezepten rein technischer Natur, sondern in erlernbaren Veränderungen der Natur des Menschen selbst. Es liegt eine große Gefahr darin, daß sich die "Explosion der Ansprüche" auch mit den Methoden modernen Öko-Marketings erfolgreich transportieren läßt,¹⁰ ohne wirklich strukturelle Innovationen bewirkt zu haben.

Andererseits wird mit extremen und allzu grundsätzlichen Forderungen wenig erreicht. Wohlstanderhaltende Optionen und marktwirtschaftliche Effizienz sind Leitgedanken, die auch im Konzept der Sanften Chemie ihren festen Platz haben.

Aufklären im Sinne einer ökologisch-wahrhaften Bewußtseinsbildung muß dennoch bedeuten, daß die Unzulänglichkeit mancher aktueller Lösungskonzepte (Pseudo-Recyclingaktivitäten, end-of-pipe-Technologien, Erzeugung hoher Mengen vom belastetem Klärschlamm usw.) unmißverständlich angesprochen und durch eine tiefergehende Korrektur überholt wird. Diese Schadstoffpolitik war notwendig, und sie war auch erfolgreich. Sie hat hohe Kosten verursacht. Sie konnte aber nicht verhindern, daß der Zustand der Ökosphäre immer bedrohlicher wurde.¹¹

Der Status der überforderten Selbstreinigungskräfte in den verschiedenen Umweltmedien verlangt heute noch mehr als bisher *neue integrative Strategien*, die eine *drastische Verringerung der anthropogenen Stoff- und Energieflüsse* bewirken. Gleichzeitig müssen nach HEYDEMANN die Lebensbedingungen der Menschen und der Natur in Richtung eines bestimmten optimalen Niveaus entwickelt und stabilisiert werden.¹² Eine nachhaltige Wirtschaft sollte geeignet sein, die natürlichen Grundlagen des Lebens zu regenerieren. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es einer wesentlichen *Umgestaltung der Stoffwirtschaft* und der damit zusammenhängenden Gerätetechnik.

Die Umsetzung dieses Konzeptes benötigt ein Netzwerk von Quer- und Vordenkern, die das herrschende Paradigma des reichen Viertels der Welt hinterfragen, die jedoch gleichzeitig genügend Mut zu Visionen haben und vorbildliche Modellbetriebe und Produkte mit ökologischem Design entwickeln.

¹⁰ ADLER Adam, MACKWITZ Hanswerner: Ökotricks und Bio-Schwindel, Orae Wien (1991).

¹¹ SCHMIDT-BLEEK (1994) S. 15.

¹² HEYDEMANN, Bernd, Minister für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein: "Naturstrategien - Leitbild einer neuen Stoffwirtschaft" in UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox 5 (6) 301-301 (1993).

2. Die Entwicklung der stofflichen Produktionsdynamik

Das Leben der Menschen auf dem Planeten Erde ist ohne Austausch von Stoffen nicht denkbar. Diese Realität ist aber durch Menge und Art der Stoffe, die durch menschliches Handeln in die Mitwelt¹³ gelangen, zu einem fundamentalen Problem der industrialisierten Welt geworden.

Infolge des expansiven Wirtschaftswachstums haben die anthropogenen Stoffströme mengen- und wirkungsmäßig so zugenommen, daß sie die natürlichen Stoffkreisläufe überlagern und stören.

Mit Beginn der Industrialisierung vor 200 Jahren verschwanden soziale und kulturelle Restriktionen, die bis dahin die wirtschaftliche Entwicklung behindert oder unterbunden hatten. Naturwissenschaft, Technik und Industrie expandierten seit 1900 so rasant, daß eine Periode des Energie- und Stoffüberflusses eingeleitet wurde, die nach heutigem Wissen keine dauerhafte Perspektive bietet.¹⁴

Als Mitverursacher der Mitweltgefährdung steht im Zentrum der ökopolitischen Diskussion die klassische industrielle Chemie. Nach FISCHER zeichnet sich konventionelle Stoffproduktion aus durch "ein Maximum an Eingriffen in die molekulare Integrität der vorgefundenen Stoffe, wobei unter hohem Energieaufwand in störfallriskanten Anlagen und unter Hinterlassung erheblicher Mengen an betriebsspezifischen Sonderabfällen meist aus petrochemischen Edukten in der Regel naturfremde Strukturen aufgebaut werden".¹⁵

Eine Vielzahl der so erzeugten Substanzen sind toxisch, persistent und reichern sich in der Biosphäre an. Wir erkennen heute, daß wir für den chemischen Fortschritt zur scheinbaren Ermöglichung von Lebensqualität (Konsumqualität) einen hohen (Entropie-)Preis bezahlen müssen.

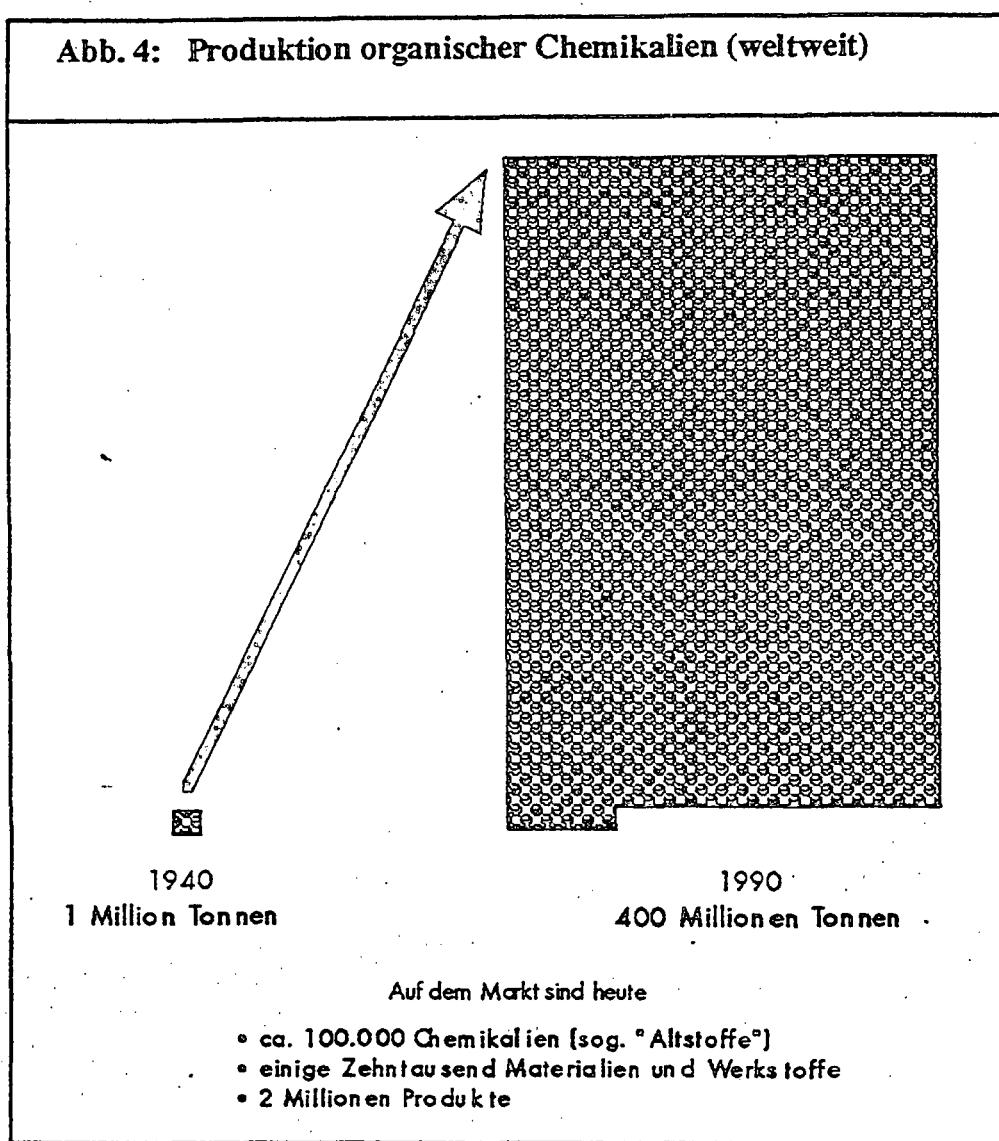
¹³ Anstelle des geläufigen Begriffes "Umwelt" bevorzugen die Autoren der Studie wo es aus sprachlicher Sicht gerechtfertigt erscheint ist und dem Verständnis nicht schadet, den weniger anthropozentrisch geprägten Begriff "Mitwelt".

¹⁴ Seit 1900 ist der Verbrauch an fossilen Brennstoffen um das Dreißigfache, die industrielle Produktion um das Fünfzigfache gestiegen. Vier Fünftel der Expansion fanden nach 1950 statt. Allein der Verbrauch an organischen Chemikalien hat sich zwischen 1940 und 1980 etwa vervierzigfacht. Siehe dazu auch SIEFERELE, R.P.: Chemie und Umwelt - Versuch einer historischen Selbstbestimmung, in: HELD, M. (Hrsg.), Chemiepolitik: Gespräch über eine neue Kontroverse, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim (1988), S. 27.

¹⁵ FISCHER (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Abb. 4: Produktion organischer Chemikalien (weltweit)



Quelle: AMECKE/ GRIESHAMMER 1993 Grafik Concerned People 1994

2.1. Anlagensicherheit

Nach der aufsehenerregenden Unfallserie beim Chemiekonzern HOECHST AG in Frankfurt am Main im Februar und März 1993 wurde das Thema "Sicherheit in der Chemieindustrie" im August 1993 erneut öffentlich debattiert. Anlaßfall war der Austritt von sechs Tonnen Phosgen aus der Musteranlage der Firma DOW CHEMICAL in Stade bei Hamburg.¹⁶

¹⁶ Phosgen, stark giftiges, farbloses, heuartig riechendes Gas. Phosgen wurde als "Grünkreuz" im ersten Weltkrieg von den Deutschen eingesetzt. Mit Wasser entsteht CO₂ und Salzsäure, seine Giftigkeit beruht auf der Protein-Deskarboxylierung. Toxisches Lungenödem bereits bei 1,25 - 2,5 ppm entsprechend 0,005 - 0,1 mg pro Liter. Tödliche Mengen können leicht unbemerkt eingeatmet werden. Verwendung: Vorprodukt für Farbstoffe, Kunststoffe, Herbizide, Pestizide und Pharmaka.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

DOW CHEMICAL, die "größte Chlorchemiefabrik Deutschlands" war erst 1992 als "sicherste Phosgen-Anlage der Welt" mit einem Kostenaufwand von 250 Mio DM (1,75 Mrd S) in Stade in Betrieb gegangen.

Bemerkenswert bei diesem sicherheitstechnischen Novum für die Polyurethanproduktion war die zusätzliche Errichtung eines glockenartigen stählernen Sicherheitscontainments. Mit dieser Schutzhülle sollte - ähnlich wie bei einem Kernreaktor - sichergestellt werden, "daß selbst unter ungünstigsten Bedingungen keine umweltrelevanten und gesundheitsbeeinträchtigenden Stoffe in die Umwelt frei gesetzt werden können".¹⁷ Als am 3. August 1993 unbemerkt von der hochmodernen Meßwarte sechs Tonnen hochtoxisches Phosgen aus einer nicht korrekt verschlossenen Druckleitung ins Freie gelangten, war es der Geruchswahrnehmung eines aufmerksamen Chemiearbeiters zu verdanken, daß das Leck entdeckt wurde. Damit hatte niemand gerechnet, denn "selbst bei einer hypothetischen Störung, mit der eine Freisetzung von Phosgen verbunden sein könnte, wird ein Phosgenaustritt in die Atmosphäre wirksam verhindert", hatten DOW-Ingenieure wenige Monate früher in einer Firmenbroschüre geäußert.

Außerhalb des Containments gab es keine Phosgenneßstellen. Wie DOW-Produktionsleiter Gerhard Schlecht nach dem Vorfall bemerkte, "war dieser Fall nach unserer Definition nicht vorgesehen". Tatsächlich ist mit der Begründung "technisches oder menschliches Versagen" niemandem wirklich gedient. Der regelmäßig zu beobachtende Reigen an Störfällen in der chemischen Industrie hat systematische Fehler als Ursachen.

Im klassisch-historischen Kontext hat die Störfallintensität damit zu tun, daß Stoffe hervorgebracht werden, die aufgrund ihrer extremen Gefährlichkeit technisch nicht beherrschbar sind. KRAUTTER erkennt in diesem Zusammenhang, daß radioaktive Elemente, Chlor, Phosgen oder dioxinträchtige Chlorchemikalien "durch noch so viele Ventile, Schrauben und Dichtungen nicht in den Griff zu bekommen" sind.¹⁸ Selbst die sicherheitstechnische Hochrüstung - wie im Fall DOW - stößt an die Grenze dessen, was technisch noch kontrollierbar wäre.

In Österreich ereignen sich in der Chemiebranche jährlich rund 5.500 Arbeitsunfälle. Davon wurden 1989 1.500 Arbeitsunfälle registriert, die direkt auf Schädigungen durch äußere chemische Einwirkungen zurückzuführen waren.

¹⁷KRAUTTER, Manfred: Wieviel Sicherheit leistet die Chemieindustrie" Ökologische Briefe Nr. 35 (1993) S. 13-14 zitiert nach DOW CHEMICAL: Firmenprospekt über die Phosgenanlage (1992).

¹⁸KRAUTTER, MANFRED (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Darunter waren 145 Vergiftungen sowie 93 Schädigungen durch Einatmen giftiger Stoffe. Für 19 Beschäftigte bedeutete dies den Tod.¹⁹

2.2. Alkali und Chlor: Der historische Zusammenhang

Aus historischer Sicht darf der Hinweis nicht fehlen, daß die heutige Chlor-industrie früher als Alkali-Industrie bezeichnet wurde. Im Vordergrund stand zunächst nicht die Gewinnung des aggressiven Kampfgases Chlor sondern der industrielle Bedarf an Alkali. Vor der Entwicklung der industriellen Chemie wurde der Alkalibedarf hauptsächlich durch Asche gedeckt. Das lateinische Wort "Pottasium" (Pottasche) für das Element Kalium deutet an, daß jener Bedarf vor der Einführung des Leblanc-Verfahrens (1775) noch auf Basis nachwachsender Rohstoffe zur Verfügung stand: Pottasche (Kaliumkarbonat) wurde durch Verbrennung von Pflanzen an Land, Soda (Natriumkarbonat) durch Verbrennen des natriumreichen Meertangs gewonnen, aber es gab und gibt auch natürliche Vorkommen (siehe Rohstoff-Dossier: Soda und Alkali).

Als die französische Revolution die damals verfügbaren Pottaschebestände für Schießpulver erschöpft hatte und der Sodanachschub aus Spanien über den Seeweg blockiert war, schrieb die Pariser Akademie der Wissenschaften einen Wettbewerb aus, um Soda aus dem reichlich vorhandenen Steinsalz herzustellen. Den Preis sicherte sich *Nicolas Leblanc* mit dem nach ihm benannten Verfahren.

Leblanc-Verfahren zur Sodagewinnung

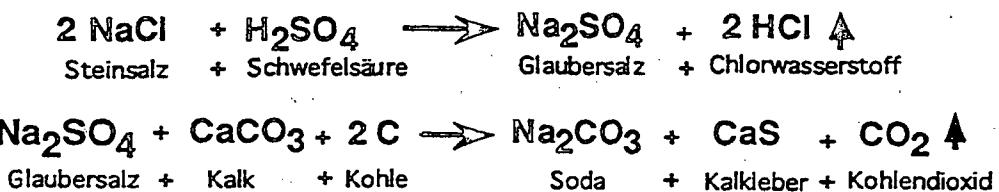


Abb. 5: Leblanc-Verfahren zur Sodagewinnung

¹⁹ÖGB-NACHRICHTENDIENST, Sonderausgabe Nummer 2667A, 2. November 1992. S.1.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Im ersten Verfahrensschritt wurde *Steinsalz* mit der bereits industriell verfügbaren Schwefelsäure zum *Glaubersalz* (Natriumsulfat) umgesetzt, das *Chlorid* des Natriums also in sein *Sulfat* verwandelt. Aus der Reaktionsgleichung (Pfeil nach oben) ist ersichtlich, daß dabei ein gasförmiges *Koppelprodukt* entsteht, welches in die Umgebungsluft emittiert wurde. Im konkreten Fall handelt es sich um *Chlorwasserstoff* (Salzsäure), wodurch in der Umgebung der Alkaliindustrie jahrzehntelang massive Umweltschäden verursacht wurden. Als mit dem Alkali Works Act 1864 in England Auflagen ergingen, wurde der gasförmige *Chlorwasserstoff* in der Folge nicht mehr über Dach abgelassen, sondern in einen "Vorfluter" eingeleitet, was naturgemäß Fischsterben zur Folge hatte.

Eindrucksvoll schildert HENSELING die Entwicklung von Rechtsprechung und Gewerbeordnung in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhundert.²⁰ Das Urteil des Deutschen Reichsgerichtes Berlin vom 22. Dezember 1897 wird als Meilenstein in der Umweltgesetzgebung bezeichnet. "Das Wasser eines öffentlichen wie eines Privatflusses ist die von der Natur gegebene Abflußrinne, nicht nur für das vom Boden selbst abfließende, sondern auch für das vielfach mit fremden Stoffen vermischt Wasser, welches zu Wirtschaftszwecken gedient hat und künstlich fortgeschafft werden muß." Kaum verwunderlich ist deshalb auch die im englischen Sprachraum noch heute übliche Kurzformel: "The common use of water is to dirty it."

Das Lehrstück des Leblanc-Verfahren scheint symptomatisch auch für spätere Fehlentwicklungen in der chemischen Industrie. Umweltprobleme auf dieser stofflichen Ebene sind durch emissionsseitige Maßnahmen (end of the pipe) nicht zu lösen, sondern nur durch einen anderen Prozeß.

²⁰HENSELING (1992).

Das Koppelprodukt-Dilemma der Alkali-Industrie der ersten Generation wurde schließlich durch den belgischen Chemiker *Ernst Solvay* mit der Erfindung des nach Ihm benannten Verfahrens zur *Sodagewinnung aus Kochsalz* zumindest vorübergehend entschärft.

Solvay-Verfahren zur Sodagewinnung



Abb. 6: Solvay-Verfahren zur Sodagewinnung

Auch dieses Verfahren erzeugt ein unerwünschtes Kuppel-Produkt, nämlich das pflanzenschädliche *Kalziumchlorid*.²¹

Die Alkaliindustrie von heute konzentriert sich nur zum geringen Teil auf die Erzeugung von Soda, sie produziert vorwiegend die chemisch wesentlich aggressivere und daher in vielen industriellen Anwendungen auch reaktionsfreudigere *Natronlauge* (Natriumhydroxid) - und zwar mit über das elektrochemische Verfahren der *Chloralkalielektrolyse*. Dafür wird außerordentlich viel Energie benötigt.²²

²¹ In einem österreichischen Betrieb des vom Erfinder gegründeten Solvay-Konzerns am Standort Ebensee in Oberösterreich entläßt man das Koppelprodukt Calzumchlorid in traditioneller Weise ins Wasser, wodurch die Salzfracht des Traunsees in einem nicht unerheblichen Ausmaß erhöht wird.

²²Um 1 kg Chlor und 1,1 kg Natronlauge zu erzeugen, ist vergleichsweise die Energiemenge nötig, die sieben Heißlüfter von je 1000 Watt in zwei Stunden verbrauchen. Der jährliche Primärenergiebedarf für die Chloralkalielektrolyse in Deutschland entspricht etwa 3 Millionen t SKE oder 6 Mio t Braunkohle. Jährliche Herstellungsmenge: 3,5 Mio t Chlor!

In Österreich konnte sich der Chlor- und PVC-Hersteller, die Fa. SOLVAY in Hallein mit der SAFE (Salzburger Landeselektrizitätsgesellschaft) Strompreise aushandeln, die sogar vom Rechnungshof (folgenlos) gerügt wurden. "Da es sich um einen besonders stromintensiven Großbetrieb mit einem jährlichen Strombedarf von 170 Mio. Kilowattstunden handelt, hat die SAFE jedes Jahr einen Mindererlös zwischen 25 und 33 Mio. Schilling zu tragen", verlautete im Rechnungshofbericht vom Herbst 1989.

Alkali-Elektrolyse

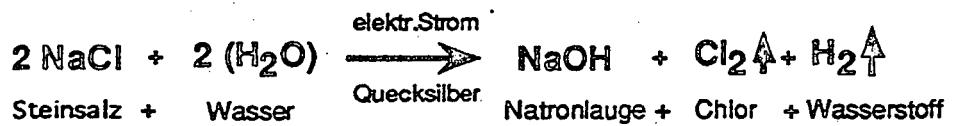


Abb. 7: Alkali-Elektrolyse

1890 begann die Produktion von Chlor und Kalilauge (bzw. Natronlauge) nach einem neuen, äußerst streng geheim gehaltenen Verfahren bei der Chemischen Fabrik GRIESHEIM ELEKTRON AG bei Frankfurt.

Die Elektrolyse wurde damals unter prekären Arbeitsbedingungen durchgeführt. In der Zersetzungshalle standen die "Bäder", schmiedeeiserne Kästen, 2 m lang, 2 m breit und 1 m hoch. Darin befanden sich eingetaucht mehrere Zellen von etwa 0,5 Kubikmeter, schmiedeeiserne Gerippe mit Zementwänden und gußeisernen Deckeln. Die Wände wirkten als Kathoden (Minuspole), als Anode (Pluspol) waren an den Deckeln Kohlenstäbe angebracht, die in das Bad eintauchten. Durch das Anlegen einer hohen elektrische Gleichspannung zersetzte sich die Salzlösung, an den Anoden bildeten sich *Chlor* und *chlororganische Zersetzungsprodukte* aus der Kohleelektrode, an den Kathoden eine ätzalkalihaltige Lauge. Das aggressive, chemische Kampfgas Chlor wurde durch Glas- und Bleiröhren abgesaugt und in Bleikammern geleitet, deren Boden mit Ätzkalk bedeckt war.

Das in der Tat gravierende Gesundheitsproblem waren nicht nur die Chlor-Dämpfe, sondern auch hochtoxische *halogenorganische* Gifte, die sich ständig an den sich abnutzenden Kohleelektroden anreicherten. Die Arbeiter wurden von "Pocken" befallen, sie litten unter akuter und chronischer *Chlorakne*, einem schmerzhaften, eitrigen Hautausschlag (Furunkel und Abszesse) oft am ganzen Körper, der auf einer massiven Überforderung des Immunsystems beruht. Dazu kamen noch Schlafsucht, Schwäche, Appetitlosigkeit, Libidoverlust und Abmagerung. Und als häufige Todesursache Krebs. Später sollte sich herausstellen, daß diese Symptome immer dann auftreten, wenn Menschen mit den *chlororganischen* Stoffen und ihren häufig unvermeidbaren Neben- und Zersetzungsprodukten, den *polychlorierten Aromaten*, den *Dioxinen* und *Furanen*, zu tun bekamen.

Von drei möglichen Verfahrensalternativen der Chloralkalielektrolyse werden in Österreich an den beiden Produktionsstandorten Brückl und Hallein nur das älteste Verfahren, das *Amalgam*-Verfahren eingesetzt, an dem an einer Graphit- oder Titan-Anode aus einer Kochsalzlösung gasförmiges Chlor abgezogen wird, während sich an der Quecksilberanode eine Natrium-Quecksilber-Verbindung abscheidet (*Amalgam*), das dann in einem zweiten Schritt in einem Amalgam-Zersetzer zu *Natronlauge* und *Wasserstoff* aufspaltet.

Beim *Amalgamverfahren* entstehen auch die meisten Abfallprobleme. Es kommt ständig zu Quecksilberverlusten (ca. 20 Gramm Quecksilber pro Tonne Chlor), außerdem kann sich hochexplosives *Chlor-Knallgas* (eine Mischung von Chlor und Wasserstoff) bilden.

In Japan und anderen Ländern wurde aus Gründen des Umweltschutzes die Quecksilberelektrolyse auf das *Diaphragma-Verfahren* umgerüstet. Dabei wird die Elektrolysezelle durch eine für Wasser undurchlässige aber ionenleitende Membran in zwei Räume geteilt. Im Anodenraum wird an einer Titan-Elektrode das Chlor abgezogen. Die verbleibenden Natriumionen können durch die Membran diffundieren und danach gemeinsam mit den Hydroxyd-Ionen als *Natronlauge* gewonnen werden, während an der Stahlelektrode der Wasserstoff entsteht.

2.3. Chlorchemie, das Jahrtausendproblem

Die Autoren halten es für eine industriepolitische Fehleinschätzung an, daß der Verbrauch jenes chemischen Grundstoffes zum Maßstab für den Entwicklungsstand der chemischen Industrie schlechthin ausgelobt wurde. Nicht nur elementar, sondern auch in seinen Folgeprodukten ist Chlor naturfremd, toxisch und mitweltgefährdend, sodaß damit eine kaum überblickbare Fülle von irreversiblen Umwelt- und Gesundheitsschäden in die Welt gesetzt wird.

Selbst im internationalen ökologischen Diskurs, in Fach- und Wirtschaftsmedien der Chemischen Industrie ist die Chlorchemie ins Schußfeld geraten. Die Bemühungen, nun auch in der Natur nach Chlorverbindungen zu suchen, führte natürlich zu deren Entdeckung, doch ist deren mengenmäßige Bedeutung im Vergleich zu den Freisetzung der chemischen Industrie für die Mitwelt problemlos.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Weltweit geraten Chlororganika in Verruf, versuchen Produzenten und Verwender zunehmend ohne die Primär- und Folgeprodukte dieser Industrie auszukommen. Auf der umweltpolitischen Prioritätenliste stehen Entgiftungsmaßnahmen innerhalb dieses Chemikalienbereiches an höchst prominenter Stelle. Die Einsicht, daß die Wirtschaft dort ihre Grenzen finden muß, wo die Lebensgrundlagen der Menschen oder der Mensch selbst vorhersehbar geschädigt werden, gewinnt täglich an Bedeutung.

Die Chlorchemie gilt nicht nur als Hauptverursacher des Dioxinproblems, die gesamte Stoffgruppe der Chlororganika²³ steht außerhalb der vorgegebenen evolutionären Stoffkreisläufe.²⁴

2.3.1. Aufschlüsselung und Umbau der Chlorchemie

Etwa ein Drittel aller Zwischen- und Endprodukte der Chemischen Industrie sind chlorierte Kohlenwasserstoffverbindungen. Der größte Teil der Stoffe, die Kohlenstoff und Chlor im selben Molekül enthalten, wird noch immer als Massenchemikalie vermarktet. In Deutschland wird fast eine Million Tonnen Chlor bei die Herstellung von PVC und anderen chlorhaltigen Kunststoffen "entsorgt". Umweltrelevant sind auch jene Chemikalien, sie selbst keine Chlor-Kohlenstoff-Bindung aufweisen, die aber über Chlorträger hergestellt wurden (Koppelproduktion).

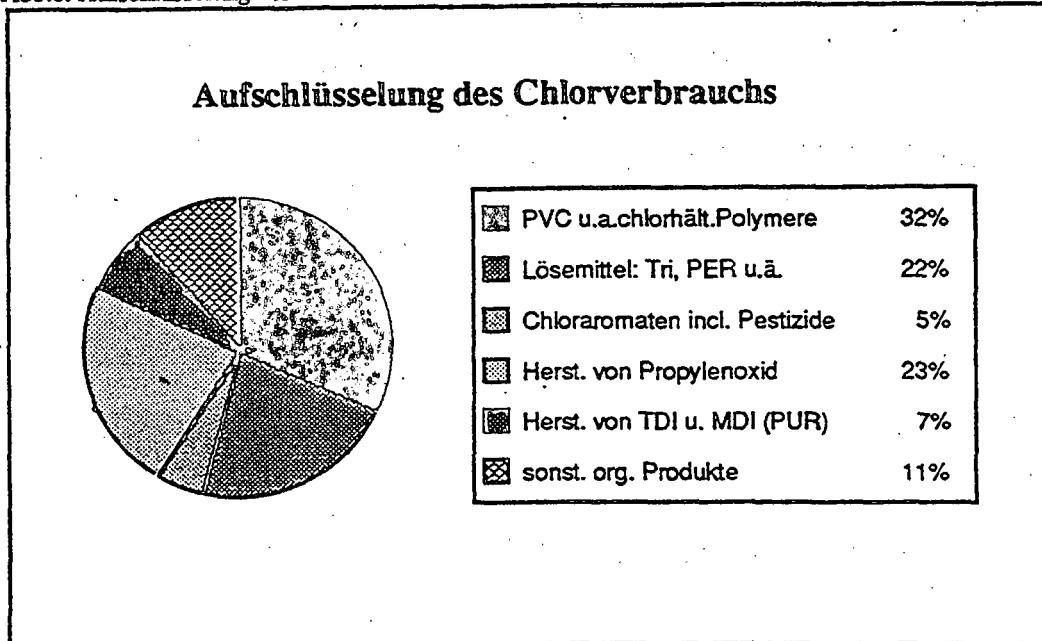
Das meiste Chlor davon verschlingt die Herstellung von Propylenoxid,²⁵ gefolgt von ca. 200.000 t Chlor für die Isocyanate TDI (Toluylendiisocyanat) und MDI (Methyldiisocyanat). Deren Haupteinsatzgebiete sind die weit verbreiteten Kunststoffe auf Basis von Polyurethan.

²³„So taktlos das Prinzip der Sippenhaftung ist, wenn man es auf Menschen anwendet, was auch heute noch vielerorts geschieht, so nützlich kann es sein, wenn man es als eine - wenn auch nicht die einzige - Richtschnur bei der Untersuchung vor allem der alten Stoffe anwendet“. Diese Aussage des Präsidenten des Deutschen Umweltbundesamtes in Berlin, Prof. Heinrich von Lersner, am Symposium "Chemie-Mensch-Umwelt" des Gottlieb Duttweiler Instituts in Zürich (1980) hat bis zum heutigen Tag nichts von ihrer treffenden Aktualität eingebüßt.

²⁴Die Dioxin- und Furananalysen in den Sedimentkernen von Flüssen und Seen bestätigen eindeutig die Relevanz der Chlorchemie für die industrielle Provenienz der Ultradifte. Der große Sprung von 40 aus 3000 Nanogramm pro Kilogramm Sediment (1990) deckt sich zeitgleich mit dem Beginn der Chloralkali-elektrolyse und der weltweit beginnenden Produktion chloraromatischer Verbindungen um 1940.

²⁵Auch noch heute wird ein Großteil des Propylenoxids nach dem klassischen Chlorhydrin Verfahren hergestellt: Durch Hydrolyse von Chlor entsteht dabei neben Salzsäure die hypochlorige Säure, die an Propylen addiert wird. Mit Kalkmilch wird das so entstandene Chlorhydrin zu Propylenoxid umgesetzt und die Säure neutralisiert. Nebenprodukte: Calciumchlorid (Salzfracht) sowie u.a. 1,2-Dichlorpropan. Dabei wären Alternativen wie der Oxiran-Prozess (Halcon-Verfahren) über Hydroperoxide und Molybdän-Katalyse oder die Propen-Direktoxidation analog der entsprechenden Ethylenoxid-Synthese durchaus verfügbar.

Abb.8: Aufschlüsselung des Chlorverbrauchs.



Grafik CONCERNED PEOPLE 1994

Es ist notwendig geworden, daß wir uns über den Ausnahmecharakter der historischen Situation klar werden, in die wir seit Beginn der Chlorchemie geraten sind, um die Ernsthaftigkeit der angesprochenen Probleme akzeptieren zu können. Daraus folgt der wichtige chemiepolitische Leitsatz:

Der Chlorverbrauch bzw. der Umgang mit halogenierten organischen Verbindungen kann heute nicht mehr als Maß für den industriellen Fortschritt eines Landes gelten. Vielmehr wird die Geschwindigkeit, mit der ein Land seinen Chlorverbrauch senken und die gefährlichen Chlorverbindungen durch "Produkte mit ökologischem Design" ersetzt, ein Maß für den umweltpolitischen Fortschritt in diesem Lande sein.

Die ökologischen Grundsätze nach Vorsorge, Vermeidung und Verwertung im System des Wirtschaftskreislaufs sind zwar unumstritten. Umstritten sind allerdings die Fragen:

- wie und in welchem Umfang in die chemische Produktion und Anwendung eingegriffen werden soll,
- welche ökonomischen Steuerungsinstrumente und
- welche rechtlichen Sanktionsmechanismen zur Entgiftung in unserem demokratischen Gemeinwesen zur Anwendung gelangen können.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Zu diesen Fragen lieferte die Prognos-Studie "Chemiestandort Hessen" bereits 1986 den wesentlichen strategischen Ansatz. Im Kern kommt diese Studie (sie wurde vom damaligen hessischen Umweltminister Joschka Fischer in Auftrag gegeben) zu der Schlußfolgerung: "Die bundesdeutsche Chemieindustrie könnte die Belastung der Umwelt mit chlorierten Kohlenwasserstoffen und Schwermetallen innerhalb von fünf Jahren um 70 % reduzieren, wenn sie für den Umweltschutz nur ein Umsatzprozent mehr ausgeben würde als geplant".

Auch die Einführung einer Chemiesteuer, wie sie der Bund für Umwelt Naturschutz Deutschland (BUND) als erster präsentiert hat, paßt durchaus in diesen chemiepolitischen Rahmen. Mit diesem Instrument (das sich auf einfache Weise berechnen läßt), soll der Gebrauch giftiger und langlebiger Stoffe "bestraft", Recycling belohnt und ein Anreiz zur Vermeidung geschaffen werden. Dadurch würde beispielsweise der Preis von Perchlöräthylen um rund 50 % und der von PVC um 100% steigen, der Preis von Cadmiumfarben würde sich verfünffachen.

Ob allerdings marktwirtschaftliche Mechanismen ausreichen, um die Belastung durch organische Halogenverbindungen rechtzeitig und wirksam zu vermindern, muß aus heutiger Sicht bezweifelt werden. Auch chemiepolitische Schritte bezüglich Entlastung der Ökosysteme von halogenorganischen Stoffen im Rahmen des Chemikalienrechtes sind in den Industrieländern eher zögerlich in Angriff genommen worden.

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Einsatzgebiete, Ersatzstoffe und -technologien zum Thema CKW/FCKW.

Einsatzgebiete und Alternativen halogenierter Kohlenwasserstoffe

Einsatzgebiet	Betroffene Stoffe	Alternativen
Chem. Reinigungen	Per, FCKW 113	Miele-Kreussler-System (MKS), EcoClean, KWL(?)
Metallbearbeitung	1.1.1-Tri, PER, Methylenchlorid, Tri, FCKW 113	Wäßrige Systeme, mechanische Verfahren, nichthalogenierte Lösemittel
Elektronikbranche	FCKW 113	Schutzgas-Löten, Citrus-Terpene
Kunststoffverschäumung	FCKW 11, H-FCKW	altern. Dämmstoffe, Vakuum-Isolation, andere Treibmittel
Kühltechnik	FCKW 11,12, H-FCKW	Ammoniak, Butan, Absorptionssysteme, Wasser, Adsorption, Stirling, Gasexp., Kaltgas
Aerosole	H-FCKW 22	Zerstäuber, Pumpe
Feuerlöschgeräte	Halone	CO ₂ , Pulverlöscher, Inergen

Tab 1: Einsatzgeb. u. Alternat. halog. Kohlenwasserstoffe © CP 1994

Es ist verständlich, daß Hersteller technischer Produkte die Beibehaltung bestehender Produktionsverfahren und damit den Austausch von Einzelstoffen bevorzugen würden. In der CKW/FCKW-Diskussion geht es aber nicht nur um die Herstellerseite; es müssen auch die Anwender einbezogen werden. Die Sinnhaftigkeit von Produkten steht heute genauso auf dem Prüfstand wie die Entwicklung alternativer Technologien und Produktionsverfahren.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Wir sind uns bewußt, daß die Umsetzung der geforderten Maßnahmen nicht von einem Tag auf den anderen erfolgen kann. Da aber die Diskussion über die Gefährlichkeit von CKW und FCKW schon über zwanzig Jahre andauert, wäre es nun an der Zeit zu handeln. Dies betrifft ebenso die Politik, die durch gesetzliche Vorgaben den künftigen Weg der österreichischen Chemiepolitik bestimmt. Wir plädieren dafür, daß in Zukunft das Kostenargument für den Einsatz umweltgefährlicher Stoffe in den Hintergrund tritt. Die betriebswirtschaftlichen Vorteile machen sich im Gegensatz zu den volkswirtschaftlichen Folgekosten geradezu winzig aus. Neben der Politik betrifft es aber auch die Wirtschaft und die Industrie, die nicht auf gesetzliche Verbote warten, sondern vermehrt zur Eigeninitiative greifen sollte.

2.3.2. Umweltoorientierte Optimierung der Chemischen Industrie

Die Chemische Industrie unternimmt gegenwärtig große Anstrengungen hinsichtlich der Internationalisierung ihrer Aktivitäten. Sie begründet die Auslagerung von Produktionskapazitäten in Schwellenländer vielfach mit der Verschärfung von Umweltgesetzen (z.B. ChemG) und den langen Genehmigungsverfahren. Dabei handelt es sich häufig um eine Reaktion auf die fehlende Akzeptanz dieser Technologien in den Industrieländern.²⁶

Andererseits profitiert auch die Chemische Industrie vom Umweltschutz, denn umwelttechnische Anforderungen sind häufig auf das Schließen von Stoffkreisläufen und auf Energieeinsparung gerichtet. So wurden in den letzten Jahren eine große Zahl von produktionsintegrierten umweltbezogene Maßnahmen realisiert, eine Auswahl davon findet sich in der folgenden Tabelle.

²⁶BLAZEJCZAK Jürgen (1992) S.100.

Tab. 2: **Produktionsintegrierte umweltbezogene Maßnahmen in der Chemischen Industrie**

Schwefelsäure aus Abgasen der Zellwolleproduktion

Bei der Herstellung von Faserstoffen nach dem Viskoseverfahren entstehen toxische und übelriechende schwefelhaltige Abgase. Daher muß an den Spinnstraßen eine hohe Luftmenge (ca. 235.000 m³/h bei einer Produktionsmenge von 55.000 t Zellwolle/Jahr) abgesaugt werden. Die Abgasentsorgung scheiterte am Volumenproblem. Seit gut 10 Jahren werden die schwefelhaltigen Abgase der Zellwollproduktion (Hoechst AG) einer benachbarten Schwefelsäureanlage (Süd-Chemie AG) zugeführt und dort als Rohstoff bzw. Verbrennungsluft eingesetzt. Die neue Verfahrenskonzeption erforderte wesentliche Veränderungen und Neuentwicklungen in beiden Anlagen (Gesamtinvestitionen von 25 Mio. DM; u.a. Kapselung der Spinnmaschinen und neuartige Absaugung, dadurch Reduktion des Abgasstroms von 235.000 m³/h auf 20.000 m³/h) und ermöglicht eine verbesserte Rückgewinnung des Schwefelkohlenstoffs im Viskosevertrieb. Die gefundene Lösung kommt ohne zusätzlichen Energiebedarf aus. Neue Abfallstoffe fallen nicht an. Aus dem Abwasser werden 37.000 t Natriumsulfat/Jahr zurückgewonnen.

Herstellung von Polypropylen (Massenkunststoff)

Bisher war keine vollständige Lösemittelrückgewinnung möglich und eine aufwendige Nachbehandlung der Abluft erforderlich. Ein neues, erst nach Verfügbarkeit neuer leistungsfähiger Katalysatoren anwendbares Verfahren (u.a. höherer Druck) vermeidet Lösemittelsemissionen in der Abluft und verursacht weit weniger Abwasser, Roh- und Reststoffe. Durch die Verfahrensumstellung konnte der Rohstoffeinsatz für 1000 kg Produkt von 1185 auf 1013 kg gesenkt werden.

Kernchlorierung von Toluol
(Vorprodukt u.a. für Pflanzenschutzmittel, Farbstoffe u. Pharmazeutika)

Durch andere Struktur der Katalysatorzugaben, der Katalysatormenge und der Reaktionstemperatur konnte das Verhältnis der bei diesem Prozeß entstehenden Isomere para-Chlortoluol und ortho-Chlortoluol von 1:1 auf 2:1 verschoben, damit besser an die Struktur der Nachfrage angehährt und der Rohstoffeinsatz zur Beseitigung überschüssigen ortho-Chlortoluols gesenkt werden.

Herstellung von Naphtalinsulfonsäuren
(Ausgangsprodukt für hochelastische Kunststoffe z.B. für PKW-Stoßdämpfer)

Bisheriges Verfahren erzielte nur 45%ige Ausbeute, bezogen auf das eingesetzte Naphtalin, zudem fiel eine nicht rückgewinnbare und der Kläranlage zuzuführende verdünnte Schwefelsäure an. Durch ein neues Syntheseverfahren (Produktabtrennung durch Kristallisation anstelle von Aussalzen) wurde eine zweistellige Ausbeutesteigerung erreicht und die Recyclierung der anfallenden verdünnten Schwefelsäure möglich. Die CSB (Chem. Sauerstoffbedarf) Belastung der Kläranlage sank deutlich, die gesamte CSB-Abgabe des Werkes Leverkusen in den Vorfluter sank um ca. 8 Prozent. Mit der Ausbeutesteigerung wurde zugleich eine Senkung der Materialkosten erreicht.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Herstellung aromatischer Amine

(Zwischenprodukt u.a. für Farbstoffe, Pflanzenschutzmittel, Pharmazeutika)

Durch ein neues Verfahren (katalytische Reduktion anstelle von Reduktion mit Eisen) wird der Anfall von Eisenoxidschlamm vermieden, damit ein Deponieproblem gelöst, sowie - durch Wegfall der zuvor zur Reinigung des Schlammes erforderlichen Wasserdampfdestillation - Abwasser und Energie gespart. Das neue Verfahren senkt die Abwassermenge um rund 90 Prozent, die Abwasserbelastung und die gasförmigen Emissionen um 99 Prozent. Ferner entfällt die Entsorgung des Eisenoxidschlammes. Durch die Erhöhung der Ausbeute und Energieeinsparung können die Herstellkosten gesenkt werden.

Herstellung von Lichtschutzmitteln

(zur Umwandlung von polymerschädlichem Licht in Wärme)

Aufgrund geringer Nachfrage lohnt für diese Produkte keine maßgeschneiderte Anlage, sie werden als "Spezialitäten" in Auslastungstälern auf anderen Anlagen mit erheblichen Reststoff- und Entsorgungsproblemen hergestellt. Durch Verfahrensumstellung (Alkohol anstelle von Zink als Reduktionsmittel, Verwertung des Nebenproduktes Keton) konnte der problematische Zinküberschub (u.a. Entzündungsgefahr, Wärmeakkumulation, Energie-, Transport- und Deponeaufwand) vermieden werden. Der Prozeß ist einfach, die eingesetzten Rohmaterialien (Lau- gen) gehen überwiegend in den Kreislauf zurück, Zahl und Menge der Hilfschemikalien ist gering, der kleine Abwasserstrom ist unproblematisch, die festen Rückstände werden u.a. verbrannt. Die Einsparungen fangen die Kosten für Entwicklung und Teuerung auf. Der ökonomischen und ökologischen Optimierung der Spezialitätenherstellung sind allerdings anlagenbezogene Grenzen gesetzt.

Herstellung von Farbstoffen

Ein periodischer Wechsel der Strömungsrichtungen des Wassers beim Waschen von Filterküchen und die entsprechende Umrüstung der Waschaggregate bewirkte große Wassereinsparungen (ca. 50 Prozent) und damit Energieeinsparungen. Die Waschdauer wurde deutlich verkürzt und der Aufwand bei der Abwasserreinigung verringert (u.a. weniger Energie für Pump- u. Belüftungsanlagen). Da die kleinere Wassermenge nun mit erhöhter Schmutzbelastung anfällt, arbeitet zudem die Abwasserreinigung effizienter und mit weniger Hilfschemikalien.

Produktion von Rein-Naphtalin

Naphtalin fällt als Beiproduct im Steinkohlenteer bei der Kokserzeugung an. Früher wurde Rein-Naphtalin in mehrstufiger Prozeßführung durch physikalische und chemische Verfahren von störenden Beiproducten (z.B. hochviskose, produktbeladene Säureharze, die deponierte werden mußten, produktbeladene Abfallschwefelsäuren und verdünnte produktbeladene Natronlauge) befreit. Diese Abfallströme führten, vermischt mit naphtalinhaltigen Ölen, zu schlammigen Ablagerungen in der Kläranlage, die mit hohem Aufwand beseitigt werden mußten. Eine optimierte mehrstufige Kristallisation in neuen Produktionsanlagen ermöglicht bei computerunterstützter Steuerung von Kristallisationstemperatur und Mengenverhältnissen höhere Reinheiten bei besserer Ausbeute sowie gänzliche Vermeidung von Abfällen und Abwässern (die auftretenden Abluftströme werden der werkseigenen zentralen Abgasverbrennung zugeleitet). Die Entwicklung des neuen Verfahrens der Naphtalinproduktion hat angesichts steigender Deponiekosten auch einen Beitrag zur Stabilisierung der Steinkohleteerverarbeitung in Deutschland geleistet.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Herstellung des Vitamins Nikotinsäure (Wasserstoffüberträger z.B. bei Photosynthese, Atmungskette, Citronensäurezyklus)

Durch Verfahrensumstellung (Änderung des Verhältnisses der Einsatzstoffe sowie Temperatur- und Druckerhöhung bei kürzerer Verweilzeit) konnte die Ausbeute um mehr als 20 Prozent gesteigert werden, die anfallende, stark saure Mutterlauge in den Ansatz zurückgeführt und verschiedene Nebenprodukte beim Durchlauf durch den Reaktor abgebaut werden. Insgesamt wurde die Energiebilanz wesentlich verbessert, große Kühlwassermengen eingespart, die Luftschadstoffe um 90 Prozent und die Abwasserbelastung um 99 Prozent reduziert und dadurch die zentralen Entsorgungsanlagen entlastet.

