

Chimia 49 (1995) 93–101
 © Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft
 ISSN 0009-4293

Produkt- und prozess-integrierter Umweltschutz in der chemischen Industrie

Konrad Hungerbühler^{a)}*

Abstract. The chemical industry is becoming more and more determined by environmental and societal issues. This influence creates a framework for the chemical industry which requires a responsibility for products and processes concerning economy, ecology/safety and society. Adherence to this framework can be achieved by means of an integrated development of chemical products and processes over their whole life cycle. The key parameters are societal acceptance, inherent safety and economic and ecological efficiency, employing the corresponding methods of risk/benefit dialogue, risk analysis and life cycle analysis (LCA). This network of parameters and methods leads to the synergies which are necessary for sustainability. These abstract concepts are illustrated by practical examples. Case studies will be necessary tools to bring the promising concept of integrated product and process development to universities and to encourage the cooperation between academia and the chemical industry.

1. Einleitung

Die immer raschere technologische Entwicklung hat der industrialisierten Welt einen hohen Lebensstandard gebracht. Dieser Fortschritt hat aber auch seinen Preis: Die anthropogenen Stoff- und Energieflüsse liegen heute in einer Grössenordnung, die das Mass der Nachhaltigkeit beim Ressourcenverbrauch wie bei der Abfallentsorgung bei weitem übersteigt.

Ein Mangel an Mass bei unseren Ansprüchen wie ein Mangel an Umwelteffizienz bei Produkten und Prozessen sind die wohl wichtigsten Ursachen für dieses globale Ungleichgewicht. Die Verantwortung liegt dabei bei uns allen, gleichgültig, ob wir als Konsument oder als Produzent an der Wirtschaft teilhaben. In dieser Problematik sind gangbare Wege für die Zukunft gefragt: Neben einem lebendigeren Umweltbewusstsein, neben einem Markt mit umweltgerechteren Preisen ist der pro-

dukt- und prozessintegrierte Umweltschutz ein weiterer hoffnungsvoller Lösungsansatz.

In der Folge soll ein Grundgerüst zu diesem integrierten Umweltschutz in der chemischen Industrie skizziert werden. Umweltschutz steht dabei stellvertretend für sämtliche Schutz- und Sicherheitsmassnahmen, die eine gefährliche Exposition zu vermeiden suchen (s. Fig. 1).



Seit dem 1. Januar 1994 ist Konrad Hungerbühler ordentlicher Professor für Umwelt- und Sicherheitstechnologie am Laboratorium für Technische Chemie der ETH-Zürich. Die Professur ist aus einer zweckgebundenen Schenkung der Schweizerischen Gesellschaft für Chemische Industrie (SGCI) hervorgegangen, wobei die inhaltliche Ausgestaltung ganz in der Verantwortung der neuen Gruppe liegt. K. Hungerbühler (geb. 1952) hat an der ETH-Zürich studiert (dipl. Chemie-Ingenieur) und bei Prof. J.R. Bourne doktortiert. Anfangs 1979 trat er bei Ciba in eine zentrale Reaktionstechnikabteilung (Leitung Prof. W. Regenass) ein. 1983 erfolgte ein Wechsel nach Grenzach in ein Produktionswerk für Chemikalien, wo ein Bereich für Verfahrensentwicklung aufgebaut werden konnte. 1989 stellte sich mit der Leitung einer Forschungs- und Entwicklungsabteilung für Farb- und Gerbstoffe eine neue Aufgabe. 1991 war K. Hungerbühler für eine Abteilung mit Schwerpunkt Prozessentwicklung neuer Farbstoffe verantwortlich. Bei der neuen Tätigkeit an der ETH-Zürich möchte K. Hungerbühler eine Lehre zum Thema 'Unternehmerisches Handeln in Verantwortung' am konkreten Beispiel von Sicherheit und Umweltschutz in der Chemie ausarbeiten. Diese Lehre wird als Element in der Zukunftssicherung des Chemie-Standortes Schweiz verstanden und kann vorerst auf umsetzungsorientierten Erkenntnissen aus eben dieser Industrie aufbauen.