Herstellung von Methionin (Tierfutterbestandteil)

Im bisherigen Sulfatverfahren sind pro kg Methionin ca. 1,5 kg organisch belastetes Natriumsulfat aufwendig zu entsorgen. Dies vermeidet bei besserer Wirtschaftlichkeit das modifizierte Syntheseverfahren (Neutralisation mit Kohlensäure anstelle von Schwefelsäure). Dieses geschlossene Kreislaufverfahren (Rückführung der Mutterlauge sowie der eingesetzten Hilfsstoffe Ammoniak, CO₂ und Kaliumcarbonat) verbessert die Produktionsausbeute, vermeidet Abwasserbelastung mit organisch verunreinigter Salzfracht und vermeidet bzw. verwertet Reststoffe.

Vitamin-Großproduktion, Zwischenprodukt "Etinol"

Zur Gewinnung von 1 kg Etinol mußten bisher ca. 3 kg Rohstoffe eingesetzt werden, von denen rund 2/3 als Abfälle verloren gingen. Die relativ junge Disziplin der chemischen Reaktionstechnik erlaubt es, durch genaue Dosierung des Reaktionspartners Lithiumacetylid und geeignete Wahl der Reaktionstemperatur die Bildung unlöslicher Harze weitgehend zu unterdrücken und die Ausbeute bezüglich Keton von 82 Prozent auf 95 Prozent und bezüglich Lithium von 68 auf 90 Prozent zu steigern. Die Lithiumrückgewinnung wird nun nicht mehr durch Harze behindert (Lithium-Einsparung von ca. 86 Prozent gegenüber dem alten Verfahren), der Verbrauch von Acetylenen wurde durch gesteigerte Rückgewinnung auf weniger als die Hälfte und von Ammoniak auf ein Viertel gesenkt, die Energierückgewinnung durch Abgasverbrennung (Ethen) möglich. Insgesamt wurde der Rohstoffeinsatz um 55 Prozent und die Abfallmenge um 95 Prozent reduziert. Dadurch verbesserte sich insgesamt auch die Wirtschaftlichkeit.

Herstellung von Methanol (u.a. als Kraftstoff und Proteinbasis) aus Abgas der Acetylenproduktion

Das überwiegend aus Wasserstoff und CO bestehende Abgas der Acetylenproduktion wurde früher nur energetisch genutzt, d.h., im Kraftwerk verfeuert. Seit 1988 werden mehr als 80 Prozent dieses Gases als Rohstoff einer Methanolanlage zugeführt und zu Methanol umgesetzt. Damit wird die zur Produktion von Methanol erforderliche Energie eingespart und die Emission von CO₂ und NO_x deutlich reduziert. Bei einer Anlage mit einer Tageskapazität von 740 t Methanol bedeutet das eine Energieeinsparung von 3.500 GJ und eine Vermeidung der Emission von ca. 600 t CO₂ und ca. 720 kg NO_x pro Tag.

Herstellung von Nitrobenzol (u.a. als Lösemittel und Rohstoff der Anilinherstellung)

Bei der Produktion von Nitrobenzol fällt bisher eine 70%ige Schwefelsäure als Gebrauchsäure an. (Nur) ein Teil dieser Säure kann nach Aufkonzentrieren in die Produktion zurückgeführt werden. Zugleich fällt nitrophenolhaltiges Abwasser an, das nicht der Kläranlage zugeleitet werden kann, dessen Verbrennung aber mit Sicherheitsproblemen verbunden ist. Ein neues Verfahren zur Gebrauchsäure-Konzentrierung (u.a. geringerer Druck) ermöglicht eine über 90%ige Rückführung von Benzol und NO_x. Eine weitere Verfahrensänderung ermöglicht die thermische Aufarbeitung des nitrophenolhaltigen Abwassers. So vorbehandeltes Abwasser kann problemlos in einer biologischen Kläranlage entsorgt werden.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

**Reststoffminderung bei der Produktion von Methacrylsäureestern
(Einsatz in Lack- und Beschichtungssystemen z.B. für Straßenmarkierungen)**

Bisher gehen beim Waschprozeß etwa 5 Prozent des Produkts verloren. Dies führt u.a. zu einer erheblichen Belastung des Prozeßabwassers. Eine Modifikation der Produktreinigung mit Rückführung der Lösemittelfaktion vermeidet den Anfall von Abwasser vollständig und erhöht die Produktionsausbeute um jene 5 Prozent, die zuvor beim Waschen verlorengingen. Als Abfall bleibt nur mehr der unlösliche zu deponierende Filterkuchen zurück (ca. 25 kg pro t Produkt). Eine weitere Abwasserbelastung entstand beim Betrieb der Vakuumpumpen der Destillationskolonnen. Die (zu verbrennenden) Abgase enthalten flüchtige Anteile des Hilfslösemittels Hexan. Der Verlust an Hilfslösemittel beträgt ca. 75kg pro t Produkt. Durch geeignete Abführung der Wärmeenergie der Vakuumpumpen (Kühlung) werden zugleich die z.T. im Betriebswasser gelösten organischen Dämpfe (ca. 68 Prozent des flüssigen Lösungsmittels Hexan) zurückgewonnen, die Abwasserbelastung verringert (ca. 50 kg pro t Produkt) und die Verbrennungsanlage entlastet.

Maleinsäureanhydrid (MSA) für Polyesterharze, Wasch- und Lackrohstoffe aus Abwasser der Phtaleinsäureanhydrid (PSAA)-Produktion

Im früheren Verfahren fiel ein konzentriertes, organisch beladenes Abwasser an, das mit erheblichem Energieaufwand verbrannt wurde. Seit über 15 Jahren wird dieses Waschwasser so aufgearbeitet, daß MSA als Wertprodukt gewonnen und das Wasser wieder in der Abgaswäsche der PSA-Anlage eingesetzt wird. Die organischen Rückstände werden unter Energienutzung in der PSA-Anlage verbrannt. Neben der zusätzlichen Wertstoffgewinnung von ca. 50kg MSA je t PSA arbeitet das PSA/MSA-Verfahren nahezu abwasserfrei.

Neue Produkte aus Abfallsäuren der Adipinsäureproduktion

Das anfallende Säuregemisch wird in eigenem Verfahren zu verkaufsfähigem Produkt veredelt (Säuerungsmittel u.a. für Klarspüler, Hilfsmittel für die Lackherstellung). Früher wurde das Säuregemisch gesammelt und unter Energieaufwand verbrannt. Heute wird zunächst Adipinsäure auskristallisiert und zurückgewonnen. Dann werden Salpetersäure und Wasser abgetrennt. Nach weiterer Behandlung und Desstillation wird das Säuregemisch als Verkaufware konfektioniert. Nur der bei der Destillation anfallende Rückstand wird verbrannt.

Soda-Herstellung

(für Glasfabrikation und Seifenherstellung) aus Rückständen der Caprolactam- Produktion

Die Rückstände der Caprolactam-Produktion wurden früher großteils verbrannt. Ein kleiner Rest löslicher Bestandteile war im Abwasser enthalten. Heute wird aus diesen Reststoffen unter Dampferzeugung hochreines Soda hergestellt. Zudem erzeugt der Abhitzekessel Hochdruckdampf, der auch anderen Produktionsstätten als Energie zur Verfügung steht.

Flüssiges Schwefeldioxid (Rohstoff der Schwefelsäureherstellung) aus Kraftwerksrauchgas

Für die BASF hätte eine herkömmliche Rauchgasentschwefelung einen jährlichen Gipsanfall von 35.000 t bedeutet, dessen Vermarktung, Zwischenlagerung oder Entsorgung (wegen der Wasserlöslichkeit) nicht ohne Probleme ist. Bei dem nun gewählten Rauchgasreinigungsverfahren entsteht dagegen unter Energieeinsatz Schwefeldioxid. Als Nebenprodukt entsteht ein Natriumsulfatstrom, der entsorgt werden muß. Nach Verflüssigung wird das Schwefeldioxid als Rohstoff für viele Produktionen eingesetzt. Das Kraftwerk wird somit auch stofflich in die Chemieproduktion integriert.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Klärschlammkonditionierung mit Abfallruß aus der Synthesegaserzeugung

Früher wurden Ruß und Asche aus der Synthesegaserzeugung unter Zusatz von Filtrationsmitteln und Kalkmilch aus dem Wasser entfernt. Der Filterkuchen mit ca. 80 Prozent Wasser, ca. 15 Prozent Ruß und Asche und ca. 5 Prozent Calciumhydroxid wurde deponiert. Neuerdings wird das rußhaltige Abwasser gemeinsam mit vorentwässertem Klärschlamm in die Kammerfilterpressen der BASF-Kläranlage geleitet. Dort ersetzt der Ruß teilweise die zur Konditionierung des Klärschlammfilterkuchens eingesetzte Ballastkohle. Der Filterkuchen wird getrocknet und im Kraftwerk unter Energienutzung verbrannt. Durch Einsparung der Rußfiltration werden Flockungsmittel und Kalkmilch eingespart. Die Calciumbelastung des Abwassers entfällt gänzlich. Die Menge des zu deponierenden Rußfilterkuchens wird durch Verbrennung um gut 85 Prozent verringert.

Rückgewinnung von Chlor aus der Isocyanatherstellung (Rohstoffe u.a. für Schaum- u. Klebstoffe, Lacke, Pflanzenschutzmittel)

Durch Chlorrückgewinnung aus dem anfallenden Chlorwasserstoff wird dessen Neutralisation mit Natronlauge oder Kalk und das salzhaltige Abwasser (von 1,35t je t Produktion) vermieden. Die Rückführungsmenge deckt dabei mit 97-98 Prozent fast den gesamten Chlorgasbedarf ab. Auch bei der Elektrolyse anfallender Wasserstoff ist wieder einsetzbar. Somit kann der gesamte Chlorwasserstoff nach Aufarbeitung wieder der Produktion zugeführt werden.

Rückgewinnung von Chrom aus Fällwässern

Bei der Herstellung pharmazeutischer Wirkstoffe (u.a. für Hormonpräparate) wird Chrom eingesetzt, das in gelöster Form im Prozeßwasser auftaucht. Es ist mittlerweile durch geeignete Ausgestaltung von Fälltemperatur, pH-Wert, Fällungsmittel (z.B. Natronlauge), Fälldauer, Verweilzeit und Durchmischung der Komponenten im Reaktor möglich, die Chromgehalte der Fällwässer um über 99 Prozent zu reduzieren. 1988 wurden (bei Schering) über 26 t Chrom zurückgewonnen, im Abwasser verblieben ca. 0,2 t.

Reststoffvermeidung und -verwertung aus der Titandioxidproduktion (Weißpigment)

Um reines Titandioxid zu gewinnen, muß man es von seinen Begleitstoffen trennen. Der Rohstoffaufschluß mit Schwefelsäure (Sulfatverfahren) führte früher zu großen Mengen verdünnter Abfallsäure (ursprünglich 8t pro t Titandioxid). Durch weitgehende Umstellung der Produktion auf das abfallarme Chlorid-Verfahren sowie Einsatz eines neuen Dünnsäureaufbereitungsverfahrens (Aufkonzentration und Wiedereinsatz der Abfallsäure beim Sulfatverfahren) wurde die Beendigung der Dünnsäureeinbringung in die Nordsee ab Ende 1989 möglich. Weitere Reststoffe werden in anderen Betrieben zu verkaufsfähiger Schwefelsäure umgesetzt.

Quelle: Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt a.M., VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf und Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (Hrsg.), Produktionsintegrierter Umweltschutz in der chemischen Industrie und BLAZEJCZAK Jürgen: Umweltschutz und Industriestandort: der Einfluß umweltbezogener Standortfaktoren auf Investitionsentscheidungen; Forschungsbericht 10103162 (Hg.: Umweltbundesamt Berlin) Berichte 1/93 (1992).²⁷

²⁷Weitere interessante und erfolgreiche Beispiele aus der chemisch-technologischen Praxis finden sich in Tagungsbänden der Veranstaltungsreihe "Strategien zur Kreislaufwirtschaft" z.B. "Umweltbewußte Produktgestaltung" (1.7.1992) oder "Ganzheitlicher Umweltschutz (29./30.9.1992) (Hg.: Franz MÖSER, Institut für Verfahrenstechnik, TU Graz).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Obwohl sich feststellen läßt, daß innerhalb des gesicherten Paradigmas der konventionellen Chemie ein hohes Maß an Bereitschaft aufscheint, technologische Optimierungen voranzutreiben und damit auch spürbare Emissionsminderungen zu bewirken, blieb die Tradition der Technik- und Stoffbewertung auf Schadensabwehr und Schadensbegrenzung hin ausgerichtet.

Der Diskurs der "Verträglichkeit", der "Zumutbarkeit" bzw. des "Restrisikos" dominiert die chemiepolitische Debatte seit Anfang der 70er Jahre. Kriterien für "positive Umwelteinflüsse" durch chemische Technologieanwendungen wurden bisher noch kaum formuliert. Eine Erkenntnis aus diesem Dilemma muß notwendigerweise strukturbildende Aspekte berücksichtigen. Dabei geht es um die Entwicklung und Bevorzugung einer fehlerfreundlichen, risikoarmen chemischen Technologie. Möglich wird eine solche Technologie jedoch nur mit sicheren, risikoarmen Stoffen.

3. Chemie und Erscheinungsbild

Die Lehre von den Eigenschaften und Umwandlungen der Stoffe wird gemeinhin als "Chemie" bezeichnet. Die veraltete Schülerweisheit wonach Chemie sei, "wenn es stinkt und knallt", erweist sich in der heutigen umweltpolitischen Zuspritzung als wenig hilfreich und nicht aussagekräftig genug, um das Phänomen der klassischen Chemie zu umschreiben und gute Argumente für einen ökologischen Umbau dieses in wenig mehr als 100 Jahren gewachsenen Wirtschaftszweiges zu erörtern.

Das umgangssprachliche Klischee legt nahe, daß die öffentliche Meinung unter "Chemie" vorzugsweise giftige Chemikalien, Chemianlagen und Störfälle versteht. Chemie ist in der Tat weit mehr.

Zum Erscheinungsbild dieser Wissenschaft zählt heute genauso die Rohstoffgewinnung von Erdöl, die Verarbeitung und Anwendung von Chemikalien in anderen Industriebranchen, Landwirtschaft und Verkehr, selbst Recycling und Entsorgung sind essentielle Bereiche der aktuellen Chemieproblematik.

3.1. Standarddefinition und "Retorte der Gesamtwirtschaft"

Nach der geläufigen Standarddefinition²⁸ befaßt sich Chemie als Wissenschaft mit

1. den chemischen Elementen in freiem oder gebundenem Zustand;
2. den Reaktionen, Umsetzungen, Umwandlungen und Wechselwirkungen der chemischen Elemente und ihrer Verbindungen;
3. der Bestimmung, Steuerung und Voraussage, Deutung und Auswertung (durch direkte und indirekte Methoden), Anwendung und den Mechanismen der unter 2. aufgeführten Prozesse;
4. den Grunderscheinungen und Kräften der Natur hinsichtlich ihrer Anwendung auf Reaktionen, Extraktionen, Kombinationen, Prozesse, Additionen, Synthesen, Zersetzung, Kennzeichnungen und Analysen.

Diese scheinbar weit gefaßte Direktive blendet dennoch aktuelle Erkenntniszusammenhänge aus ihrer Festlegung aus. GRIESHAMMER²⁹ bezeichnet die Chemieindustrie zutreffend als die Retorte der Gesamtwirtschaft, spezifisch strukturiert, mannigfach und dominierend mit der Gesamtindustrie verflochten, gleichermaßen Rohstofflieferant wie Brain-Trust und Produktentwickler. Er nennt drei herausragende Besonderheiten:

1. Die Vielfalt und Komplexität der etwa 100.000 Stoffe und der zwei Millionen Produkte führt zu großen Problemen der Überschaubarkeit.
2. Die Gefährlichkeit vieler Chemikalien erzeugt Störfall- und Transportrisiken, die denen der Atomindustrie ähnlich sind und sie bewirkt kaum kontrollierbare Gefährdungen für die damit Beschäftigten - nicht nur in der Chemieindustrie (siehe 2.1 Anlagensicherheit: Störfall als Normalfall?).
3. Bei den allermeisten chemischen Reaktionen entstehen unabwendbar enorme Quantitäten an Nebenprodukten, die als (Sonder)abfälle "entsorgt" werden müssen, wenn sie nicht als Vorprodukte für andere Reaktionen ausgenutzt werden können. Diese Verbund- und Koppelproduktion erweist sich bisweilen als sinnvoll und manchmal fatal, da sie Stoffstromverantwortliche dazu verleitet, neue Produktfelder und Bedürfnisse zu forcieren und zudem den Ausstieg aus bekannten Problemprodukten (s. Chlorchemie) erschwert.

²⁸RÖMPP (1989).

²⁹GRIESSHAMMER (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Alle Stoffe werden zumeist in anderer Form oder Zusammensetzung wieder in die Mitwelt zurückgeführt, z.B. als Abfälle, Abwässer oder Abgase, sowohl nach dem Gebrauch als auch bereits in der Produktion oder im Gebrauch. Stoffumsätze sind auf jeder Stufe des Produktlebenszyklus unvermeidbar, von der Ausbeutung von Bodenschätzen über die Herstellung der Vor- und Zwischenprodukte, die Verteilung und Verwendung des gewünschten Produktes, dessen Lagerung und Transport bis hin zur Entsorgung oder Nachnutzung im Wirtschaftskreislauf.

Weder für den Konsumenten noch für den Hersteller ist der gesamte Produktlebenszyklus überblickbar. Vieles bleibt im Dunkeln, viele Fragen sind bis heute unbeantwortet bzw. wurden noch gar nicht gestellt.

In welcher Relation stehen Energie- und Know-How-Einsatz, Mitweltbeeinträchtigung durch Rohmaterialgewinnung, Produktion, Handel und Transport einerseits zum Nutzen für den Konsumenten, andererseits zum Nutzen für die Volkswirtschaft? Wie effektiv werden die Ressourcen genutzt? Wie hoch sind die negativen Mitweltauswirkungen während des gesamten Werdegangs der zivilisatorischen Produkte?

Stoffe werden nicht nur zur Erfüllung der Grundbedürfnisse wie z.B. für Nahrung, Kleidung und Wohnen eingesetzt, sondern seit Beginn der Industrialisierung in zunehmendem Maße auch zur Erfüllung der gestiegenen Konsumansprüche. Kleidung und Textilien, z.B. aus Synthesefasern hergestellt und mit mehr als 8000 verschiedenen Stoffen chemisch nachbehandelt sowie gegen Schadorganismen ausgerüstet (Jahresverbrauch in Deutschland ca. 2.000 Tonnen Mottenschutzpräparate), sind heute ein bedeutender Wirtschaftsfaktor der chemischen Industrie. Die Gewinnung und Veredlung von Textilfasern führt nachweislich zu ökologischen und gesundheitlichen Schäden; z.B. durch Gewässerbelastung und gehäuftes Auftreten von Allergien.³⁰

³⁰ ROSENKRANZ/CASTELLO (1993).

3.2. Stoffströme im Blickpunkt: Das Beispiel Polyurethan

Die Grundannahme der konventionellen Chemie besteht darin, daß die in der Natur vorkommenden Substanzen nach Art und Menge nicht geeignet seien, wesentliche Bedürfnisse moderner Industriegesellschaften zu erfüllen. Als Folge dieser Annahme steht nach wie vor das erklärte Ziel, "chemische Produkte in größtmöglicher Unabhängigkeit von Naturprozessen zu erzeugen."³¹

Polyurethan (PU) zum Beispiel gilt als "Tausendsassa" unter den modernen polymeren Chemiewerkstoffen. Es wird zu so unterschiedlichen Produkten wie Klebstoffen, Lacken, Schaumstoffen (Matratzen, Möbel, Fenster-Schäumen) oder Schuhsohlen verarbeitet.

Angesichts des Mißverhältnisses zwischen reduktionistischen Bewertungsgewohnheiten einerseits und den globalen Auswirkungen von Chemikalien auf alle Lebewesen andererseits ist in den letzten Jahren der Ruf nach Methoden lauter geworden, die zu einer ganzheitlichen und damit der Komplexität des Wirklichen entsprechenden Bewertung der synthetischen Alltagsprodukte führt.

Eine dieser Methoden steht in Gestalt der sogenannten Produktlinienanalyse zur Verfügung, wie sie besonders von Mitarbeitern des Freiburger Ökoinstitutes ausgearbeitet wurde.³²

Die Produktlinienanalyse geht von der Voraussetzung aus, daß eine wirklichkeitsgerechte Beurteilung von Produkten nur bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produktes - von der Gewinnung der primären Rohstoffe bis hin zum Verbleib der letzten Metaboliten nach der Entsorgung - gewonnen werden kann. Über dieser "biographischen" Dimension der Produktlinienanalyse wird nun noch eine weitere Dimension aufgespannt, indem man für jede Lebensstation des Produktes jeweils dessen Auswirkungen auf die Bereiche Natur, Gesellschaft und Wirtschaft analysiert.

³¹FISCHER (1994). S.57.

³²siehe z.B. BAUMGARTNER, Thomas, et al.: Die gegenwärtige Produktpolitik und ihre Umgestaltung mit Hilfe der Produktlinienanalyse. Freiburg, Öko-Institut 1989 (= Werkstattreihe Nr. 54) oder auch SCHMIDT-BLEEK (1994).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

So komplex die Prozeßketten auch erscheinen, sie sind gegenüber der Realität immer noch eine starke Abstraktion, die den realen Ablauf der Produktentstehung transparenter, sauberer, kontrollierbarer erscheinen lassen, als er es in Wirklichkeit ist.

Zur Verringerung dieses Abstraktionsgrades wäre es nötig, den gesamten Lebenslauf in allen Einzelheiten tatsächlich draußen in den Chemiefabriken Station für Station, Reaktion für Reaktion und Sondermülldeponie für Sondermülldeponie zu erleben.

Deutlich wird jedoch eine der Grundstrukturen heutiger chemischer Produktion, nämlich die große Anzahl hintereinandergeschalteter Kettenglieder. Anders ausgedrückt: vom primären Rohstoff bis zum verkaufsfähigen Produkt ist es ein langer Weg mit zahlreichen chemischen Reaktionen und physikalischen Verfahrensschritten.

Angesichts der Tatsache, daß praktisch keine chemische Reaktion vollständig abläuft, sondern das Entstehen zahlreicher unerwünschter Nebenprodukte bei jedem einzelnen Reaktionsschritt sogar die Regel ist, zerfasert der reale Produktionsprozeß in ein unübersichtliches Gewirr von Stoffströmen, die neben dem einen gewünschten Stoff Tausende von unerwünschten Stoffen transportieren. Je größer die Zahl der hintereinandergeschalteten Kettenglieder ist, um so lawinenartiger schwint diese Flut an.

In der Praxis bewirkt dieses Phänomen ein ungünstiges Mengenverhältnis von Zielprodukt einerseits und entsorgungspflichtigen Sonderabfällen andererseits. Bei typischen Produkten der organischen Chemie kann dieses Verhältnis durchaus bedeuten, daß 1 kg gewünschtes Zielprodukt entlang der Prozeßkette mit der hundertfachen Menge Abfall erkauf werden muß.

Diese Tatsache ist vielen Industriechemikern merkwürdigerweise nicht voll bewußt. Vermutlich liegt das daran, daß die Einzelschritte der Prozeßkette auf ganz unterschiedliche Produzenten aufgeteilt sind, die sich in der modernen arbeitsteiligen Welt zueinander im Lieferantenverhältnis befinden.

Damit fehlt jedoch ein übergreifendes Gesamtbewußtsein für den vollständigen Ablauf, der erst durch Prozeßketten der hier gezeigten Art wieder ansatzweise herzustellen ist.

**Die allgemeine Produktlinie
Vom Primärrohstoff bis zum vollständigen Abbau?**

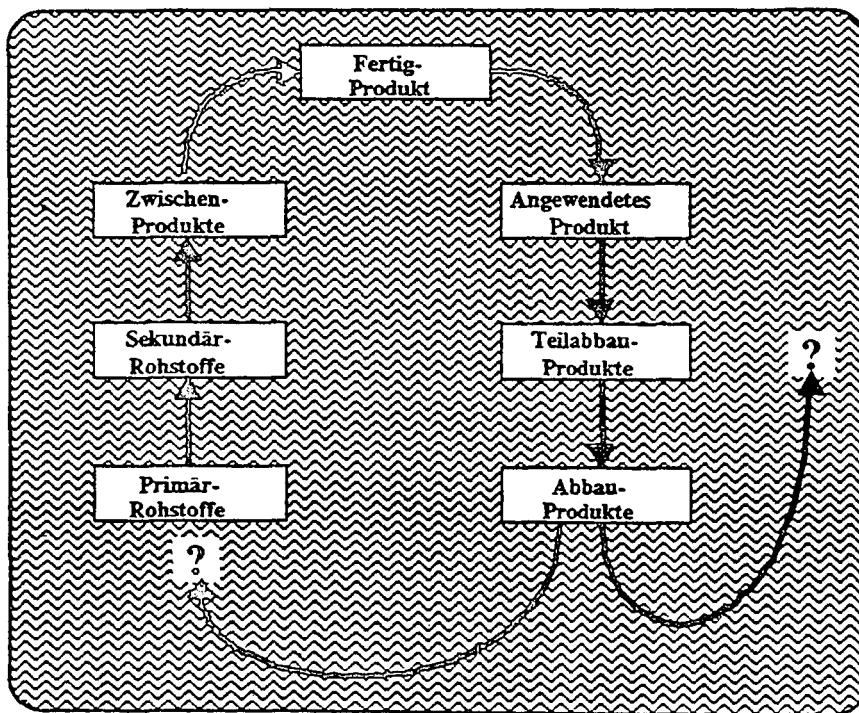


Abb. 9 Grafik CONCERNED PEOPLE mod. nach FISCHER (1992)

Die Biografie der Primärprodukte beginnt zumeist in den Lagerstätten des fossilen Kohlenstoffträgers Erdöl, dem Schlüsselrohstoff der modernen Chemischen Industrie, von dem diese zu fast 100% abhängig ist.³³ Es bestehen keine Zweifel darüber, daß die vorhandenen Erdölreserven in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein werden.³⁴

³³ Einschränkend sollte beim PU erwähnt werden, daß einige seiner Vorprodukte auch aus Erdgas hergestellt werden. Dies ändert die ökologische Konsequenz aber nicht, denn Erdgas zählt ebenso zu den fossilen nicht erneuerbaren Kohlenstoffquellen.

³⁴ s. z.B. Deutsche BP AG (Hg): Das Buch vom Erdöl, Hamburg: Reuter u. Klöckner 1989, S 688. Oder Römpf Chemielexikon, 9. Auflage 2 (1990) S 1211: "1980 beliefen sich die förderbaren Reserven auf 135 Mrd. t - die beim gegenwärtigen Verbrauch und ohne Neufunde in 42 Jahren (!) erschöpft sein würden." Siehe dazu auch das neu erschienene Werk von Eva Müller: Das Ende der Ölzeit. Strategie für eine saubere Wirtschaft in Deutschland. Frankfurt Fischer (1993).

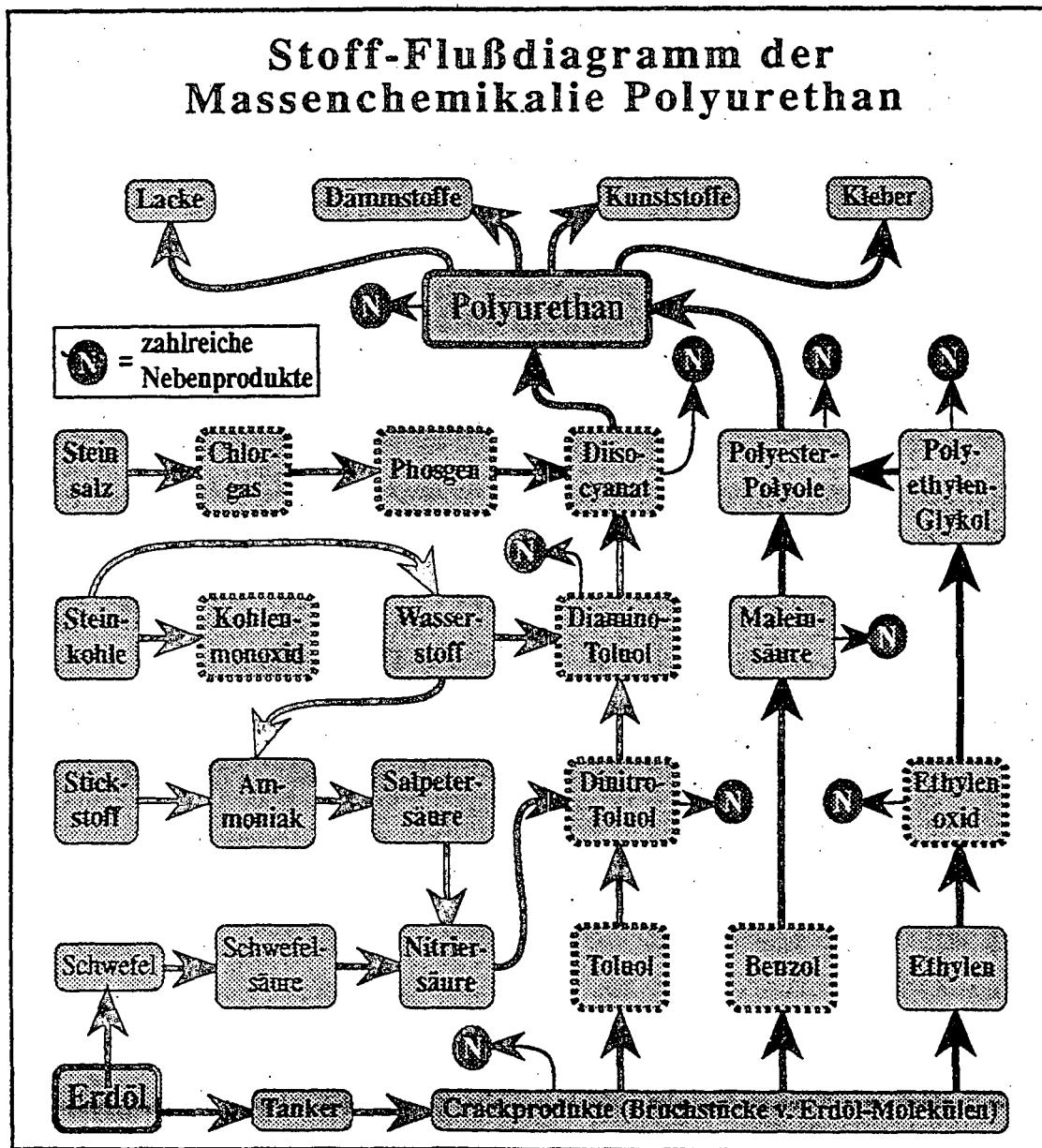


Abb. 10: Stoff-Flu&diagr. der Massenchemikalie PU Grafik CONCERNED PEOPLE mod. n. FISCHER 1994

Polyurethane (PUR) zählen zu den heute am vielseitigsten eingesetzten Massenkunststoffen. Charakteristisch für ihr Herstellungsverfahren ist die Polyadditionsreaktion zwischen Polyolen und Di- oder Polyisocyanaten. Die stofflichen Zusammenhänge mit der Erdöl- und Chlorchemie ist in verkürzter Form aus der Grafik ersichtlich und wird im Folgenden näher erläutert.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Schon bei der Extraktion des Rohöls aus den Lagerstätten der Erde kommt es in großem Umfang zu unvermeidlichen Leckagen. Die regelmäßigen Oilspills und Ölverschmutzungen der Strände sind ein deutliches, optisch sichtbares Signal.³⁵ Aufgrund zunehmender Erschöpfung ist die Erdölgewinnung selbst (Tertiärförderung) eine stark umweltbelastende Aktivität. Es werden Förderhilfsmittel (*Tenside, Polymere u.a. hydrolysiertes Polyacrylnitril*) eingesetzt. Zum Entschäumen dieser geförderten Mischung dienen etwa *Ethylhexanol, Polyglykole, Trialkylmelamine, Silicone*. Um die Rohölemulsion zu spalten, werden beispielsweise Sulfonsäuren als Demulgatoren verwendet.

Die petrochemische Weiterverarbeitung erfolgt in der Raffinerie. Bei der Destillation des Rohöls werden die einzelnen natürlichen Inhaltsstoffe des Erdöls aufgrund ihrer unterschiedlichen Siedepunkte destillativ voneinander getrennt. Das Ergebnis dieser fraktionierten Destillation sind *Gas, Naphta, Gasöl, Vakuumdestillat* und *Vakuumrückstand*, sie bestehen aus den verschiedenen Kohlenwasserstoffklassen: *Paraffine, Naphtene, Naphteno-Aromaten, Aromaten* und *Asphaltene*.

Ganz wesentlich ist der zweite Schritt, das "Cracken" der Erdölfaktionen. Der Crackprozeß verändert die ursprünglich vorhandene Molekülstruktur. Verständlich wird dies durch die Crack-Temperaturen, sie liegen zwischen 450 und 600 Grad Celsius. Erst durch diesen Eingriff gelangt man zu den relativ kleinen, niedermolekularen Crackprodukten, die als Grundlage der Petrochemie dienen, aus denen später neue Verbindungen entstehen.

³⁵ Auf dem Weg von der Förderung bis zur Raffinerie verseuchen nach Hochrechnungen von FISCHER Oilspills von 6 Milliarden Kilogramm jährlich eine Wassermenge von 3×10^{16} Liter, das sind 16 Gigatonnen Wasser. Dieses Volumen übertreift den jährlichen Trinkwasserverbrauch der Menschheit um mehrere Zehnerpotenzen!

**Produkte, die neben Benzol und Ethylen
beim Naphtaprozeß der Erdölraffinerie anfallen**

Fraktionierungsstufe	Prozent	Für die weitere Verwendung anfallende Stoffe
Wasserstoff und Methan (ein Kohlenstoffatom)	16	Energiegewinnung Hydrierung
Ethylen (zwei Kohlenstoffatome)	35	Polyethylen, Polystyrol
Propen (drei Kohlenstoffatome)	15	Acrylnitril, Polyalkohole, Polyamine, Polyurethan, Polyester, Polyamid
Butene (vier Kohlenstoffatome)	8,5	Lösemittel
Pentane, Pentene, Cyclopenten, Isopentan usw. (fünf u. mehr Kohlenstoffatome)	25	Isopren Pyrolysebenzin: Benzol, Toluol, Isocyanat, Polyurethan, Xylool. Lösemittel, Phtalsäurederivate

Tab. 3: Produkte, die neben Benzol und Ethylen beim Naphtaprozeß der Erdölraffinerie anfallen
(Quelle RÖMPP, KELM, GENSCH)

Bei der Aufspaltung (Destillation und Crack-Prozeß) des Erdöls wird eine breite Palette von Grundstoffen gewonnen, die in unterschiedliche Produktlinien eingehen. In der obigen Tabelle werden die Grundstoffe aufgelistet, die mit *Benzol* und *Ethylen* bei der Auf trennung und Spaltung der Napthafraktion anfallen und im Bereich der Kunststoffherstellung eine Rolle spielen (Koppelproduktion).

Die *Pyrolyseprodukte* (Pyrolyse = Hitzezersetzung ohne Zufuhr von Sauerstoff), die bei den verschiedenen Spaltungs- und Auf trennungsschritten entstehen, sind gesundheitsschädlich. Dazu gehören die *Ruße* und *Teere*, die in der Liste Maximaler Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Liste) gefährlicher Stoffe als eindeutig krebserzeugend (Gruppe III A1) ausgewiesen sind.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Teerdämpfe und *Kokereirohgase* gehören zur Gruppe III A2, d.h. zu den Stoffen, die im Tierversuch, aber unter Bedingungen, die der Belastung am Arbeitsplatz vergleichbar sind, als krebserzeugend eingestuft werden.³⁶

Die ebenfalls auftretenden *polycyclischen Kohlenwasserstoffe* tragen auch zum krebserzeugenden Potential solcher Gemische bei. Viele petrochemische Produkte (Benzin, gesättigte Kohlenwasserstoffe aus 5-7 Kohlenstoffatomen, Naphtene, Aromaten) wirken schädigend auf das Nervensystem (neurotoxisch).³⁷ Bei niedriger chronischer Exposition gegenüber diesen Stoffen werden unspezifische Symptome wie Kopfschmerzen, Übelkeit, Müdigkeit und Augenbrennen verursacht.

Benzol gehört zu den chemischen Stoffen, deren Gefährlichkeit für den Menschen schon lange bekannt ist. Es verursacht Blutkrebs und wird daher in der Gruppe III A1 der MAK-Liste geführt. Die Technische Richtkonzentration (TRK-Wert) beträgt 5 ml/m³. Für krebserzeugende Stoffe existiert aber kein Schwellenwert unterhalb dessen das Krebsrisiko zu vernachlässigen wäre, mit geringerer Konzentration nimmt nur die Wahrscheinlichkeit einer Krebsentstehung ab.

Chronische Belastungen durch niedrige Konzentrationen von Benzol, wie sie aufgrund der Technischen Richtkonzentrationen legal z.B. im Bereich von Tankstellen und Umläufigstationen auch stattfinden, führen zu Defekten im Immunsystem und Veränderungen im Zentralnervensystem (ZNS).³⁸

Im Bereich der Petrochemie sind Mehrfachbelastungen mit verschiedenen flüchtigen Stoffen eher der Normalfall: gerade für Benzol gibt es eindeutige Hinweise auf Synergien (Zusammenwirken, u.U. sich gegenseitig verstärkend) mit anderen flüchtigen Stoffen.³⁹

³⁶Vgl. zu Kokereigasen die grundlegenden Arbeiten von *Manz, A.u.a.* Zur Frage des Berufskrebses bei Beschäftigten in der Erdölindustrie, Bundesanstalt für Arbeitsschutz (Hrsg.) Dortmund, Bremerhaven 1976 und *Chemie am Arbeitsplatz*, Hrsg. Katalyse, BUND, Öko-Institut, ULF, Reinbek (1987).

³⁷*Gregersen, P.*, Organic Solvents, Miljoprojekt Nr. 72, National Academy of Environmental Protection, Denmark (1986).

³⁸Vgl. *Smolik, R.u.a.* in: Internationales Archiv für Arbeitsmedizin 31/1973, S.243, zitiert nach *Patty, F.A.*, in *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology* Vol IIb, John Wiley, New York (1981), S. 3.253.

³⁹Vgl. *Patty, F.A.* in: ebenda

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Insofern ist es für eine schadstoffbezogene Produktlinienbewertung wesentlich, die sozialen und ökologischen Randbedingungen der Produktion mit zu berücksichtigen. In diesen Zusammenhang fällt z.B. der Umstand, daß Alkoholkonsum den Abbau des Lebergiftes Xylol einschränkt. Bei der Spaltung der Naphtafaktion zur Benzolgewinnung fallen *Benzol*, *Toluol*, *Xylol* und *Ethylbenzol*, die sog. "BTX-Fraktion" zusammen an. Sie sind untereinander chemisch verwandt und lassen sich schlecht voneinander trennen. *Toluol* und *Xylol* werden als Lösemittel und als Grundstoffe für weitere Produktionszweige verwendet.

Toluol zeigt ein ähnliches Wirkungsspektrum wie Benzol, allerdings ohne die Verursachung von Leukämie. Der MAK-Wert beträgt 100 ppm (= parts per million, Teile eines Stoffes auf eine Million "Teile" Luft). Aber Konzentrationen von 50 bis 100 ppm in der Luft führen schon zu Veränderungen der elektrisch messbaren Hirnfunktionen (EEG). In Stadluft und in der Nähe von Produktionsanlagen werden Toluolkonzentrationen von 0,05 und 0,01 ppm gemessen.⁴⁰ Xylol wird in der Nähe von Produktionsanlagen im Trinkwasser entdeckt.⁴¹ Xylol verändert die Blutwerte und wirkt auf das Zentrale Nervensystem (ZNS). Der MAK-Wert beträgt ebenfalls 100 ppm. Im Rattenversuch wurden bei einer Exposition von 1000 ppm bis 2000 ppm Leberschäden festgestellt, bei 7000 ppm zeigten sich Verhaltensänderungen, eine Schwächung der Immunabwehr zeigte sich schon bei 12 ppm.⁴²

Grundsätzlich muß bei der Übertragung von Tierversuchen auf Menschen mindestens mit einem Sicherheitsfaktor von 100 gearbeitet werden. In diesem Licht sind auch die oben erwähnten Daten zu interpretieren.

Bei der Überführung der reaktionsträgeren Kohlenstoffverbindungen (*Toluol*, *Benzol* und *Ethylen*) zu eigentlichen reaktiven Zwischenprodukte kommen im Fall des Polyurethans vier verschiedene Verfahren zum Einsatz (es handelt sich um vier verschiedene Oxidationsmittel).

Toluol wird mit *Nitriersäure*, einer aggressiven, stark oxidierend wirkenden Mischung aus konzentrierter *Schwefelsäure* und konzentrierter *Salpetersäure*, zum *Dinitrotoluol* umgesetzt.⁴³

⁴⁰National Toxicology Program 327, December 1987, US Department of Health and Human Services, Toxicology of Xylenes (Mixed), Washington (1987).

⁴¹Ebenda

⁴²Ebenda

⁴³DNT ist verwandt mit TNT (Trinitrotoluol), einem Hauptbestandteil von Sprengstoff.

Erst nach diesen Reaktionsschritten wird durch Synthese der zuvor gebildeten *Diisocyanate* und *Polyester-Polyole* das eigentliche *Polyurethan* strukturiert, ein weiter Weg, der über die Verkettung von Dutzenden Einzelreaktionen führt, wobei allein die nicht erwähnten Nebenprodukte (NP) jedes für sich wieder ein weiteres toxikologisches Risikopotential darstellen. Kritische Toxikologen warnen bereits 1986 vor den "kaum mehr beherrschbaren Folgen".⁴⁸

3.2.1. Mögliche Auswirkungen von Isocyanaten (Restmonomere und Zwischenprodukte)

Die Isocyanatgruppe zeichnet sich durch ihre große Reaktionsfreudigkeit aus. Diese Eigenschaft ermöglicht auch die schnelle Reaktion mit NH₂--, SH- und OH-Gruppen. Diese funktionellen Gruppen sind in der Regel in großer Anzahl in Molekülen biologischer Systeme vorhanden.

Die Reaktion von Isocyanaten mit diesen biologischen Molekülen kann zu Veränderungen von Proteinen, Inaktivierung von Enzymen, Rezeptoraktivierung oder Zerstörung von Membranbestandteilen führen⁴⁹. Der allgemeine Wirkungscharakter ist allen Isocyanaten gemeinsam.

Die akute Toxizität der Isocyanate bei oraler Zufuhr ist gering.⁵⁰

Die LD₅₀ für TDI bei Ratten wird mit 5,8 g/kg angegeben.⁵¹

Bei Hautkontakt können Diisocyanate allerdings ein allergisches Kontaktzekzem auslösen. So gelten alle bisher untersuchten Diisocyanate als kompetente Auslöser allergischer Kontaktdermatitis. Symptome sind Rötung und Schwellung der Haut, Juckreiz, Pusteln, Ausschläge und Ekzeme.⁵²

Um ein vielfaches toxischer ist inhalativ aufgenommenes Isocyanat. Effekte im Bereich der Atemwege und mögliche genotoxische und kanzerogene Wirkungen können die Folge sein. Die toxischen Wirkungen im Bereich der Atemwege lassen sich im wesentlichen in vier Gruppen einteilen:

⁴⁸ ALSEN/WASSERMANN (1986) S. 6.

⁴⁹ DILLER (1983).

⁵⁰ BROCHHAGEN (1991).

⁵¹ HENSCHLER (1972).

⁵² KANERVA et al. (1989).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Ethylen, ein farbloses, brennbares, aber ansonsten recht harmloses Gas, wird etwa durch die Oxidation an Silberkatalysatoren in das farblose, süßlich riechende, hochexplosive und nachweislich karzinogene *Ethylenoxid* übergeführt.⁴⁴ "Seine überragende Bedeutung liegt in der Reaktivität des Oxiran-Ringes, die es zu einer Schlüsselsubstanz für eine Vielzahl weiterer Zwischen- und Endprodukte macht"⁴⁵

Selbst das leukämogene *Benzol* ist, wie das *Toluol*, für die Weiterverarbeitung viel zu reaktionsträge. Deshalb wird es (wie *Ethylen*) mit Sauerstoff zu *Maleinsäureanhydrid*, einer stark reizenden Chemikalie, oxidiert; woraus sich mit Wasser die *Maleinsäure* als Vorprodukt der *Polyester-Polyole* (zusammen mit *Polyethylenglykol*) kondensieren lässt.

Die vierte Komponente, das *Kohlenmonoxid* (in der Stoff-Fluss-Grafik Mitte links) geht einen Sonderweg. Zur Oxidation von *CO* wird nicht Sauerstoff verwendet, sondern eines der schon erwähnten Schlüsselsubstanzen der Chemie, das gefährliche Reizgas *Chlor*. Zusammen mit Kohlenmonoxid bildet Chlor *Phosgen*, ein farbloses und heuartig riechendes Gas.⁴⁶ An dieser Stelle kann mit Bestimmtheit gesagt werden, daß Verfahren der eben beschriebenen Art (wie die Herstellung von *Dinitrotoluol*, *Maleinsäure*, *Ethylenoxid* und *Phosgen*) nicht "konvertierbar" sind. Sie lassen sich aufgrund ihrer stoffspezifischen Eigenschaften und Synthesewege nicht ökologisieren.

Zur Herstellung von PU müssen die vier reaktionsfähigen Stoffe noch weiter umgeformt werden - in andere ebenfalls sehr reaktionsfreudige Vorprodukte:

- aus *Dinitrotoluol* wird an Nickelkatalysatoren und in *Dichlorbenzol* als Lösemittel durch Dehydrierung *Diaminotoluol*;
- aus *Ethylenoxid* wird *Polyethylenglykol*;
- *Diaminotoluol* wird mit *Phosgen* zusammengeführt und bildet *Diisocyanat*;⁴⁷
- *Maleinsäure* und *Polyethylenglycol* werden ebenfalls zusammengebracht und bilden *Polyester-Polyole*.

⁴⁴Die Jahresproduktion an *Ethylenoxid* liegt allein in Deutschland bei ca. 500.000 Tonnen.

⁴⁵Römpf Chemielexikon, 9. Auflage 2 (1990) S. 1259.

⁴⁶Fußnote 16.

⁴⁷Bekannt geworden ist auch das Methylisocyanat, das im indischen Bhopal 1986 tausende Menschen in einer Nacht tötete und Hundertausende verstümmelt hat. Ein interessanter Hinweis findet sich in Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, 4. Auflage 13, Weinheim, Verlag Chemie (1977) S. 350: "Isocyanate kommen wegen ihrer großen Reaktionsfähigkeit nicht in der Natur vor." Dazu ist zu bemerken, daß zu gewissen "Sonderzwecken" auch in biologischen Systemen hochgiftige und reaktive Stoffe produziert werden. Im Mainstream der Biosphärenchemie sind sie jedoch von untergeordneter Bedeutung.

3.2.1.1. Toxische Irritationen bei hohen Isocyanatkonzentrationen in der Atemluft

In hohen Konzentrationen bzw. hohen Dosen wirken Isocyanate stark reizend auf die Haut und die Schleimhäute der Augen und der oberen und mittleren Atemwege. Typische Symptome sind Tränenfluß, Fließschnupfen, Rachenreizzungen, Bronchitis, Kopfschmerzen, Übelkeit und Erbrechen. Als Folge inhalativer Aufnahme von höheren Konzentrationen treten Husten, Bronchospasmus, Tracheitis, Bronchitis, Bronchitis obliterans, Bronchopneumie und ab 50 ppm ein lebensbedrohliches Lungenödem auf.⁵³

Akute biologische Effekte von TDI nach wenigen Minuten Einwirkzeit sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Konzentration	Effekt
< 0,02 ppm	evtl. asthmatische Beschwerden bei überempfindlichen Personen
> 0,05 ppm	Geruchsschwelle, Augenreiz
> 0,1 ppm	leichte Reizung von Nasen und Rachen
> 0,5 ppm	stechender Augenreiz, Tränenfluß, Kratzen und Brennen im Rachen
> 1,3 ppm	Husten, reversible Bronchitis (einige Stunden lang)
> 10 ppm	reversible Bronchialnekrosen, Lungenödem
> 50 ppm	lebensgefährlich

Tab. 4: Akute biologische Effekte von TDI (Angaben nach HENSCHLER 1972)

Normalerweise sind die Symptome einer akuten toxischen Irritation innerhalb weniger Stunden bis Tage reversibel. In seltenen Fällen kommt es aber auch zu einer bleibenden Zerstörung der Flimmerepithelien im Bronchialsystem und zu einer chronischen Bronchitis.⁵⁴

⁵³DILLER (1985); KAROL (1986).

⁵⁴DILLER (1985).

3.2.1.2. Unspezifische Beeinträchtigung der Lungenfunktion bei chronischer Belastung mit niedrigen Isocyanatkonzentrationen

Eine langjährige Exposition gegenüber subakuten Isocyanatkonzentrationen führt bei beruflich Exponierten zu einer Verschlechterung der Lungenfunktion. Subjektive Beschwerden wie Atemnot und Enge in der Brust, aber auch erhöhte Infektionsanfälligkeit der Atemwege werden beschrieben.

Es ist umstritten, ab welcher Konzentration eine Schädigung zu erwarten ist, aber Hinweise zeigen schon eine Verschlechterung der Lungenfunktion ab einer Isocyanatkonzentration von 10 ppb.⁵⁵

Deutlich schlechtere Atemfunktionswerte zeigen Arbeiter, die kurzzeitig höheren Konzentrationen ausgesetzt waren, als dem Grenzwert entspricht. Bei Arbeitern ohne diese Spitzenwerte war dies nicht der Fall.⁵⁶ Derselbe Autor macht auch darauf aufmerksam, daß sich trotz der Einhaltung der derzeit gültigen MAK-Werte bei Isocyanatarbeitern die Atemwegsinfektionen häufen.

3.2.1.3. Spezifische Isocyanatüberempfindlichkeit mit Isocyanat-Asthma und allergischer Alveolitis als Krankheitsbilder

Isocyanate führen aufgrund allergischer Reaktionen auch zur Entstehung von Asthma. Nach Schätzungen verschiedener Autoren sind in Nordamerika ca. 5% aller isocyanatexponierten Arbeiter (etwa 50.000) gegen Isocyanat-Niedrig-Dosen intolerant und entwickelten eine Überreaktion oder Sensibilisierung mit asthmatischen Symptomen.⁵⁷ Die Isocyanate sind zur Zeit mit 20% die Hauptursache für das berufsbedingte Asthma.⁵⁸

In der Schweiz sind im industriellen Bereich die Isocyanate mit 23,6% Anteil, noch vor durch Mehlstaub verursachtem Asthma, die häufigste Ursache für das Berufsasthma.⁵⁹

⁵⁵BAUR (1990).

⁵⁶OMAE (1992).

⁵⁷KAROL et al. (1979); WEILL (1979); SALVAGGIO (1979); PRÜGGER (1980).

⁵⁸CULLEN & CHERNIACK (1989); VANDENPLAS (1992).

⁵⁹JOST et al. (1990).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Raumluftmessungen bei an Isocyanatallergie erkrankten Personen ergaben durchschnittliche Belastungen von 20-30 ppb. Bei den meisten Patienten ist die Erkrankung erstmals nach der Anschaffung neuer Einrichtungsgegenstände (Teppichböden, Spanplatten, etc.) mit einer zeitlichen Verzögerung von bis zu 6 Monaten aufgetreten. Bei vielen Patienten ist eine Verbesserung des Gesundheitszustandes erst nach einer Wohnraumsanierung erzielt worden.⁶⁰

3.2.1.4. Unspezifische bronchiale Hyperreagibilität

Beschrieben wird der akute Asthmaanfall eines Reparateurs, der in einem Diisocyanat verarbeitenden Betrieb eingesetzt wurde. Obwohl die Diisocyanatkonzentration stets unterhalb des MAK-Wertes lag, erlitt der Arbeiter auf Grund einer bestehenden bronchialen Hyperreagibilität im Gegensatz zu allen anderen dort Beschäftigten einen schweren Asthmaanfall.⁶¹

Eine weitere Wirkung der Isocyanate ist auch die Fähigkeit allein durch Hautkontakt eine Sensibilisierung des Atemtraktes auslösen zu können.⁶²

Nach Isocyanat Belastung wurden auch neurologische Symptome, wie Euphorie, Ataxie, und Bewußtlosigkeit und gastrointestinale Störungen, wie Übelkeit, Erbrechen und Magenschmerzen bemerkt. Kopfschmerzen, Konzentrationsschwierigkeiten und schlechte Gedächtnisleistungen können über Jahre hinweg anhalten.⁶³

In humanen isolierten Lymphozyten führt MDI zu Chromosomenaberrationen.⁶⁴ Nach in vivo- und in vitro-Belastung mit Isocyanaten konnten DNA-Doppelstrangbrüche und DNA-Crosslinks nachgewiesen werden.⁶⁵ In einer 2-jährigen Studie an Ratten und Mäusen des National Toxicology Progams der USA hat TDI bei oraler Aufnahme eindeutig Krebs erzeugt.

In einer Langzeit inhalationsstudie wurden Ratten einem Aerosol aus technischem MDI (= polymeres MDI = 30-80% MDI in einer Mischung mit höhermolekularen Homologen des MDI) ausgesetzt. Bei mehreren Tieren traten Lungenadenome und bei einem Tier ein Adenokarzinom auf.⁶⁶

⁶⁰DEILMANN & BERGHEM (1989); BERGHEM & DEILMANN (1990).

⁶¹DILLER (1985).

⁶²KAROL et al. (1981); KAROL (1985), (1986).

⁶³MUSK et al. (1988).

⁶⁴MÄKI-PAAKANEN & NORPPA (1987).

⁶⁵BAUR et al. (1991).

⁶⁶HENSCHLER (1992).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Auf Grund dieser Befunde wurden MDI und polymeres MDI von der MAK-Kommision in die Gruppe III B, Stoffe mit begründetem Verdacht auf krebserzeugendes Potential, neu eingestuft.

Isocyanate reagieren beim Kontakt mit Wasser zu den korrespondierenden Aminen. Bei Personen die 2,4- und 2,6-TDI einatmeten, wurde im Urin und im Plasma *Toluylendiamin (TDA)* nachgewiesen.⁶⁷ Die Diamine als Abbauprodukte der Diisocyanate sind von besonderer Bedeutung, weil sich verschiedene dieser Verbindungen als mutagen und kanzerogen erwiesen haben. So wird das 2,4-TDA und das korrespondierende Amin von MDI, das *4,4'-Diaminodiphenylmethan* als kanzerogen eingestuft.⁶⁸

Die derzeit gültigen Grenzwerte (MAK-Werte: TDI: 10 ppb; MDI: 5 ppb) am Arbeitsplatz bieten keinen Schutz für besonders empfindliche Personen.

Während in Österreich und in der Bundesrepublik Deutschland für TDI der Grenzwert 10 ppb beträgt, sind in Dänemark, Schweden, Schweiz und den USA nur 5 ppb und in Japan nur 2 ppb zugelassen. Grenzwerte für den Wohnbereich, zum Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Stoffen sind nicht ausgewiesen.

3.2.2. Zersetzungprodukte im Brandfall

Von schweren Vergiftungen nach einer TDI-Exposition wird berichtet.⁶⁹ Beide Veröffentlichungen beschreiben Fälle von Feuerwehrmännern, die bei Lösch- und Aufräumarbeiten einer brennenden Polyurethanschaumfabrik TDI exponiert wurden. Die z.T. langjährigen Gesundheitsbeeinträchtigungen sind nicht nur allein auf das TDI zurückzuführen, da beim Brand auch noch viele andere Schadstoffe entstehen. Ab einer Temperatur von ca. 200 Grad Celsius werden aus Polyurethanprodukten Isocyanate und mit zunehmender Temperatur vermehrt *Kohlenmonoxid* und *Cyanwasserstoff* freigesetzt.⁷⁰

1980 testeten Experten die Mutagenität von Produkten, die bei der thermischen Zersetzung von PUR-Hartschaum entstehen.⁷¹

⁶⁷ SKARPING et al. (1991); BRORSON et al. (1991).

⁶⁸ HENSCHLER (1985).

⁶⁹ AXFORD et al (1976) und LE QUESNE et al. (1976).

⁷⁰ SEEMANN & WÖLCKE (1976); SÜSSMANN & KRUSE (1982).

⁷¹ ZITTING et al (1980).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Die Zersetzungsprodukte wurden nach ihrer Löslichkeit in verschiedene Fraktionen (etherlöslich, wasserlöslich) aufgetrennt und an zwei verschiedenen Bakterienstämmen getestet. Alle Fraktionen verursachten in beiden Stämmen Mutationen.

Neben einer Vielzahl an Verbindungen - PAKs konnten mit GC nicht nachgewiesen werden - entstehen mutagene primäre *Amine*, und möglicherweise auch Isocyanate. Von Bedeutung ist die PUR-Zersetzung nicht nur für Feuerwehrmänner, sondern auch für berufliche und hobbymäßige Handwerker, die z.B. mit PUR umwickelte Drähte und Kabel schneiden, löten oder schweißen.

3.2.3. Resumé Produktlinie Polyurethan

Die objektive Aufklärung über das, was mit dem Kauf eines Chemieproduktes in Bewegung gesetzt wird, könnte zu einer spürbaren Senkung des Produktionsdruckes führen. Produziert wird letztlich nur, was auch gekauft wird. Gekauft wird in immer größerem Ausmaß nur noch das, was der Käufer für ökologisch verantwortbar hält. Wenn der Konsument sich seiner Verantwortung auch für die gesamte Produktlinie bewußt wird, könnten auf diese Weise viele Produkte verschwinden und damit ein weiteres Aufklaffen der "toxikologischen Wissenschere" vermindert werden.

Zusammenfassend lässt sich zum Stoff-Fluß-Diagramm PUR feststellen:

Die Risiken der Polyurethan-Produktlinie betreffen Gesundheitsschäden am Arbeitsplatz ebenso wie unkontrollierbare Giftgasausbrüche, Probleme im Brandfall, bei der Anwendung und Entsorgung. Die PUR-Chemie ist eine chemische Technologie, die naturfremde Stoffumwandlungen durch den Einsatz großer Energiemengen erzwingt und dabei die Freisetzung einer Vielzahl naturfremder toxischer oder krebszerregender Substanzen in die Lebensräume bewirkt. Manche PUR-Materialien sind aus heutiger Sicht durch naturnähere Stoffe zu ersetzen, z.B. durch Lacke und Farben auf Naturharzbasis oder durch Latex aus *Hevea brasiliensis* (s. Rohstoff-Dossier).

Auch die so "überaus praktischen Seiten von PU-Sprühschaumstoff" zur Abdichtung von Flachdächern, zum Fenstereinbau und zur Hohlraumversiegelung im Bausektor sind weniger Ausdruck technologischer Genialität als der Ausgleich technisch/handwerklicher Qualitätsminderung durch Chemie. Flachdächer und schaumstoffabgedichtete Fenster zeugen von handwerklicher Unkultur, bei entsprechenden Blechqualitäten und Konstruktionen sind Hohlraumversiegelungen

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

obsolet. Außerdem gibt es im Fachhandel Dämmstoffe - auch für Hohlräume - die zeitgemäßen und anspruchsvollen baubiologischen Kriterien genügen.

Was die Post-Consumer-Abfälle des Produktstammbaumes der Polyurethane betrifft, zeigen die Recherchen, daß das verfügbare Datenangebot nicht ausreicht, um Warenstrommodelle aufzustellen, aus denen sich das Abfallpotential von PUR (z.B. Blockschaum, Weichschaum, Hartschaum) praxisgerecht bestimmen läßt. Dies wäre dennoch dringend erforderlich, um zumindest mit angemessenen Recyclingstrategien auf den wachsenden Output reagieren zu können. Über drei Viertel des PUR-Verbrauches fällt auf die Bereiche Möbel/Matratzen, Fahrzeugindustrie, Bausektor, Kältetechnik und Oberflächenbeschichtung.

Tab.5 Abschätzung des Inlandsverbleibs an PUR aufgeteilt auf sieben Anwendungsbereiche für das Jahr 1991 (in Deutschland)

Anwendungsbereich	Jährliches Abfallpotential an PUR (in Tonnen)
Möbel/Matratzen	90.300
Fahrzeugbau	69.000
Baubereich	65.000
Kälte (technische Isolierung)	25.000
Oberflächenbeschichtung	25.000
Schuhsohlen	22.000
Sonstige (Textilien, Klebstoffe u.a.)	65.000
Summe	361.300

Quelle: Forschungskooperation Okoforum 1994

Da in erster Näherung in Österreich mindestens mit einem Zehntel des deutschen Aufkommens gerechnet werden kann (ein großer PUR-Schaumstoff Hersteller befindet sich in Kremsmünster O.Ö.), sollten die bescheidenen Ansätze der bisherigen werkstofflichen Verwertung (Klebepressentechnik und Mahlgutverwertung) zumindest ausgebaut und forciert werden.

Das Chemische Recycling von PUR (Hydrolyse, Glykolyse/Alkoholyse bzw. Hydrierung/Pyrolyse und Hochtemperaturvergasung) ist technisch noch nicht ausgereift, um als realistische Verwertungsoption bezeichnet zu werden.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Die "energetische Verwertung" ist wenig sinnvoll, da bei der Verbrennung nur ein Bruchteil jener Energie zurückgewonnen wird, der für die Herstellung der Polyurethane notwendigerweise eingesetzt werden muß.

Tab. 6: Vergleich der Energieäquivalenzwerte
und der Verbrennungsenthalpie
(unterer Heizwert) für verschiedene Kunststofftypen

Polymer bzw. Polymerkomponente	Energie- äquivalenzwert [MJ/kg]	unterer Heizwert [MJ/kg]	Verhältnis E-äquivalenz zu Heizwert
Polyetherpolyol	77	29,4	0,38
TDI	145	29,4	0,20
PUR-Weichschaum	80	27,0	0,34
Polyethylen (LDPE)	69	43,3	0,64
Polystyrol	80	39,9	0,50

Quelle: Forschungscooperation Okoforum 1994 und eigene Berechnungen

3.3. Sustainable Development - Dauerhafte Entwicklung

"Das Konzept einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung verknüpft entwicklungspolitische Themen und die Problematik des globalen Bevölkerungswachstums mit grundlegenden stoffpolitischen Themen."⁷²

In den letzten Jahren ist in weiten Teilen der Gesellschaft ein Prozeß des Umdenkens in Gang gesetzt worden - weg vom nachsorgenden Reparaturbegriff des Umweltschutzes hin zu einem vorbeugenden nachhaltigen Stoffstrommanagement. Die notwendigen Schritte zu einer zukunftsverträglichen Entwicklung der Industriegesellschaft - in der internationalen Diskussion als "Sustainable Development" bezeichnet und anlässlich der "UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung" in Rio de Janeiro von der großen Mehrheit der Staaten dieser Welt postuliert - sind jedoch erst in bescheidenen Ansätzen sichtbar.

3.3.1. Rio-Deklaration

Auch die Rio-Deklaration stellte den Anspruch aller Menschen auf ein gesundes und produktives Leben im Einklang mit der Natur in den Vordergrund. Das Recht auf Entwicklung muß auf eine Weise erfüllt werden, die den Bedürfnissen heutiger und künftiger Generationen gerecht wird. Die Deklaration erkennt die besondere Verantwortung der Industrienationen an, die sie aufgrund ihrer globalen Umweltbelastungen und ihrer technologischen und finanziellen Möglichkeiten bei dem internationalen Streben nach nachhaltiger Entwicklung tragen. Sie enthält das Vorsorge- und Verursacherprinzip und fordert die Integration des Umweltschutzes in alle Politikbereiche sowie die Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen, die Beteiligung der Öffentlichkeit und gerichtliche Kontrollmöglichkeiten.

Die Deklaration fordert eine wirksame Umweltgesetzgebung und hebt auch die Bedeutung des Einsatzes ökonomischer Instrumente und der Internalisierung der Kosten hervor.

⁷²ENQUETE-KOMMISSION Deutscher Bundestag: "Schutz des Menschen und der Umwelt - Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft", (1993) S.37.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Eine Möglichkeit diesen Ansprüchen gerecht werden zu können, sieht PERNTHALER et al. (1992) in der Verankerung eines ökologischen Prinzips als "Baugesetz der Verfassung". Eines dieser Konzepte besteht in der Verleihung einer eigenständigen Rechtssubjektivität an die Natur und an künftige Generationen. *Der Mensch ist Teil der Natur und seiner Generationsfolge. Zerstört er diese seine Lebensbedingungen, zerstört er sich selbst.*⁷³

3.3.2. Agenda 21

Mit dem Aktionsprogramm "Agenda 21" hat die Rio-Konferenz für alle wesentlichen Bereiche der Umwelt- und Entwicklungspolitik detaillierte Handlungsaufträge an alle Staaten formuliert, um einer weiteren Verschlechterung der Situation entgegenzuwirken, eine schrittweise Verbesserung zu erreichen und eine nachhaltige Nutzung der Ressourcen sicherzustellen.

Die in 40 Kapiteln beschriebenen Handlungsaufträge haben einen vielfältigen direkten und indirekten Bezug zu den Themen einer Stoffpolitik. Die Kapitel 19, 20 und 21 formulieren Regeln für einen umweltverträglicheren Umgang mit gefährlichen Chemikalien und gefährlichen Abfällen, die auch die Verhinderung bzw. das Verbot des internationalen Handels mit solchen Abfällen und Produkten beinhalten. Andere Kapitel bezeichnen Festlegungen zum Schutz der Erdatmosphäre, der Landressourcen, der Meere und Wasserressourcen sowie den Erhalt der biologischen Vielfalt und die Förderung einer nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft. Die Agenda 21 konkretisiert die Forderungen des Konzeptes eines Sustainable Development nach Erhalt der stoffpolitisch relevanten Funktionen des natürlichen Produktionssystems - Ressourcenbereitstellung und Aufnahme von Rückständen.

3.3.3. Das Jahrhundert der Umwelt

Nach Ernst Ulrich von WEIZSÄCKER treten wir, ob wir es wollen oder nicht, in ein Jahrhundert der Umwelt ein. In diesem wird jeder, der sich Realist nennen möchte, gezwungen, seine Handlungsweise zu rechtfertigen.⁷⁴ Ernüchternd an dieser Feststellung ist die Formulierung "ob wir es wollen oder nicht". Denn entweder werden wir das Jahrhundert zu einem Jahrhundert der Umwelt machen, oder die Umwelt wird uns dazu zwingen. "Das Jahrhundert der Umwelt" ist nach WEIZSÄCKER jedoch nicht als pathetische Ankündigung zu verstehen:

⁷³PERNTHALER (1992).

⁷⁴WEIZSÄCKER (1992).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Gemeint ist die grausame Realität, die sich einstellt und die unvermeidlich kulturbestimmend wirkt, wenn die Plünderung des Planeten durch den Menschen sich noch ein bis zwei Jahrzehnte fortsetzt. Eine wesentliche, von SCHMIDT-BLEEK daraus abgeleitete Konsequenz lautet, daß Güter und Dienstleistungen dramatisch "dematerialisiert" werden müssen, und zwar "von der Wiege bis zur Bahre" und zuerst in den Industriestaaten.⁷⁵

Der notwendige Wandel ist nicht nur ein technischer, er ist ein struktureller, der weite Bereiche des Wirtschaftslebens und auch kulturelle Werte einbeziehen muß.

3.3.4. Trendwende unabdingbar

Die menschliche Existenz beruht im wesentlichen auf dem Zusammenwirken zweier Systeme: auf einem natürlichen und einem künstlichen Produktionsystem (Wirtschaftssystem oder Technosphäre). Das natürliche System (Ökosystem) stellt die Ressourcen für das künstliche Produktionssystem zur Verfügung, bildet ein Aufnahmedepot für Reststoffe aus der Technosphäre⁷⁶ und enthält auch immaterielle Werte, wie Ästhetik und Erholung; das Ökosystem wird vom Prinzip der "ökologischen Weisheit" geleitet.

Das Wirtschaftssystem versorgt die Menschen mit Waren aller Art, indem es natürliche Ressourcen für den Gebrauch modifiziert. Es beinhaltet alle anthropogenen Aktivitäten.

Weil der Mensch ein Teil der Natur ist, kann das künstliche System nur im natürlichen System eingebettet betrachtet werden, nicht aber von ihm isoliert. Denn überall dort, wo von der Natur selbst nicht Erfundenes (oder "absichtlich" Weggelassenes) auftaucht, muß sich das bereits vorher dort Vorhandene chemisch, physikalisch und biologisch mit den "unbekannten Eindringlingen" der klassischen Syntheseprodukte und ihrer Bruchstücke auseinandersetzen.

⁷⁵ SCHMIDT-BLEEK (1993) S. 49.

⁷⁶ Ökologisch wichtiger als die Menge von Reststoffen ist zumeist ihre Qualität, ist die Frage, ob sie schonend verarbeitbar sind. Die derzeit so aktuelle Konzentration auf die Mengenreduzierung läuft Gefahr, in ihrer Negation der Qualitäten von Stoffen 'wesentliches' zu übersehen. Siehe dazu VON GLEICH (1993) S.6 ff.

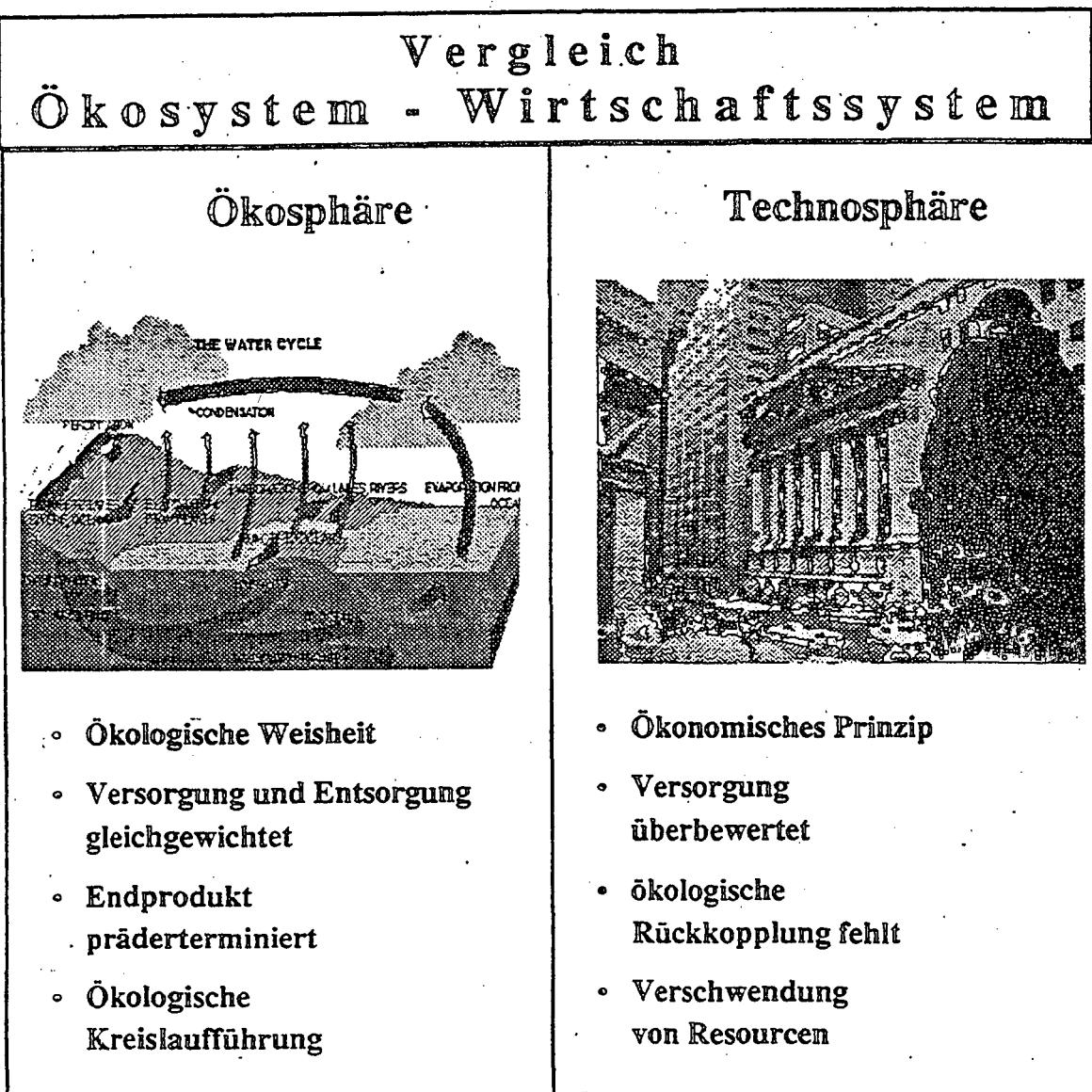


Abb. 11 Vergleich Ökosystem - Wirtschaftssystem

© CONCERNED PEOPLE 1994

Die unreflektierte Gegenüberstellung von einer der Ökosphäre gegenüberstehenden Technosphäre suggeriert eine real nicht existierende Unabhängigkeit, Abgrenzbarkeit der beiden 'Sphären'. Gerade weil der gesellschaftliche Stoffwechsel den Naturhaushalt schon immer geprägt hat, muß nach VON GLEICH das Ziel der bewußten Einbettung des gesellschaftlichen in den Naturhaushalt und nicht das Abschotten des einen gegen den anderen in den Vordergrund gestellt werden. Die Unterscheidung zwischen 'offenen' und 'geschlossenen' Anwendungen von Stoffen verliert dadurch nicht ihre ökologische Bedeutung, wird jedoch stark relativiert.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

HABER weist zurecht auf den bestehenden "Stoffkreislauf-Mythos" hin und schlägt dagegen "ökologisch geordnete Stoff-Flüsse" als Leitkonzept vor.⁷⁷ Auch SCHMIDT-BLEEK zeigt auf, daß etwa der Verbrauch von Energie selbst von ökologischer untergeordneter Bedeutung ist. Es sind die mit dem Transport, der Umwandlung und dem Verbrauch von Energie verbundenen Stoffströme, welche die wesentlichen Umweltauswirkungen hervorrufen.⁷⁸ Benötigt werden also Strategien, die unsere Wirtschaftsprinzipien den Naturstrategien weitgehend annähern können.⁷⁹

Die Reichweite des Begriffs der Nachhaltigkeit in der sanften Chemie erstreckt sich schwerpunktmaßig auf die Gewinnung der Rohstoffe, betrifft aber auch die Verarbeitung, die Verwendung und die Entsorgung der Endprodukte.

Die Kapazität des materiellen Anteils eines biologischen Systems wird im wesentlichen durch zwei Parameter bestimmt:

1. die Menge an Ressourcen,
die aus einem System kontinuierlich entnommen werden können.
2. die Tragfähigkeit des Systems für eingebrachte Abfälle.

Der erste Parameter ist vergleichsweise leicht zu bestimmen. Für die Umsetzung sind Daten der land-, forst- und gewässerwirtschaftlichen Produktionsstatistik, Grunddaten der Verfügbarkeit ökoproduktiver Flächen, der Sonneneinstrahlung, der Photosyntheseleistung und des Wasserhaushaltes nötig.

Über die Belastbarkeit von Ökosystemen sind derartig handfeste Kenntnisse nicht zu erwarten.⁸⁰ Hier ist nicht nur eine Bewertung des quantitativen Eintrags (Wieviel verträgt das Ökosystem?), sondern auch eine qualitative Beurteilung notwendig (Welche Stoffe verträgt das System, und welche Wirkungen lösen sie bis zu ihrem vollständigen Abbau aus?).

Um von Nachhaltigkeit sprechen zu können, dürfen die Grenzen dieser beiden beschränkenden Parameter nicht überschritten werden.⁸¹

⁷⁷HABER (1993) S.4 ff.

⁷⁸SCHMIDT-BLEEK (1994) S.15.

⁷⁹Einen interessanten Ansatz dazu haben Harry LEHMANN und Ulrike BRÜGGERMANN vom Wupperthal Institut entwickelt, das Instrument der "Computerunterstützte Stoffstromanalyse" (Computer Aided Material Flow Analysis, CAMA) wurde 1993 erstmals publiziert.

⁸⁰HOLLING (1992).

⁸¹WACKERNAGEL, MATHIS et al. (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Die Grundsätze der Sanften Chemie vermeiden zumindest eine Überlastung der Ökosysteme mit den Produktionsabfällen in qualitativer Hinsicht.

Die geringfügigen Veränderungen, die an den Stoffen vorgenommen werden, bestimmen den Charakter der Abfälle, die während des Produktionsprozesses entstehen.

Als Orientierungshilfe für künftige Handlungsweisen (und für die nachhaltige Gewinnung von nachwachsenden Rohstoffen) können bestehende Vorbilder der schonenden (und sozialverträglichen) Nutzung des tropischen Regenwaldes und der darin vorkommenden Naturrohstoffen herangezogen werden.⁸²

Um eine zukunftsfähige Wirtschaft zu schaffen, genügt es freilich nicht, den status quo von 'Ökosphäre' und 'Technosphäre' technologiepolitisch aufeinander abstimmen zu wollen. Die Wertediskussion, das Wohlstandsmodell an sich und die Frage nach der Verantwortung für künftige Generationen sind fester Bestandteil dieses Strukturwandels. Das neue Öko-Bewußtsein bezieht sich nicht nur auf den Erhalt der Natur wegen ihrer materiellen Werte. "Nachhaltig zukunftsverträgliche Entwicklung beinhaltet auch die Erhaltung der belebten und unbelebten Natur sowie von *Kulturgütern als ästhetischem Wert*. Der Verlust von Vielfalt und Vitalität der Umwelt stellt die menschliche Identität in Frage und entzieht damit künftigen Generationen die Grundlage für ihre Kultur. Die daran orientierte technologische Neuorientierung ist Voraussetzung für dauerhaftes menschliches Leben."⁸³ Auf die Konsequenzen des Verlustes dieser Werte verweist auch schon Konrad LORENZ. Er sieht in der Entfremdung von der Natur eine Hauptursache in der ethischen und ästhetischen Verrohung des Zivilisationsmenschen.⁸⁴

- Aus diesem Grund führten Proponenten der sanften Chemie wie FISCHER und VON GLEICH die Achtung und Ehrfurcht vor der gewachsenen Struktur als eine der zentralen Leitlinien der neuen Stoffpolitik ein. Diese Ethik zu einem grundlegenden Motivationsprinzip zu erheben, hat durchaus grob- und feinstoffliche Auswirkungen.

⁸²Die Firma ABAX (Braunschweig) bezieht etwa das Kokosöl für ihr Waschmittel AWALAN von einer nachhaltig wirtschaftenden Kokosfarm in Brasilien und zahlt dem Kokoslieferanten für das kontrolliert-biologisch hergestellte Fett den dreifachen Welthandelspreis. Der brasilianische Partner, Jaou Chaves in Porto Segura (Bahia), produziert umwelt- und sozialverträglich, verzichtet auf Monokultur und Pestizide, seine Kokosbauern erhalten um 50% mehr Lohn für ihre Arbeit als der Staat vorschreibt, und Chaves sorgt in vorbildlicher Weise für medizinische Betreuung und wirtschaftliche Sicherstellung seiner Angestellten. Das COCO BAHIA -Projekt schont nicht nur Boden und Gesundheit der Menschen in der Dritten Welt, die Rohstoffe der Sanften Chemie für die "erste Welt" werden auch zu einem fairen Preis gehandelt.

⁸³ENQUETE-KOMMISSION Deutscher Bundestag: Umweltverträgliche Stoffkreisläufe (1993) S. 53.

⁸⁴LORENZ (1973), S. 23-32.

Die naturwissenschaftlich-technische Forschung der letzten Jahrzehnte bestand im wesentlichen aus der Analyse von Stoffen und der nachfolgenden strukturellen Modifikation für die Anwendung (Nutzung durch Veränderung). Die Achtung der gewachsenen Struktur verschiebt die Handlungstrategie von der Veränderung der Stoffe zur genauen Beobachtung der Stoffe (Nutzung durch Beobachtung). Durch diese Verschiebung kommt es zu einer Nutzung der gewachsenen natürlichen Strukturen vorzugsweise auf dem höchsten molekularen und energetischen Niveau, sowie zu einer kaskadenförmigen Art der Nutzung, bei der das Ergebnis der vorherigen Nutzung zum immer noch wertvollen Ausgangspunkt der nächsten Nutzungsform wird.⁸⁵ Durch diesen ethischen Anspruch werden die Grenzen und Regeln des Zusammenspiels des ökologischen und ökonomischen Systems neu zu setzen sein.

Jedes ökologische System unterliegt Grenzen, die nur bis zu einem gewissen Grad verschoben werden können, z.B. durch Maximierung der Ausbeuten, durch Verfahrensoptimierungen, Mehrfachnutzungen usw.. VON GLEICH bemerkt in diesem Zusammenhang, daß eine Produktivitätssteigerung weniger durch gesteigerten Betriebsmitteleinsatz, als durch ausgeklügelteren Umgang mit der Natur (sophistication), d.h. durch intelligenten Arbeitseinsatz erzielt wird⁸⁶. Auch diese Grenzen sind nicht beliebig erweiterbar. Nach den Kriterien des Sustainable Development ist die Nutzung von nicht erneuerbaren Ressourcen in soweit statthaft, wie künftige Generationen dadurch nicht schlechter gestellt werden. Die Position der gegenwärtig handelnden Generation wird dadurch vom reinen Nutzer zum Verwalter der natürlichen Güter differenziert.⁸⁷

Die erforderliche Trendwende bezieht ihre Legitimation aus den relevanten Risiken der derzeitigen Stoffpolitik; die Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt" des deutschen Bundestages nennt fünf Charakteristika:

⁸⁵VON GLEICH (1993).

⁸⁶Als weiterer Begriff aus dem englischsprachigen Raum im Zusammenhang mit umweltgerechter Produktgestaltung ist der Terminus "environmental elegance" aufgetaucht. Dieser Begriff soll eine gewünschte Balance zwischen Produktionskosten, Verkaufspreis, Marktanforderungen, Technologieeinsatz und Umweltbelastung zum Ausdruck bringen.

⁸⁷Die Symbolik des Konsums und weniger sein Nutzen scheint die eigentliche Crux zu sein. Wir Menschen leben in Bedeutungswelten und diese Bedeutungen sind heute sehr stark an Konsumobjekte gebunden (z.B. Automobil).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

- **Globalität** - Ihre Auswirkungen erstrecken sich über den gesamten Globus
- **Irreversibilität** - Einmal eingetretene Schäden lassen sich nicht oder nur über sehr lange Zeiträume und unter extrem hohen Kosten wieder rückgängig machen.
- **Zeit- bzw. Beschleunigungsfaktor** - Veränderungen der stofflichen Umwelt erfolgen so schnell, daß evolutionserprobte Anpassungsmechanismen nicht mehr funktionieren.
- Schädigung und Schäden verteilen sich ungleich über den Globus. Daraus ergeben sich Verteilungskonflikte innerhalb einer Generation.
- Schädigung und Schäden verteilen sich ungleich über die Generationen. Daraus ergeben sich Verteilungskonflikte zwischen Generationen.

Darüber hinaus wird diese Stoffpolitik durch die Problematik der **Nicht-Wißbarkeit** bestimmt. Der technologisch-wissenschaftliche Fortschritt in den Industriestaaten war im letzten Jahrhundert einer beschleunigten Entwicklung unterworfen. Das bedeutet: Die Möglichkeiten zu tiefgreifenden stofflichen Eingriffen und Umwandlungen haben rasant zugenommen. Die Mittel für eine Beurteilung und Bewertung dieser Veränderungen hinken dieser Entwicklung hinterher. Für einen verantwortungsvollen Abwägungsprozeß über den Einsatz einer Technologie und ihrer Folgeprodukte ist es notwendig, diese Lücke möglichst klein zu halten.

VON GLEICH empfiehlt aus diesem Grund im Sinne des Vorsorgeprinzips Verhaltensänderungen, die Rücknahme der Eingriffstiefe bzw. Handlungsmächtigkeit und damit auch den bewußten Verzicht auf vielversprechende technische Möglichkeiten, wenn diese Wissenslücke nicht ausreichend geschlossen werden kann.⁸⁸

Trotz vieler Bemühungen für einen ökologischen Strukturwandel sind in wichtigen Bereichen der Industriegesellschaft noch erhebliche Defizite festzustellen. Zwar sind in vermehrtem Maße legislative, technische und finanzielle Anstrengungen des staatlichen und industriellen Umweltmanagements zu verzeichnen, doch in Summe spitzen sich die ökologischen Krisen weiter zu. Eine nachweisbare Trendwende vom gedanken- und rücksichtslosen Umweltverbrauch zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise ist bei Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzung und Wiederverwertung von Produkten noch nicht vollzogen.⁸⁹

⁸⁸VON GLEICH (1993).

⁸⁹SCHWANHOLD (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Im **Abfallbereich** konnte die Zunahme der Mengenströme zwar abgebremst werden, eine befriedigende Antwort nach einer mitweltverträglichen Behandlung vieler Produkte nach Gebrauch steht aber bis heute aus. Die stoffliche Zusammensetzung der Produkte (Verbundmaterialien) und die teilweise hohe Schadstoffbelastung führt in vielen Fällen zu einer nahezu unlösaren Entsorgungsaufgabe.

Im **Gewässerbereich** liegen die Schwermetallgehalte zwar niedriger und die Sauerstoffgehalte höher als in früheren Jahren, der Nährstoff- und Salzgehalt sowie die Konzentrationen an schwer abbaubaren organischen Substanzen sind aber noch viel zu hoch. Qualitätsvergleiche hinsichtlich des Grundwassers sind wenig aussagekräftig, da langfristige Meßreihen fehlen. Die zunehmende Häufigkeit der Feststellung von kritischen Schadstoffgehalten (z.B. Chlororganika, Benzol und Atrazin) deuten auf eine *Verschlechterung des Zustandes* hin.

Während in den letzten Jahren die Umweltbelastung in den klassischen Segmenten (Wasser, Boden, Luft) bei der Stoffproduktion verringert werden konnte, blieb die **Hauptemissionsquelle** weitgehend unbeeinflußt: Die Belastung durch die Produkte selbst.

Nicht nur die gezielt in Verkehr gesetzten Produkte, sondern auch die in ihnen enthaltenen Verunreinigungen und die bei der Herstellung entstehenden Abfälle stellen eine zunehmende Belastung für die Biosphäre dar.

Obwohl es nicht an Aufforderungen fehlt Ressourcen zu schonen und die Stoff- und Energieumsätze insgesamt deutlich zu verringern, um künftigen Generationen ihre Zukunftschancen zu wahren, kritisieren SCHWANHOLD und andere Autoren den Mangel an Strategien, die divergierenden Interessen und unterschiedlichen Handlungsansätze von Politik, Industrie, Gewerbe, Handel, Konsumenten und Umweltschutzverbänden zusammenzuführen.⁹⁰

⁹⁰SCHWANHOLD (ENQUETE KOMMISSION) (1994).

3.4. Die neue Aufgabenstellung: Sanfte Technik

Ziel dieses ersten Teils der Projektarbeit "Sachte Chemie" ist:

Der Entwurf eines theoretischen Gedankengebäudes, das die Richtlinien und Arbeitsmethoden einer *s a n f t e n* chemischen Produktionsweise festlegt.

Das Adjektiv "sacht" in der Wortwahl könnte in der Weise mißdeutet werden, daß es sich hierbei lediglich um ein sozial- oder geisteswissenschaftlich begründetes Vorhaben handelt, dies trifft keineswegs den Kern der Intentionen. Die Sachte Chemie wird zwar auch mit historischen, pädagogischen, philosophischen, soziologischen und sogar ästhetischen Argumenten begründet, sie verfügt indes ebenso wie die sachte Technik (soft technology) über eine solide naturwissenschaftlich fundierte Basis.⁹¹

3.4.1. Grundgedanken

Um das Konzept für eine sachte chemische Produktionsweise zu erstellen, war es notwendig einige Randbedingungen zu definieren:

1. Die Erde ist als beinahe geschlossenes System anzusehen. Leben ist auf die Biosphäre beschränkt, sie bildet ein *globales Ökosystem*.
2. Auf die Erde trifft von der *Sonne Strahlungsenergie*, die bis auf geringfügige Schwankungen konstant ist. Diese Strahlungsenergie und ihre Konversionsformen stehen dem Leben auf der Erde zur Verfügung (also auch das Erdöl, siehe dazu 3.2. Stoffströme im Blickpunkt).
3. Das globale Ökosystem enthält alle Formen belebter und unbelebter Natur. Seine Zustandsgrößen (übertragen aus der physikalischen Chemie) wie Populationsdichten, Generationszeiten, Syntheseleistung, etc. sind über die Zeit nicht konstant, sondern unterliegen einer stetigen oder auch sprunghaften Veränderung. Es gibt prinzipiell *keine ökologische Stabilität*.
4. Das globale Ökosystem und damit auch lokale Ökosysteme haben die Möglichkeit der stetigen *Adaption* auf sich langsam ändernde Umgebungsbedingungen. Dazu notwendig sind: eine große ökologische Vielfalt, ein genügend großes Gebiet und einige Generationszeiten.

⁹¹ Die in manchen Bereichen der Sachten Chemie noch ausstehende Quantifizierbarkeit teilt dieser stoffpolitische Arbeitsentwurf mit anderen modernen naturwissenschaftlichen Konzepten etwa im Bereich der Chaosforschung oder der momentan geradezu ausufernden Umweltwissenschaft.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Ökologische Schocks (Schadstoffemissionen, Treibhauseffekt etc.) führen zu einer Abnahme der Artenvielfalt und damit zu einer verminderten Adaptionsfähigkeit.