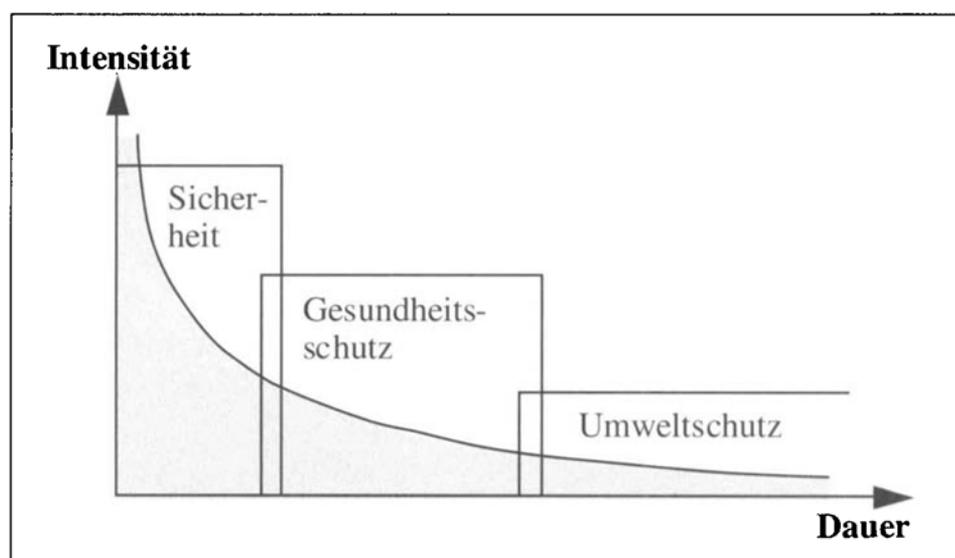


Fig. 1. Sicherheit, Gesundheitsschutz- und Umweltschutz: Einordnung im Intensitäts-/Zeinfeld einer allfälligen Exposition [1]

*Korrespondenz: Prof. K. Hungerbühler
 Laboratorium für Technische Chemie, ETH-Z
 Universitätstrasse 31
 CH-8092 Zürich

^{a)} Überarbeitete Einführungsvorlesung vom 17. Februar 1995 an der ETH-Zürich

2. Ausgangslage, Rahmen und Ziel

2.1. Die Ausgangslage der chemischen Industrie

Die chemische Industrie lässt sich durch die drei Grundgrössen *hohe Wertschöpfung, breites Gefahrenspektrum und gesellschaftliche Akzeptanzproblematik* charakterisieren. Die Wertschöpfung (Wirkstoffe aus molekularer Umwandlung von Basisstoffen) basiert in hohem Mass auf Innovation, Produktivität und Qualität. Demgegenüber steht ein breites Gefahrenspektrum bei einer Vielzahl an Prozessen und Produkten mit toxischen und umweltgefährdenden Eigenschaften sowie Brand- und Explosionsgefahr. Die gesellschaftliche Akzeptanzproblematik schliesslich hat ihren Ursprung in einem Mangel an Wissen, an Dialog und an Vertrauen. Diese gesellschaftliche Entwicklung hat (neben dem allgemeinen Wertewandel) durchaus chemiespezifische Ursachen: Unfallschere (z.B. Schweizerhalle, Bhopal, Seveso), Umweltschäden, Streit um Gentechnologie.