Ausgehend von diesen Randbedingungen ergeben sich für stoffliche Umsetzungen durch den Menschen einige Konsequenzen:

1. Die Nutzung von *fossilen* oder mineralischen *Energiequellen* ist nur mit einem *Zeitlimit* vertretbar, um die Zeit für Forschung und Entwicklung zur Sonnenenergienutzung zu überbrücken.
2. Anzustreben ist die möglichst weitgehende *Verwendung von Naturstoffen*, die nur auf bestimmte Zeit dem natürlichen Stoffkreislauf "ausgeliehen" werden, nach der Nutzung aber wieder in das ursprüngliche Ökosystem zurückgeführt werden, ohne daß es zu schockartigen Beeinträchtigungen kommt.
3. Der *Gesamtstoffumsatz* an Verbrauchs- und Gebrauchsgütern in den Industrieländern muß (wie der Energiekonsum) *drastisch gesenkt* werden.

Was den naturwissenschaftlich-materiellen Teil betrifft wurden, bei der Suche nach einer praktikablen Alternative zur herkömmlichen Chemie von den Mitgliedern des AK Sanfte Chemie in den letzten Jahren drei Prämissen erarbeitet.⁹²

⁹²Seit 1985 und in der Folge betätigen sich im Arbeitskreis Sanfte Chemie:
 Prof. Dr. Armin von Gleich, Biologe und Sozialwissenschaftler, Universität Bremen
 Doz. Dr. Hermann Fischer, Chemiker, Dozent TU Braunschweig
 Dr. Wolfgang Linden, Chemiker, Katalyse Umweltinstitut, Köln
 Dipl. Chem. Hanswerner Mackwitz, Lektor TU Wien
 Dr. Lutz Stäudel, Chemiedidaktiker, Gesamthochschule Kassel
 Dr. Peter Braun, Chemiker, B.A.U.C.H. Analyseinstitut Berlin
 Wilfried Bobles, Bioingenieur Hamburg
 Dr. Mins Minssen, Biochemiker, Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel
 Dr. Georg Keller, Chemiker und Mediziner, Stuttgart
 Reinhard Leeb, Ökologiestudent Wien
 Mag. Dr. Christoph Neumann, Biochemiker Universität Wien
 Prof. Dr. Friedhelm Diehl, Chemiker und Allergologe Fachhochschule Fulda
 Martin Weishäupl, Chemiker Global 2000, Wien
 Dr. Kari-Otto Henseling, Chemiker Enquête-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt, Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft", Deutscher Bundestag, Bonn.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

3.4.2. Neue Produktionskonzepte

Es wurde ein neuer Grundkonsens über eine Stoffproduktion vereinbart, welche sich nicht mehr an den Leitbildern einer manipulier- und ausbeutbaren Natur (im Sinne von Bacon und Descartes) orientiert, sondern am Leitbild der *natürlichen Vielfalt, Selbstorganisation und Regenerativität*. Diese Forderung setzt voraus, daß die pädagogischen und philosophischen Grundlagen der heutigen Chemie vorurteilslos reflektiert werden.

Zwar kann die Art und Weise, wie die Natur mit Stoffen und Energie umgeht, in vielen Fällen nicht direkt in die Technik übertragen werden. Dennoch lassen sich im Hinblick auf die Funktion der ökologischen Gesamtsysteme und die ökologisch optimierten Naturstrategien wertvolle und praktische Impulse für die Sanfte Chemie und Ökotechnik des Menschen ableiten.⁹³ STURM und HEYDEMANN legen sich in diesem Zusammenhang auf sechs Naturstrategien und Wirtschaftsprinzipien der Natur beim Umgang mit Stoffen fest (sie werden weiter unten im Kap. 4.3. "Das Konzept der Sanften Chemie" näher erläutert).⁹⁴

1. Naturstrategie der *Sparsamkeit*
2. Naturstrategie des Stoff-Recyclings in *Verwertungsketten* und -kreisläufen
3. Naturstrategie der *Langsamkeit* (zeitliche Streckung und Stetigkeit)
4. Naturstrategie der *Vielfalt, Spezialisierung* und *Selektivität* (in überlappenden und ergänzender Konkurrenz bei Produkten und Produktionswegen)
5. Naturstrategie der *evolutiven Entwicklung*, der *Fehler- und Reparatur-freundlichkeit*

3.4.3. Neue Gebrauchsstoffe

Eine innovative Palette von Produkten des täglichen Gebrauchs wird forciert, welche sich nicht mehr am Ideal der Naturfremdheit ("synthetisch ist Trumpf"), Stabilität ("Kunststoffe für die Ewigkeit") und technischer Perfektion ("Ultra-weiß-wasch") orientiert, sondern am Vorbild der *Naturnähe*, rascher Kreislaufschließung und *bio-ökologischer Angepaßtheit*.

⁹³HEYDEMANN (1990) und (1991).

⁹⁴STURM (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Dieses Postulat erfordert eine nüchterne Bestandsaufnahme der toxikologischen und ökologischen Wirkungszusammenhänge synthetischer Stoffe sowie das Einverständnis der Grenzen der Erkenntnis⁹⁵ möglicher Kombinationswirkungen von Haupt- und Nebenprodukten.

3.4.4. Neue Produktlinien

Ein neues Design chemischer Produktionen wurde entworfen, welches sich aus der historisch gewachsenen Abhängigkeit von fossilen Primärrohstoffen herauslöst, keine hochreaktiven Zwischenprodukte und aufwendige Hochsicherheitstechnik benötigt. Dieses avantgardistische Design verhilft dem ökologisch richtigen Recyclinggedanken zum Durchbruch, indem es von hochkomplexen Naturstoffen ausgehend mit möglichst geringen "Eingriffstiefen" und "Zurichtungen" erst die Voraussetzungen für eine perfekte und rasche Wiedereingliederung der Materie in die natürlichen Stoffkreisläufe schafft.

Eine solche Neustrukturierung der prozessualen Stoffströme erfordert die konsequente Einübung in vernetztes Denken und Handeln im Hinblick auf die ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen der heutigen Chemiewirtschaft in lokaler wie globaler Dimension - und zwar entlang der gesamten Produktlinie bis zum Letztabfall von Abbauprodukten in der Biosphäre.

Als Konsequenz aus den genannten Forderungen leitet FISCHER die These ab, wonach die in der Chemie verwendeten Verfahrenstechniken, Umwandlungsprozesse, Energie- und Stoffströme (prozessuale Betrachtung) mindestens gleichrangig bewertet werden müssen, wie die eingesetzten und resultierenden Stoffe selbst (substantielle Betrachtung). Die bisher weitgehend allein vertretene statische Bewertung von Chemie wird damit in eine dynamische Bewertung überführt.⁹⁶

⁹⁵ Es gibt inzwischen genügend Beispiele für das mangelnde Vermögen der Naturwissenschaft, langfristige Auswirkungen synthetischer Chemikalien auch nur annähernd abzuschätzen. Die ozonschädigenden Fluorchlorkohlenwasserstoffe etwa wurden nach ihrer Synthese aufgrund bestechender technischer Vorzüge geradezu euphorisch begrüßt.

⁹⁶ FISCHER (1993) S.114.

3.4.5. Querverbindungen zu Wissenschaft und Gesellschaft

Ob die Sanfte Naturstoffchemie in der Lage sein wird, sanfter mit der Natur und mit dem Menschen - umzugehen, wird davon abhängen, ob die Eigenschaften, die wir von ihr einfordern, diese Prämissen erfüllen können. Und dies hängt wiederum davon ab, wie konsequent die Analyse der Fehlentwicklungen der heutigen Technik und ihrer Stoffströme verfolgt wird.

Da die heutige Stoffwirtschaft aus unserer Gesellschaft, unserer Denkweise und aus den Wunschvorstellungen der Machbarkeit gewachsen ist, bedeutet eine Auseinandersetzung mit der Sanften Chemie notwendigerweise auch einer *Auseinandersetzung mit gesellschaftlichen Zielen und Kriterien*.

Auch die Wissenschaft selbst spielt dabei eine maßgebliche Rolle, indem sie über die Fragen entscheidet, auf welche die Technik Antworten zu finden hat. Wie die Wissenschaft die Fragen formuliert, bestimmt darüber, welche Aufgaben die Technik für sich selbst lösen will. Wie Wissenschaft eingesetzt wird, ist richtungsweisend für die Art von Technik, mit der wir es heute zu tun haben und welche gesellschaftlichen und umweltrelevanten Konsequenzen daraus erwachsen. Die Wissenschaft stellt - bewußt oder unbewußt - viele Weichen in der technischen und somit auch in der gesellschaftlichen Entwicklung.

3.4.6. Prävention statt Symptombehandlung

Ein Verhaltensmuster, welches bei der Fehlentwicklung von Wissenschaft und Technik besonders ins Gewicht fällt, ist die mangelnde Anerkennung und somit auch fehlende Förderung von Präventionsstrategien. In den meisten technischen Anwendungsbereichen wird Symptombehandlung statt Prophylaxe vorgezogen.

Dies hat bedeutende Konsequenzen für die Umweltbelastung, den Rohstoff- und Energieverbrauch, die Gesundheit von Mensch und Natur. Aus systemanalytischen Überlegungen lässt sich indes folgern, daß Vorsorgemaßnahmen mittel- und langfristig erheblich günstiger zu bewerten sind als "Reparaturen". Deshalb stellt sich die Frage, wer von der Problemvermeidung profitiert? Offensichtlich diejenigen, die nichts für "Reparaturen" ausgeben müssen, sei es für den Schutz kranker Pflanzen, die Reinigung belasteten Grundwassers oder die Behandlung chronischer Krankheiten.

Daß die technische Symptombekämpfung dennoch seit langem als "integraler Teil unserer Wirtschaft" verstanden wird, hängt mit ihrer *"Doppelverdienst-Funktion"* zusammen, indem die eine Hälfte an der Entstehung des Problems, die andere an deren "Lösung" finanziell beteiligt ist. Die Reparaturkosten tragen zwar zum Bruttosozialprodukt bei, schlagen jedoch im Bereich der Lebensqualität negativ zu Buche. So lernt ein Chemieingenieur heute lediglich Umweltprobleme mithilfe der Technik zu behandeln. Soziale - oder Verhaltensänderungen (oder auch grundsätzlich neue Prozeß- bzw. Stoffstromszenarien) sind noch kaum Teil seiner Ausbildung.

Bei der Ausübung seines Berufes liegt es deshalb näher, eine Kläranlage, einen Filter oder eine Müllverbrennungsanlage mit Rauchgaswäsche zu installieren, anstatt sich mit Strategien der Kreislaufwirtschaft an den Kern des Problems heranzutasten.⁹⁷ Wer dafür sorgt, daß das Problem an der Quelle vermieden wird, erhält im Regelfall noch nicht die nötige Anerkennung.

3.4.7. Von der meßbaren Quantität kleiner Größen zur Vernetzungsstrategie

Ein weiterer Aspekt einer Denkweise, die eine integrale Problembehandlung erschwert, ist die *Betonung von scheinbarer Exaktheit*⁹⁸ bei der Beantwortung von Fragen, z.B. von Grenzwertüberschreitungen. Die Gewichtung der Quantifizierbarkeit verhindert häufig eine tiefere Auseinandersetzung mit der Ursache des Problems, etwa bei der Trinkwasserversorgung: Der Technische (wie auch der wissenschaftliche) Aufwand gilt auf diesem Sektor fast ausschließlich der Analytik und der aufwendigen Entfernung derjenigen Substanzen, die nicht im Wasser vorhanden sein sollen (man denke z.B. an die reversible Osmose zur Entfernung von Nitrat oder die Aktivkohlebehandlung von CKW-belastetem Grundwasser). Die Präventivoptionen werden weder umweltpolitisch noch umwelttechnisch forciert.

⁹⁷Zur Frage der Intention und der Problemlösungskompetenz hat Mark Twain den treffenden Satz formuliert: "Wenn das einzige Werkzeug ein Hammer ist, neigt man dazu, alle Probleme als Nägel zu sehen."

⁹⁸Dazu der Biochemiker und Philosoph Erwin Chargaff: "Wenn Naturforschung eine geistige Tätigkeit ist, vergleichbar, obwohl auf viel niedrigerem Niveau, mit Musik, Kunst, Dichtung, Philosophie oder Mathematik, so wird es einem jeden klar sein, daß eine Parforcejagd auf (meistens kleine) Fakten der Natur zu nichts Gute führen kann. Der Versuch, die Entdeckung von Naturgesetzen zu industrialisieren, mußte scheitern. Wissen ohne Herz und Geist ist gefährlicher als Ignoranz, denn es verdirbt den Charakter." E.Chargaff: "Neugier, Habgier, Mordgier", Die Woche 14. April 1994.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Dabei existieren Lösungsansätze, die auf mehreren Gebieten gleichzeitig Entlastungen bieten könnten. Augenfällig wären hier Maßnahmen in der Landwirtschaft, die heute als Hauptverschmutzer des Grundwassers (flächenmäßig nicht punktuell) erkannt wurde. Der wichtigste Schritt, ein Übergang zur ökologischen Anbauweise, brächte nicht nur die Lösung des Grundwasserproblems, sondern auch andere Vorteile mit sich: niedriger Energieverbrauch, eine Steigerung der Bodenfruchtbarkeit, höheren Nährwert und bessere Lagerfähigkeit der landwirtschaftlichen Erzeugnisse - und eine Verminderung der Risikoanfälligkeit.⁹⁹ Die Summe dieser nachweisbaren Vorteile scheint jedoch weder den Gewässerschutz noch die Wissenschaft der Hydrologie besonders zu beeindrucken. Dort bemüht man sich nach wie vor um eine Verbesserung der Genauigkeit der Analytik und meint, damit das Wichtigste getan zu haben. Auch die offizielle Umweltwissenschaft hat bisher noch kaum signalisiert, daß die meisten Probleme nicht durch exaktes Berechnen des Ausmaßes, sondern erst durch wirksames Begreifen der Ursache wirkungsvoll angegangen werden können.

3.4.8. Von der Beherrschung zur Symbiose

DAVIS vertritt hingegen die Auffassung, daß das *Nicht-meßbare*, das Nicht-quantifizierbare (insbesonders soziologische, gesellschaftliche Einflußgrößen) kaum wahrgenommen wird, obwohl solche Faktoren eine wesentlich größere Rolle in der Problementstehung wie auch -lösung spielen.¹⁰⁰ Die Fähigkeit, mit komplexen Systemen, nichtquantifizierbaren Einflußfaktoren und längerfristigen, vorsorglichen Planungsstrategien umgehen zu können, wird daher als wichtige Voraussetzung für die Entwicklung einer schonenden Technik und Technikwendung betrachtet.

Technik und Gesellschaft erfahren derzeit einen ähnlichen Wandlungsprozeß: Die dominierenden, beherrschenden Eigenschaften, die in der Entwicklungsphase vorherrschend waren, treten zugunsten der Eigenschaften einer *Symbiose* zurück. Die gegenseitige Abhängigkeit von Technik und Gesellschaft bewirkt, daß Änderungen im Technologiebegriff auf die Gesellschaft zurückwirken und vice versa. Nach DAVIS sind Bemühungen um eine sanftere, schonendere Technik der Zukunft Bemühungen um eine lebenswertere Zukunft.

⁹⁹Die österreichische Landwirtschaft verbraucht jährlich etwa 4.600 Tonnen Pflanzenschutzmittel in offener Landschaft, das entspricht drei Kilogramm pro Hektar Ackerfläche im Durchschnitt. Dieser Chemikalieninput würde bei flächendeckendem Biolandbau wegfallen. Die Verminderung der Krisenanfälligkeit wird aus dem verminderten Energieeinsatz für den Wegfall des synthetischen Stickstoffdüngers ersichtlich, da auch die importierten Grundstoffe für die Salpetersäureproduktion in Krisenzeiten nicht ohne weiteres zur Verfügung stehen.

¹⁰⁰DAVIS Joan S. (1992).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

3.5. Das Konzept der Sanften Chemie und sein Umfeld

Der Begriff der "Sanften Chemie" leitet sich in erster Näherung u.a. aus der Tradition einer "sanften Technologie" ab, wie sie u.a. von EDELMANN/BAER,¹⁰¹ JUNGK,¹⁰² LOVINS,¹⁰³ MÜLLER-REISSMANN,¹⁰⁴ SCHUHMACHER¹⁰⁵ und anderen Autoren bereits in den 70er Jahren determiniert und anhand vielfältiger Beispiele präzisiert wurde. Der Schwerpunkt der Sanften Chemie liegt wie bei der sanften Technik in *ökologischen Erkenntnisprozessen*. Ökologisch sanfte Lösungen sind Prozesse, welche die natürlichen Kreisläufe möglichst wenig belasten. *Materialqualität* und *Materialintensität* stehen also im Vordergrund.

Als strategische Ziele einer Sanften -, Angepaßten - oder Mittleren Technologie werden von EDELMANN/BAER angeführt:

- Annäherung von Systemen und Teilsystemen an ihre *optimale Größe*,
- Schließung von aufgebrochenen Stoffkreisläufen,
- Internalisierung externer Kosten (Bezahlung der Kosten durch die Verursacher),
- Ausgleich von Ungleichgewichten in der Verteilung lokal und weltweit
- Erzeugung möglichst hoher Qualität bei möglichst niedrigem Stoff- und Energieumsatz,
- Förderung von *dauerhaften* und *reparierbaren Produkten*, die bei ihrer Herstellung und Nutzung möglichst wenig Ressourcen beanspruchen.
- Schaffung von *sozialen Strukturen*, in denen sich der Einzelne wohl und geborgen fühlt,
- Zurückdrängung von Überspezialisierung und
- Förderung von kleinen, überschaubaren Einheiten durch *Dezentralisierung* ("small is beautiful" resp. "small is possible").

Der Begriff der mittleren Technologie beschreibt nach den geläufigen Definitionen demnach nicht nur eine bestimmte Technikkategorie, es handelt sich vielmehr um ein umfassendes Konzept, in dem die von der Technik ausgehenden *sozial-ökologischen* Wirkungen in die Bewertung mit einbezogen werden.

¹⁰¹EDELMANN, Werner/BAER, Stephan (1977).

¹⁰²JUNGK, Robert (1977), (1981), (1983), (1988).

¹⁰³LOVINS, Amory: (1978).

¹⁰⁴MÜLLER-REISSMANN, Karl-Friedrich (1978).

¹⁰⁵SCHUHMACHER, Ernst Friedrich (1974).

Auch geht es nicht darum, einzelne Aspekte eines sozial- und umweltverträglichen Handelns herauszugreifen und isoliert durchzusetzen.¹⁰⁶ Das Konzept basiert vielmehr auf einem ganzheitlichen Ansatz, der die Auswirkungen einzelner Techniken auf möglichst viele Lebensbereiche berücksichtigt und abgewogene Reaktionen fordert.¹⁰⁷ Allerdings wird der von E. F. SCHUHMACHER geprägte Begriff "small is beautiful" auch im Hinblick auf die Sanfte Chemie nicht mit Produkten und Produktionsverfahren gleichgesetzt, die vom technischen Fortschritt abgekoppelt sind. Einfach heißt vielmehr: dezentral einsetzbar, innovativ, aber mit überschaubarem Risikopotential. BOSSEL bezeichnet solche Techniken als solche, die der gesellschaftlichen Entwicklung folgen können,¹⁰⁸ während WEIZSÄCKER den Begriff der "fehlerfreundlichen Technik" geprägt hat. Das wirtschaftspolitische Credo dieser Entwicklung hat WINTER beschrieben: "Während Umweltfreundlichkeit gestern noch eine kaum honorierte Nebenleistung war, so ist sie heute bereits ein wichtiges Verkaufsargument, morgen wird sie Voraussetzung für die Verkäuflichkeit eines Produktes überhaupt sein."¹⁰⁹

Die neue Art des technischen Fortschritts, innerhalb dessen die Sanfte Chemie ihren Platz beansprucht, folgt konsequent dem permanenten *Wertewandel* der postindustriellen Kultur und Gesellschaft: Sie pflegt haushälterischen statt ausbeuterischen Umgang mit den begrenzten Gütern dieser Erde, sie sucht *Respekt* mit *anstatt Bevormundung* der Natur, sie fordert den ganzen Menschen heraus, anstatt Teilfunktionen des Menschen zu überfordern, und legt dabei größeres Gewicht auf die schöpferische Freude aktiver Produzenten als auf die billigstmögliche Versorgung passiver Konsumenten.

Der Arbeitsbegriff der "Sanften Chemie" zielt folglich darauf ab, daß die Produktion von Gebrauchsgütern des täglichen Bedarfs auf eine Art und Weise geschieht, die in der Mitwelt und Nachwelt keine dauerhaften Schädigungen hervorruft. Die Basis des Konzeptes bilden Rohstoffe, deren Herkunft wir kennen und bei deren Entstehung und Verarbeitung wir anwesend sein können.

¹⁰⁶Ein Maximum an Energieeinsparung kann beispielsweise nicht das prioritäre Ziel sein, wenn dadurch die Innenraumbelastung an Schadstoffen bedenklich zunimmt, oder die Wohnqualität leidet.

¹⁰⁷KIEFFER et al. (1988).

¹⁰⁸BOSSEL (1983).

¹⁰⁹WINTER (1990).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Das signifikante Prinzip ist daher eine möglichst weitgehende Verwendung von *Naturstoffen*, die auf bestimmte Zeit dem natürlichen Stoffkreislauf entlehnt werden, nach der Nutzung indes wieder in das ursprüngliche Ökosystem rückföhrbar sind. Diese Forderung für eine sanft chemische Produktion bedingt gegenüber der klassischen organischen Chemie eine Reduktion der möglichen chemischen Umsetzungen auf jene wenigen, die in bestehenden Ökosystemen von der belebten Natur üblicherweise wieder rückgängig gemacht werden können.¹¹⁰

3.5.1. Naturstrategien - Leitbilder/Anstöße zu einer neuen Stoffwirtschaft

Nach HEYDEMANN muß eine nachhaltige Wirtschaft geeignet sein, die natürlichen Grundlagen des Lebendigen in einer Weise zu verwalten, sodaß die *Evolution des Lebens* künftig gesichert ist. Um dieses Ziel zu verwirklichen, bedarf es einer wesentlichen *Umgestaltung der Stoffwirtschaft* und der damit zusammenhängenden Gerätetechnik, Verfahren der Rohstoffgewinnung, der Produktion, des Verbrauchs und der Reststoffbehandlung müssen dergestalt umgeformt werden, daß die Funktionsfähigkeit der Biosphäre langfristig sichergestellt ist.

Im Spannungsfeld Ökologie-Ökonomie bieten Lösungsansätze nach dem Vorbild der lebendigen Natur weit mehr *anwendungsorientierte Qualitäten*, als ihr bisher von Wissenschaft, Technik und Gesellschaft eingeräumt wurden. Drei Milliarden Jahre erfolgreich verlaufene Evolutionsgeschichte des Lebens und die während dieser Zeit erprobten Stoffbildungs- und Strukturstrategien (die Wirtschaftsprinzipien der Natur) sind nach HEYDEMANN verlässliche Wegweiser und Leitbilder - auch für die notwendige Neugestaltung der Stoffwirtschaft.

Im Stoff-Strukturbereich orientiert sich die Natur nach den folgenden Strategien:

3.5.1.1. Naturstrategie der Sparsamkeit in Bezug auf Energie und Materie

Höher entwickeltes Leben existiert nur im Niedertemperaturbereich. Leben muß sparsam mit Stoffen und Energie umgehen. Leben benötigt die energieeffiziente und gezielte (und dennoch fehlerfreundliche) Synthese einer begrenzten Anzahl von Stoffen mit einer breiten Eigenschaftspalette. Durch geeignete Kombination mit anderen Stoffen bilden sich molekulare Wechselbeziehungen und eine aussergewöhnlich große strukturelle Vielfalt heraus.

¹¹⁰Wenn lediglich die Irreversibilität im Zentrum der Debatte steht, unterscheiden sich alte und neue Techniken nur noch quantitativ in der Größenordnung der durch sie hervorgerufenen Probleme. Deshalb muß in der Diskussion über Technikfolgen festgehalten werden, daß 'der Mensch' mit seinen Stoffumwandlungen nicht einfach 'zuviel' in die Natur eingreift, sondern daß er 'falsch' mit ihr umgeht.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Als Lehre für die Sanfte Chemie folgt daraus die Erforschung der Nutzungsoptionen von Naturstoffen, natürlichen Strukturen und Naturprozessen auf dem jeweils höchstmöglichen energetischen, molekularen und strukturellen Niveau in Form langsam absteigender Kaskaden und die Nutzung der Multifunktionalität von natürlichen Strukturen.

3.5.1.2. Naturstrategie des Stoff-Recyclings in Verwertungsketten und -kreisläufen

Die Natur setzt der Nutzbarkeit ihrer Produkte keine Grenzen. Nach einer möglichst langen Nutzungsdauer auf der Primärstufe erhöht sich der Wert der Biomasse innerhalb der Nahrungspyramide, während die Masse um etwa den Faktor zehn schrumpft. Jedenfalls durchlaufen alle komplexen Stoffe mehrere Nutzungsstadien, bevor sie für eine gewisse Zeit mineralisiert werden.¹¹¹ Für jeden Aufbau von Molekülstrukturen wurden Abbaumethoden entwickelt, die in Form einer "lauwarmen Verbrennung" der Stoffe zwischen 0 °C und 40 °C, selten bis zu 80 °C, langsam und stark abgepuffert verlaufen. Der enzymatische Ab- und Umbau vollzieht sich stetig und kommt nach Durchlaufen der letzten Nutzungsstufe durch Humusbildung oder vollständige Mineralisation dem gesamten Ökosystem zugute.

Als Lehre für die Sanfte Chemie folgt daraus, daß persistente (chemisch sehr stabile) Stoffe und solche, deren Abbauprodukte ein neues Risikopotential darstellen, nach Möglichkeit vermieden werden. Als Maßstab für die Verweildauer im Ökosystem kann in erster Näherung die "ökologische Halbwertszeit" benutzt werden. Das ist jene Zeitspanne, die zum vollständigen Abbau der Hälfte einer beliebigen Stoffmenge (unter "normalen" Lebens-Bedingungen) notwendig ist.

¹¹¹ Im Gegensatz dazu verbraucht die industrielle Produktion einen Großteil der natürlichen Ressourcen. Ein tiefer chemischer Eingriff, eine weitgehende Vermischung einer Vielzahl unterschiedlicher Stoffe (Verbundmaterialien) und eine unkontrollierte Verteilung schwer abbaubarer und giftiger Substanzen verhindern in vielen Fällen eine Verwertung der Syntheseprodukte nach ihrem Gebrauch.

3.5.1.3. Naturstrategie der Langsamkeit (zeitliche Streckung und Stetigkeit)

Die Stabilität des Gesamt-Ökosystems scheint das prioritäre Ordnungsprinzip der Natur zu sein, dem sich das Streben nach individuellen Vorteilen unterordnet. In einem dynamischen Fließgleichgewicht erhält die Natur ihre chemische, physikalische und strukturelle Zusammensetzung über lange Zeiträume weitgehend konstant. Sie strebt aber auch eine langfristige Festlegung stofflicher Systeme in geeigneten Organismen (beispielsweise in Bäumen) an.¹¹²



Jede Synthesestufe mit der in ihr gebundenen Energie und in ihr enthaltenen molekularen Ordnung wird vor dem gezielten Umbau möglichst lange verwendet. Stabilisierende Substanzen, die gegen einen Abbau durch Licht, Sauerstoff, Wasser, Säuren und Mikroorganismen schützen, werden mit eingebaut oder gleich in die molekulare Struktur integriert (Beispiel Lignin).

Als Konsequenz daraus ergibt sich für die Sanfte Chemie etwa ein Forschungsschwerpunkt "Strukturbildungsprozesse", wobei Fragen der Selbstorganisation und Synergetik, der Bionik "Lernen von der Natur" sowie interorganismische stoffliche Interaktionen (Chemische Ökologie) vertieft werden müßten.

3.5.1.4. Naturstrategie der Vielfalt, Spezialisierung und Selektivität (in überlappender und ergänzender Konkurrenz bei Produkten und Produktionswegen)

Die Biosphäre synthetisiert ihre wichtigsten Strukturmaterialien (Zellulose, Lignin, Eiweiße und Chitin) mithilfe energieeffizenter, enzymatischer Prozesse aus den am häufigsten vorkommenden chemischen Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff.¹¹³

¹¹²Dies steht keineswegs im Widerspruch zur Naturstrategie des Stoffrecyclings und der Verwertungsketten!

¹¹³PETER/HESSE/MÜLLER (1992).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Ausgehend von diesen wenigen Elementen verfolgt die Biosynthese eine parallele und vernetzte chemische Spezialisierung für mannigfaltige Anwendungsbedürfnisse: Struktur- und Formenbildung, mechanische Stabilität, Kleben, Färben, Modifikation mechanischer Eigenschaften, Konservierung von Strukturen, Information für Fremdorganismen und Symbionten usw.¹¹⁴ Durch diese Vielfalt erhöht die Natur die Stabilität ihres Gesamtstoffwechsels gegenüber externen Störungen. Die Natur strebt *nicht* die optimale Lösung an, ebensowenig ist sie an einer "Breitbandwirkung" interessiert.

Für die Sanfte Chemie lässt sich aus der Naturstrategie der Vielfalt ein Arbeitsschwerpunkt anwendungsorientierter Grundlagenforschung ableiten, der sich mit naturnaher Werk- und Wirkstoffgewinnung aus organischen (nachwachsenden) Quellen, insbesondere aus der Land- und Forstwirtschaft, aus Importrohstoffen (Hafenwirtschaft) und marinen (bzw. fluvialen) Quellen befasst.

3.5.1.5. Naturstrategie der evolutiven Entwicklung, der Fehler- und Reparaturfreundlichkeit

Die Natur erprobt ihre Innovationen kontinuierlich in kleinen Schritten und mit begrenzter Eingriffstiefe. Während sie als Ganzes über lange Zeiträume chemische, physikalische und strukturelle Stabilität anstrebt, unterliegen kleinere Teilbereiche der Veränderung unter der Strategie "Fortschritt". Veränderungen werden aber nicht *a priori* als "Fortschritt", sondern abwägend auch als "Risiko" gewertet. Deshalb sind viele Naturprozesse reversibel. Das Anhalten bestimmter Evolutionsprozesse bei Nichteignung innerhalb der Ökosysteme ist in der Biosphäre üblich.

Der Minister für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, HEYDEMANN, plädiert auf der Basis dieser Naturstrategien dafür, industrielle Prozesse künftig der Organisation der natürlichen Stoffkreisläufe anzupassen. Dazu zählen der Zeitfaktor über die Schnelligkeit der Abläufe, die ökologische Grundstruktur ("Ökologisches Design") von Produkten und die Vermeidung von Stoffen, die in der biologischen Evolution nicht verwendet wurden (z.B. die Synthese von Chlororganika, der Einbau bestimmter Schwermetalle).

¹¹⁴MIETH/AMBSDORF, PETER (1992).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Explizit fordert HEYDEMANN eine Technik, die durch einen sehr selektiven Einsatz naturnaher Grundstoffe auf Mineralbasis und bestimmter nachwachsender Rohstoffe wie Zellulose, Lignin, Chitin und Eiweißstoffe das Synthesepotential und die Energiequelle der Natur (Sonne) nutzt.¹¹⁵

Zu den Gebrauchsstoffen, die nach sanft-chemischen Prinzipien nach derzeitigem Wissensstand herstellbar sind, gehören u.a. Wasch- und Reinigungsmittel, desinfizierende Agentien auf Basis ätherischer Öle, Kosmetika, Beschichtungsmittel zum Schutz, zur Pflege und zur Veredelung von Oberflächen, neue Werkstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe und Biopolymere, Klebstoffe, Baumaterialien sowie Wirkstoffe für die Landwirtschaft (Pflanzenpflegemittel).

3.5.2. Naturstrategien als Innovationsimpulse der industriellen Produktion

Zusammenfassend können aus den Naturstrategien interessante, und möglicherweise bisher kaum vorstellbare Innovationsimpulse für die industrielle Produktion abgeleitet werden. Ein Katalog von 15 vernetzten Handlungsanleitungen faßt die anwendungsorientierten Maßnahmen zusammen.

1. Die Regelung und Steuerung von Entwicklung, Produktion, Verbrauch und Verwertung nach naturanalogen Mechanismen.
2. Die Notwendigkeit der häufigen stofflichen Wiederverwertung der Produkte (Langzeitgebrauch, Vielfachgebrauch, Reparaturfreundlichkeit) auf möglichst hoher molekularer Stufe mit möglichst geringem Energieeinsatz.
3. Bei bereits vorhandenen Produktionszweigen sollte auch die Bedarfsstruktur kein Tabu mehr darstellen. Unter Einbeziehung sozialer, ökonomischer und ethischer Kriterien und Berücksichtigung des gesamten Lebensweges (Produktlinienanalyse) sind neue natur- und mitweltverträgliche Produkte zu entwickeln.
4. Anzustreben ist eine möglichst häufige stoffliche Wiederverwertung mit möglichst geringem Energieaufwand und unter Erhalt der molekularen sowie mikro- und makrostrukturellen Ordnung (kein Down-Cycling, kein "thermisches" Pseudo-Recycling).

¹¹⁵ HEIDEMANN (1993) S.302.

5. Die Festlegung/Immobilisierung/Inertisierung problematischer Stoffe (bspw. Humifizierung von Nährstoffen, Rückführung von Schwermetallen in inerter Form in die Pedosphäre).
6. Die Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebrauchsgütern.
7. Die Bevorzugung niederenergetischer, langsam ablaufender Stoffumwandlungsprozesse gegenüber Hochtemperaturprozessen.
8. Das Überdenken von Rationalisierungsvorhaben, die zu einer monotonen Vereinheitlichung führen.
9. Die Bevorzugung einer intelligenten Produktdiversifikation und von Prozessen der Miniaturisierung und Spezialisierung gegenüber zu groß geratenen Einheitsprojekten und -produkten.
10. Die Vermeidung und der Ersatz persistenter toxischer Stoffe (Xenobiotika) wie Chlororganika oder Schwermetalle.
11. Die Erhaltung der biologischen Artenvielfalt v.a. auch der Mikroorganismen (Sie werden nicht nur zur vollständigen Mineralisierung und Rückführung, sondern künftig in vermehrtem Maße auch zum Stoffaufbau benötigt.).
12. Die Einpassung industrieller Prozesse in natürliche Stoffkreisläufe: Ökologisches Produktdesign, Produkte auf der Basis von Endprodukten der Natur.

HEYDEMANN betont in seinem Exkurs, daß es keinen logischen oder rationalen Weg gibt, sich an den Strategien der Natur "vorbeizumogeln" und dennoch zukunftssicher für den Menschen zu planen und zu arbeiten. "Je eher wir dies einsehen, desto schneller können wir uns auf den möglichen Rahmen einer genügend umweltverträglichen Produktion und eines naturverträglichen Konsums einstellen. Überschreiten wir diesen in unserem technischen und wirtschaftlichen Handeln, wird unsere Zukunft zunehmend verbaut."

3.6. Die Pflanze als Inbegriff der Sanften Technologie

Die im ökologischen Kontext oft gebrauchten Begriffe "autark, dezentral und energiesparend" sind in der Pflanzenproduktion einsichtig nach-vollziehbar und zwar dann, wenn Anbau, Gewinnung und Vermarktung den geläufigen Umwelt- und Sozialkriterien genügen.¹¹⁶

Die Natur für sich arbeiten zu lassen, ist nachgerade eine Urform menschlichen Wirtschaftens. In der Pflanze liegt das Urbild der Sanften Technologie. Die zum Einsatz kommende Energie stammt ausschließlich aus der Kraft der Sonne.



Wasser, Kohlensäure und Mineralien bilden in der Pflanze eine bisher noch kaum erforschte Vielfalt von Stoffen mit großer Komplexität auf hohem stofflichem Niveau. Die Pflanze als "live-supporting-factor" gewinnt angesichts der rasant voranschreitenden globalen Klimakatastrophe immer größere Bedeutung.¹¹⁷

Das Wachstum der Pflanzen ist abhängig von der Funktionsfähigkeit des Ökosystems Boden. Es ist das artenreichste Teilsystem der Natur, das pro Hektar etwa zwei bis fünf Tonnen Lebendgewicht an Bodentieren und Mikroorganismen enthält. Diese große Anzahl von Lebewesen sorgt dafür, daß Nährstoffe auf- und umgebaut werden, daß Schadstoffe abgepuffert, Wasser gespeichert, gereinigt und abgegeben wird und somit optimale Wachstumsbedingungen für Pflanzen entstehen.

Um dieses Ökosystem in einem dynamischen Gleichgewichtszustand 'stabil' zu halten, ist ständiger Energieinput nötig, da die Bodenlebewesen für ihre Tätigkeit Prozeßenergie in Form von schnell verfügbaren Kohlenstoffverbindungen benötigen. Diese wiederum können nur die Pflanzen herstellen, indem sie mit Hilfe des Chlorophylls und der Photosynthese Sonnenenergie "organisch fixieren" und sie in Form von Wurzelabsonderungen und -ausscheidungen überall im Boden verteilen.

¹¹⁶Die Erfüllung dieser Anforderungen ist Grundlage des ökologischen Landbaus. Der ökologische Landbau zeigt, daß es möglich ist, ohne die Produktionsfaktoren Dünge-, Pflanzenschutz- und Fremdfuttermittel auszukommen und dennoch ausreichende und qualitativ hochwertige Erträge zu erwirtschaften.

¹¹⁷Vor allem wegen der Refixierungskapazität der Biomasse - auch für das anthropogen verursachte CO₂.

3.6.1. Die Photosynthese: kurzer historischer Exkurs

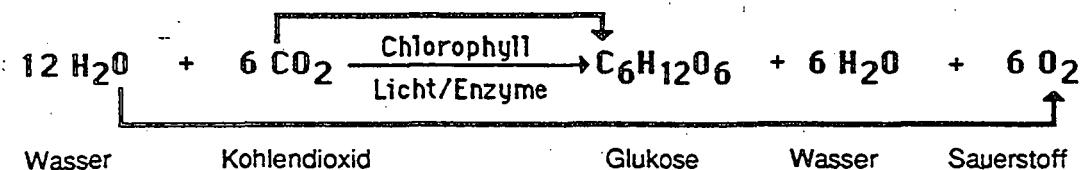
Noch im 17. Jahrhundert herrschte die Auffassung vor, daß Pflanzen ihre Nahrung nur aus dem Boden beziehen.

Der belgische Arzt, Jan Baptist van Helmont hat als erster experimentell bewiesen, daß die Pflanzen ihre Biomasse nicht in erster Linie über die Wurzeln gewinnen. Helmont ließ eine kleine Weide fünf Jahre in einem größeren Blumentopf gedeihen und stellte vor dem Einsetzen das genaue Gewicht der Erde und der Pflanze fest. Die Weide wurde lediglich mit Wasser gegossen.

Nach einem halben Jahrzehnt war der Baum um 75 Kilo schwerer geworden, während das Erdreich nur 56 Gramm(!) verloren hatte. Helmont zog daraus den (zum Teil) richtigen Schluß, daß sämtliche Biomassezuwächse dem Wasser und nicht dem Boden zugerechnet werden müssen.



Jan van Helmont
(1577 - 1644)

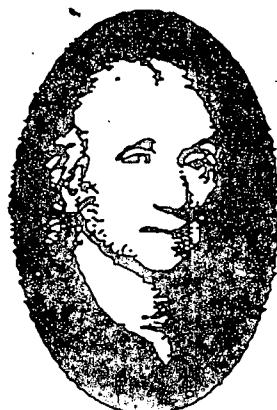


Daß auch das Kohlendioxid der Luft, das Blattgrün (Chlorophyll) und die Sonne eine wichtige Rolle bei der Photosynthese spielen, konnte Helmont noch nicht wissen. Gemeinhin versteht man unter Photosynthese denjenigen biologischen Prozeß, bei dem die elektromagnetische Energie von Lichtquanten durch Pigmente der Chloroplasten (oder ähnliche Zellstrukturen) absorbiert und in chemisch gebundene Energie (z.B. Kohlenhydrate) transformiert wird.

Im ersten Abschnitt der Photosynthese, der "Lichtreaktion" (unterer Pfeil), wird die absorbierte Solarenergie dazu verwendet, Wasserstoff von Sauerstoff zu trennen (Photolyse des Wassers) und die dabei anfallenden H-Atome energetisch zu aktivieren. Die Wasserstoffatome werden dabei in eine energiereiche Bindung an ein geeignetes Molekül überführt (z.B. Chlorophyll a), der Sauerstoff wird dabei als O₂ freigesetzt. Außerdem werden bei diesem Prozeß energiereiche Phosphatbindungen geknüpft (Bildung von ATP).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Im zweiten Abschnitt der Photosynthese (oberer Pfeil) wird atmosphärisches CO₂ in die Struktur eines C₆-Zuckers (Glukose) eingebaut. Dieser komplexe Prozeß der "Dunkelreaktion" läuft über mehrere Zwischenstufen an denen sich wichtige Enzyme (z.B. Carboxylase, Phosphatasen, Isomerasen) beteiligen, und wird auch als *Calvin-Zyklus* bezeichnet. Melvin CALVIN, Nobelpreisträger für Biochemie von der University of California in Berkeley, hat in den Jahren 1946 bis 1953 wesentlich zur Aufklärung dieses Phänomens beigetragen. Der Grundstein zu dieser Erkenntnis wurde fast 200 Jahre früher gelegt:



Joseph Priestly

Am 17. August 1771 legte Joseph Priestly einen Minzenzweig unter eine Glasglocke, in der eine Wachskerze gebrannt hatte. 10 Tage später, am 27. August, konnte er in derselben Luft eine weitere Wachskerze entzünden ohne daß sie verlöschte. Priestly glaubte eine Methode entdeckt zu haben, mithilfe derer er "die verbrauchte Luft wiederherstellen konnte, die durch das Abrennen der Kerze Schaden genommen hatte". Aus diesem Veruch schlußfolgerte Priestly, daß Pflanzen einen vitalen Bestandteil der Luft produzieren können, der bei der Verbrennung und ebenso bei der Atmung von Tieren benötigt wird. Später wurde der Beweis erbracht, daß es sich dabei um Sauerstoff handelt.

Antoine Lavoisier
(1743-1794)

Lavoisier experimentierte mit Meerschweinchen und grünen Pflanzen ebenfalls unter einer gasdichten Glasglocke. Er fand bald heraus, daß die Pflanze für die leidgeprüften Versuchstiere einen essentiellen gasförmigen Stoff zur Verfügung stellten, er nannte ihn "Phlogiston". Lavoisiers Versuche endeten abrupt am 8. Mai 1794, er wurde ein Opfer der Guillotine.

Julius Robert Mayer gilt als Mitentdecker des Ersten Hauptsatzes der Thermodynamik. Außerdem hat er als erster formuliert, daß mithilfe der Photosynthese Lichtenergie in chemische Energie verwandelt wird. Seine Einblicke gipfelten 1845 in der Erkenntnis, daß die photosynthetisierende Pflanzenwelt "die größte chemische Fabrik auf der Welt" verkörpert.



Julius Robert Mayer

Interessanterweise hat auch Ernst Friedrich SCHUHMACHER, er gilt als Begründer des "Angepaßten Technologie"-Begriffes, dem vielfältigen Nutzen von Bäumen große Bedeutung zugemessen: "Es gibt Bäume für fast alle menschlichen Bedürfnisse. Wenn jeder Inder - der Lehre Buddhas folgend - alle fünf Jahre einen Baum pflanzen und pflegen würde, ergäbe das über einen Zeitraum von fünf Jahren zwei Milliarden lebensfähige Bäume. Daraus entstünden Nahrungsmittel, Fasern, Baumaterial, Schatten, Wasser, fast alles, was der Mensch wirklich braucht."¹¹⁸

Das Konzept der nachwachsenden Rohstoffe wird in den letzten Jahren vor allem deshalb kontrovers diskutiert, weil häufig mit immer größerem technischem Aufwand von der Landwirtschaft erzeugte Nahrungsmittel auf nicht gerade "sachte" Art in Industrieholz umgewandelt werden. Als negatives Beispiel wird vielfach das Biosprit-Projekt aus Brasilien ins Feld geführt. Dort wurden durch die Intensivierung des Zuckerrohranbaus in der Tat großflächige Bodenschäden verursacht und gleichzeitig kleinbäuerlich gewachsene Strukturen nachhaltig zerstört. Die "Nachhaltigkeit der Zukunft" wird daher nur dann "im Boden wachsen" können, wenn die Ökologie nicht unter das Prinzip der Ökonomie fällt.

Unabhängig davon ist der Kohlenstoff die entscheidende Grundlage aller Lebensvorgänge. Bei der Aufnahme und Verdauung von Nahrungsmitteln etwa findet einerseits eine Umwandlung in körpereigene organische Substanz (Muskeln, Sehnen, Haut, Organzellen) statt, andererseits durch Sauerstoffanlagerung die Umwandlung in das von uns ausgeatmete Kohlendioxid. Die Differenz des Energiegehaltes von (energiereicher) kohlenstoffhaltiger Nahrung und (energiärarem) Kohlendioxid erscheint in Gestalt von Körperwärme und Bewegungsenergie.

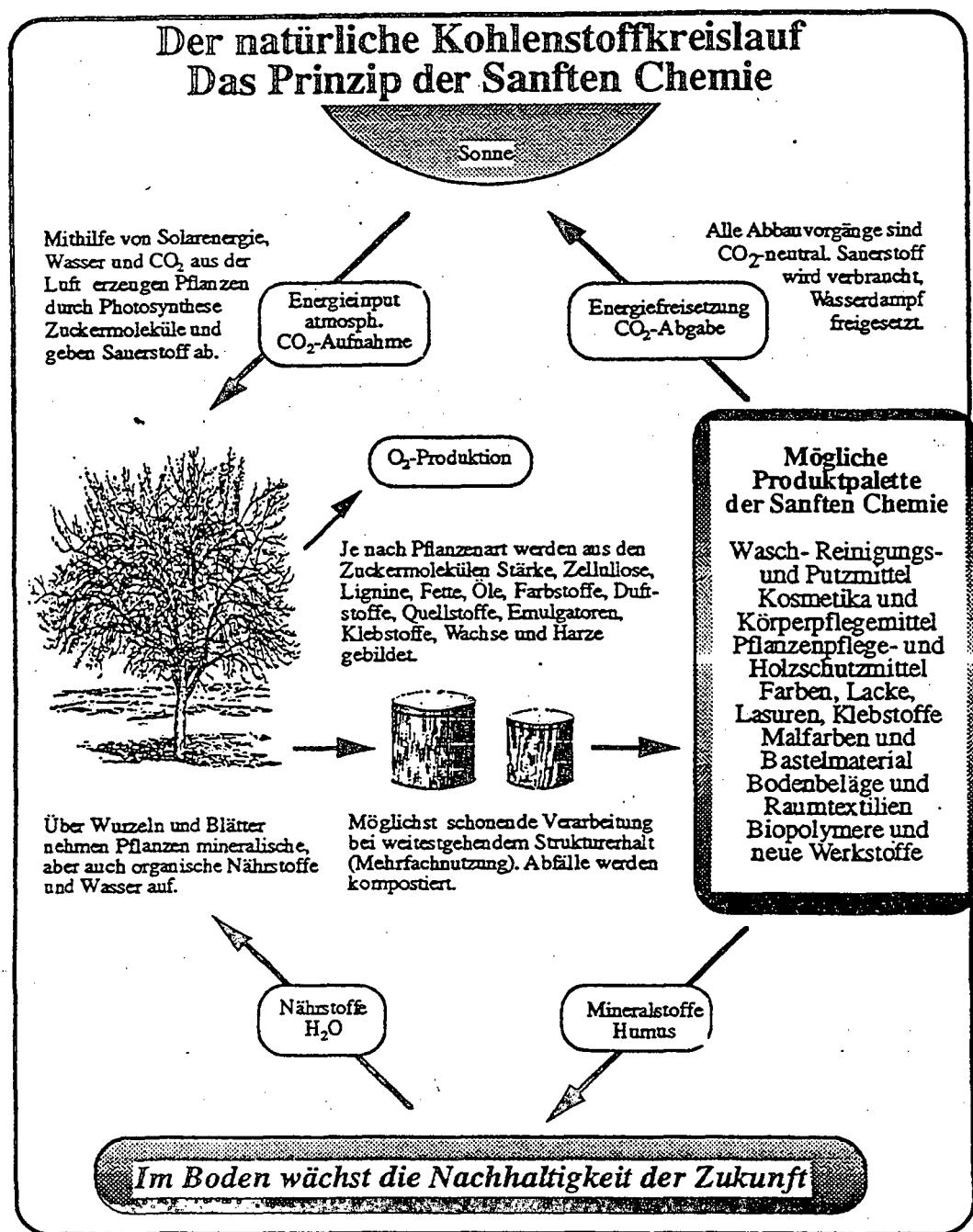
¹¹⁸SCHUHMACHER (1979).

3.6.2. Leistung und Funktion der Biosphäre

Das Leben auf der Erde entstand vor über drei Milliarden Jahren. Seit zwei Milliarden Jahren gibt es grüne Pflanzen und seit rund 400 Millionen Jahren höheres Leben auf dem Land. In diesen Zeiträumen brachte die Biosphäre Millionen von Ökosystemen und mehrere hundert Millionen Tier- und Pflanzenarten hervor.

Treffend und überzeugend beschreibt VESTER die verkannte Leistungsfähigkeit der Biosphäre: *"Die Biosphäre, dieses Supersystem aus Mikroben, Algen, Plankton, verletzlichen Tieren und zarten Pflänzchen, macht immerhin einen Jahresumsatz von 200 Milliarden Tonnen Kohlenstoff und organischem Material. Es produziert über seine subtilen Funktionsformen allein 100 Milliarden Tonnen Sauerstoff und verarbeitet selbst an Schwer- und Leichtmetallen wie Eisen, Vanadium und Kobalt, Magnesium, Natrium und Kalium Jahr für Jahr zusammen genommen viele Milliarden Tonnen, ohne je Rohstoff- oder Abfallsorgen zu kennen (für jedes Abfallprodukt stehen Organismen und Enzyme bereit, die es gleich wieder in ein neues Ausgangsprodukt verwandeln). So haben wir es auf der einen Seite mit einem Energie- und Stoffumsatz gewaltigen Ausmaßes zu tun, auf der anderen Seite jedoch mit einem System, das mit einem traumhaften Wirkungsgrad von bis zu 98 Prozent arbeitet, ein System, das eine wahre Fundgrube an technischen Raffinessen, an energiesparenden Tricks und eleganten Kombinationen der verschiedenartigsten Technologien darstellt. Wollte der Mensch mit seiner heutigen Technik die Funktionen dieser globalen Superfabrik voll ersetzen, er brauchte dazu sicher ein Tausendfaches der von ihr verbrauchten Energie und maschinell wahrscheinlich mehr Platz, als auf allen Planeten unseres Sonnensystems zusammen vorhanden ist."*¹¹⁹

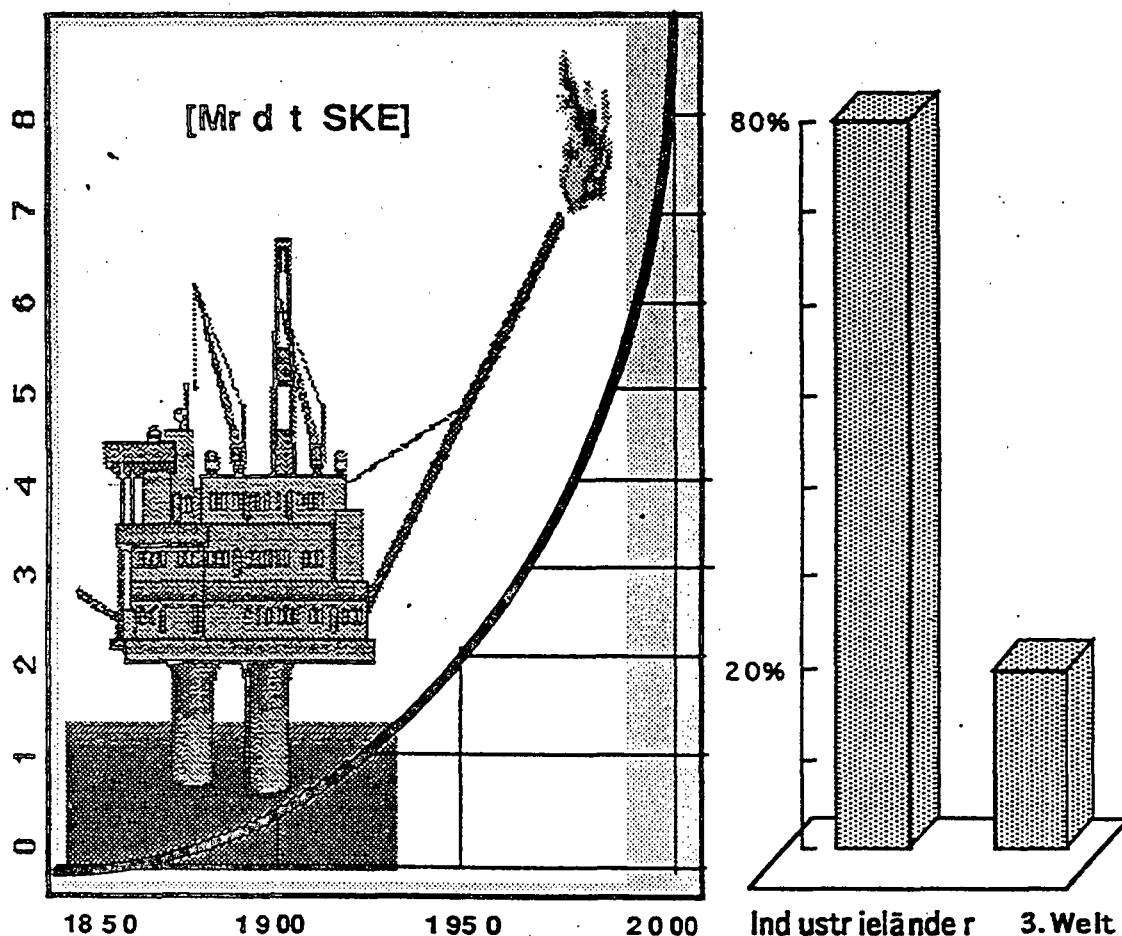
¹¹⁹ VESTER zit. nach VON WEHRENALP (1988) S. 257.



Wenn es gelingt, unseren Energiebedarf von der Sonne zu decken und überdies ein relevantes Kontingent der Gebrauchsgüter aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen, die nach den Methoden des ökologischen Landbaus kultiviert werden, ist der Begriff der Kreislaufwirtschaft - seiner logischen Bedeutung gemäß - gerechtfertigt.

Im Gegensatz dazu steht die bisherige Praxis der Nutzung fossiler Rohstoffe und auch der Kernkraft in Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch der Menschheit.

Energieverbrauch (fossile Quellen und Kernkraft)



Besonders augenfällig ist die Tatsache, daß die Industrieländer mit nur einem Viertel der Weltbevölkerung 80 Prozent der Weltenergie für sich beanspruchen.

Unsere Erde hat bisher etwa 10^{20} Tonnen Biomasse produziert (als Trockenmasse gerechnet).¹²⁰ Dieses 'Quantum' Materie war irgendwann einmal lebendig, bestand also aus Eiweiß, Zellulose, Holz, Knochen oder Millionen anderer Substanzen in Pflanzen und Tieren.

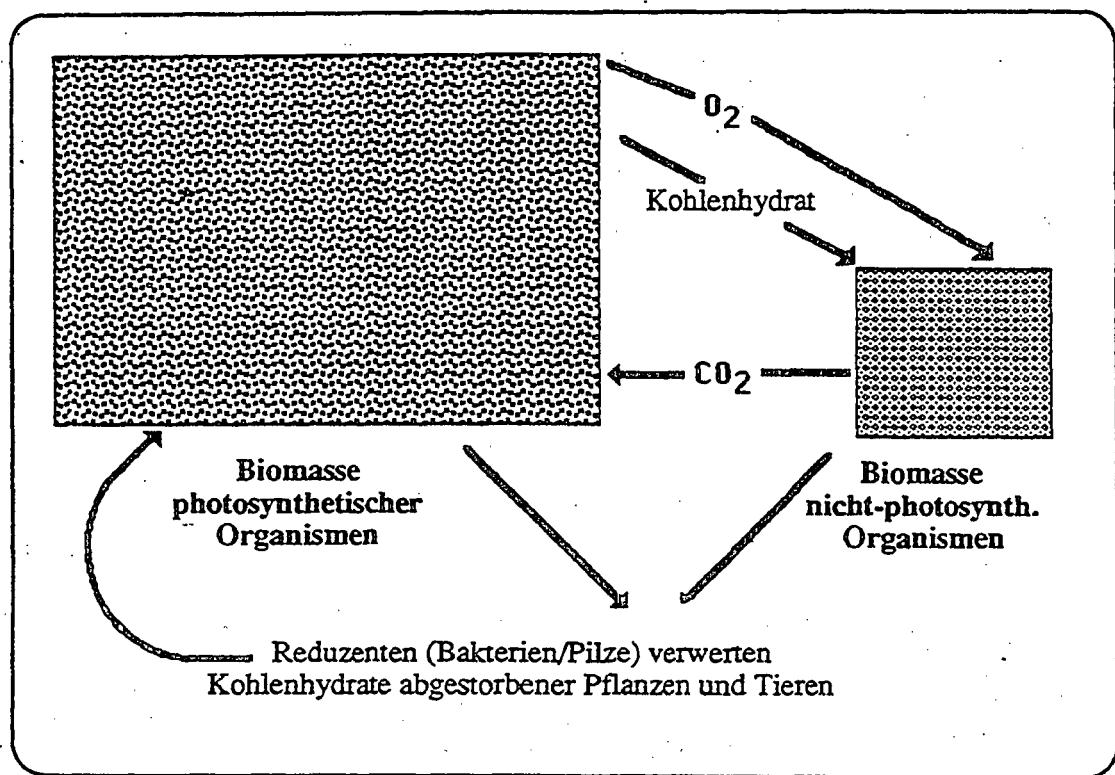


Abb.13 : Biomasseaustausch zwischen Flora und Fauna Grafik © CONCERNED PEOPLE 1994

Die Abbildung veranschaulicht (in verkürzter Darstellung) die Stoffstöße zwischen Pflanzen und Tieren. Um genügend Sauerstoff für die Fauna bereitzustellen, ist die pflanzliche Biomasse im Vergleich zur tierischen erheblich vermehrt. Am Kohlenstoffkreislauf sind nur Kohlendioxid und die Produkte der Photosynthese beteiligt. Das CO₂ für die Pflanzen stammt aus der Atmosphäre. Der Kohlenstoff wird z.B. in den Blättern fixiert. Ein Bruchteil des CO₂ wird bei der Atmung der Pflanzen (Dunkelreaktion oder Assimilation) an die Atmosphäre retourniert. Die Atmung ist ein energieliefernder Prozess, bei dem die während der Photosynthese mithilfe von Sonnenlicht, Chlorophyll und Enzymen produzierten Kohlenhydrate wiederum z.T. in CO₂ und H₂O zerlegt werden.

¹²⁰Das ist die unvorstellbare Menge von 180 Trillionen Tonnen.

Innerhalb der biosphärischen Zirkulation wurden bis heute allein rund 5×10^9 t Kohlenstoff umgesetzt, das entspricht dem 800.000fachen des gesamten Kohlenstoffgehaltes der Erdkruste. Das bedeutet in der Konsequenz: der gesamte Kohlenstoff unseres Körpers, unserer Nahrung, des Kohlendioxids der Luft inklusive des Karbonatgestein in Kalksteinen und Sedimenten hat im statistischen Mittel 600 Zyklen durchlaufen - als Rohstoff, Biomasse und Abbauprodukt im Produktionsprozeß des Lebens auf der Erde. Nach bisheriger Kenntnis haben sich nirgendwo auf dem Planeten ökotoxische C-Rückstände kumuliert. Dort, wo ein Teil des Materials in "Abfalldeponien" z.B. in Form von Meeres-Sedimenten abgelagert wurde, sind heute fruchtbare Lehmböden.

Ähnliches wie für Kohlenstoff gilt für andere Elemente. Simulationen des UPI (Umweltprognose Institut Heidelberg) ergaben, daß

- der biosphärisch verfügbare Stickstoff schon rund 800 mal in die Körper von Lebewesen eingebaut und wieder ausgeschieden wurde,
- Schwefel 300 mal
- Phosphor 8000 mal
- Kalium 2000 mal
- Kalzium, Chlor und Eisen 10 mal
- Magnesium 15 mal und
- Natrium 3 mal.

Im Laufe dieses "elementaren Stoffwechsels" wurden die Rohstoffe von lebendigen Organismen aus dem Reservoir der Meere und des Bodens aufgenommen. Nach dem Absterben der Lebewesen flossen sie wieder in dieses Reservoir zurück, "ohne daß irgendwelche toxischen Rückstände übriggeblieben wären, die in wiederum abfallerzeugenden Entsorgungsseinrichtungen durch Müllverbrennungsanlagen vernichtet werden müßten."¹²¹

Wasser als universelles Lebens- und Lösemittel zeigt noch verblüffendere Erkenntnisse. UPI kalkulierte einen bisherigen biosphärischen Wasserverbrauch von insgesamt 10^{23} Tonnen. Da die globale Wassermenge aber nur $1,7 \times 10^{18}$ Tonnen beträgt, läßt sich aus der Kombination der beiden Zahlen schließen, daß sämtliches verfügbare Wasser nicht weniger als 50.000 mal durch pflanzliche und tierische Organismen hindurchging.¹²²

¹²¹TEUFEL (1990).

¹²²Im Gegensatz dazu genügt der einmalige Durchgang des Wassers durch eine industrielle Chemieanlage, um es für Lebewesen ungenießbar zu machen. In diesem Zusammenhang sei an die Halbwertszeit von Perchlorylen im Tiefengrundwasser von ca. 5000 Jahren erinnert.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Verglichen mit den evolutionär eingespielten biosphärischen Stoffumsätzen ist die Menge aller vom Menschen bisher industriell erzeugten Güter verschwindend gering. Mit anderen Worten: Die Leistungsfähigkeit der Biosphäre ist auch in quantitativer Hinsicht um einige Zehnerpotenzen höher als die der chemischen Industrie.

Jährliches Produktionsvolumen					
Biosphäre (nur Festland)	11	x	10^{10}	Tonnen	¹²³
Biosphäre (nur aquatisch)	5,5	x	10^{10}	Tonnen	¹²⁴
Petrochemie (weltweit)	9	x	10^7	Tonnen	¹²⁵

Tab.7 Quelle UPI Heidelberg (1990) Fischer (1993)

Für die globalen Zwecke der Energiebereitstellung, Nahrung und biogenen Stofferzeugung werden heute zwischen 1 und 3 Prozent der jährlich neu gebildeten Biomasse genutzt.

Pflanzen bilden durch Photosynthese und organisches Wachstum niemals nur eine Substanz oder auch nur eine Stoffklasse. Selbst die einfachsten Coniferen synthetisieren zugleich Zellulose, Hemizellulose, Rindenfarbstoffe, Gerbstoffe, Chlorophyll, Pflanzenwachse (auf der Oberseite der Nadeln), ätherische Öle, Harze, Terpentinöle, öl- und proteinreiche Zapfen und eine Vielfalt anderer nutzbarer Naturstoffe. Es liegt deshalb nahe, eine Pflanze nicht nur wegen eines Rohstoffes zu ernten, sondern nach Möglichkeit viele Teile mehrfach zu nutzen.

Auch die Energieflüsse der Biosphäre stellen den Energieumsatz der Menschheit weit in den Schatten. Zur Herstellung der Biomasse und zur Aufrechterhaltung des Lebens fing die Biosphäre bisher etwa 6×10^{19} Tonnen Steinkohleeinheiten Sonnenenergie ein. Das ist 200 Millionen mal mehr als der gesamte bisherige Energieverbrauch der Menschheit.

¹²³RÖMPP 9. Auflage Band 1 (1989) S. 426.

¹²⁴Die gesamte biosphärische Stoffproduktion entspricht in Energieeinheiten etwa dem Zehnfachen des Weltenergieverbrauchs.

¹²⁵DEUTSCHE SHELL AG (1985) S.1. Sofern man die Überwindung der Wegwerfmentalität (z.B. bei dzt. fast 100 Mio Tonnen Kunststoffen p.a.) in Rechnung stellt, besteht noch ein erhebliches Einsparungspotential!

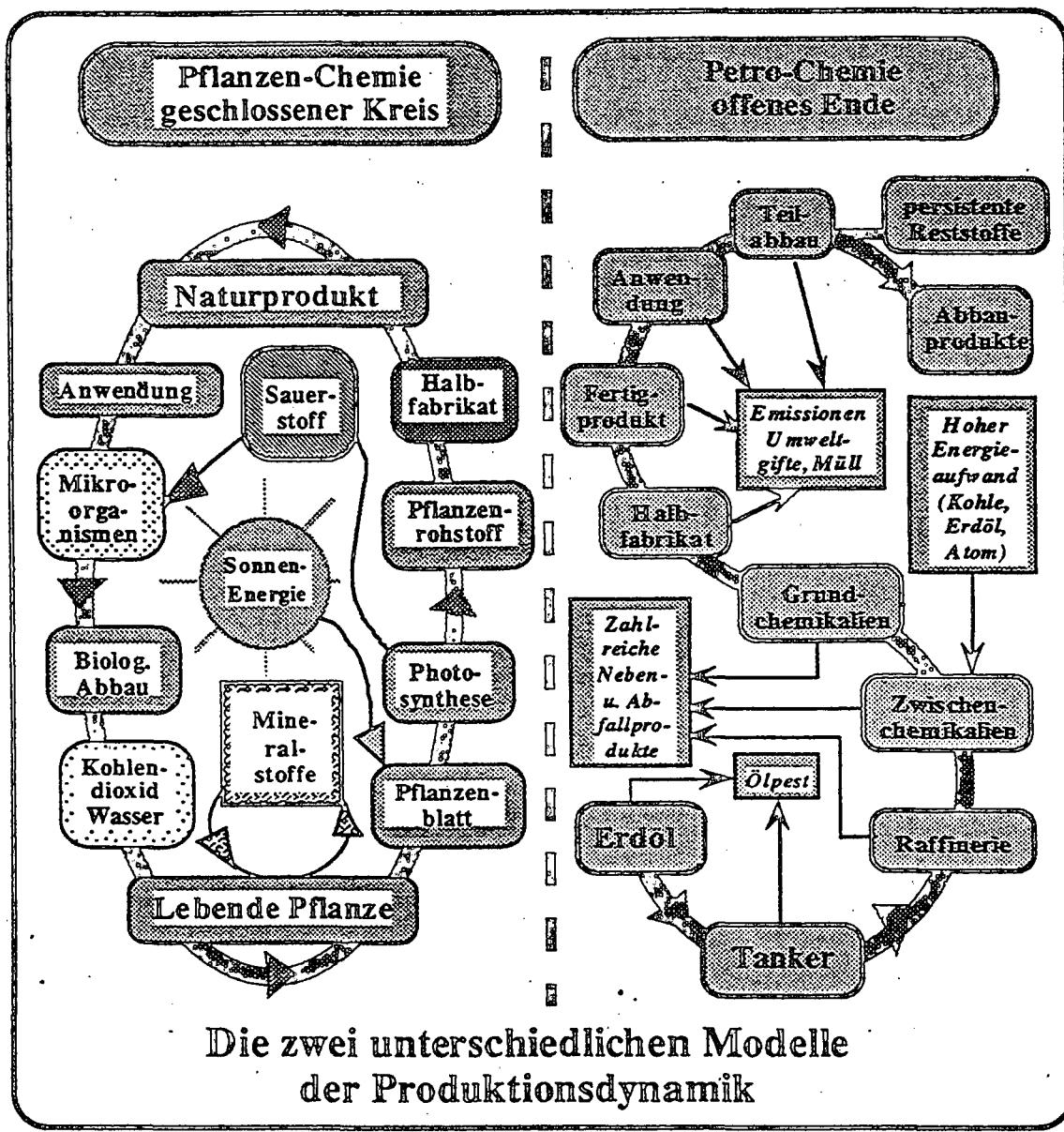


Abb.14: Pflanzen-Chemie vs. Petro-Chemie Grafik CONCERNED PEOPLE mod. nach FISCHER 1994

Als Charakteristikum der naturwissenschaftlichen Prinzipien der Sanften Chemie ist die Tatsache von Bedeutung, daß die stofflichen Ergebnisse des pflanzlichen Stoffwechsels zu chemisch-technischen Alltagsprodukten verarbeitet werden und Bestandteil perfekt geschlossener Stoffkreisläufe sind. Alle auf diese Weise erzeugten Produkte werden nach überschaubarer Zeit in harmlose und cylierbare mineralische Komponenten zerlegt.

Die nichtgeschlossene Lebenslinie petro-chemischer Produkte ergibt insgesamt ein charakteristisches Bild: Die vielgliedrige Kette mit einem Anfang und einem offenen Ende wird demgemäß auch als "petro-chemische Schlange" bezeichnet. Die Verwendung fossiler Rohstoffe erweist sich umso problematischer, je früher die Quellen erschöpft sind und die natürlichen Senken an die Grenze ihres Aufnahmevermögens gelangen.

3.7. Sanfte Chemie und Ökologisches Bauen

Ökologisch Bauen bedeutet: schonend für den Naturhaushalt, sparsam mit Ressourcen (insbes. auch Grund und Boden); heißt klimatisch und kulturell eingepaßt, stadtbildbewußt und landschaftsgebunden und es berücksichtigt Infrastrukturfolgen wie Ver- und Entsorgungswege, Verkehrserregung etc.. Bauökologie optimiert den Umgang mit der äußeren Natur (Umwelt) und den Umgang mit der inneren Natur des Menschen (Inwelt, Universalien menschlichen Verhaltens).

In den Medien, sogar in den "klassischen" Bau- und Wohnzeitschriften finden gesundes Bauen und Wohnen und natürliche Bau- und Einrichtungsmaterialien hohe Beachtung. Die Einstellung hat sich im Vergleich zu früheren Jahren drastisch verändert, es wird mit beachtlicher Wertschätzung berichtet. Das bedeutet: Ökologisches Bauen, Renovieren und Wohnen ist heute kein avantgardistisches Experiment mit ungewissem Ausgang mehr. Im Verlauf der etwa zwanzigjährigen Experimentierphase haben sich ausgereifte und praktikable Lösungen entwickelt.¹²⁶

Nach zögerlichen Anfängen in den 70er Jahren sind biologische Bau- und Einrichtungsprodukte heute auf dem Weg zum Mega-Trend der 90er Jahre. Der Grund für diese Entwicklung liegt in der zunehmenden Erkenntnis von Bauherren, Mietern, Planern und Verarbeitern, daß nur ökologisch sinnvolle Produkte eine Zukunft haben können.

126 Gute Ansätze im Neubau bieten das BIO-SOLAR Wohnprojekt Schafbrühl bei Tübingen und die Öko-Siedlung Gänserndorf bei Wien. Schafbrühl ist ein Beispiel maßvoller Verdichtung mit höchster Wohnzufriedenheit und anheimelndem Ortsbild zugleich Modellfall für Baubiologie im Genossenschaftswohnbau (Architekten Eble und Sambeth/Tübingen): 111 Wohnungen auf 1,3 ha, Biosolar-Konzept mit Wintergärten, Hof- und Baukörperbegrünung samt Mietergärten, Tonziegel plus Kalkputz, Holzbalken- und Ziegeldecken, Oberflächenbehandlung mit Naturharzöl und Bienenwachs, Naturlasuren und Kaseinfarben, Elektroinstallationen abgeschirmt, Schlafzonen mit Netzfrequenzschaltern, Fernheizung aus Blockheizkraftwerk, Nieder-T-Fußleistenheizung. Das Motiv für die traditionellen Materialien und Methoden bildeten ursprünglich die teuren Bauschäden der Wohnhochhäuser desselben Bauträgers aus den 50er-, 60er- und 70er Jahren.

Ökosiedlung Gärtnershof Gänserndorf bei Wien (Architekt H. Deubner): Auf 0,65 ha Bauland, zu 50 % verbaut, entstanden 21 Wohneinheiten: 11 Häuser mit 100 bis 130 m² Nutzfläche um 2,1 Mio. Schilling, sind als passive Solarsysteme konzipiert, dazu 10 Wohnungen mit 60 - 100 m² um 1,2 - 1,7 Mio. Schilling. Der verdichtete Flachbau beherbergt rund 80 Menschen. Die Wohträume öffnen sich nach Süden und sind nach Norden mit zweischaligem Mauerwerk (Zwischenschicht Sägemehl der nahen Tischlerei) abgeschirmt. Auch die porösen Ziegel dämmen und sind durch 2-%ige Silikonlösung wasserabweisend (gegen Frostschäden). Fast alle Häuser haben Humustoiletten im Keller, die Dachrinnen führen in eine Zisterne, die Haushaltsabwasser gelangen in eine Pflanzenkläranlage (mit Schilf, Binsen, Sumpfiris und Wassermelze) und dienen der Bewässerung; die Nachnutzung erzielt zu Abwasserdisziplin. Die neue Architektur findet zu virtuoser Raumgestaltung in Holz und Glas.

Diese Erkenntnis folgt der nüchternen Einsicht in die Begrenztheit der Welt, ihrer Ressourcen und ihrer Belastbarkeit. Bauen und Wohnen greift grundsätzlich in die Naturzusammenhänge ein - die richtige Auswahl der Baustoffe kann Tiefe und Umkehrbarkeit dieses Eingriffes wesentlich bestimmen. Es ist nicht belanglos, ob ein Bauprodukt aus erdölabhängigen, abfallintensiven und schwer abbaubaren Komponenten gefertigt wird, oder aus nachwachsenden, raumklimafördernden Rohstoffen ohne Entsorgungsprobleme.

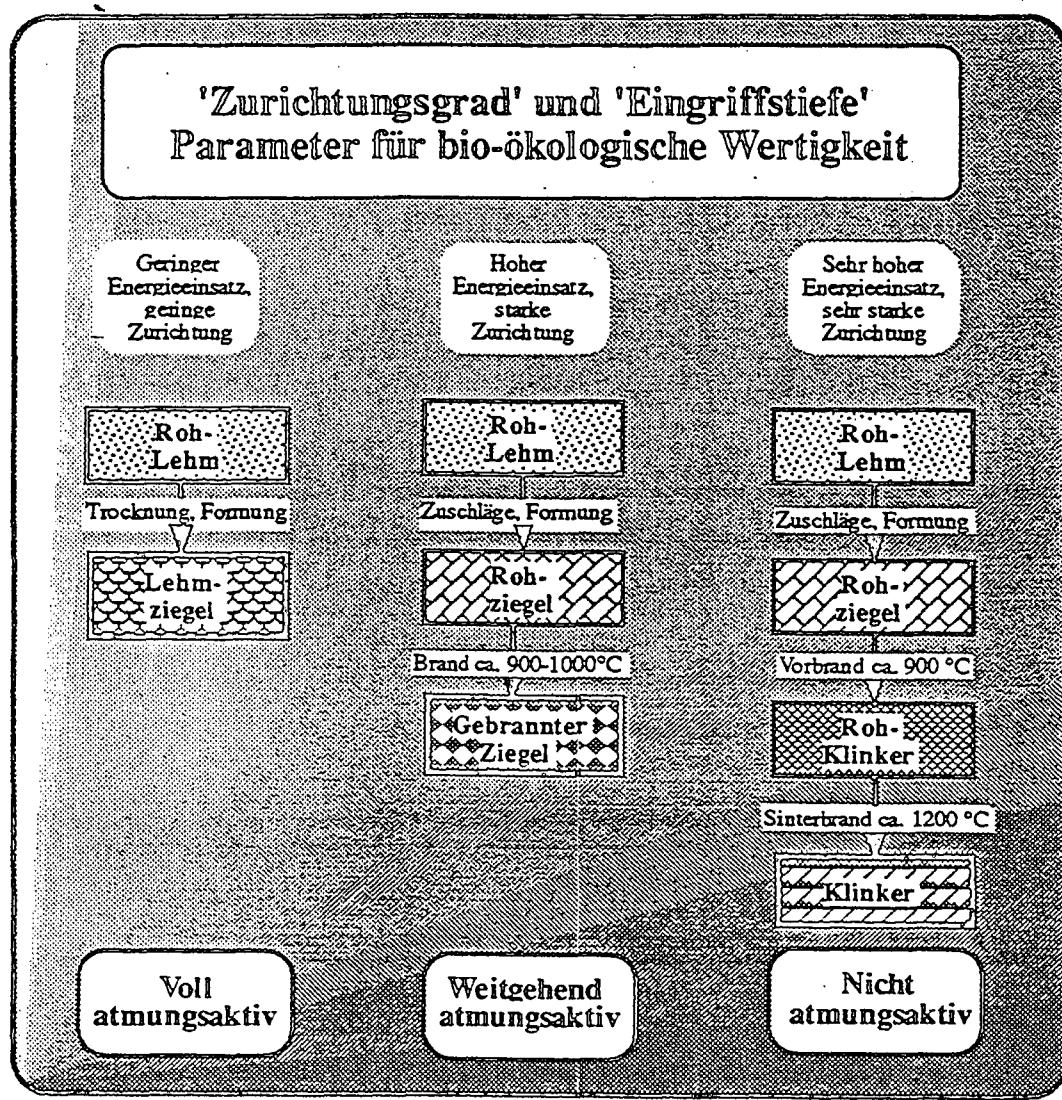


Abb. 15 Grafik CONCERNED PEOPLE Quelle FISCHER (1993)

Ein emotionaler Faktor kommt hinzu: Die perfekten, aber auch gesichtslosen Bauprodukte aus der Hoch-Zeit des Funktionalismus gehen an den Grundbedürfnissen vieler Menschen nach behaglichem Raumklima und nach lebendig strukturierten Flächen vorbei. Ökologisch bewußte Konsumenten wollen die Ge- schichte hinter dem Stoff kennenlernen, mit welchem sie sich raumumschließend konfrontieren. Das Alternativprodukt muß in seiner ganzen Lebenslinie überzeugen: von der Gewinnung der primären Rohstoffe über deren Verarbeitung und Transport bis hin zu den Handelsformen, der Verwendung und dem Verbleib in der Umwelt. Für alle Lebensstationen müssen die ökologischen, aber auch die sozialen und wirtschaftlichen Faktoren das Leitbild von Transparenz, Lebensgerechtigkeit und Nachhaltigkeit erfüllen.

Die *Dauerhaftigkeit* von Baustoffen leistet sowohl einen Beitrag zur Energieeinsparung, als auch einen wesentlichen Beitrag zur Schonung von Ressourcen. Besteht ein Baustoff aus nachwachsenden Rohstoffen, sollte seine Lebensdauer nicht geringer sein, als die zum Nachwuchs nötige Zeitspanne.

Emissionen von Baustoffen während der Nutzungsphase eines Gebäudes haben sowohl Auswirkungen nach außen auf die Umwelt als auch nach innen auf die Bewohner. Die aus den Baustoffen entweichenden Lösemittel oder Holzschutzmittel können die Bewohner gesundheitlich beeinträchtigen,¹²⁷ sie können auch über die Nahrungskette akkumulieren und ökotoxische Schäden verursachen.

Da wir uns den größten Teil des Tages in geschlossenen Räumen aufhalten, spielt die Belastung der Wohn- und Arbeitswelt mit Schadstoffen eine große Rolle, besonders weil der Einsatz von Chemikalien im Baubereich laufend zunimmt. Schätzungen gehen von 1000 - 2000 verschiedenen Stoffen in der Raumluft von Neubauten aus.¹²⁸

¹²⁷ Gesundheitsschäden durch Holzschutzmittel sind seit Jahren evident.

¹²⁸ MÜLLER Peter, WIERICHES Hermann (1992). S. 19.

**Mögliche Quellen von Luftverunreinigungen in Innenräumen
und die von ihnen emittierten Schadstoffe**

Quelle	Emittierte Stoffe oder Stoffklassen
Mensch	Kohlendioxid, Wasserdampf, Gerüche
Menschliche Aktivitäten	
• Energieversorgung (Gasherde und -öfen, offene Feuerstellen)	Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickoxide, Wasserdampf, Aldehyde, Kohlenwasserstoffe, Teilchen, polzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
• Tabakrauch	Kohlenmonoxid, Stickoxide, Acrolein und andere Aldehyde, Nitrosamine, Rauchpartikel, polzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
• Haushalts- und Hobbyprodukte	viele organische Verbindungen, z.B. Lösemittel, Pestizide, teilweise als Aerosol
• Staubsaugen	Staub
Raumausstattung	
• Bau- und Renovierungsmaterialien (Fußböden insbes. PVC Beläge, Tapeten, Wandanstriche, Fugendichtungen usw.)	Radon, Asbest und andere Fasern, Formaldehyd und andere organische Verbindungen, z.B. Lösemittel, Holzschutzmittel, Klebstoffe
• Einrichtungsgegenstände (Möbel, Teppiche, Vorhänge)	viele organische Verbindungen, z.B. Lösemittel, Formaldehyd

Tab.8: Luftverunreinigungen in Innenräumen Quelle: CONCERNED PEOPLE nach Seiffert et al. (1992)

Biologische Baustoffe kommen humanökologischen Bedürfnissen in idealer Weise entgegen: sie verbinden rationale und emotionale Aspekte. Die breite Akzeptanz der Bauökologie begann jedoch erst, als die entsprechenden Produkte auch bautechnisch so weit optimiert wurden, daß sie den ebenfalls berechtigten Forderungen nach Haltbarkeit, Vielfältigkeit, Verfügbarkeit und handwerksgerechter Verarbeitbarkeit entsprechen konnten, ohne ihren Charakter und ihre Eigenart eingebüßt zu haben.

Konsequente Bewertungskriterien zum bio-ökologischen Baustoff sind dementsprechend multidisziplinär und fächerübergreifend angelegt.

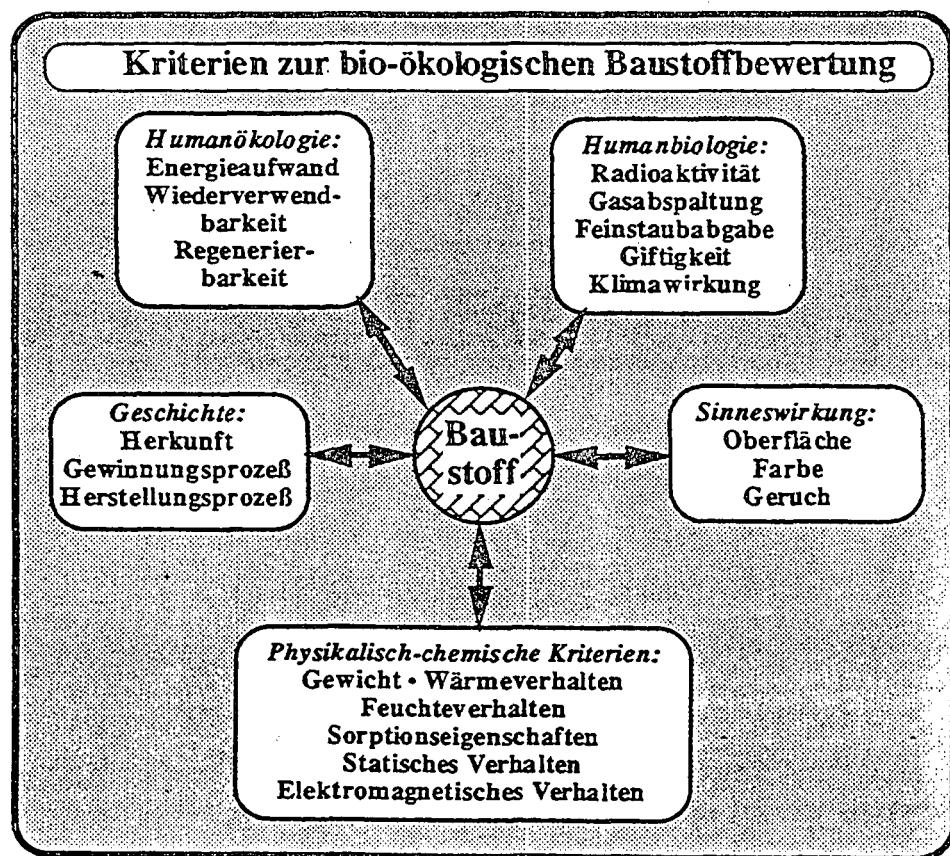


Abb. 16 Grafik CONCERNED PEOPLE Quelle LÜBKERT, KÖNIG, FISCHER (1993)

Sie sind geradezu prototypisch für die Vernetztheit des ökologischen Denkens und Handelns; ihre Anwendung am konkreten Objekt erfordert eine offene und vielschichtige Herangehensweise.

Tab. 9: **Das Öko-Haus: Versuch einer Positivliste**

Empfehlungen aufgrund von Materialeigenschaften ohne Berücksichtigung der spezifischen Bauaufgabe und Planungssituation

Rohbau	
• Fundamente	Ziegel, Natursteine, Magerbeton
• Kellerwände	Ziegel, Kalksandsteine
• Außenwände	Lehm, Ziegel (auch porös), Kalksandsteine, Massivholz, Holzständerbau
• Innenwände	Wie Außenwände. Außerdem Platten aus Naturgips, Holzwolleleichtbauplatten
• Außenputz	Mineralische Putze mit hydraulischem Kalk als Bindemittel
• Innenputz	Mineralische Putze mit Luftkalk als Bindemittel, Naturgipsputze
• Außenwandverkleidungen	Putze, Holzschalung, keramische Platten, Ziegelverblendung
• Fenster	Holz aus mitteleuropäischem Anbau, ungefärbtes Glas als Doppelscheiben
• Decken	Holzbalkendecken, Stahlsteindecken
• Treppen	Innen Holz, außen Naturstein
• Dachabdichtung (Flachdach)	Keine Empfehlung. Besser: geneigtes Dach
• Dacheindeckung (Steildach)	Tondachpfannen, Holzschindeln, Stroh, Schilf
Innen-Ausbau	
• Estrich	Keine Empfehlung. Ersatz z.B. durch Dielenboden auf Kanthölzern
• Oberböden	Dielen, Parkett, Linoleum, Kork, Teppich aus Naturfasern wie Sisal, Kokos, Wolle
• Innenwand und Deckenbekleidung	Holz, Naturtextilien, keramische Platten, Natursteinplatten von Sedimentgesteinen
• Dämmstoffe	Kork, Schilfrohr, Kokosfasern, Holzwolleleichtbauplatten, Schaumglas, Zelluloseplatten- und schüttungen, Blähton, geblähte Silikate als Schüttung
• Anstriche	Kalk-Silikat-Kasein-Leimanstriche, Dispersionen ohne petrochem. Lösemittel mit Naturharzen, -wachse und -öle
• Holzschutzmittel	Boraxverbindungen (amtlich zugelassen), Holzessig (nicht zugelassen), Niem-Präparate (bei uns nicht zugelassen)
• Tapeten	Papiertapeten aus Recyclingpapier mit Leim- oder Normaldruck, Rauhfaser, Textil-, Gras-, Holz-, Kork-, Ledertapeten ohne Kunststoffzusätze oder Oberflächenbeschichtungen
• Kleber	Leime, Kleister, Dispersionen ohne petrochem. Lösemittel

Quelle: CONCERNED PEOPLE u. H. Struhk & Partner, Architektur- und Planungsbüro Wien/Braunschweig (1992).

3.7.1. Naturfarben - Herausforderung für überlebte Konzepte

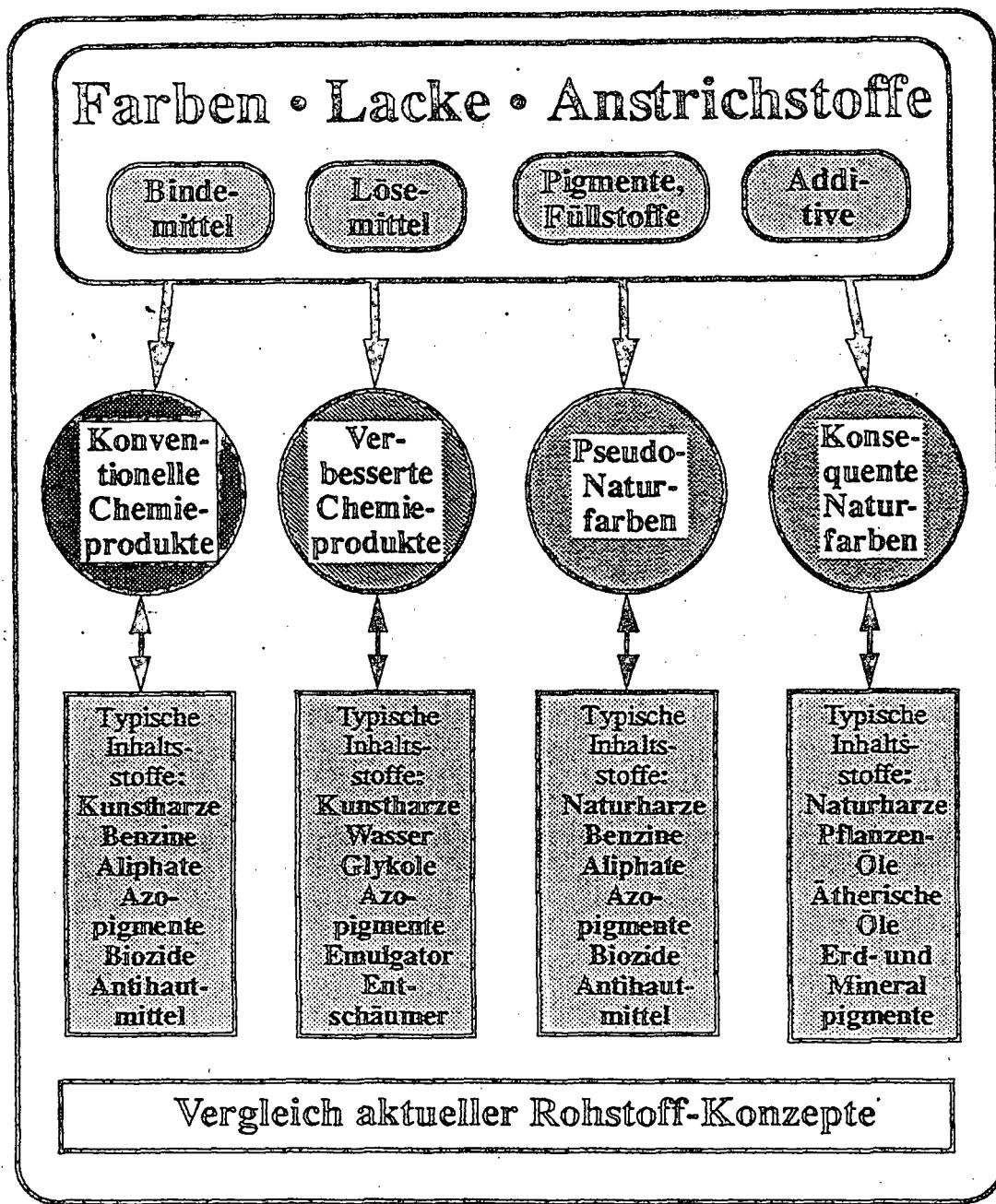


Abb.17: Farben und Lacke -Aktuelle Rohstoffkonzepte Quelle AGN Grafik CP

Der Vergleich aktueller Rohstoff-Konzepte von Farben und Lacken lässt zumindest eine Zuordnung zu vier verschiedenen marktgängigen Kategorien erkennen, die unterschiedlichen Formulierungen entsprechen und sich demgemäß in der ökologischen Gesamtbewertung unterscheiden.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Der Ökotrend hat auch im Farben- und Lacksektor insgesamt deutliche Spuren hinterlassen. Zwar sind nach wie vor im strengen Sinn "konventionelle" Produkte im Handel, jedoch auch in den modernen, mit zahlreichen Umweltaspekten beworbenen Wasserlacken sind bemerkenswert viele synthetische Chemikalien enthalten: Vom synthetischen Emulgator über chemische Entschäumer und weitere Additive bis hin zu synthetischen, hochwirksamen Konservierungsstoffen. Diese Ingredienzien verstärken wie die speziell wasserverdünnbaren Kunstharz-Bindemittel die Abhängigkeit von der Rohstoffbasis Erdöl. Gerade die neuen Wasserlacke und -Lasuren sind sehr schlecht "rückholbar"; zum Entfernen alter Anstriche auf Wasserbasis werden extrem aggressive Abbeizer benötigt.

Eine gesunde Wohnumwelt zählt heute zu den unverzichtbaren Grundbedürfnissen des Menschen ("Die Dritte Haut"), Zahlreiche Medienberichte über Ausdünstungen von Formaldehyd aus Spanplatten, Lindan, Pentachlorphenol (Dioxine/ Furane) und Permethrin aus Holzschutzmitteln, Weichmacher aus Decklacken usw. haben den Wunsch vieler Konsumenten nach natürlicher Oberflächenbehandlung geweckt. Dadurch wurde auch die Entwicklung der Naturfarben forciert.

Die wichtigsten Rohstoffgruppen, aus denen diese herstellt werden, sind:¹²⁹

- *Pflanzenharze* - z.B. Dammar, Kiefernharz, Lärchenharz, Mastix, Kolophonium;
- *Pflanzenöle* - z.B. Leinöl, Holzöl, Safflor-Öl, Soja-Öl, Maiskeimöl;
- *Pflanzenwachse* - z.B. Carnauba-Wachs, Candelilla-Wachs, Japan-Wachs;
- *Pflanzen-Leime* und -Gummis - z.B. Tragant, Gummi arabicum, Naturkautschukmilch;
- *Pflanzenengeiste* - z.B. Balsamharzöle, ätherische Citrusöle, Rosmarinöl, Alkohol;
- *Pflanzen-Farbdrogen* - z.B. Reseda, Indigo, Krapp, Catechu, Blauholz, Rotholz;
- *Pflanzen-Wirkstoffe* mit pilzhemmender und insektenabwehrender Wirkung aus Heilkräutern;
- *Naturstoffe tierischer Herkunft* - z.B. Bienenwachs, Schellack, Cochenille, Casein;
- *Natürliche Mineralien* - Kreide, Talkum, Ocker, Umbra u.a. Erdfarben, Kieselgur (Diatomeenerde), Bentonit;
- Aufbereitete Mineralstoffe - z.B. Titanweiß (aus Dünnsäure-Recycling-Verfahren), Borax, Ultramarin.

¹²⁹Diese und andere Rohstoffe werden im Rohstoff-Dossier weiter unten näher erläutert.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Das Sortiment der natürlichen Oberflächenveredelungen ist aus der „Öko-Szene“ längst in breite Anwenderschichten hineingewachsen. Zunehmend werden große Wohn- und Büro-Objekte erfolgreich mit Naturfarben oberflächenbehandelt.¹³⁰

Das Wachstum der konsequenten Naturfarbenproduzenten (sie gelten als Pioniere der Sanften Chemie) liegt weit über dem der konventionellen Branche.

Dieser Erfolg auf einem heiß umkämpften Markt bedurfte einer seriösen Aufbauarbeit. Der heutige Marktführer im deutschen Sprachraum, die Firma AURO stellt an drei Standorten Naturfarben her: in Braunschweig/Deutschland, Klein-Glödnitz/Österreich und Winterthur/Schweiz.

Der ursprüngliche Gründungsanlaß in den frühen 70er Jahren galt der Herstellung von "gesunden Farben für Kinder zum Malen als Alternative zu den grellen, human-ökologisch und pädagogisch fragwürdigen Syntheseprodukten."¹³¹ In den folgenden Jahren wurde das Konzept der Malfarben für Kinder durchgehend weiterentwickelt. Die Produktpalette umfaßt mittlerweile ein vollständiges Sortiment zur Behandlung und Gestaltung von Oberflächen aller Art für Holz, Stein, Metall, Papier und Kork, für innen und außen, transparent und deckend, außerdem Klebstoffe und Leime sowie Wasch-, Reinigungs- und Pflegemittel.

1994 beschäftigt AURO 60 Mitarbeiter, davon fast ein Drittel in Forschung, Entwicklung und Anwendungstechnik. Die Jahresproduktion entspricht einem Marktwert von ca. 25 Mio DM (ca. 180 Mio Schilling). Aufgrund sorgfältiger Unternehmensplanung und -kontrolle konnten seit der Gründung ausschließlich schwarze Zahlen geschrieben werden; 50% des Ertrages werden an die Mitarbeiter ausgeschüttet.

¹³⁰ z.B. ein großer Büro- und Gewerbekomplex in Frankfurt, s. Bericht in DER SPIEGEL Nr.41 (1991) S.105-106 oder auch die unter Fußnote 126 beschriebenen Projekte.

¹³¹ FISCHER pers. Mitt. (1992).

Öko-Punkte: Farben- und Anstrichmittel

Wertung der Hauptkomponenten: Bindemittel, Lösemittel, Pigmente, Additive (Optimum = 5)

Kriterium	Synthet. Farben	Öko-Punkte	Naturfarben	Öko-Punkte
<i>a) Basis-Rohstoff</i>				
<i>Herkunft</i>	Erdöl	0	Pflanzen	5
<i>Entstehung</i>	nicht erneuerbar	0	erneuerbar	5
<i>Verfügbarkeit</i>	begrenzt	0	unbegrenzt	4
<i>Globale Verteilung</i>	sehr ungleich	0	weitgehend gleichmäßig	4
<i>Verfügbarkeit</i>	Monopolkonzerne	0	regionale Erzeuger	5
<i>Toxikologie</i>	giftig	0	wenig oder nicht giftig	3
<i>Ökologie</i>	umweltschädlich	0	unschädlich	4
<i>b) Stoffaufbau (Synthese)</i>				
<i>Grundprinzip</i>	chem. Synthese	0	Photosynthese	5
<i>Produktionsart</i>	zentralistisch	0	dezentral	4
<i>Energieaufwand</i>	hoch	0	niedrig	5
<i>Energiequelle</i>	Erdöl, Kohle, Atomkraft	0	Sonnenenergie	5
<i>Chem. Strukturen</i>	naturfremd	0	naturnah	5
<i>Störfallrisiko</i>	hoch	0	kein Risiko	5
<i>Sicherungsaufwand</i>	hoch	0	sehr gering	4
<i>Fehlerfreundlichkeit</i>	gering	0	optimal	4
<i>Emissionen</i>	hoch	0	keine	5
<i>Abfallmenge</i>	hoch	0	kein Abfall	5
<i>Abfallarten</i>	z.T. toxisch	0	(Sauerstoff)	5
<i>Gesellschaftl. Folgekosten</i>	hoch	0	gering	5
<i>c) Produktgebrauch</i>				
<i>Chemikalienemission</i>	z.T. sehr hoch	0	keine	5
<i>Atmungsfähigkeit</i>	meist ungünstig	1	meist günstig	4
<i>Geruch (Löse- / Hilfsmittel)</i>	aufdringlich	0	angenehm natürlich	5
<i>Tastgefühl</i>	abweisend, glatt	2	tastsympathisch	4
<i>Elektrostatische Aufladung</i>	meist hoch	1	meist gering	3
<i>Raumklima</i>	oft ungünstig	1	sehr positiv	5
<i>Verarbeitbarkeit</i>	gut bis sehr gut	5	gut	4
<i>Halbarkeit</i>	gut bis sehr gut	5	gut	3
<i>d) Entsorgung</i>				
<i>Biolog. Abbaubarkeit</i>	z.T. sehr schlecht	1	vollständig	5
<i>Abbaugeschwindigkeit</i>	z.T. sehr langsam	1	sehr rasch	4
<i>Atmosphärenbelastung</i>	Treibhauseffekt	0	keine (Kreislauf)	5

Tab.10: Öko-Punkte Farben und Lacke Quelle AGN © CP 1994

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Die Gegenüberstellung einer qualitativen Bewertung der wichtigsten Komponenten (Bindemittel, Lösemittel, Pigmente und Additive) von synthetischen Farbanstrichen mit solchen aus konsequenten Naturfarbenrezepturen zeigt die vorhergehende Tabelle. (5-teilige Öko-Punkte Skala, je höher die Punktzahl desto höher die ökologische Wertigkeit).

Bei den Kriterien *Basis-Rohstoff*, *Stoffaufbau*, *Synthese* und *Entsorgung* schneiden Naturfarben durchwegs besser ab, lediglich beim Kriterium *Produktgebrauch*, hier insbesondere bei der Verarbeitbarkeit (längere Trocknungszeiten) und bei der Haltbarkeit lassen konventionelle Lackrezepturen eine etwas bessere Wertung erkennen.

Stellungnahmen der konventionellen Lackindustrie zu ihren ungeliebten Konkurrenten sind häufig von Wunschdenken und Festhalten an überlebten Feindbildern geprägt.¹³² Mit der Suggestion einer „verbreiteten Skepsis“ wird der Versuch unternommen, den Erfolg der Naturfarben abzuwerten. Beliebtes Beispiel ist das Argument vom „*Gift aus der Natur*“. Niemand kann bestreiten, daß toxische Stoffe in Mineralien, Pflanzen und Tieren existieren. Deren Gleichsetzung mit synthetischen Umweltgiften ist nicht nachvollziehbar, da die Natur schon Jahrtausende von ihren selbstproduzierten Giftstoffen unbeeinträchtigt geblieben ist. Die natürlichen Toxine werden bekanntlich nur in geringen Mengen an definierten Orten für spezielle Abwehraufgaben produziert und zudem rasch abgebaut - während viele Produkte der klassischen Chemie als nicht abbaubare Altlasten an die Generation unserer Kinder und Enkel weitergereicht werden.

3.7.2. Pflanzliche Lösemittel aus ökologischer Sicht

Ein Vergleich pflanzlicher Lösemittel (Citrus-Schalen-Öl, Balsam-Terpentinöl aus Coniferen wie Kiefern, Lärchen) mit *chemischen Lösemitteln* ist problematisch, weil die Inhaltsstoffe synthetischer Lösemittel erst seit wenigen Jahrzehnten (seit es eine chemische Industrie gibt) Bestandteil unserer Umwelt sind. Pflanzen, Tiere, Menschen und sogar Mikroorganismen des Bodens werden durch Einwirkung chemischer Lösemittel gravierend irritiert.¹³³

¹³²z.B. NN: „Wie gefährlich sind Bio-Lacke?“ in: Baustofftechnik 5 (1985). Stets gleiche Quelle: Caparol-Presseinfo.

¹³³s.dazu KATALYSE, BUND, ÖKO-INSTITUT, ULF: Chemie am Arbeitsplatz: Gesundheitsgefahren durch Lösemittel, S. 160 ff. Reinbek (1987) und MÖDERL (1993) S. 2 ff.

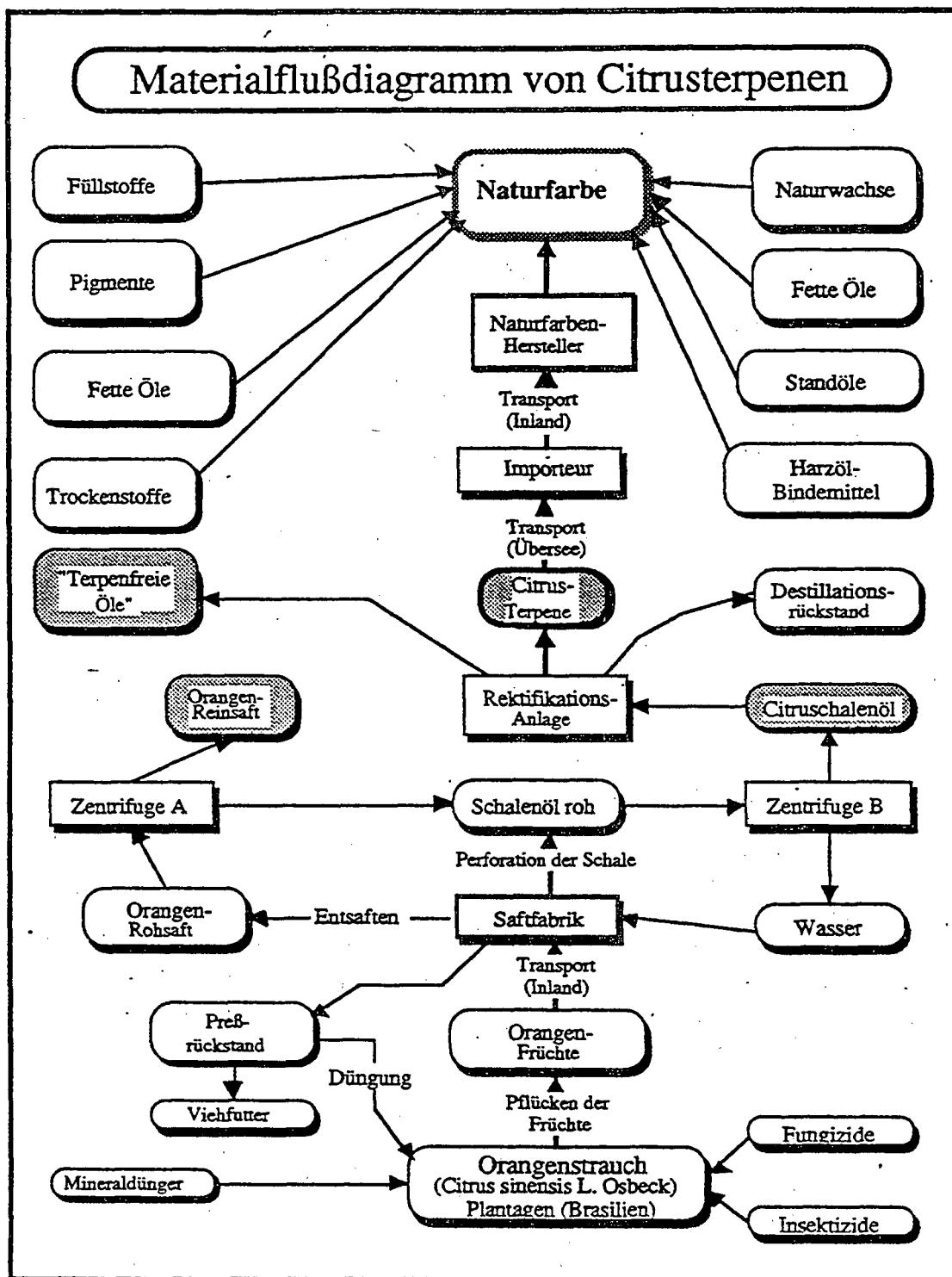
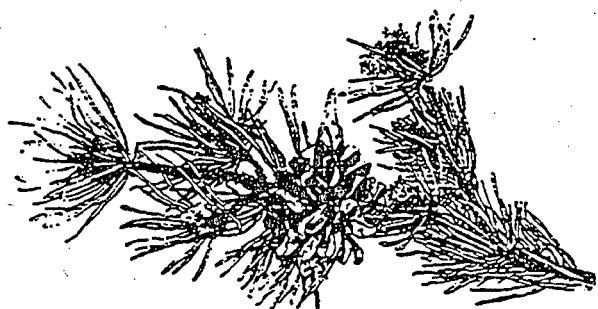


Abb.18 Citrus-Flow Grafik CONCERNED PEOPLE nach FISCHER (1993)

Citruschalenöl fällt bei der Orangensaftgewinnung zwangsläufig an und würde ohne die Nutzung durch Naturfarbenhersteller (und neuerdings auch der Metallentfettung, Druckindustrie und Chip-Produktion) direkt aus den Schalenabfällen in exakt gleicher Menge in die Atmosphäre gelangen.

Die pflanzlichen Lösemittel (insbesonders die Terpene) sind hingegen in erheblichen Quantitäten seit Urzeiten Bestandteil der Umwelt. Die wechselseitige Anpassung von Terpenen und Lebewesen ist logisch nachvollziehbar und bedarf keiner besonderen Begründung: Im ökologischen Kontext ist bedeutsam, daß die pflanzlichen Lösemittel wie *Citrussschalenöl* (bzw. Citrusterpene) nicht eigens wegen ihrer Verwendung in Naturfarben gewonnen werden.

Balsamterpentinöl (BTO) ist Nebenprodukt der Gewinnung wertvoller Naturharze aus dem Coniferenharzbaß (Lärchen, Fichten, Tannen, Latschenkiefer etc.) und muß auch *stets* von diesem destillativ abgetrennt werden.



Pflanzliche Lösemittel machen also bei Verwendung durch den Menschen nur einen kleinen, nützlichen *Umweg*, bevor sie dorthin gelangen, wohin sie auch ohne diesen Umweg natürlicherweise gegangen wären..

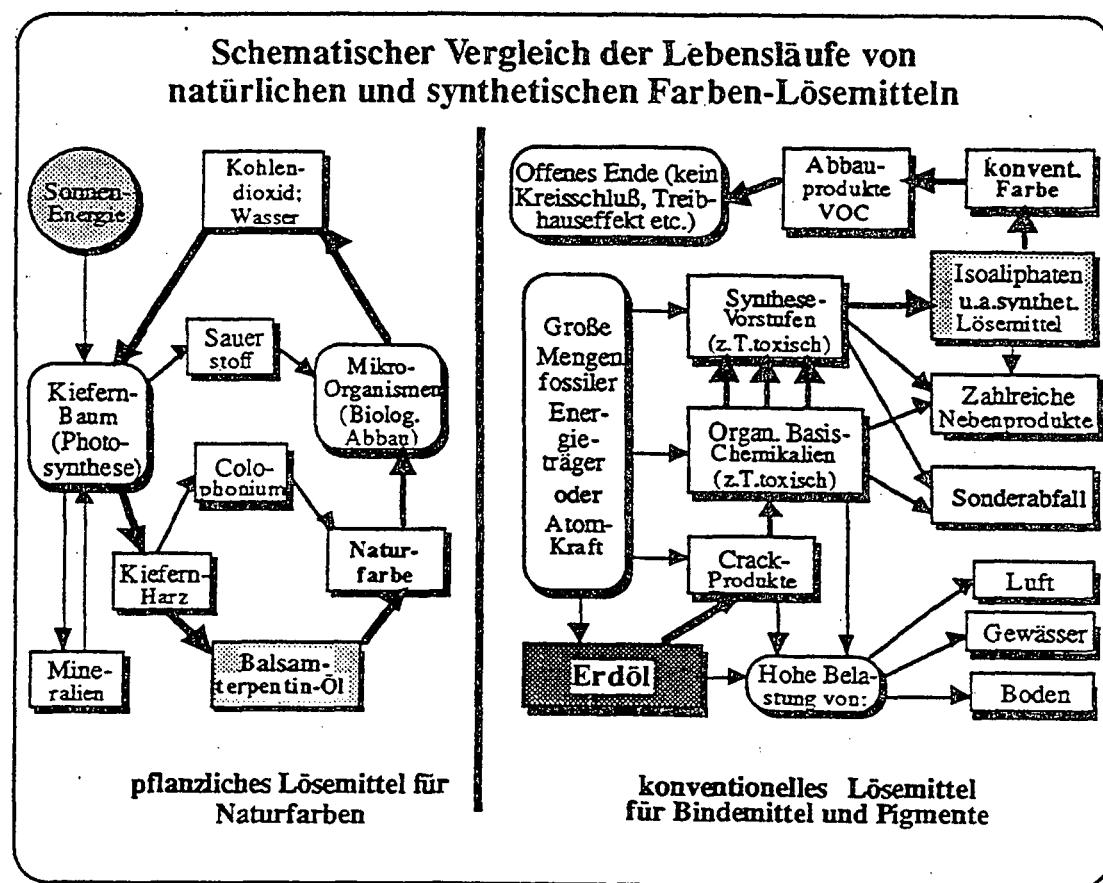


Abb. 19 Grafik CONCERNED PEOPLE mod. nach FISCHER (1993)

Exakt die Menge an Kohlendioxid, die beim Abbau pflanzlicher Lösemittel *freigesetzt* wird, wurde ursprünglich in der Pflanze bei der photosynthetischen Bildung des Lösemittels *gebunden*. Die Bilanz ist ausgeglichen. Nettoeintrag: Null.

Terpene (pflanzliche Lösemittel) gelten als counterpart zu chemischen Lösemitteln. Sie dürfen mit diesen reinen Syntheseprodukten in einer Produktlinie bezüglich Herkunft und Verbleib nicht unkritisch vermengt werden.

3.7.2.1. Der Beitrag pflanzlicher Lösemittel zum Treibhauseffekt

Die Frage, ob pflanzliche Lösemittel zum Treibhauseffekt beitragen, kann klar verneint werden, denn die Terpene sind in der Natur nachweislich so leicht, rasch und rückstandsfrei abbaubar, daß sie sich in der Atmosphäre an keiner Stelle akkumulieren. Zusätzliches Indiz: Die enorm großen Ausdünstungen der Wälder (ebenfalls Terpene) haben nie in den Wärmeaushalt der Erde eingegriffen.

3.7.2.2. Der Beitrag pflanzlicher Lösemittel zum stratosphärischen Ozonabbau

Können pflanzliche Lösemittel die stratosphärische Ozonproblematik mitverursachen? Auch dafür gibt es keinerlei Hinweise. Aufgrund der raschen Wiedereingliederung der Phyto-Destillate in den ökologischen Kreislauf gelangen sie nicht in die oberen Atmosphärenschichten. Zusätzliches Indiz: Die Gesamtmenge aller in den vergangenen Jahrzehnten freigesetzten Chemikalien, die den Ozonschwund verursachen, ist verschwindend gering gegenüber der Menge an pflanzlichen Lösemitteln, die seit Jahrtausenden jährlich durch Emissionen der Pflanzen in die Luft diffundieren.¹³⁴ Kleinsten Zusatzmengen an naturfremden Stoffen können die stratosphärische Ozonchemie wesentlich beeinflussen, während die hohen Quantitäten an Naturstoffen dieses Gleichgewicht nicht stören konnten.

¹³⁴ Vorsichtige Schätzungen von FISCHER et al. geben eine Größenordnung von 10^9 Tonnen pro Jahr natürlicher Terpenemissionen aus Wäldern an.

3.7.2.3. Der Beitrag pflanzlicher Lösemittel zum bodennahen Ozon

MÖDERL hat in einer bemerkenswerten Diplomarbeit die Frage untersucht, ob pflanzliche Lösemittel messbar zum Bodenozon beitragen können.¹³⁵ Eine Abschätzung der Verdunstung ergibt für α -Pinen, als Hauptbestandteil des Balsamterpentinöls, einen Zeitraum in der Größenordnung von einem Monat, um nach der Anwendung vollständig zu verdunsten - das ist wesentlich kürzer als die Verrottungsdauer im Forst von etwa einem Jahr. Daraus folgt, daß der Einsatz dieser Lösemittel keine zusätzlichen VOC (Volatile Organic Compounds) verursacht, sondern diese als "biogene" Emissionen zu betrachten sind.

Die heute durch die Naturfarben in die Luft abgegebene Menge beläuft sich auf ca. 5×10^2 Tonnen pro Jahr. Selbst bei der extrem unrealistischen Annahme, daß alle Farben - und Oberflächenbehandlungen weltweit zu 100% auf pflanzliche Lösemittel umgestellt würden, wäre der zusätzliche Beitrag der als Lösemittel eingesetzten Terpene gegenüber dem natürlichen Eintrag irrelevant und nicht einmal messbar!

Die Angabe abstrakter Labormesswerte für ein angebliches Ozon-Potential der Terpene ist als typisches Beispiel überholten, monokausalen Denkens zu werten. Die komplexen Verhältnisse in der natürlichen Atmosphäre lassen sich durch abstrakte Laborversuche nicht simulieren.¹³⁶ Die Natur hat ihr "Terpen-Experiment" in der globalen Praxis durchgeführt und nicht nur simuliert - und sie ist mit diesem Konzept seit Jahrmillionen erwiesenermaßen einen bewährten Weg gegangen.

3.7.2.3. Der Beitrag pflanzlicher Lösemittel zur Wasserbelastung

Eine Bewertung in ökologischer Sicht muß auch den möglichen Eintrag ins Wasser berücksichtigen. Können pflanzliche Lösemittel *Boden und Gewässer* stark belasten? Messungen an den beiden hauptsächlich verwendeten pflanzlichen Lösemitteln (Balsam-Terpentinöl und Citrusschalenöl) zeigen eine hervorragende, vollständige Abbaubarkeit der Inhaltsstoffe im Abwasser bzw. Boden innerhalb weniger Tage. Die Abbauprodukte sind keine Metaboliten sondern reines Wasser und reine Kohlensäure.

¹³⁵ MÖDERL (1993).

¹³⁶ Mit der gleichen lebensfremden Logik, mit der Terpene für Ozonmog verantwortlich gemacht werden, müßte man Mensch und Tier die Hauptschuld am Treibhauseffekt zeihen, da sie es wagen, das Treibhausgas Kohlendioxid in großen Mengen auszuatmen.

3.7.2.4. Die humantoxikologische Relevanz pflanzlicher Lösemittel

Sind die Inhaltsstoffe pflanzlicher Lösemittel humantoxikologisch relevant?

Toxikologischen Daten weisen pflanzliche Lösemittel nicht als Gift aus. Sie werden - versehentlich eingenommen - auch nicht zu Giften metabolisiert, sondern im Körper rasch abgebaut und ausgeschieden. Zusätzlicher Beleg: Fruchtfleisch und Säfte von Zitrusfrüchten enthalten erhebliche Mengen an Terpenen (diese machen im wesentlichen den eigentlichen Geschmack z.B. der Orangen aus).¹³⁷ Können pflanzliche Lösemittel Ursache von Allergien sein? Die rasante Zunahme von Allergiekrankheiten geht einher mit der zunehmenden Belastung der Umwelt mit Spuren naturfremder Chemikalien, die das Immunsystem irritieren. Die Konzentration an pflanzlichen Lösemitteln hat im gleichen Zeitraum eher abgenommen - durch Waldverminderung und Schwächung der Terpenproduktion infolge Umweltschädigung der Bäume. Durchaus vorkommende Allergien gegen pflanzliche Lösemittel sind folglich nicht *Ursachen*, sondern vielmehr die *Folge* der Xenobiotika - unter anderem auch der synthetischen Lösemittel!

Die als berufliche Hautkrankheit vor Jahrzehnten unter der Bezeichnung "Malerkrätze" bekannte Ekzembildung war eine Folge extrem minderwertiger Lösemittel (aus der Zellstoffproduktion bzw. aus Coniferen der ehemaligen UDSSR) mit sehr hohen Gehalten an ekzemauslösenden Inhaltsstoffen.¹³⁸ In den konsequenteren Naturfarben der Gegenwart werden hochwertige pflanzliche Lösemittel eingesetzt.¹³⁹ Zusätzliches Indiz: In mehr als 15 Jahren Erfahrung mit modernen Naturfarben trat nicht ein Fall dieser Krankheit auf.

¹³⁷ Auch das geschätzte Holz als Material für Böden, Wände und Möbel ist seit jeher eine bemerkenswerte Terpen-Quelle: Eine humantoxikologisch begründete Argumentation gegen pflanzliche Lösemittel, müsste ebenso für ein generelles Holzverbot im Innenraumbereich plädieren.

¹³⁸ D-3-Caren

¹³⁹ Lärchenharzbalsam aus dem Kärntner Gurktal enthält D-3-Caren-Gehalte im unteren ppm-Bereich.

3.7.2.5. Isoaliphaten: Alternative zu BTO und Citrusöl?

Können synthetische Isoaliphäten eine Alternative zu pflanzlichen Lösemitteln bieten? Diese petrochemischen Destillate (Hauptbestandteile Undecan und Dodecan) sind eine geruchlose vollysynthetische Chemikalie, die - wenn sie in "Naturfarben" eingesetzt wird, diesen Begriff ad absurdum führt (Verbrauchertäuschung). Isoaliphäten erfordern aufgrund ihrer geringen Lösefähigkeit zur Einstellung gleicher Verstreichbarkeit den Einsatz weit größerer Mengen als bei pflanzlichen Lösemitteln. Der Verarbeiter nimmt die Isoaliphäten-Lösemittel trotz objektiv hoher Belastung nicht wahr, da sie chemisch auf "Geruchlosigkeit" eingestellt wurden und daher subjektiv nicht wahrnehmbar sind. Diese Eigenschaft kann keineswegs als Vorteil betrachtet werden, denn damit fehlt auch die Warnfunktion für den Verarbeiter. Gerade diese wäre hier besonders wichtig, da bereits Nierenschäden durch Isoaliphäten-Einatmung nachgewiesen wurden.¹⁴⁰

Prozeßketten der chemischen Synthese Lösemittel vom Typus Isoaliphaten

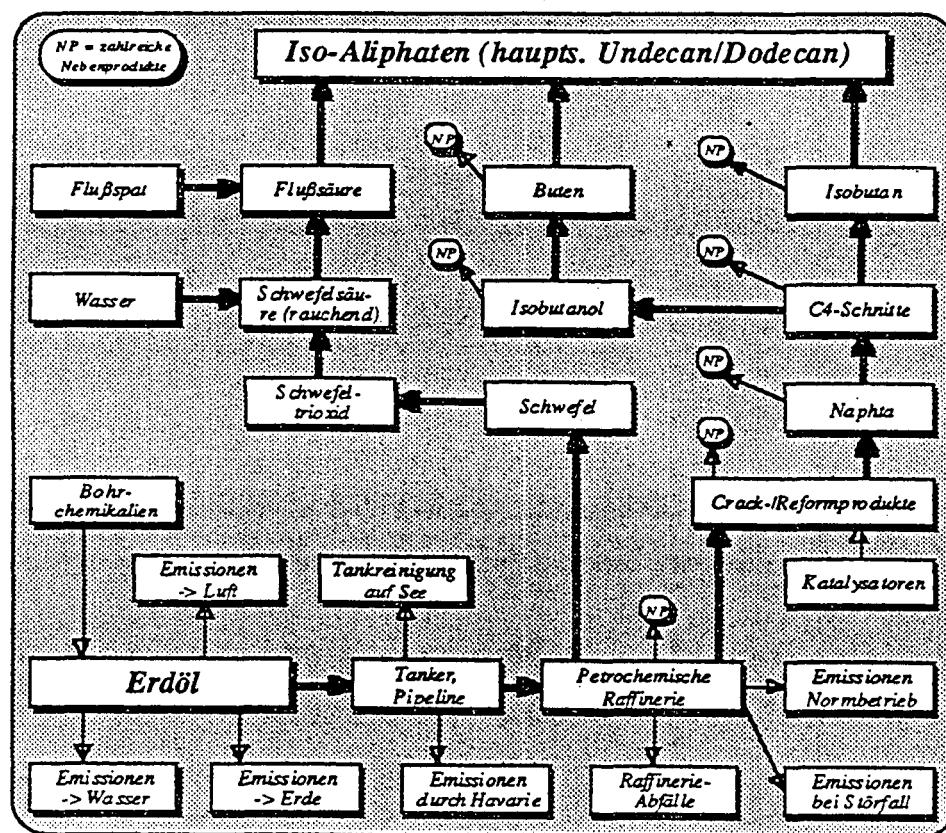


Abb. 20: Grafik CONCERNED PEOPLE Quelle RÖMPP/KEIM/FISCHER

140 SCHUSSER pers. Mitt. 1.6.1992.

Isoaliphaten weisen eine ungünstige Ökobilanz auf: Bei Gewinnung, Transport, chemischer Umwandlung und Weiterverarbeitung müssen die charakteristischen Risiken der Petrochemie in Kauf genommen werden. Auch nach dem Abdunsten aus dem Farbanstrich bleiben die Stoffe ein Umweltrisiko. Aufgrund ihrer extremen chemischen Stabilität besteht die Gefahr mangelhaften Abbaus und damit der Anreicherung im Ökosystem.

3.7.2.6. Pflanzliche Lösemittel nicht völlig harmlos

Pflanzliche Lösemittel, auch das muß in diesem Zusammenhang betont werden, sind nicht *frei* von jeder berechtigten Kritik. Lösemittel sind stets "überflüssige" Rezepturbestandteile. Sie bleiben als echte Hilfsmittel nicht Bestandteil des späteren Anstrichfilms, sondern verdunsten während der Anwendung.

Ihr Einsatz ist jedoch zwingend erforderlich. Oberflächenbehandlungsmittel müssen "*streichfähig*" sein - während die fertige Beschichtung *fest* sein sollte. Daher ist auch die möglichst weitgehende Einsparung pflanzlicher Lösemittel trotz deren positiver Öko-Bilanz notwendig und richtig. Die Hersteller von Naturfarben haben ihren Gesamt-Lösemittelverbrauch trotz gestiegener Umsätze *drastisch gesenkt*.

3.7.2.7. Neugründungen im Naturfarbenbereich erfolgversprechend

Unternehmensneugründungen im Bereich Naturfarben haben heute gute Marktchancen und wären dringend nötig, denn die bisherigen Anbieter können nicht den ganzen Farbenbedarf der Zukunft decken. Voraussetzung für den Erfolg ist jedoch ein lupenreines, konsequentes Produktkonzept. Risiken bei Neugründungen bestehen vor allem im Bereich der fachlichen und kaufmännischen Qualifikation. Zudem bedarf es eines breitgefächerten Naturstoffwissens, um die konventionelle Chemie konsequent und elegant meiden zu können.

Neugründer im ökologischen Bereich schätzen die Bedeutung einer exzellenten Konzeption, Organisation, Personalpolitik und Finanzsteuerung häufig als zu gering ein. Nur auf einer sehr guten instrumentellen Basis kann ein ökologisch konsequentes Konzept erfolgreich bestehen.

3.8. Richtlinien für die Gewinnung und Verarbeitung von Produkten der Sanften Chemie

Der ökologische Strukturwandel der nächsten Zukunft bringt es mit sich, daß diejenigen Branchen und Unternehmen, die schon jetzt naturnahe Stoffe mit naturnahen Stoffen verarbeiten, mit Wettbewerbsvorteilen und Bedeutungsgewinnen rechnen können. So stehen Nahrungs- und Genussmittel aus kontrolliert-biologischem Anbau, aber auch die Naturtextil- und Holzverarbeitung derzeit noch im Schatten strukturpolitischer Überlegungen, obwohl das Bedürfnis nach möglichst unverfälschten Naturprodukten unzweifelhaft wächst.

Nachwachsende Rohstoffe stehen im Mittelpunkt des Konzeptes der Sanften Chemie. Doch die Stoffe der Natur lediglich als willfähriges Objekt menschlicher Erforschung, Zurichtung und Nutzung zu betrachten, würde das Zentrum der neuen Denkweise verfehlt.

Beispielhaft sollen deshalb im folgenden Richtlinien vorgegeben werden, die nachhaltig-zukunftsverträgliche Entwicklungen auf den verschiedenen Stufen - Gewinnung, Verarbeitung, Verwendung, Entsorgung - der Sanften Chemie beschreiben.

3.8.1. Nachhaltigkeit in der Gewinnung

Bei der Förderung von Rohstoffen stehen die nachhaltig zu gestaltenden Eingriffe in die Natur im Vordergrund. Eine allgemein bekannte und schon lange angewandte Methode besteht z.B. in der Wiederaufforstung von Waldflächen, die vorher durch Schlägerung dem Bestand entnommen worden sind. In den letzten Jahren ist erkannt worden, daß eine quantitative Wiederherstellung des Ausgangszustandes durch Anpflanzung von schnellwachsenden Fichten nicht ausreichend ist, um die Ökosysteme gesund zu erhalten. Es ist auch eine qualitative Aufwertung vorzunehmen, z.B. durch die Anpflanzung von langsam wachsenden Harthölzern.

Wie mehrfach betont, sollte die Gewinnung von nachwachsenden Rohstoffen für eine sanft-chemische Produktion nur unter Vermeidung von irreparablen Folgen für die Mitwelt vorgenommen werden. Das bedeutet, daß das Ökosystem in möglichst kurzer Zeit ohne menschliches Zutun wieder in den ursprünglichen Zustand zurückfinden kann. Eine irreparable Schädigung würde entweder den

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Verlust oder die Nichtnutzbarkeit eines Ökosystems für einen langen Zeitraum bedeuten. Ungeachtet des ökologischen Schadens kann der Verlust eines Produktionsfaktors auch nicht im Sinne des Nutzers sein, weil er gleichzeitig einen ökonomischen Schaden verursacht.

Ein Weg, die Menge an räumlicher und genetischer Information und damit die Regenerationsfähigkeit im jeweiligen Ökosystem zumindest in Teilgebieten zu erhalten, kann die Errichtung von *Ökowertstreifen* sein, wie es in der Landwirtschaft zur Zeit schon praktiziert wird.

Für die Gewinnung von Rohstoffen ist es notwendig, Veränderungen im ökologischen System durchzuführen. Um die menschlich umgestaltete Natur (Kulturlandschaft) stabil zu halten, haben die bäuerlichen Gesellschaften im alpinen Raum vier Prinzipien im Umgang mit der Natur eingehalten. Diese Prinzipien, hat BÄTZING formuliert:

- Der Mensch muß Nutzungsgrenzen akzeptieren.
- Entsprechend der kleinräumigen Struktur der Naturlandschaft müssen auch die menschlichen Nutzungen klein gestaltet werden.
- Es muß das richtige Maß zwischen Über- und Unternutzung gefunden werden, sowie die richtige Nutzungsdauer, damit die Vegetation sich gut zu regenerieren vermag.
- Zusätzlich ist viel Pflege- und Reparaturarbeit nötig, um die Kulturflächen zu stabilisieren.

Durch Beachtung dieser Prinzipien hat der Mensch im alpinen Raum eine Form der nachhaltigen Bewirtschaftung geschaffen. Die alpinen Ökosysteme sind in ihrer Natur labiler als die Regionen des Flachlandes. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß aus diesen Erfahrungswerten für jedes Ökosystem dieselbe Gültigkeit abgeleitet werden kann. Es erscheint aus diesem Grund sinnvoll, diese Leitlinien auch auf Ökosysteme anzuwenden, die stabiler sind als die Almen, weil dadurch mit noch größerer Sicherheit eine nachhaltige Wirtschaftsweise erreicht werden kann.

Unabhängig von der Region, in der eine Nutzung durch den Menschen stattfindet, kann demnach die Handlungsmaxime gelten: "Weil der Mensch seit der Erfindung von Ackerbau und Viehzucht zum Zwecke seiner Lebenssicherung die vorgefundene Natur tiefgreifend ökologisch verändern muß, ist nachhaltiges Wirtschaften ein Handeln, das die ökologischen Konsequenzen seiner Naturveränderungen kennt, sie gemäß den vier Prinzipien berücksichtigt und gleichzeitig eine entsprechende Umweltverantwortung und -kontrolle entwickelt."¹⁴¹

3.8.1.1. Wildsammlung

Ein optimales Beispiel für die Gewinnung von Rohstoffen liefert die Wildsammlung, die vor allem die räumliche und weitgehend auch die genetische Information intakt hält, sofern sie nicht zur Raubsammlung verkommt. Ein Mangel dieser Form der Rohstoffgewinnung betrifft den Umstand, daß sie sich nicht für jeden Rohstoff einsetzen läßt.

Rohstoffe, die mithilfe der Wildsammlung gewonnen werden können, bilden einjährige Pflanzen und Teile von Pflanzen. Der limitierende Faktor liegt hier in der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Diese ist gegeben, wenn die benötigten Pflanzen in genügender Anzahl und ausreichender Dichte in einem gewissen Areal vorkommen.

Eine nachhaltige Form der Wildsammlung bedeutet, daß im Erntejahr eine bestimmte Menge an samentragenden Pflanzen übrig gelassen wird, die gewährleisten, daß im Folgejahr eine ähnlich ertragreiche Ernte möglich ist. Auch sind Veränderungen, die durch das Sammeln entstehen, so zu gestalten, daß das Ökosystem möglichst keinen Schaden erleidet, der länger zur Regeneration benötigt als bis zur nächsten Sammelperiode.

3.8.1.2. Kontrolliert biologischer Anbau (kbA)

In den bekannten Richtlinien zum kontrolliert biologischen - oder auch zum biologisch dynamischen Anbau sind die wichtigsten Anweisungen für eine nachhaltige Bewirtschaftung enthalten. Sie bedürfen keiner gesonderten Ergänzung oder Erweiterung.

¹⁴¹Bärling (1994) S. 20-23.

3.8.1.3. Konventioneller Anbau

Diese Form der Bewirtschaftung entspricht wegen des Einsatzes von meist für große Gebiete vereinheitlichten genetischen Materials am wenigsten den Richtlinien der Nachhaltigkeit. Der konventionelle Anbau benötigt außerdem große Mengen an Erdöl für die Bereitstellung von Hilfsmitteln, wie Düngemitteln, Pestiziden, und Herbiziden.

Erdöl stellt aber keine erneuerbare Ressource dar. Somit kann der konventionelle Anbau nur als Überbrückungsmöglichkeit für die Gewinnung nachwachsender Rohstoffe gesehen werden, um in späterer Folge in den kbA übergeführt zu werden.

3.8.2. Nachhaltigkeit der Produktion

Es handelt sich auch um ein ökonomisches Prinzip, den Ertrag an Produkt aus einem Rohstoff zu optimieren, wodurch der Begriff der Nachhaltigkeit in der Produktion leichter verständlich wird. Unter Nachhaltigkeit versteht man hier im besonderen die *Mehrfachnutzung* eines Rohstoffes.

Es sind zwei Arten der Mehrfachnutzung möglich.

a. Quantitativ

Aus einem Grundrohstoff (Pflanze) werden verschiedene Stoffe für verschiedene Anwendungen gewonnen. So können z. B. aus dem Öllein das Leinöl aus Leinsamen für Anstrichmittel, Zellulose aus Lein-Stroh für die Papierproduktion, Tierfutter aus den Preßrückständen der Leinölproduktion und anderes gewonnen werden.

b. Qualitativ

Ein Stoff wird für unterschiedliche Zwecke eingesetzt. Als Entscheidungskriterium dient die Reinheit und Qualität des Rohstoffes. Auch hier soll wieder der Öllein als Beispiel dienen. Bei der Leinölgewinnung kann das Öl aus der kalten Erstpressung als Diätleinöl in der Lebensmittelindustrie verwendet werden, während das Öl aus der zweiten Kaltpressung und der Warmpressung als Industrieleinöl für die Herstellung von Anstrichmitteln dient.

Neben dem sparsamen Einsatz von Produktionsenergie steht auch die Forderung nach erneuerbaren Energieformen, die für die Herstellung Verwendung finden. Für die Zeit, in der fossile Energieträger nicht mehr mit vertretbarem Aufwand zu gewinnen sind, müssen schon heute die Möglichkeiten für die Nutzung von regenerierbaren Energieformen auf Basis von Biomasse, Sonnenenergie, Wasserkraft, usw. aufgebaut werden. Um die Energieeinsparung zu vergrößern, erweist es sich als günstig, den verarbeitenden Betrieb in der näheren Umgebung der Rohstoffproduktion einzurichten. Die Energieeinsparung beim Transport wird in der Regel umso größer sein, desto weiter die Wertschöpfung vorangeschritten ist. Dies wird aber nur in den Fällen möglich sein, wo die Infrastruktur für die Errichtung eines Betriebes schon vorhanden ist, oder mit geringem Aufwand zur Verfügung gestellt werden kann.

Weiters ist es zur Minimierung der Energie- und Materialströme sinnvoll, die betriebsinterne Kreislaufführung von Produktionsmitteln, wie z.B. Wasser, und den Einsatz von Sekundärrohstoffen (Recyclingmaterial) zu optimieren.

3.8.3. Nachhaltigkeit der Verwendung

Um von Nachhaltigkeit bei der Verwendung sprechen zu können, müssen zwei Arten von Produkten unterschieden werden. Zu unterscheiden sind dabei Gebrauchsgüter und Verbrauchsgüter, die im Sinne eines Eco-Design¹⁴² beurteilt werden können.

Für beide Arten von Gütern gilt es, ihre Sinnhaftigkeit zu hinterfragen und die jeweiligen Anwendungsbereiche kritisch zu analysieren. Zu prüfen ist auch, ob der Bedarf für das Produkt mit Stoffen, die für eine sanft chemische Produktion zur Verfügung stehen, gedeckt werden kann, ohne die Kriterien für einen nachhaltigen Umgang mit den Stoffen zu verletzen. Bei der weiteren Beurteilung erweist es sich als sinnvoll *Gebrauchs- und Verbrauchsgüter* getrennt zu behandeln.

Für die *Gebrauchsgüter* stellen sich folgende Fragen:

- Ist die Lebensdauer des Produktes größer, als die Ausgangsrohstoffe benötigen um nachzuwachsen?

Es existieren in Österreich Tischlereien, die sich dieses Prinzip zur Aufgabe gemacht haben. Sie konstruieren ihre Möbel in der Weise, daß die Lebensdauer sich mindestens über jenen Zeitraum erstreckt, wie das dafür verwendete Holz benötigt, um wieder nachzuwachsen. Je länger die nutzbare Lebensdauer

¹⁴²Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

eines Produktes ist, umso besser wird es nach Kriterien der Nachhaltigkeit beurteilt.

- Sind Verschleißteile leicht auszuwechseln?

Um zu verhindern, daß das gesamte Produkt seine Verwendbarkeit verliert und damit entsorgt werden müßte, sollten vorhandene Verschleißteile leicht auszuwechseln sein. Dadurch kann die Lebensdauer eines Produktes erheblich erhöht werden. Ein entsprechendes Dienstleistungsangebot muß vom Produzenten erstellt und schon bei der Konzeption des Produktes berücksichtigt werden.

- Ist eine Reparatur des Produktes möglich?

Für eine Verlängerung der Lebensdauer ist es ebenso erstrebenswert, die Konstruktion des Produktes so zu gestalten, daß eine Reparatur möglich ist. Diese Anforderung kann z.B. durch Zerlegbarkeit, Ersatz von Klebeverbindungen durch Schraub- und Steckverbindungen, Vermeidung von Verbundmaterialien, usw. erreicht werden.

- Welche Betriebsmittel werden benötigt?

Betriebsmittel sind wie Verbrauchsgüter zu behandeln und nach den dafür gültigen Kriterien zu bewerten.

Für *Verbrauchsgüter* stellen sich folgende Fragen:

- Wie effizient ist das Produkt?

Bei der Gestaltung des Produktes ist zu berücksichtigen, daß die erzielte Wirkung in einem vertretbaren Ausmaß zur verwendeten Menge steht. Das Verbrauchsgut sollte möglichst sparsam einzusetzen sein, ohne jedoch an Wirkung zu verlieren.

- Wie weit wird durch die Verwendung die Mitwelt beeinflußt?

Unmittelbar nach der Anwendung verwandelt sich das Produkt in Abfall. Umwelthygienische, umwelttoxikologische Fragen und Fragen des biologischen vollständigen Abbaus müssen deshalb auch bei sanft chemischen Produkten vor dem Inverkehrsetzen möglichst vollständig geklärt werden.

3.8.4. Nachhaltigkeit der Entsorgung

An dieser Stelle wird sich in der Regel herausstellen, wie effizient das ECO-Design des Produktes vorgenommen wurde, und wie konkret die Leitlinien einer Sanften Chemie in die Praxis umgesetzt werden konnten.

Künftig wird es nötig sein, Abfallströme auf ein nicht vermeidbares Ausmaß zu reduzieren. Die sanft chemische Produktion ist bestrebt, durch eine möglichst geringe Eingriffstiefe und durch geschickte Auswahl der eingesetzten Materialien ihre Produkte so zu gestalten, daß die in der Natur vorhandenen Abbaupfade genutzt werden können. Aufgrund der geringen stofflichen Veränderung, die auf dem Weg zum Produkt vorgenommen wird, kann eine Belastung durch Substanzen, die der Natur fremd sind, ausgeschlossen werden. Zu berücksichtigen ist vielmehr die Quantität an Stoffströmen, die in die Mitwelt zurückverfrachtet werden, unabhängig davon, ob es sich um die Produkte selbst oder um Abfallströme aus der Produktion handelt.

Für eine Bewertung der Produkt- und Abfallströme bezüglich ihrer Entsorgung sollen beispielhaft einige Fragen gestellt werden, von deren Beantwortung abhängig ist, inwieweit eine nachhaltige, zukunftsverträgliche Gestaltung realiter erreichbar ist.

- Handelt es sich um ein *Einweg*- oder um ein *Mehrwegprodukt*?

Durch die Konzeption als Mehrwegprodukt kann der Verwendungszeitraum der eingesetzten Rohstoffe verlängert werden. Als Entscheidungskriterium für die Konzeption kann der Stoff- und Energieaufwand herangezogen werden, der für die Kreislaufführung des Produktes notwendig ist. Übersteigt dieser Aufwand die Energie- und Stoffmengen, die zur Herstellung notwendig sind, wird eine Gestaltung als Einwegprodukt vorzuziehen sein. Hygienische Gründe stellen ein Kriterium dar, bei der Energie und Stoffströme eine untergeordnete Rolle spielen. In diesem Bereich wird eine genaue Prüfung notwendig sein, ob die Mehrwegoption dennoch realisierbar ist.

- Ist eine *stoffliche Verwertung* möglich?

Unter 'stoffliche Verwertung' ist die Definition des IÖW für 'Recycling' gut operationalisierbar, da sie alle zur Zeit verwendeten Varianten der Kreislaufführung berücksichtigt.¹⁴³

¹⁴³ Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (1993).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Diese sind:

- a) *Wiederverwendung*: Produkte werden nach Verwendung bzw. Ablauf der Lebensdauer in einem neuen Produktionsschritt zu Rohmaterial aufbereitet und wieder in dieselbe Form gebracht. (Altglasauflbereitung zu neuen Flaschen)
- b) *Wiederverwertung*: Mehrfachverwendung ohne stoffliche Veränderung (Mehrwegflasche)
- c) *Weiterverwertung*: Abfälle aus einem Prozeß werden als Rohstoff in einem anderen Prozeß genutzt.
- d) *Weiterverwendung*: Produkte werden ohne stoffliche Veränderung für einen neuen Zweck eingesetzt.

3.9. Verfahrensweisen der Sanften Chemie

Ein Merkmal der sanften Chemie ist die schonende Vorgangsweise in der Verarbeitung der Rohstoffe zu Halbfertig- und Fertigprodukten. Es ist deshalb notwendig, dem Grad ihrer "Zurichtung", der stofflichen Veränderung, besonderes Augenmerk zu widmen. (Im Detail wird der Grad der Zurichtung und die Grenze, bis zu der die molekulare Veränderung von Naturstoffen stattfinden darf, um noch von sanft chemischer Produktion sprechen zu können, im Punkt "Eingriffstiefe" diskutiert.)

Bearbeitungstechniken und Stoffumwandlungsprozesse, die in der Sanften Chemie zur Anwendung kommen (und die die vom Arbeitskreis erwogene Grenze der Eingriffstiefe nicht überschreiten), sollen im Folgenden dargestellt werden.

Grundsätzlich unterscheiden sich Verfahren zur Herstellung von sanft chemischen Produkten nicht von Verfahren, die in der konventionellen Chemie ihren festen Platz haben. Es werden in der Sanften Chemie nur nicht alle Verfahren verwendet, weil manche dieser Techniken eben zu einer Überschreitung dieser Grenze der Eingriffstiefe führen würden.

Ziel sanft-chemischer Technik ist es u.a. den molekularen Aufbau von Naturstoffen weitgehend zu erhalten bzw. nur geringfügig zu modifizieren, um alle Vorteile, die diese Stoffe bieten, in vollem Umfang nutzen zu können. Aus diesem Grund werden speziell solche Methoden vermieden, die in der organischen Synthese dazu dienen, Stoffe in ihrer molekularen Struktur tiefgreifend zu verändern.

Die in Tab. 11 dargestellten Methoden, gegliedert nach Art der Behandlung, geben einen Überblick über einige sanft-chemische Verfahrensweisen.

3.9.1. Physikalische, chemische und biotechnologische Methoden

Physikalisch		Chemisch	Biotechnologisch
Mechanisch	Thermodynamisch		
Pressung	Lösung	Verseifung	Enzymkatalyse
Verreibung	Erhitzung	Veresterung	Photosynthese
Mischung	Destillation	Sulfatierung	Atmung
Filtration	Ausfällung	Phosphatierung	Gärung
Zentrifugation	Extraktion	Umesterung	
Siebung	Chromatographie	Veretherung	
Windsichtung	(Um)Kristallisation	Umetherung	
Flotation	Ionenaustausch	Oxidation (O_2)	
	Koagulation	Reduktion	
	Solvatation	Polymerisation	

Tab. 11: Verfahrensweisen der Sanften Chemie

Im Folgenden werden die angegebenen Verfahren kurz erläutert.

Bei *mechanisch-physikalischen Verfahren* werden vorwiegend Unterschiede der Stoffe im Bezug auf Teilchengröße und Gewicht sowie Unterschiede im Phasenzustand (fest, flüssig, gasförmig) zur Bearbeitung herangezogen. Dabei werden im Idealfall keine Veränderungen im Phasenzustand und in der chemischen Beschaffenheit der Stoffe verursacht.

- Pressung: zur Trennung von flüssigen und festen Bestandteilen (z.B.: zur Gewinnung von Ölen aus Ölsamen) und zur Verdichtung von Stoffen
- Verreibung: zur Homogenisierung von Stoffgemischen und Verkleinerung von Korngrößen
- Mischung: zur Homogenisierung von Stoffgemischen
- Filtration: zur Trennung von festen und flüssigen Stoffgemischen
- Zentrifugierung: zur Trennung von festen und flüssigen Stoffgemischen oder Stoffen unterschiedlicher Dichte
- Siebung: zur Trennung von festen Stoffen unterschiedlicher Korngrößen
- Windsichtung: zur Trennung von festen Stoffen unterschiedlicher Dichte oder auch Form mittels Luftstrom
- Flotation: zur Trennung fester Stoffe unterschiedlicher Dichte

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Bei *thermodynamisch-physikalischen* Verfahren werden zu einer Bearbeitung der Stoffe unterschiedliche thermodynamische Größen, wie z.B. Siedetemperatur, Schmelztemperatur, Löslichkeit, elektrische Ladung, herangezogen. Wie bei den mechanisch-physikalischen Verfahren wird auch hier eine Vermeidung von Veränderungen in der chemischen Struktur angestrebt. *Phasenübergänge* sind aber ein wichtiger Bestandteil dieser Operationen.

Lösung: Verteilung von festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen in einem Lösungsmittel (Wasser, EtOH, BTO, RME...)

Erhitzung: Verfahren um Stoffe durch Temperaturrehöhung miteinander zur Reaktion zu bringen (max. 100°C)

Destillation: Trennung von Stoffen mit unterschiedlicher Siedetemperatur, oder aufgrund unterschiedlichen Lösungsverhaltens (z.B. Wasserdampfdestillation)

Ausfällung: Trennung von gelösten Stoffen durch Veränderung der Lösungsmittelbedingungen (oder des Säure-Basen Gleichgewichtes)

Extraktion: Trennung von Stoffen anhand unterschiedlichen Lösungsverhaltens zwischen zwei oder mehreren Lösungsmitteln

Chromatographie: Trennung von Stoffen anhand von unterschiedlichem Lösungsverhalten, aber auch unterschiedlicher elektrischer Ladung, Polarität, Molekülgröße,...

(Um)Kristallisation: Trennung von Stoffen mit unterschiedlicher Löslichkeit

Ionen austausch: Trennung von Stoffen mit unterschiedlicher elektrischer Ladung

Solvatation: Verteilung von festen bzw. flüssigen kleinen Teilchen in einer flüssigen bzw. gasförmigen Phase

Koagulation: Umkehrung der Solvatation durch Änderung des Ionengleichgewichtes

Bei den *chemischen Verfahren* geht es um *einfache Umsetzungen*, die die molekulare Struktur der Stoffe leicht verändern. (Eine genauere Besprechung, innerhalb welchen Spielraumes sich die strukturelle Veränderung bewegen sollte, wird unter "Eingriffstiefe" erläutert.)

Verseifung: Aufspaltung von festen Ölen in Fettsäuresalze (Seifen) und Glycerin

Veresterung: Reaktion von Alkoholen mit Säuren unter Wasserabspaltung

Sulfatierung: Reaktion von Alkoholen mit Schwefelsäure unter Wasserabspaltung

Phosphatierung: Reaktion von Alkoholen mit Phosphorsäure unter Wasserabspaltung

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

<u>Umesterung:</u>	Rekombination von Estern mit anderen Alkoholen oder Säuren zu neuen Estern
<u>Veretherung:</u>	Reaktion von Alkoholen miteinander unter Wasserabspaltung
<u>Umetherung:</u>	Rekombination von Ethern mit anderen Alkoholen zu neuen Ethern
<u>Oxidation</u> (mit O ₂):	Reaktion von Stoffen mit Sauerstoff oder sauerstoffabspaltenden Substanzen
<u>Reduktion:</u>	Umkehrung der Oxidation mit "milden" Reduktionsmitteln
<u>Polymerisation:</u>	Reaktion von einzelnen Substanzen zu langen Ketten, Knäueln oder Ringen

Unter *biotechnologischen Verfahren* werden jene verstanden, bei denen chemische Veränderungen mithilfe von Organismen oder Enzymen, die aus Organismen stammen, durchgeführt werden. Inwieweit und ob dazu gentechnisch veränderte Organismen oder Substanzen, die aus diesen Organismen gewonnen wurden, für eine sanft chemische Produktion zulässig sind, wird unter "Sanfte Chemie und gentechnische Arbeitsmethoden" erörtert.

<u>Enzymkatalyse:</u>	Mithilfe von Enzymen durchgeführte chemische Umsetzungen, unter Bedingungen, die jenen, die in Zellen vorherrschen, gleichen
<u>Photosynthese:</u>	Von Pflanzen durchgeführter Prozeß, der mithilfe von Licht Kohlendioxid und Wasser zu Zuckern umsetzt. Die Photosynthese stellt einen grundlegenden Prozeß dar, der das Leben auf der Erde ermöglicht.
<u>Atmung:</u>	Die biologische Weiterführung der Photosynthese; dabei werden energiereiche Stoffe wie Zucker, Stärke, Fette, usw mithilfe von Sauerstoff unter Energiegewinnung zu Kohlendioxid und Wasser zerlegt, und daraus wiederum komplexere Strukturen auf- und umgebaut.
<u>Gärung:</u>	Ein der Atmung verwandter Prozeß zur Energiegewinnung, der aber ohne Sauerstoff stattfindet. Da die Ausgangssubstanzen nicht bis zum Kohlendioxid und Wasser abgebaut werden, ist die Energieausbeute nicht so groß wie bei der Atmung. Die Endprodukte geben der Art der Gärung den Namen, z.B. alkoholische Gärung, Essigsäuregärung, Milchsäuregärung,...

Die hier aufgeführten Verfahren könnten, oberflächlich betrachtet, den Eindruck entstehen lassen, daß zwischen konventioneller und sanfter Chemie-Praxis keine relevanten Unterschiede bestehen. Dies trifft auch zu, sofern man diese Verfahren isoliert bewertet und keine weiteren Einschränkungen der Verfahren vornimmt. Diese Einschränkungen betreffen

- 1) die eingesetzten Materialien, aus denen das Endprodukt hergestellt werden soll,
- 2) die thermodynamischen Parameter, die die Reaktionsbedingungen während der Entstehung des Endproduktes abgrenzen.

3.9.2. Kriterien zur Rohstoffauswahl

Bei der Auswahl der Rohstoffe für eine sanft chemische Produktion sind folgende Leitlinien zu beachten:

- Für die Herstellung von sanft chemischen Produkten sind nachwachsende Rohstoffe grundsätzlich nicht regenerierbaren vorzuziehen (s. Rohstoff-Dossier).
- Von den anorganischen Rohstoffen sind diejenigen zu bevorzugen, die sich auf überschaubare Zeiträume von mehreren Generationen ohne Raubbau nutzen lassen (z.B. Kreide, Tone, Erdfarben,...).¹⁴⁴
- Human- und umwelthygienisch bedenkliche Stoffe sind nach Möglichkeit zu meiden
- Bei mehreren Alternativen haben standortgemäße Rohstoffe Vorrang vor anderen, weil sie dem jeweiligen Ökosystem vertraut sind.

3.9.3. Rohstoffe aus pflanzlichen und tierischen Organismen (Auswahl)

Zur Verdeutlichung der großen Vielfalt an Naturstoffen für die sanft chemische Produktion dient eine vorläufige Auswahl von organischen Rohstoffen, die von der AGN (Arbeitsgemeinschaft Naturfarben) zusammengestellt und von den Autoren der Studie erweitert und kommentiert wurde.

Rohstoff	Erläuterung
Alkanna-Wurzeln	Wurzeln von Alkanna tinctoria (Ungarn)
Aluminium-Stearat	Aluminiumsalz der Stearinsäure
Anottasaat	Samen von Bixa orellana
Arvenöl	ätherisches Öl der Hochgebirgs-Zirbelkiefer (Kärnten)
Avocadoöl	fettes Öl des Fruchtfleisches der Avocadobirne (USA)
Balsamterpentinöl	äther. Oldestillat aus Kiefernharz-Rohbalsam (Portugal)
Benzoe	aromaticisches Edelharz (Siam)
Bergamotteöl	äther. Öl aus der Frucht der Bergamotte
Bienenwachs gebleicht	einfarbiges, echtes Bienenwachs (Mitteleuropa)
Bienenwachs gelb	ungebleichtes, echtes Bienenwachs (Mitteleuropa)
Birkenholzteröl	Produkt der trockenen Destillation von Birkenholz (BRD)
Blauholz (Brasilholz)	Färbedroge aus Haematoxylon campechianum (Mexiko)
Buchenholztereer	Produkt der trockenen Dest. von Buchenholztereer (BRD)
Buchenholzzellulose	ligninfreier pflanzlicher Füllstoff mit Faserstruktur
Caiaputöl	äther. Öl aus Melaleuca leiadendron (Asien)
Calzium-Stearat	Calziumsalz der Stearinsäure

¹⁴⁴FISCHER (1990).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Carboxy-Methylzellulose	durch chem. Aufschluß wasserquellbare Holzzellulose
Carnaubawachs	pflanzliches Hartwachs einer Palmenart (Brasilien)
Catechu	brauner Extrakt aus Kernholz von <i>Acacia catechu</i> (Java)
Chitin	stickstoffhaltiges Polysaccharid, wesentlicher Bestandteil von Crustaceen, Insekten, Pilzen und Kieselalgen, lässt sich leicht zu Chitosan umsetzen
Chitosan	durch alkalische Hydrolyse deacetyliertes Chitin in Medizin, Pharmazie, Kosmetik, in der Umwelt- und Biotechnologie, Lebensmitteltechnologie und in der Landwirtschaft einsetzbar
Chlorophyll	natürlicher Blattfarbstoff
Citruschalenöl	äther. Öl der Orangenschalen (Brasilien, Florida)
Coloph.-Glyc. Ester	Verkochung von Naturharz mit natürlichem Glycerin
Colophonium	helles Nadelbaumharz (Portugal, China)
Colophonium kalkgeh.	durch Neutralisierung i.d. Schmelze gehärtetes Naturharz
Copaiva-Balsam	flüssiges Harz der <i>Copaifera</i> -Arten (Brasilien)
Dammar	helles, gilbunfreies Laubbaumharz (Sumatra)
Drachenblut	rotes Harz aus den Früchten einer Palmenart
Eichenrinde	Extrakt aus <i>Cortex Quercus</i> (BRD)
Ethanol	Produkt der alkohol. Gärung vergällt mit BTO (BRD)
Eucalyptusöl	äther. Öl der Blätter des Eukalyptusbaumes (Australien)
Fichtenharzpech	Destillationsrückstand von Fichtenharz
Fichtennadelöl	äther. Öl der Fichtennadel (Schweden, Sibirien)
Flachs	heimische anspruchslose Pflanze mit typischer Kaskadennutzungsoption: Faserverbundwerkstoffe, Vliesstoffe, Verpackungen und Filter bzw. Automilinenteile, Pflanzköpfe, Obststeigen, Obstschalen...
Galgantwurzel	Wirkstoff aus <i>Rhizoma Galangae</i> (Alpenländer)
Gelbholz (Fustik)	gelbfärbendes Holz von <i>Chlorophora tinctoria</i> (Brasilien)
Gelbwurzel	Rhizom von <i>Curcuma domestica</i> (Indien)
Geranienöl	äther. Öl aus <i>Pelargonium graveolens</i> (Algerien)
Glycerin	Produkt der Verseifung von pflanzlichen Ölen (BRD)
Guajakholz	Holz v. <i>Bulnesia sarmienti</i> , reich an äther. Ölen (Paraguay)
Holzessig	Destillationsprodukt einheimischer Holzarten
Holzöl roh	Samenöl des Tungbaumes (China)
Holzschliff	besteht zu 70-90% aus Altpapier, ökologisch vorteilhaftes Verpackungsmaterial im Lebensmittelbereich (Eierkartons, Apfeltrays, Obstschalen...)
Hydroxy-Aethylzellulose	durch chem. Aufschluß wasserquellbare Holzzellulose
Indigo Echt	blauer Farbstoff aus <i>Indigofera</i> Arten (Bengalen)
Japanwachs echt	Fett aus dem Fruchtfleisch von <i>Rhus succedana</i> (Japan)
Johanniskraut	gerbstoff- u. äther. ölreiche Pflanze (Mitteleuropa)
Jute	traditionsreiche Bastfaser, ökologisch problemloses Sackmaterial, auch für Teppiche, Böschungsschutz, Polstermöbel und Bauwirtschaft
Kalmusöl	äther. Öl aus <i>Acorus Calamus</i> (Ostasien)
Kamala Pura	rotbrauner Farbstoff aus Früchten des <i>Mallotus</i> -Baumes
Kampheröl	äther. Öl aus <i>Cinnamomum Camphora</i> (China)
Kartoffelstärke	natürliche Kartoffelstärke (BRD)
Kiefernharz-Balsam	gereinigtes, dickflüssiges Kiefern-Rohharz (Portugal)
Kokosöl	Öl aus dem Kernfleisch von <i>Cocos nucifera</i> (Indonesien)
Kokosölseife	Verseifung aus Kokosöl und Natronlauge

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Krappwurzeln	rotfärbende Wurzeln der Färberräte (<i>Rubia tinctoria</i> , Iran)
Lackleinöl	gereinigtes Samenöl der Leimpflanze (Argentinien)
Lärchenharz-Balsam	gereinigtes, dickflüssiges Edel-Rohharz (Kärnten)
Latschenkieferöl	äther. Öl der Latschenkiefer (Europa)
Lavendelöl	äther. Öl der Lavendelblüte (Südfrankreich)
Leinöl-Fettsäure	Produkt aus der Spaltung von Leinöl (neben Glycerin)
Leinöl-Standöl	dickflüssig gekochtes Leinölprodukt
Lignin	phenolartiger Holzbestandteil, der durch Weißfäulepilze (Basidiomyeten) enzymatisch sowohl abgebaut als auch zu einem interessanten Bindemittel (Spanplatten) polymerisiert werden kann
Licea cubeba	Frucht, reich an äther. Ölen (China)
Maiskaimöl	nichttrocknendes Öl des Maissamen-Keims (USA)
Manilacopal	spirituslösliches Laubbaumharz (Neuseeland)
Mastix	Edelharz einer Pistazienart (Insel Chios)
Mate	Blätter von <i>Ilex paraguensis</i> (Brasilien)
Melissenöl	äther. Öl <i>Melissa officinalis</i> (Mitteleuropa)
Methylzellulose	durch chem. Aufschluß wasserquellbare Holzzellulose
Milch-Casein	ausgeflocktes und gereinigtes Milcheiweiß (BRD)
Mohnöl	fettes Öl aus Mohnsamen
Natur-Asphalt	natürliches Erdpech (Trinidad)
Naturgummi-Milch	Milchsaft des Kautschukbaumes (Malaysia)
Nelkenöl	äther. Öl (Indonesien)
Niemrinde	Baumrinde von <i>Azadirachta Indica</i> (Nicaragua)
Olein	Gemisch pflanzlicher Ölsäuren
Olivenöl	fettes Öl aus dem Fruchtfleisch der Oliven (Italien)
Oreganum	Kräuterextrakt aus der grünen Pflanze (Italien)
Paperschaum	neues ökologisch interessantes Polstermaterial aus Altpapier und Stärke (bei 100°C mit Wasserdampf geschäumt)
Perubalsam	flüssiges Rohharz von <i>Myroxylon Pereira</i> (El Salvador)
Pine Oil	äther. Oldestillat (Terpenalkohol) von <i>Pinus palustris</i>
Polysaccharid	natürliche Stärkestoffe (BRD)
Popcorn	Verpackungs- und Füllmaterial für zerbrechliche Waren, aus <i>Zea mays everta</i> , einer speziellen Maiszüchtung
Propolis	Bienenharz (Mitteleuropa)
Reseda	Färbeplante für gelbe Pflanzenfarben (Mitteleuropa)
Rhabarber	heimische "Kompostpflanze", aus der sich Apfelsäure, ein gut abbaubares Reinigungsmittel von hoher Kalklösekraft und Hautverträglichkeit herstellen läßt
Ricinenstandöl	verkochtes Ricinusöl
Ricinusöl	fettes Samenöl der Ricinuspflanze (Brasilien)
Rosenholzöl	äther. Öl aus <i>Aniba rosaeodora</i> (Brasilien)
Rosenöl	äther. Öl aus Blüten von <i>Rosa gallica</i>
Rosmarinblätter	Pflanzenteile reich an äther. Ölen (Dalmatien)
Rosmarinöl	äther. Öl aus Rosmarinblättern (Dalmatien)
Rotholz (Fernambuk)	rotfärbendes Holz von <i>Caesalpina echinata</i> (Costa Rica)
Safflor-Standöl	Produkt aus dem Samenöl der Färberdistel (Spanien)
Salbei	Kräuterextrakt aus den Blättern (Deutschland)

Schellack wachsfrei	Ausscheidungsprodukt einer tropischen Schildlaus (Indien)
Sojalecithin	extrahierter Inhaltsstoff der Sojabohne (USA)
Sojaöl	fettes Öl der Sojabohne (USA)
Sojaölseife	Verseifung aus Sojaöl und Natronlauge
Spikeöl	äther. Öl aus Lavandula spica latifolia (Spanien)
Stärke	natürl. Polysaccharid (Kartoffeln, Getreide, Mais) z.B. für Bio-Polymeren (Verpackungen und Werkstoffe)
Thymian	Kräuterextrakt aus den Blättern (Frankreich)
Tragant	Gummi von Atragalus gummifer (Türkei)
Türkischrotöl	sulfuriertes Ölprodukt aus Ricinusöl
Wacholderbeeren	Gerbstoff- und äther.-reiche Frucht (Ungarn)
Wacholderholz	Extrakt aus Lignum Juniperi (BRD)
Walnußöl	Samenöl von Juglans regia (BRD)
Walnußschalen	braunfärbende Fruchtschalen der Walnuß (Marokko)
Weizenmehl	Stärkereiches, quellfähiges Getreidemehl (BRD)
Wintergrünöl	äther. Öl (Kalifornien)
Wollwachs wasserfrei	Fettsubstanz der Schafsschurwolle (Neuseeland)
Xanthen	Extrakt aus Xanthomonas campestris
Zedernholzöl	äther. Öl aus Cedrus lebanitica (Libanon)
Zimtöl	äther. Öl aus Cinnamomum cassia (China)
Zink-Stearat	Zinksalz der Stearinsäure
Zitronenöl	äther. Öl aus Zitrusfrüchten
Zitronensäure	natürliche Säure aus Zitrusfrüchten
Zitronellöl	äther. Öl aus Antronon Nardus subspeciesgenuius (Java)

Tab. 12: Rohstoffe aus pflanzlichen und tierischen Organismen (Auswahl)

3.9.4. Mineralische Rohstoffe (Auswahl)

Die folgende Liste bietet eine Auswahl von anorganischen Verbindungen, die in der sanften Chemie schon heute verwendet werden. Da die sanft-chemische Technologie noch am Beginn ihrer Entwicklung steht, ist anzunehmen, daß sich die Anzahl der in Frage kommenden, anorganischen Verbindungen noch vergrößern wird.

Rohstoff	Erläuterung
Alaun	wasserlösliches Salz (Kalium-Aluminiumsulfat)
Aluminiumoxid	Bauxit, Tonerde, Korund; der Abbau von Bauxit geschieht häufig unter tiefgreifenden Veränderungen der Mitwelt (Bodenerosion, Änderungen der klimatischen Verhältnisse...) Ziel für die Zukunft sollte es sein, diese auf ein Minimum zu reduzieren
Aluminiumsulfat	Aluminiumsalz (s.o. oben)
Ammoniumcarbonat	Hirschhornsatz
Ammoniumhydroxid	Salmiakgeist
Bariumsulfat	künstlich hergestellter mineralischer Füllstoff
Borax	natürliches Bormineral (Natrium-Tetraborat, Türkei)
Borsalz	leichtlösli. nat. Bormineral (Natrium-Octaborat, USA)

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Borsäure	aus Bormineralien freigesetzte, wasserlösliche Verbindung
Calciumcarbonat	siehe Dolomit, auch Kalkstein
Calciumchlorid	Nebenprodukt der Sodaerstellung
Calciumhydroxid	siehe Kalkhydrat
Calciumsulfat	siehe Gips
Chromdioxidgrün	künstlich hergestelltes Mineralfarbenpigment
Dolomit	natürliches Calciumcarbonat (Frankreich)
Eisen(II)sulfat	Eisensalz
Eisencarbonat	natürliches, unlösliches Eisensalz, Siderit
Eisenhydroxid	unlösliches Eisensalz
Eisenoxidbraun	künstlich hergestellte Minerafarbe
Eisenoxide	Hämatit, Magnetit, Brauneisenstein
Eisenoxidgelb	künstlich hergestelltes Mineralfarbenpigment
Eisenoxidrot	künstlich hergestelltes Mineralfarbenpigment
Eisenoxidschwarz	künstlich hergestellte Minerafarbe
Eisenphosphat	unlösliches Eisensalz
Englischrot	natürliches Erdfarbenpigment (Italien)
Erdschwarz	natürliches Erdfarbenpigment (Italien)
Gips	natürliches Mineral (Calciumsulfat wasserhaltig)
Glaubersalz	wasserlösliches Salz (Natriumsulfat)
Glimmer	natürlicher miner. Füllstoff mit Blättchenstruktur (BRD)
Grünerde	natürliches Erdfarbenpigment
Kalkhydrat	gelöschter Kalk
Kalilauge	stark alkalische Lösung aus Kaliumhydroxid, Gewinnung s. Natronlauge
Kaliumcarbonat	siehe Pottasche
Kaliumchlorid	Sylvin, natürliches, wasserlösliches Mineral
Kaliumphosphat	wasserlösliches Kaliumsalz
Kaliumsulfat	Arkanit, Kaliumsalz
Kaliwasserglas	aus Quarzmehl und Pottasche hergest. mineral. Bindemittel
Kaolin	natürliche Tonerde (Aluminium-Silikat) BRD
Kasseler Erde	natürliches Erdfarbenpigment (Deutschland)
Kieselgur	natürlicher Füllstoff mit großer immer Oberfläche (BRD)
Kieselsäure	künstlich hergestelltes feinteiliges Siliciumdioxid
Knochenschwarz	aus Verkokung von Knochen (BRD)
Kochsalz	wasserlösliches Salz (Natriumchlorid)
Kohlendioxid	Gas, natürlicher Bestandteil der Luft
Kohlensäure	schwach saure wässrige Lösung von Kohlendioxid
Kupfersulfat	Kupfersalz
Lichtblau	Künstlich hergestelltes Mineralpigment (BRD)
Lithopone	Mischung aus künstl. Mineralpigm. u. nat. min. Füllstoffen
Magnesiumcarbonat	Magnesit, Dolomit
Magnesiumchlorid	durch Eindampfen der Endlaugen aus der Kaliumchloridgewinnung; aus Meerwasser durch Fällung mit Kalk und Umsetzung mit Salzsäure
Magnesiumhydroxid	Brucit, bildet starke basische wässrige Lösungen
Magnesiumoxid	durch Brennen von Magnesit oder Dolomit
Magnesiumphosphat	Magnesiumsalz
Magnesiumsulfat	Bittersalz
Manganoxide	Braunstein
Miloriblau	künstlich hergestelltes Eisensalzpigment
Natriumcarbonat	siehe Soda
Natriumchlorid	siehe Kochsalz
Natriumphosphat	Natriumsalz
Natriumsulfat	siehe Glaubersalz

Natronlauge	Stark alkalische Lösung aus Natriumhydroxid, Gewinnung durch Elektrolyse von Natriumchlorid, dabei entstehendes Chlorgas steht seit langer Zeit in umweltpolitischen Diskussionen; eine Alternative zur Gewinnung von Natronlauge könnte Natriumsulfat als Ausgangsstoff bilden, das bei der Viskoseherstellung in hoher Menge als Nebenprodukt anfällt
Natronwasserglas	aus Quarzmehl und Soda hergest. minerl. Bindemittel
Ocker	natürliches Erdfarben-Pigment (Wunsiedeler-Becken)
Persischrot	natürliches Erdfarbenpigment (Italien)
Phosphorsäure	Herstellung durch Schmelzen von Phosphaten mit Koks und Quarzsand, mittelstarke Säure
Plastorit	natürliches Mineral, Glimmer-Quarz-Verwachsung
Pottasche	mildes Alkali, bildet mit Wasser Langen (Kaliumcarbonat)
Quarzmehl	natürlicher miner. Füllstoff, reines Siliziumoxid (BRD)
Quellton	natürliches Aluminosilikat (Montmorillonit)
Rebschwarz	aus Rebstrunk durch Verkohlung hergestelltes Pigment
Salmiakgeist	alkalische Lösung (Ammoniakwasser)
Sauerstoff	Gas, natürlicher Bestandteil der Luft
Schiefergrau	Natürliches Erdfarbenpigment
Schwefel	die Bildung von Schwefeldioxid bei einer späteren Verbrennung ist zu berücksichtigen
Schwefelsäure	Gewinnung durch katalytische Oxidation von Schwefeldioxid
Soda	mildes Alkali, bildet mit Wasser Laugen (Natriumcarbonat)
Talkum asbestfrei	natürlicher miner. Füllstoff mit Blättchenstruktur (BRD)
Terra die Siene	natürliches Erdfarbenpigment (Italien)
Titandioxid Chloridverf.	künstliches Weißpigment (dünnsäurefreies Verfahren)
Trinatriumphosphat	anorganisches wasserlösliches Salz
Ultramarinblau	künstlich hergestelltes Mineralfarbenpigment
Ultramarinrot	künstlich hergestelltes Mineralfarbenpigment
Umbra	natürliches Erdfarbenpigment (Italien)
Wasserstoffperoxid	gibt leicht Sauerstoff ab; Bleichmittel
Zinkcarbonat	Zinkspat, natürliches Mineral
Zinkchlorid	durch Reaktion von Zink mit Salzsäure
Zinkoxid	durch Verbrennen von Zinkdampf; siehe Zinkweiß
Zinkphosphat	Zinksalz
Zinksulfat	Bestandteil von (siehe) Lithopone
Zinksulfid	Bestandteil von (siehe) Lithopone
Zinkweiß bleifrei	künstliches Weißpigment

Tab. 13: Mineralische Rohstoffe (Auswahl)

Eine Verwendung dieser Stoffe empfiehlt sich aus natürlichen häufig vorkommenden Formen (so ist z.B. Gold oder Silber in der Natur am häufigsten in geigerter Form zu finden, während andere Metalle in Form von Salzen oder Komplexverbindungen vorliegen). Eine Wertung der verwendeten Substanzen nach sanft chemischen Kriterien wird deshalb umso höher ausfallen, desto häufiger und leicht zugänglicher die Verbindungen in der Bio- und Geosphäre vorgefunden werden. Nach den Richtlinien, die für den organischen Teil der Sanften Chemie gelten, sollten auch bei anorganischen Verbindungen zuerst die vorhandenen Eigenschaften untersucht und genutzt und erst in weiterer Folge Modifikationen vorgenommen werden.

Die oben aufgelisteten Substanzen zeichnen sich vor allem durch ihre ökotoxikologische Unbedenklichkeit aus. Sie sind entweder in der Biosphäre in relevanten Mengen vorhanden, oder sind durch ihre Unlöslichkeit für lebende Systeme nicht verfügbar (z.B. Bariumsulfat). Sowohl für organische als auch für anorganische Rohstoffe, für deren Gewinnung, Weiterverarbeitung und Produktformulierung ist es vorteilhaft, den Bereich dieser Stoffe nicht zu verlassen, um von sanft-chemischer Produktion sprechen zu können. Andernfalls handelt es sich um eine Variante der konventionellen Naturstoffchemie.

3.9.5. Thermodynamische Größen

Die zu diskutierenden thermodynamischen Größen sind vor allem der Druck und die Temperatur, unter denen eine chemische oder physikalische Bearbeitung vorgenommen wird. Im Gegensatz zur klassischen Chemie, die Reinigungen und Modifizierungen unter teilweise drastischen Bedingungen vornimmt, orientiert sich die Sanfte Chemie an Produktionsbedingungen, die jenen von Organismen selbst gleichen. Idealiter erfolgt die Bearbeitung der Stoffe bei Normaltemperatur und Normaldruck.¹⁴⁵

Stoffe und Stoffgemische, die in der Sanften Chemie verwendet werden, sind für ihre pflanzliche bzw. natürliche Umgebung und für ebendiese Voraussetzungen über evolutionäre Gesetzmäßigkeiten selektiert worden. Weil sie unter diesen Umständen lange Zeiträume überdauert haben und während dieser Zeit ihre Funktionalität und Umweltverträglichkeit erprobt wurden, kann man davon ausgehen, daß sie auch in menschlicher Verwendung in diesem Spektrum am optimalsten funktionieren. Hermann FISCHER verweist in diesem Zusammenhang auf die Ähnlichkeiten zwischen den Prozessen, die in der Pflanzenzelle ablaufen und den Stoffwechselvorgängen, die in menschlichen Zellen tagtäglich stattfinden.¹⁴⁶

Es ist eine Tatsache, daß grundlegende biochemische Abläufe in tierischen (also auch menschlichen Zellen) und pflanzlichen Zellen weitgehend identisch sind. Unter diesen Reaktionen können im wesentlichen Stoffumsetzungen des Primärstoffwechsels verstanden werden. So laufen z.B. der Citronensäurezyklus, die Glykolyse bei fast allen bekannten Organismen gleich ab.¹⁴⁷

¹⁴⁵ Unter Normaltemperatur und Normaldruck werden die physikalischen Gradienten verstanden, denen die Pflanze auch unter Wachstumsbedingungen ausgesetzt ist.

¹⁴⁶ FISCHER (1989).

¹⁴⁷ KARLSON (1980).

Erst in den Ausformungen des Sekundärstoffwechsels werden größere Unterschiede bemerkbar. Dieser Bereich des Stoffwechsels kann als Reaktion von Organismen auf ihre Mitwelt verstanden werden, oder als nützliche Verwendung von Abfallstoffen aus dem eigenen Stoffwechsel. Diese Stoffe sind aber nicht nur in einem ähnlichen Milleu, sondern auch unter ähnlichen Bedingungen entstanden, weshalb von einer "Erfahrung der Mitwelt" im Umgang mit diesen Stoffen ausgegangen werden kann.

Diese Ähnlichkeit im Ablauf von Prozessen in allen Zellen sind wahrscheinlich auch ein Grund dafür, daß bisher in der gesamten Mitwelt keine Akkumulation von Stoffen biogenen Ursprungs gefunden werden konnte. In Opposition dazu befinden sich Stoffe anthropogenen Ursprungs, wie halogenierte organische Verbindungen (z.B. PCBs, PCDDs, DDT,...), die durch ihre Persistenz (Langlebigkeit), ihre Akkumulation in der Mitwelt, und die Anreicherung in der Nahrungsstrecke in ständigem "Konflikt" mit dem Leben stehen.

3.9.5.1. Temperatur

Für die Temperatur bietet sich als oberer Grenzwert die Siedetemperatur des Wassers mit 100°C an. Einige Bakterienstämme können selbst bei dieser Temperatur ihre Stoffwechselvorgänge noch aufrecht erhalten, wobei aber viele andere Naturstoffe, speziell viele Proteine, schon bei viel niedrigeren Temperaturen denaturieren. Dieser Richtwert ist deshalb als eine noch vorsichtige Einschätzung zur Vermeidung von Veränderungen in der Molekülstruktur von Substanzen zu verstehen, als es grosso modo in der organische Chemie der Fall ist. BECKER gibt an, daß sich oberhalb von 150°C bereits viele Substanzen merklich zersetzen.¹⁴⁸ Die Empfehlung, die Siedetemperatur des Wassers als Richtwert für die sanft chemische Verfahrenstechnik heranzuziehen, beruht auch auf dem Umstand, daß oberhalb dieses Wertes kaum noch Mikroorganismen oder terrestrisches Leben allgemein existiert. Deshalb lassen sich auch für Stoffe, die unter diesen Bedingungen entstanden sind, selten Organismen finden, die diese Matrix wieder in den natürlichen Kreislauf zurückführen.¹⁴⁹

¹⁴⁸BECKER, S.37 (1986).

¹⁴⁹FISCHER, S.4 (1990).

3.9.5.2. Druck

Um für den Druck Richtwerte zu finden, erweist es sich sinnvoller, Veränderungen am bearbeiteten Stoff zu beachten, als einen bestimmten Grenzwert zu fixieren. Durch die Krafteinwirkung pro Flächeneinheit allein werden in der Regel noch keine drastischen Veränderungen an der molekulären Struktur der Stoffe ausgelöst. Z. B. sind bei der CO₂-Extraktion durchaus Drücke zwischen 200-400 bar üblich, bei denen das Extraktionsgut keine stofflichen Veränderungen erfährt, die bei diesem hochselektivem Verfahren auch unerwünscht wären. Erst in der Kombination von erhöhtem Druck mit erhöhten Temperaturen ergeben sich Reaktionsvarianten von und zwischen Substanz-Matrizes, die unter Normalbedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können. Für eine Bewertung aus sanft chemischer Sicht kann davon ausgegangen werden, daß das eingesetzte Verfahren umso günstiger zu beurteilen sein wird, je näher sich Druck und Temperatur bei den Normalwerten unter biotischen Strukturbildungsbedingungen befinden.

3.9.6. Sanfte Chemie und gentechnische Arbeitsmethoden

Den Autoren erscheint gerade im Zusammenhang mit der sanften Chemie eine Technologiebewertung gentechnischer Methoden besonders wichtig, da sowohl bei der Rohstoffproduktion als auch bei den diversen Aufarbeitungsschritten zu einem fertigen Produkt molekularbiologische Arbeitstechniken von großem Nutzen sein könnten. Es gibt in der Anwendung dieser Technologien jedoch einige Risikofaktoren, deren tatsächliche Bedeutung bis jetzt noch nicht klar erkannt ist. Nachfolgend seien einige Vor- und Nachteile kurz angeführt:

3.9.6.1. Vorteile

Naturstoffproduktion: enzymkatalysierte chemische Reaktionen, Ensorgung über biologisch eingespielte Kreisläufe (sofern kein Freisetzungsrisko nachweisbar). Eine sanft chemische Produktion ist ohne Ressourcen nachwachsender Rohstoffe nicht denkbar. Um Wildsammlungen wegen der bekannten ökologischen Nachteile in Zukunft zu meiden und Qualitätsanforderungen besser erfüllen zu können, muß langfristig ein Großteil der benötigten Rohstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion (kbA) stammen.

Enzymkatalysierte Umsetzungen:

Von Enzymen katalysierte chemische Reaktionen haben gegenüber organisch-chemischen Synthesewegen mehrere bedeutende Vorteile:

Umsetzungen sind selektiver und in der Regel mit höheren Ausbeuten möglich, (vor allem, wenn kontinuierlich gearbeitet werden kann).

Die Reaktionsbedingungen liegen in der Regel günstiger, nämlich in Bereichen, wie sie für lebende Organismen typisch sind; dies führt zu einer Reduktion des Energieaufwandes.

Durch gentechnischen Methoden, die heute zur Verfügung stehen, ist es nicht mehr notwendig, die gewünschten Enzyme durch die Aufarbeitung von tierischem oder pflanzlichem Material chemisch zu isolieren, sondern sie können von genetisch veränderten Organismen produziert und kontinuierlich an das sie umgebende Nährmedium abgegeben werden. Diese Möglichkeiten reduzieren stark die Kosten und den Energieaufwand für die Gewinnung von Enzymen (s. Rohstoff-Dossier "Stärke" und "Biopolymere").

Da Enzyme nur der Katalyse chemischer Umsetzungen dienen und in den meisten Produktlinien nicht das Endprodukt sind, ist ihr Einsatz in weit geringeren Mengen erforderlich (Ausnahme: gezielte Produktion von Proteasen und Lipasen für den Waschmittelsektor).

3.9.6.2. Nachteile

Freisetzungsgefahr transgener Organismen; damit verbunden: nichtkalkulierbare Auswirkungen auf Ökosysteme.

Zu Beginn dieser Argumentation ist es notwendig, sich die unterschiedliche Arbeitsweise von "klassischer Chemie", die sich im Reagenzglas abspielt, und von Gentechnik, deren Resultat erst am lebendigen Organismus zu bemerken ist, klar zu machen.

Gentechnische Methoden haben einen grundsätzlich anderen Angriffspunkt, sie ermöglichen die Modifizierung der Erbsubstanz von Organismen.

Die Molekularbiologie hat heute weitgehend die klassischen Methoden der Artenzüchtung ersetzt, da sie wesentlich effizienter anzuwenden ist. Wo bei Züchtungsmethoden Grenzen erreicht sind, kann durch den direkten Zugriff auf das Erbgut diese Barriere in vielen Fällen überwunden werden.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

In der Biotechnologie sind solche gezielten Veränderungen des Erbmaterials von Bakterien schon lange möglich und wurden vor allem zur Produktion bestimmter Proteine genutzt. Chemische Reaktionen, die von Enzymen katalysiert werden, wurden dadurch industriell reizvoll (weil preiswert).

Seit den ersten Arbeiten mit gentechnisch veränderten Bakterien wurden die Sicherheitsvorkehrungen, die die Freisetzung solcher Bakterien verhindern sollten, zunehmend gelockert und man kann heute davon ausgehen, daß es in der Laborroutine ständig zur Freisetzung nicht-pathogener transgener Bakterien kommt.

Das ist insofern bemerkenswert, als bisher noch kein direkter Zusammenhang zwischen diesen kontinuierlichen Freisetzungen und einer ökologischen Beeinträchtigung festgestellt wurde. Das bedeutet natürlich nicht, daß es einen solchen Zusammenhang nicht geben kann!

Bakterien werden meist nicht in ihrem eigenen Erbgut verändert, sondern bekommen die genetische Information für das Protein, das sie produzieren sollen, als Zusatz. Diese Zusatz-Information ist in den meisten Fällen auf einem kurzen DNA-Stück lokalisiert, das unter bestimmten Bedingungen von den Bakterien aufgenommen werden kann. Man nennt dies *Transformation*, ein Vorgang, der auch in der Natur spontan stattfinden kann.

3.9.6.3. Versuch einer Abgrenzung

Versucht man nun, diese Technologien nach den Richtlinien der Sanften Chemie zu bewerten, so ist vor allem der Eingriff an Erbsubstanz an sich der Kritik zu unterziehen und weniger die Art und Weise der Rohstoffgewinnung, der Produktion, der Verwendung. Prinzipiell sind biotechnologische Verfahren mit den Grundsätzen der Sanften Chemie vereinbar. Eine kritische Beurteilung ist vor allem bei der Verwendung transgener Organismen notwendig, da zufällige Freisetzungen nicht ausgeschlossen werden können und daher natürliche Ökosysteme nicht mit Sicherheit geschützt werden können.

Es empfiehlt sich daher, nur solche Techniken zu benutzen, deren prinzipielle Schritte erwiesenermaßen in freier Natur oft stattfinden und dort auch reversibel sind. Damit kann sichergestellt werden, daß die Auswirkungen irrtümlicher Freisetzungen von einem natürlichen Ökosystem besser vertragen werden.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Die für eine Sanfte Chemie akzeptablen Grenzen der Eingriffstiefe werden durch gentechnische Methoden nicht überschritten, wenn:

- die Art des Eingriffs erwiesenermaßen auch in der Natur zu finden und reversibel ist;
- sich im Ökosystem für den betreffenden Organismus kein Selektionsvorteil ergibt;
- keine Verwendung pathogener Organismen erfolgt;
- Plasmide und Vektoren, die in der Natur weit verbreitet sind, zum Einsatz kommen
- Phagen, deren Infektionsweg in der Natur üblich ist, zum Einsatz kommen
- keine Antibiotikaresistenzen als Selektionsfaktoren auftreten können, sondern die Selektion z.B. über essentielle Aminosäuren erfolgt.

4. Exemplarisches zur Sanften Chemie

4.1. Kohlenstoffbilanz der Biomassenutzung

In der Atmosphäre sind etwa 720 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert. Davon werden jährlich etwa 16% durch die Photosynthese verarbeitet. Ebensoviel wird durch Veratmung und Abbau durch die Atmosphäre wieder zurückgegeben. Wird Biomasse nachhaltig genutzt, halten sich Aufbau und Abbau die Waage. Solange der Mensch seine Energie und (das Gros seiner Gebrauchsgüter) nur aus der Biomasse (und breit verfügbaren Mineralien) gewinnt und nachhaltig nutzt, bewegt sich der C-Kreislauf in einem dynamischen, natürlichen Gleichgewicht.

"Kohlenstoffbilanz der Biomassenutzung" lautet ein EU-Forschungsauftrag des Grazer Joanneum Research unter Leitung von Univ. Doz. Josef Spitzer. Die Grazer Autoren gehen davon aus, daß die Kohlenstoffbilanz aus Biomasse - Brennholz, Stroh - grundsätzlich ein Nullsummenspiel ergibt, d.h.: Bei der Verbrennung wird nicht mehr CO₂ emittiert, als die Pflanze bei Ihrem Wachstum gebunden hat. Biomasse ist daher *unter gewissen Voraussetzungen* eine Alternative zu fossilen Energieträgern, die dzt. noch 85% des Welt- Energieverbrauchs decken.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

In Österreich stammen rund 12 % der Primärenergie aus Biomasse. Im Rahmen eines EU-Forschungsprojekts möchte das Joanneum Research den Einfluß anderer Faktoren der Biosphäre auf die C-Bilanz und Biomassenutzung aufzeigen. Beispielsweise soll die Frage beantwortet werden, wie sich die "Entnahme von Biomasse je nach Bewirtschaftungsform auf den C-Vorrat der Böden" auswirkt. So reagiert etwa nach einem Kahlschlag der Waldboden zeitlich verzögert, er behält seinen hohen Kohlenstoffausstoß bei, obwohl mangels Bewuchs wenig Input stattfindet. Die C-Bilanz der Biomasse wäre somit zumindest vorübergehend im negativen Bereich. Zielsetzung des Forschungsprojektes sind u.a. Empfehlungen, welche Form der Biomassenutzung aus der Sicht der CO₂-Problematik die größten Einsparungspotentiale aufweist.

4.2. Chitin, ein vielseitig einsetzbarer Naturstoff

Zu den nachwachsenden Naturstoffen, denen die Wissenschaft eine vielversprechende Zukunft prophezeit, gehört auch Chitin. Chitin ist ein stickstoffhaltiges *Polysaccharid*, d.h. eine polymere Zuckerverbindung, und nach Zellulose das zweithäufigste natürliche Polysaccharid. In der Natur findet man Chitin insbesonders als Grundbaustein des Skelettmaterials bei Crustaceen und Insekten. Es ist wesentlicher Bestandteil der Zellwand von Pilzen und kommt auch in einigen niederen Pflanzen (Kieselalgen) vor.

Reines Chitin existiert in drei kristallinen Modifikationen, ist farb- und geruchlos, unlöslich in Wasser, verdünnten Säuren, Laugen oder organischen Lösungsmitteln. In biologischem Material findet sich Chitin in fibrillärer, mikrokristalliner Struktur. Mit Zellulose teilt das Chitin-Molekül starke strukturelle Ähnlichkeiten. Behandelt man es mit konzentrierter Natronlauge, entsteht durch alkalische Hydrolyse deacetyliertes - *Chitosan*. Vom nicht toxischen Chitin unterscheidet sich Chitosan durch seine als sehr gering einzustufende akute Toxizität (LD₅₀-Dosis < als 16 g/kg). Chitosan wirkt antibakteriell und fungistatisch. Wesentliche Faktoren für die Umweltverträglichkeit beider Polymere sind deren Biocompatibilität und Abbaubarkeit durch natürliche Enzyme.

	CHITIN	CHITOSAN
löslich in: Wasser	nein	nein
verdünnte Säuren	nein	ja
organ. Lösungsmittel	nein	ja
Toxizität	keine	sehr gering
antibakteriell u. fungistatisch		ja
biocompatibel	ja	ja
enzymatisch abbaubar	ja	ja

Tab. 14.: Kurzcharakteristik von Chitin und Chitosan - Quelle HESSE (1992).

Chitin lässt sich als Polysaccharid durch Reaktionen an den freien OH-Gruppen zu zahlreichen O-Alkyl- oder O-Acyl-Derivaten umsetzen, bei Chitosan ergeben sich durch die freien Aminogruppen vielfältige zusätzliche Derivatisierungsvariationen. Aufgrund dieser nahezu unbegrenzten Anzahl an Synthesemöglichkeiten können aus Chitin und Chitosan Verbindungen mit unterschiedlichsten und bemerkenswert exakt steuerbaren Eigenschaften entstehen. Das breite Anwendungspotential umfasst derzeit mehr als 200 mögliche Applikationen, die bisher allerdings nur zu einer geringen Zahl großtechnisch realisiert wurden.

Der derzeitige Anwendungsbereich erstreckt sich von den Bereichen Medizin, Pharmazie, Kosmetik über den technischen Einsatz in der Umwelt- und Biotechnologie bis zur Anwendung in der Lebensmitteltechnologie und dem Einsatz in der Landwirtschaft.

4.2.1. Medizin - Pharmazie - Kosmetik

- Chitin und Chitosan Membranen als
- Künstliche Haut
- Zusatz in Wundverbänden
- Membranen mit besonders guter Sauerstoffdurchlässigkeit
- antibakteriell und heilungsfördernd
- Besondere Membranpermeabilität zur kontrollierten Antibiotikafreisetzung
- chirurgisches Nahtmaterial
- Antikoagulantien
- fungizides und feuchtigkeitsspendendes Salbenmaterial
- Haarfestiger (Wella)
- Bestandteil von Lidschatten (Yves Saint Laurent)

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Chitin und Chitosan werden durch körpereigene Enzyme (Lysozyme) langsam abgebaut und Wirkstoffe, die man zuvor in die Polymermatrix eingebaut hat, werden auf diese Weise graduell aktiviert. Aufgrund der enzymatischen Abbaubarkeit eignen sich Fasern aus Chitosan hervorragend als resorbierbares chirurgisches Nahtmaterial. Auch für nicht permanent verbleibende Organteile und Endoprothesen können Chitinwerkstoffe verwendet werden. Durch partiell deacetyliertes Chitin und Chito-Oligosaccharide werden T-Lymphocyten, Makrophagen und natürliche Killerzellen stimuliert und somit tumorhemmende Wirkungen erzielt.

4.2.2. Technik - Umwelttechnik - Biotechnologie

- Membranen für Ultrafiltration, Osmose, Reversosmose
- Faserbeschichtung
- Papierbeschichtung
- Schimmelresistenzerhöhung
- Erhöhung der Reißfestigkeit
- Zusatzstoff zur Veredelung von Textilfasern
- Flockungsmittel für Proteine und Fette aus Abwässern
- Matrix zur Immobilisierung von Zellen und Enzymen
- Trägermaterial für chromatographische Anwendungen

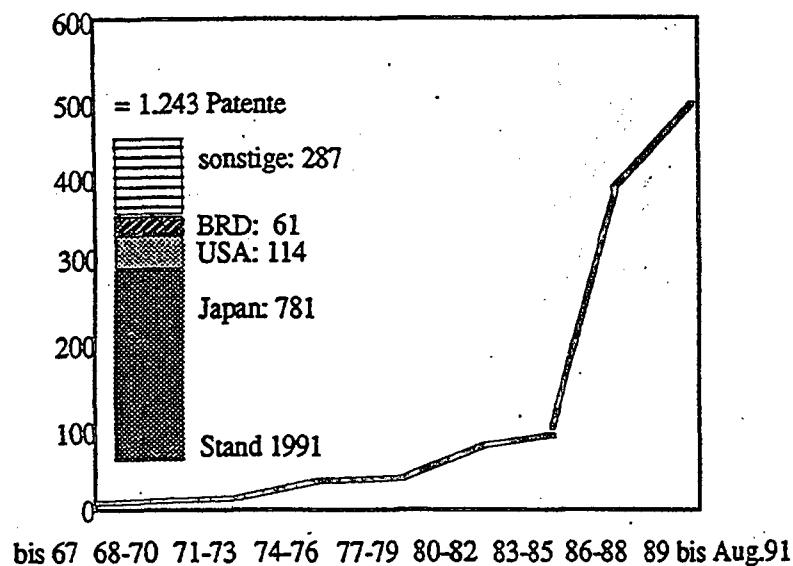
Hauptanwendungsgebiet für Chitosan in Japan liegt im Bereich der *Abwasserbehandlung*. Die koagulierenden Eigenschaften erlauben den Einsatz als Flockungsmittel mit hoher Effizienz zur Entfernung von Proteinen und Fetten aus besonders schwer zu reinigenden Abwässern der Lebensmittelindustrie. Die angereicherten Flocken lassen sich später als Futterzusatzmittel verwenden. Als Chelatbildner besitzen Chitin und Chitosan ausgeprägte Komplexierungseigenschaften für zahlreiche Metallionen, besonders Quecksilber, Eisen, Kupfer, Nickel und können deshalb zur Behandlung schwermetallbelasteter Abwässer eingesetzt werden. Selbst zur Entfernung von Uran sind Chitin und Chitosanphosphate äußerst effizient eingesetzbar. Im Bereich der Biotechnologie können mit Hilfe einer bei Raumtemperatur erstarrenden Chitin- bw. Chitosanmatrix Enzyme und Zellen immobilisiert werden, die unter anderem in Biosensoren und zur Produktion monoklonaler Antikörper Verwendung finden.

4.2.3. Lebensmitteltechnologie - Landwirtschaft

- Klärung von Frucht- und Buntsäften
- Entfernung von Tanninen und Schwebstoffen
- Filterhilfsstoffe bei der Trinkwasseraufbereitung
- Natürliches Bindemittel
- Stabilisatoren und Emulgatoren in Nahrungsmitteln
- Verpackungsfolien für Lebensmittel aufgrund selektiver Gas- und Wasserpermeabilität
- verdaulichkeitsfördernder Tierfutterzusatz bei Molkefütterung (schwer abbaubare Lactose; Chitosan in den USA bereits als Tierfutterzusatzmittel zugelassen)
- Beschichtung von Saatgut zur Verbesserung von Lager- und Keimfähigkeit
- Konservierung von Früchten (antibakterielle, fungistatische Wirkung - bereits zugelassen vom Canadian Department of Health and Welfare)
- Regulator zur Induktion natürlicher pflanzeneigener Abwehrstoffe gegen phytopathogene Viren, Pilze und Fadenwürmer.
- Kontrollierte Freisetzung von Herbiziden und Insektiziden

Die sehr rasch fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der Chitin- und Chitosantchnologie wird durch die zunehmende Zahl von Patentanmeldungen in den letzten Jahren dokumentiert. Zur Zeit sind weltweit mehr als 1240 Patente registriert, die höchste Anzahl auf dem Gebiet der Pharmazeutik. Insbesonders der Erkenntnisvorsprung Japans fällt durch 781 Patentregistrierungen auf. Das deutsche Engagement stellt sich dagegen mit insgesamt 61 Patenten relativ bescheiden dar.

Abb.21: Weltweite Patentanmeldungen in der Chitin und Chitosan-Technologie



4.2.4. Gewinnungsoptionen von Chitin und Chitosan

Chitin und Chitosan lassen sich aus Krabben- und Krebsschalen gewinnen, die in großen Mengen als Abfallprodukt der Fischereiwirtschaft anfallen. Die Krabenschalen werden gemahlen, homogenisiert, sodann Proteinreste mit Natronlauge extrahiert. Salzsäure löst den in den Schalen enthaltenen Kalk und nach wiederholten Waschvorgängen liegt Rohchitin vor. Zur Chitosangewinnung wird das Rohchitin durch Erhitzen mit 40-50%iger Natronlauge unter Sauerstoffausschluß weitgehend deacetyliert und gewaschen. Das vorliegende Chitosan wird getrocknet und in Granulatform verpackt. Dieses Verfahren erlaubt eine nahezu vollständige Verwertung der Bestandteile bei weitgehendem Recycling der Ausgangschemikalien. Außer Chitosan werden auch Natriumacetat und Calciumoxid gewonnen. Die Ausbeute beträgt für Chitin ca. 5 bis 6% und ca. 3,5% für Chitosan. Die Produktionskosten für Chitosan sind abhängig vom Reinheitsgrad und werden mit ca. 6 bis 32 US \$ pro kg veranschlagt.

Die weltweit anfallenden Mengen an Krabben- und Krebsschalen aus der Fischereiindustrie werden auf jährlich 10 Mio.t geschätzt, wobei Thailand, Japan, USA, Mexiko und Indien an der Spitze stehen. Daraus lassen sich potentiell pro Jahr 60.000 t Chitin bzw. 36.000 t Chitosan produzieren.

Die derzeitige Weltjahresproduktion an Chitin liegt bei 2.000 bis 3.000 t, wobei Japan eine Spitzenstellung einnimmt. Hier werden Chitinprodukte schon erfolgreich im großtechnischen Maßstab eingesetzt

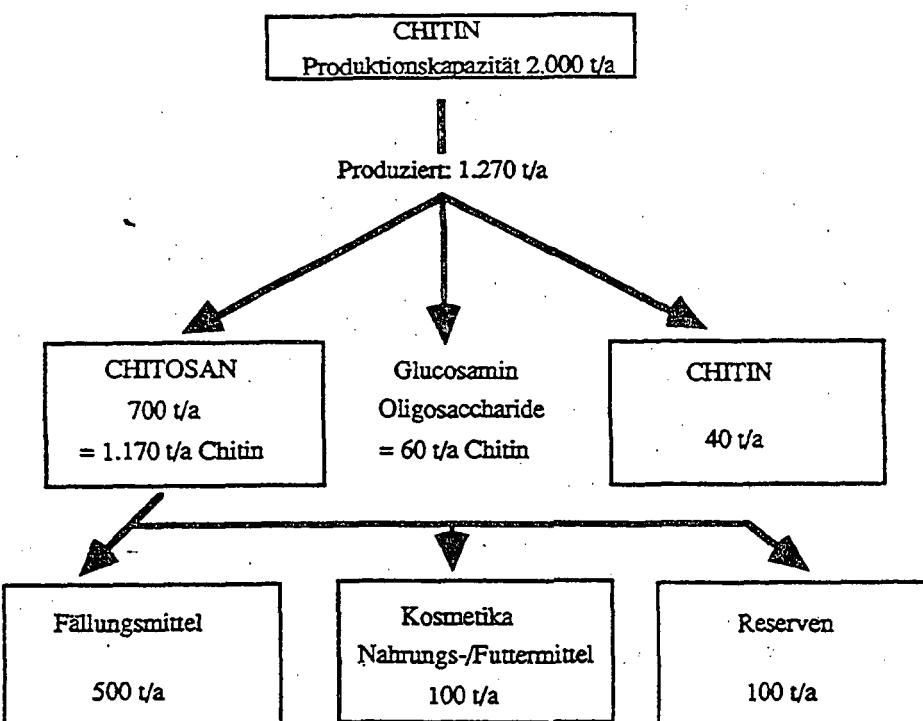


Abb. 22: Erzeugung und Verbrauch von Chitin und Chitosan in Japan (1986)

4.2.5. Zukunftsperspektiven für Chitin und Chitosan

Die Frage nach den besonders aussichtsreichen Anwendungsbereichen der Chitin- und Chitosanverwertung wird dadurch erschwert, daß derzeit noch ein großes Defizit an allgemein zugänglichen Wirtschaftlichkeitsberechnungen besteht. Grundsätzlich muß bei der Wirtschaftlichkeit neben der Patentsituation auch die Konkurrenz von billigeren Grundstoffen wie Zellulose oder synthetische Polymere berücksichtigt werden.

Anwendungen für Chitin und Chitosan werden sich kurz- oder mittelfristig auf solche Gebiete beschränken, bei denen die gewünschten Materialeigenschaften mit anderen Polymeren nur unter erhöhtem Aufwand erzielt werden können.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

So ist zum Beispiel Chitosan als Polykation direkt aus natürlichen Quellen zugänglich, während Zellulose zur Erzeugung eines polykationischen Derivates zunächst einer chemischen Reaktion unterworfen werden müßte.

Als aussichtsreichstes Anwendungsbereich ist die Umwelttechnik mit der Wasser- und Abwassertechnik zu nennen. Auch wird sich das underivatisierte Chitosan mit steigendem Umweltbewußtsein in der Landwirtschaft, speziell in der Pflanzen- und Saatgutbehandlung anbieten. Als aussichtsreich wird ferner die Anwendung in der hochqualifizierten Biotechnologie betrachtet, insbesonders zum Zweck der Zell- und Enzymimmobilisation.

Im Bereich der Lebensmitteltechnologie werden in Japan Chitin- und Chitosanprodukte mit zunehmender Rentabilität verwertet. In der BRD wurde in diesem Zusammenhang eine Wirtschaftlichkeitsberechnung zum Chitosaneinsatz in der Fruchtsaftschönung durchgeführt, die im Verhältnis zu gängigen Schönungsmitteln eine positive Bilanz zog.

Die Anwendung in der Medizin, Pharmazie und Kosmetik ist aufgrund der Natur des Stoffes mit einer erheblichen Wertschöpfung verbunden. Bei den medizinischen Anwendungen müssen allerdings die Ziele unter den Aspekten der jeweiligen Patentsituation sowie zugelassenen Konkurrenzpräparaten sehr sorgfältig definiert werden, weiterhin sind die schwierigen und langwierigen Zulassungsverfahren zu beachten.

Ein derzeit noch ungelöstes Problem für die besonders lukrativen medizinischen und auch spezialisierten biotechnischen Anwendungen ist die chemische Standardisierung des Naturstoffes Chitin. Infolge ihres breit variierenden Molekulargewichtsspektrums und des uneinheitlichen Deacetylierungsgrades sind Chitin- und Chitosanprodukte nur schwer mit dem chemischen Begriff eines Reinstoffes in Einklang zu bringen. Neue enzymtechnologische Verfahren und intelligente Analysetechniken können dem vielseitigen Naturstoff zum nachhaltigen Durchbruch verhelfen.

4.3. Rohstoffe aus dem Regenwald

4.3.1. Daimler Benz entdeckt die Natur

Auf der nordbrasilianischen Insel Marajó im Amazonasdelta, einige Kilometer entfernt von der Hafenstadt Ponta Depedras liegt Praia Grande. Dort existiert seit 15 Jahren das UNICEF-Projekt "Umwelt und Armut in Amazonien", bei dem es darum geht, den Tropenwald zu retten und zugleich den Einheimischen die Existenz zu sichern. "Wir wollen die arme Bevölkerung in ein politisch bewußtes Subjekt des Umweltschutzes verwandeln", formuliert der Soziologe Thomas Mitschem vom Deutschen Akademischen Austauschdienst die Zielsetzung des Projektes. Mitschem leitet ein Institut für Amazonische Studien in Belém.

Bereits vor 15 Jahren hatten die Bewohner von Praia Grande auf Initiative einer kirchlichen Entwicklungsorganisation aus Italien rund um die Siedlung eine Plantage aus Kokospalmen angelegt, ein Experiment, das "die Menschen an den Rand des Abgrundes gebracht hat", betont der Agrarwissenschaftler Pedro Saviniano von der Bundesuniversität Pará. Nach wenigen Jahren hatten sich in den Monokulturen Schädlinge breit gemacht und die schweren Traktoren die Humusschicht zersört. Vor allem die Abhängigkeit von nur einem einzigen Produkt wurde den Bauern zum Verhängnis. Der Ertrag schwankte mit dem Erntepreis für Kokosnüsse, der im Laufe der Jahre immer mehr abnahm. Die Folge: Das Dorf verarmte weiter.

Heute planen die Agrarwissenschaftler den Anbau einer Mischkultur, die dem natürlichen Regenwald nachempfunden ist und wie sie auch den Ureinwohnern seit Jahrhunderten Erträge garantiert. "Nachhaltige Nutzung" nennt sich auch hier der neue Grundsatz.

Im Frühjahr 1992 engagierte sich der Daimler Benz Konzern in diesem Projekt mit einer Summe von 1 Million US-Dollar. Das Geld soll Praia Grande zu einem Experimentierfeld für nachwachsende Rohstoffe aus dem Tropenwald machen. Das Engagement des Autokonzerns ist dabei nicht ganz uneigennützig: Untersucht werden soll, wie Naturfasern, Naturöle, Naturfarben und Naturkautschuk im Norden Brasiliens gewonnen und nachfolgend industriell eingesetzt werden können. Matthias Kleinert, Generalbevollmächtigter für Wirtschaftsfragen der Daimler Benz AG: "Wir sehen in dem Projekt nicht nur eine Chance,

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

sondern es besteht auch die Notwendigkeit, daß wir uns mit der Endlichkeit der Ressourcen auseinandersetzen". Daimler Benz als Retter des Regenwaldes und Freund der Armen ?

Tatsächlich könnte der Autokonzern dazu beitragen, Probleme im Umweltbereich mitzulösen, und zwar auf Basis einer soliden Kooperation. Für Daimler-Manager Matthias Kleinert vereint das Projekt ökologische und ökonomische Bestrebungen. "Wenn es gelingt, aus Pflanzen Produkte herzustellen, hätten alle davon einen Nutzen: Die Umwelt, die Menschen in Brasilien und Mercedes Benz do Brasil." Tatsächlich ist es hoch an der Zeit, die in diesen Regionen praktizierten Brandrodungs- und Wanderfeldverfahren abzulösen und eine Agrartechnik zu etablieren, mit der sich die indigenen Völker ihre Lebensgrundlage erhalten können und gleichzeitig die globale Treibhausproblematik entschärft wird.

Das Programm von Mercedes Benz do Brasil findet folgerichtig seine Fortsetzung mit umfangreichen Labortests. Dabei sollen die bereits vorhandenen material- und produktionstechnischen Verfahren auf ihre Eignung für die industrielle Rohstoffaufbereitung geprüft werden. Vorgesehen sind Vakuum- und Mikrowellen- Trocknungsverfahren, um die Produkte bei dem hohen Feuchtigkeitsgehalt des Amazonasklimas verarbeitungsfähig und lagerbeständig zu machen. Zwecks Untersuchungen des Materialverhaltens gibt es zusätzliche Vereinbarungen zwischen der Universität Pará und Daimler Benz.

In Praia Grande wachsen mittlerweile auf den Feldern die ersten Setzlinge im Schatten von Kokospalmen, die vom klerikalen Entwicklungsprojekt stehengeblieben sind. 1995 wird der erste Mangobaum Früchte tragen, der *Urucu*-Strauch in dessen Fruchtkernen der rote Farbstoff *Pixin* enthalten ist, wird bereits geerntet, noch mindestens 6 bis 8 Jahre benötigen dagegen die angepflanzten Gummibäume, bis aus ihrer Rinde die erste klebrige *Latexmilch* "gezapft" werden kann.

Eine interessante Ausweitung findet das Experiment außerhalb des Regenwaldes auf den gerodeten Flächen: Hier wachsen Mischkulturen heran unter dem Schatten der brasilianischen Kastanie (Paranüsse) mit Palmen, Cupuaco- und Kakao-Bäumen, ein Wirtschaftswald, der den tierliebenden Menschen eine zusätzliche Existenz bietet. Kenner des Projektes heben hervor, daß es nicht nur um den Schutz der Natur, sondern um die Erhaltung der Lebensgrundlagen der Bevölkerung bei einem gleichzeitigen Aufbau eines Marktes für nachwachsende

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Rohstoffe geht. Nach Expertenmeinung könnte nach drei Jahren die Basis für eine wirtschaftliche Grundlage geschaffen sein, ohne daß weitere Spendengelder fließen müssen.

An welchen Produkten aus Praia Grande hat Mercedes Benz do Brasil ein echtes Interesse: Aus den Wildpflanzen des Amazonas sind Sonnenblenden für LKW geworden, aus der Luffagurke und Kunstharsz gepreßte Motorhauben, deren Innenverkleidung aus Jute besteht, Bremsschläuche und Radkappen auf Rizinusbasis, Reifen aus Naturkautschuk sowie Kopfstützen und Bussitze aus Kokosfasern. Mit Urucu sind bereits auch die Bezüge orangerot eingefärbt worden. Alle Versuchsprodukte seien billiger als die bisher verwendeten aus Kunststoff und Erdöl.

Ob das Prestigeprojekt von Praia Grande langfristig erfolgreich bleibt, hängt von der Lösung vieler weiterer Probleme ab, die gerade in einem Land wie Brasilien von zentraler Bedeutung sind.

- Das Problem des Handels mit nachwachsenden Rohstoffen für die Industrie ohne soziale Ausbeutung der indigenen Bevölkerung.
- Das Problem der richtigen Dimensionierung des Projektes ohne die Zerstörung des Tropenwaldes am Amazonas weiter voranzutreiben (keine Großproduzenten sondern ECO-Farming über Genossenschaften),
- Das Problem, die Armut in den Ballungszentren Brasiliens und den wachsenden Siedlungsdruck auf das Amazonasgebiet zu bremsen.

Wenn die Absicht der Projektponsoren ernst gemeint ist, könnte das Programm von Mercedes Benz do Brasil den Menschen im Amazonas eine neue Existenzgrundlage und der Natur eine echte Chance geben. Das bedeutet, daß durch die konsequente Etablierung sanft-technologischer Verfahrensweisen positive sozial-ökologische Auswirkungen und gleichzeitige nachhaltige Nutzungsformen realisiert werden können.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

Literatur

- ALSEN, Carsten; WASSERMANN, Otmar : Die gesellschaftliche Relevanz der Umwelttoxikologie. Wissenschaftszentrum Berlin: IIUG-Report 86-5 (1986).
- AXFORD A.T., MC KERROW C.B., JONES P.A. & LE QUESNE P.M. : Accidental exposure to isocyanate fumes in a group of firemen. Br. J. Ind. Med., 33: 65-71 (1976).
- BAUR X.: New aspects of isocyanate asthma. Lung, Suppl: 606-613 (1990).
- BAUR X., MARCYNSKI B., RAULF M., CZUPPON A. & MAREK W.: Auswirkungen von Isocyanaten in MAK-Bereich auf die Lungenfunktion und zelluläre Vorgänge. Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed., 26: 475-478 (1991).
- BÄTZING, Werner: Nachhaltiges Wirtschaften im Alpenraum. in: Spektrum der Wissenschaft 1(1993), S. 20-23.
- BECKER, G.O.Heinz: ORGANIKUM Organisch-chemisches Grundpraktikum: Durchführung einer einfachen Destillation. VEB Berlin (1986),
- BERGHEIM S. & DEILMANN F.: IgE-Antidörperbildungen gegen einige Gase. Der Kinderarzt, 7: (1990) 1018-1022.
- BLAZEJCZAK Jürgen: Umweltschutz und Industriestandort: der Einfluß umweltbezogener Standortfaktoren auf Investitionsentscheidungen; Forschungsbericht 10103162 (Hg.: Umweltbundesamt Berlin) Berichte 1/93 (1992) S.100.
- BOSSEL, Hartmut: Zukunftsperspektiven für eine umwelt- und sozialverträgliche Technik. Ökologische Konzepte 18 (1983).
- BROCHHAGEN F. : Isocyanates. In: HUTZINGER O. (Hrsg.) The Handbook of Environmental Chemistry. Anthropogenic Compounds. Vol. 3 Part. G: 1-95, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag (1991).
- BRORSON T., SKARPING G. & SANGÖ C.: Biological monitoring of isocyanates and related amines. IV. 2,4- and 2,6-toluenediamine in hydrolysed plasma and urine after test-chamber exposure of humans to 2,4- and 2,6-toluene diisocyanate. Int. Arch. Occup. Environ. Health, 63: 253-259 (1991).
- CULLEN M.R. & CHERNIACK M.G. (1989): Spectrum of occupational disease in an academic hospital-based referral center in Connecticut from 1979 to 1987. Arch. Int. Med., 149: 1621-1626.
- DAVIS, Joan S.: Von der Beherrschung zur Symbiose: Techniken von morgen geprägt vom Männlichen und Weiblichen. In: Die Erde bewahren - Dimensionen einer umfassenden Ökologie. Festschrift zum 80. Geburtstag von Karl Werner Kieffer. (Hrsg.) Immo Lünzer, in: Alternative Konzepte, Stiftung Ökologie und Landbau/C.F.Müller Karlsruhe (1993).
- DEILMANN F. & BERGHEIM S.: Allergologische Untersuchungsergebnisse bei Patienten mit chronischen rezidivierenden Atemwegserkrankungen. Der Kinderarzt, 8: 1081-1086 (1989).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

- DILLER W.F.: Arbeitsmedizinische Aspekte der PUR-Rohstoffe In: OERTEL G. (Hrsg.) *Kunststoffhandbuch Nr.7. Polyurethane*. 2.Aufl., München, Wien: Carl Hanser Verlag. 113-120 (1983).
- DILLER W.F.: Das Spektrum der Diisocyanat-bedingten Broncho-Pneumopathien. *Zbl Arbeitsmed.*, 35: 66-69 (1985).
- DEUTSCHE BP AG (Hg): *Das Buch vom Erdöl*, Hamburg: Reuter u. Klöckner (1989).
- DURNING, Alan B.: Armut, das Ende der Not, in: *Die Lage der Welt 1990/91*. WORLDWATCH Institute Report, S. Fischer Frankfurt (1990).
- EDELMANN, Werner/BAER, Stephan: *Alternative Technologie - Gebot der Stunde*. Berlin: Lichtland (1977).
- ENQUETE-KOMMISSION: "Verantwortung für die Zukunft, Wege zum nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen", Zwischenbericht der Enquête-Kommision im Deutschen Bundestag "Schutz des Menschen und der Umwelt - Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft", *economica* Bonn (1993).
- FISCHER, Hermann: Leicht gekürztes Manuskript AURO Naturfarben-Tagung am 16. Juni 1990. In: *AURO Mitteilung* Nr. 19, S. 4, Braunschweig (1990).
- FISCHER, Hermann: Nahrung für die Sinne-Entlastung für die Umwelt, *Auro-Mitteilungen* Nr. 13, Braunschweig (1989).
- FISCHER, Hermann: *Plädoyer für eine Sanfte Chemie - Über den nachhaltigen Gebrauch der Stoffe*, Alembik - C.F. Müller, Braunschweig - Karlsruhe (1993).
- GENSCH, Carl-Otto: *Die Polyurethane*. In: *Gesamtökologische Betrachtung chemischer Produkte*, Forschungskooperation Ökoforum (Hg.: UBA Berlin 1994).
- GORE, Al : *Wege zum Gleichgewicht. Ein Marshallplan für die Erde*. Frankfurt S. Fischer (1992).
- GRIESSHAMMER, Rainer: *Gute Argumente - Chemie und Umwelt*. Beck'sche Reihe, München (1993) S. 11 ff.
- HENSCHLER D. (Hrsg.): *Toluylendiisocyanate. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Toxikologisch - arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten*. 10. Lieferung. Weinheim: Verlag Chemie (1972).
- HENSCHLER D. (Hrsg.): *2,4- Toluylendiamin. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten*. 11. Lieferung. Weinheim: Verlag Chemie (1985).
- HENSCHLER D. (Hrsg.): *Diphenylmethan-4,4''-diisocyanat (MDI) "Polymeres MDI" (PMDI). Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten*. 18. Lieferung. Weinheim: Verlag Chemie (1992).
- HENSELING, Karl Otto: *Ein Planet wird vergiftet*. Reinbek (1992).
- HESSE, Karl-J.: *Krabben schalen sammeln und verwerten - Chitin ein vielseitig einsatzbarer Naturstoff*. In: *Energie* Jg.44, 11, 20 (1992).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

- HEYDEMANN, Bernd, Minister für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein: "Naturstrategien - Leitbild einer neuen Stoffwirtschaft" in UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox 5(6) 301-301 (1993).
- HABER, W.: Von der ökologischen Theorie zur Umweltplanung, in GAIA 2 (1993).
- HOLLOWAY, Marguerite: Spektrum der Wissenschaft 9, S. 70-77 (1993).
- Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (Hrg.): ECODESIGN - Fibel für Anwender, im Auftrag des BMUJF, Wien (1993).
- JOST M., RÜEGGER M. & HOFMANN M.: Isocyanatbedingte Atemwegserkrankungen in der Schweiz. Schweiz. med. Wschr., 120: 1339-1347 (1990).
- JUNGK, Robert: Der Jahrtausendmensch. Bericht aus den Werkstätten der neuen Gesellschaft, München (1973), Der Atomstaat. Vom Fortschritt in die Unmenschlichkeit. München (1977), Zukunftswerkstätten. Wege zur Wiederbelebung der Demokratie. Hamburg (1981), Menschenbeben. Der Aufstand gegen das Unerträgliche. München (1983), Projekt Ermutigung. Streitschrift wider die Resignation. Berlin (1988), Und Wasser bricht den Stein. Streitbare Beiträge zu drängenden Fragen der Zeit. Freiburg (1986).
- KANERVA L., LAEHTEEENMAEKI M.T., ESTLANDER T., JOLANKI R. & KESKINEN H. : Allergic contact dermatitis from isocyanates. In: FROSCH J.P. et al. (1989): Current topics in contact dermatitis. Berlin: Springer Verlag. 368-373 (1989).
- KARLSON, Peter: Kurzes Lehrbuch der Biochemie für Mediziner und Naturwissenschaftler, Stuttgart (1980).
- KAROL M.H.: Hypersensitivity to isocyanates. Immunotoxicology and Pharmacology, Target Organ Series, Dean J., Ed., Raven Press, New York, 475-488 (1985).
- KAROL M.H., IOSET H.H. & ALARIE Y.C. : Tolyl-specific IgE antibodies in workers with hypersensitivity to tolylene diisocyanate. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 39: 454-458 (1978).
- KEIM, Wilhelm; BEHR, Amo; SCHMITT Günter: Grundlagen der industriellen Chemie, Frankfurt (1986).
- KIEFFER, DÜRRSCHMIDT/LÜNZER/MÜLLER (Hrsg.): Ökologisch denken und handeln; Strategien mittlerer Technologie. Alternative Konzepte, Bd. 67, C.F. Müller, Karlruhe (1988).
- LE QUESNE P.M.; AXFORD A.T., MC KERROW C.B. & JONES P.A.: Neurological complications after a single severe exposure to toluene diisocyanates. Br. J. Ind. Med., 33: 72-78 (1976).
- LEHMANN, Harry; BRÜGGEMANN, Ulrike: Computer Aided Material Flow Analysis, >CAMA<, in: Fresenius Environmental Bulletin, 2, 8 (1993).
- LORENZ, Konrad: Die acht Totsünden der zivilisierten Menschheit, Kap.3 Die Verwüstung des Lebensraumes, München (1973), S.23-31.

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

- LOVINS, Amory: Sanfte Energie. Das Programm für die energie- und industrie-politische Umrüstung unserer Gesellschaft. Reinbek; Rowohlt (1978)
- LÜNZER Immo, Stiftung Ökologie und Landbau, Verlag C.F. Müller Karlsruhe (1992). S 43 ff.
- MÄKI-PAAKANEN J. & NORPPA H.: Chromosome aberrations and sister-chromatid exchanges induced by technical grade toluene diisocyanate and methylene-diisophenyl diisocyanate in cultured human lymphocytes. *Toxicol. Lett.*, 36: 37-43 (1987).
- MIETH, A.; AMBSDORF, J.; PETER, M.G.: Strategien und Techniken des Klebstoffeinsatzes in der Natur - Anregungen für die Technik. Studie im Auftrag des Ministers für Natur, Umwelt und Landesentwicklung des Landes Schleswig-Holstein, Kiel (1992).
- MÜLLER, Peter; WIERICH, Hermann: Baustoffbewertung - Modellversuch Ökologisches Bauen, Bremen (1992).
- MÜLLER-REISSMANN, Karl-Friedrich: Mittlere Technologie statt Großtechnologie. In: Alternativen, Texte des Instituts für angewandte Ökologie e.V. Freiburg; Dreisam (1978).
- MÜLLERT, Norbert R.: Veränderungschancen in der Industriegesellschaft. In Technologie und Politik. Reinbek; rororo (1978).
- MUSK A.W., PETERS J.M. & WEGMAN D.H.: Isocyanates and respiratory disease: Current status. *Am. J. Ind. Med.*, 13: 299-310 (1988).
- OMAE K., HIGASHI T., NAKADATE T., TSUGANE S., NAKAZA M., & SAKURAI H.: Four-year follow-up effects of diisocyanate exposure on the respiratory system in polyurethane foam manufacturing workers. I. Study design and results of the first cross-selectional observation. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 63: 559-564 (1992).
- OMAE K., HIGASHI T., NAKADATE T., TSUGANE S., NAKAZA M., & SAKURAI H.: Four-year follow-up effects of diisocyanate exposure on the respiratory system in polyurethane foam manufacturing workers. II. Four-year changes in the effects on the respiratory system. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 63: 559-564 (1992).
- PAULA Michael: Umweltbewußte Produktgestaltung - Ein Schwerpunkt der Forschungs- und Technologiepolitik, in: "Umweltbewußte Produktgestaltung", Veranstaltungsreihe Strategien der Kreislaufwirtschaft (TU Graz Inst.f.Verfahrenstechnik, BMWF, BMUJF) TU Graz 1.7.1992.
- PERNTHALER, Peter; WEBER, Karl; WIMMER, Norbert: Umweltpolitik durch Recht - Möglichkeiten und Grenzen, Rechtliche Strategien zur Umsetzung des Umweltmanifests. Wien (1992).
- PETER, M.G.; HESSE, K.J.; MÜLLER, K.: Chitin, Chitosan und Derivate - Wissenschaftliche Grundlagen, Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten in der Wirtschaft Schleswig Holsteins. Studie im Auftrag des Ministers für Natur, Umwelt und Landesentwicklung des Landes Schleswig-Holstein, Kiel (1992).
- PRÜGGER F.: Erkrankungen durch Diisocyanate. *Sichere Arbeit*, 2: 23-25 (1980).

Sanfte Chemie: Theoretische Grundlagen, Chancen und Perspektiven

- ROSENKRANZ Bernhard/CASTELLO Edda: Textilien im Umwelttest. Reinbek: rororo (1993).
- RÖMPP, Chemielexikon, 9. Aufl. Bd.1 (1989).
- SALVAGGIO J.E.: Occupational asthma: overview and mechanisms. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 64: 646-649 (1979).
- SCHMIDT-BLEEK, Friedrich: Wieviel Umwelt braucht der Mensch?: MPS - das Maß für ökologisches Wirtschaften. Birkhäuser, Berlin (1994).
- SCHUHMACHER, Ernst Friedrich: Es geht auch anders. Jenseits des Wachstums. Technik und Wirtschaft nach Menschenmaß. München; Desch (1974).
- SCHUHMACHER, Ernst Friedrich: A Guide for the Perplexed I. Jonathan Cape, Thirty Bedford Square, London (1977) - Deutsche Ausgabe: Rat für die Ratlosen - Vom sinnerfüllten Leben, Rowohlt Verlag, Reinbek (1979).
- SEEMANN J. & WÖLCKE U. : Über die Bildung toxischer Isocyanatdämpfe bei der thermischen Zersetzung von Polyurethanlacken und ihren polyfunktionellen Härtern. *Zbl. Arbeitsmed.*, 1: 2-9 (1976).
- SKARPING G., BRORSON T. & SANGÖ C.: Biological monitoring of isocyanates and related amines. III Test chamber exposure of humans to toluene diisocyanate. *Int. Occup. Environ. Health* 63: 83-88 (1991).
- STURM, Dieter: Politischer und administrativer Umgang mit der Produktionsdynamik - Möglichkeiten und Grenzen. Vortrag Evang. Akademie Loccum, Fachtagung "Wende in der Chemiepolitik - ein Ziel der Meeresforschung" April 1993.
- SÜSSMANN, ARNHILD & KRUSE H.: Gesundheitsrisiken durch thermische Zersetzungprodukte von Kunststoffen. Schriftenreihe der Untersuchungsanstalt für Umwelttoxikologie des Landes Schleswig-Holstein, 10 (1982).
- VANDENPLAS O., MALO J.L., CARTIER A., PERREAULT G. & CLOUTIER Y.: Closed-circuit methodology for inhalation challenge tests with isocyanates. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 145: 582-587 (1992).
- VON GLEICH, Armin: Stellungnahme der Sachverständigen zum Einführungstext und zu den Fragen für die öffentliche Anhörung am 7. Oktober 1993 zu dem Thema "Leitbilder einer Stoffpolitik", 1993, Enquête-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt, Deutscher Bundestag Bonn (1993).
- WACKERNAGEL, Mathis; MCINTOSH, Janette; REES, William E.; WOLLARD, Robert: How big is our ecological footprint? A Handbook for estimating a community's appropriated carrying capacity. University of British Columbia, Vancouver (1993).
- WEIZSÄCKER, Ernst-Ulrich: Erdpolitik (1992).
- WEILL H.: Epidemiologic and medical-legal aspects of occupational asthma. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 64: 662-664 (1979).
- WINTER, Georg: Das umweltbewußte Unternehmen, ein Handbuch der Betriebsökologie. München (1990).
- WORLDWATCH Institute Report, S. Fischer Frankfurt (1990).
- ZITTING A., FALCK K. & SKYTTÄ E. : Mutagenicity of aerosols from the oxidative thermal decomposition of rigid polyurethane foam. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 47: 47-52 (1980).