2.2. Das Rahmenverständnis

Das Rahmenverständnis der chemischen Industrie basiert auf der Idee einer Zukunftssicherung, die mit einer Entwick-

lung in Richtung Nachhaltigkeit zu vereinbaren ist. Der Rahmen ist dabei abgesteckt durch die Eckwerte *Ökonomie, Ökologie und gesellschaftliche Akzeptanz* und gekennzeichnet durch ein hohes Mass an Dynamik, Komplexizität und Vernetzung. Bestimmungsgrössen sind einerseits die Ansprüche (Kapital-/Produktmärkte, Unternehmung, Gesellschaft), andererseits sind es die Schutzziele bezüglich Sicherheit und Umweltqualität. Schliesslich entscheidet der technologische Stand, mit welcher Effizienz und Effektivität sich dieser Rahmen auch tatsächlich ausfüllen lässt. Das Rahmenverständnis bewegt sich in einem dialektischen Dreieck. Dieses erfährt in der Ressourceneffizienz (d.h. maximale Wertschöpfung pro verbrauchter Ressourcenmenge) eine positive und im abnehmenden Grenznutzen (d.h. Einzelmaximierung anstelle von Gesamtoptimierung) eine negative Rückkoppelung.

Die Anforderungen an diesen Rahmen werden weiter steigen, sei es durch den globalen Wettbewerb, sei es durch weitergehende Schutzmassnahmen für Mensch und Umwelt. Diese Entwicklung wurde 1992 von der chemischen Industrie in proaktiver Weise aufgegriffen, indem sie als Ausdruck der Eigenverantwortung das 'Responsible Care-Program' lanciert hat

[2]. Dabei werden Ökologie, Sicherheit und der Dialog mit der Gesellschaft zu zentralen Unternehmensgrössen.

2.3. Ziel der integrierten Entwicklung

Die Zielsetzung des produkt- und prozessintegrierten Umweltschutzes ist ein Entwicklungsprozess, bei dem eine umfassende Verantwortung hinsichtlich Ökonomie, Ökologie/Sicherheit und Gesellschaft von Anfang an die massgebende Leitgrösse ist. Diese integrierte Entwicklung sollte zu einer markt- und zeitgerechten Bereitstellung sicherer und umweltschonender chemischer Produkte und Prozesse führen und damit langfristig zu einem Optimum bezüglich Wirkung, Vorsorge und Effizienz. Vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung geht eindeutig hervor, dass 'End of Pipe'-Umweltschutz bestenfalls die zweitbeste Lösung sein kann.

3. Methodik

3.1. Arbeitsrahmen: interdisziplinäre Teamarbeit

Die integrierte Entwicklung als Bearbeitung einer offenen und meist breit vernetzten Problemstellung erfordert interdisziplinäre Zusammenarbeit. Die integrierte Entwicklung bildet dabei eine Brücke zwischen Naturwissenschaft (Chemie, Biologie, Umweltnaturwissenschaften, etc.), Humanwissenschaft (Sozial- und Geisteswissenschaft) und der Produkt-/Prozesstechnologie.

Zentral ist das gemeinsam getragene Ziel, das nur mit einer gemeinsamen Sprache, mit der Fähigkeit über die eigenen Fachgrenzen hinauszublicken sowie mit einem hohen Mass an sozialer und fachlicher Kompetenz erreicht werden kann.

3.2. Betrachtungsrahmen: Produkte-Lebenszyklus

Eine weitere Grundgrösse bei der integrierten Entwicklung ist die Erweiterung des Betrachtungsrahmens auf den Produkte-Lebenszyklus (Fig. 2). Der Lebenszyklus umfasst den Weg von der Ressourcenbereitstellung über Produktion, Applikation, Gebrauch bis zur Entsorgung. Der Produkte-Lebenszyklus zeigt dabei die Wechselwirkungen mit der Umwelt auf: als Input die Rohstoff- und Energieströme und als Output die Abwasser-, Abfall- und Abluftströme. Die integrierte Produkt-/Prozessgestaltung versucht primär die Emissionen zu vermeiden beziehungsweise zu vermindern, in zweiter Linie diese zu verwerten und schliesslich diese zu entsorgen [3]. Dazu ist vorab der Stoff- und Energieeinsatz auf ein Minimum zu redu-

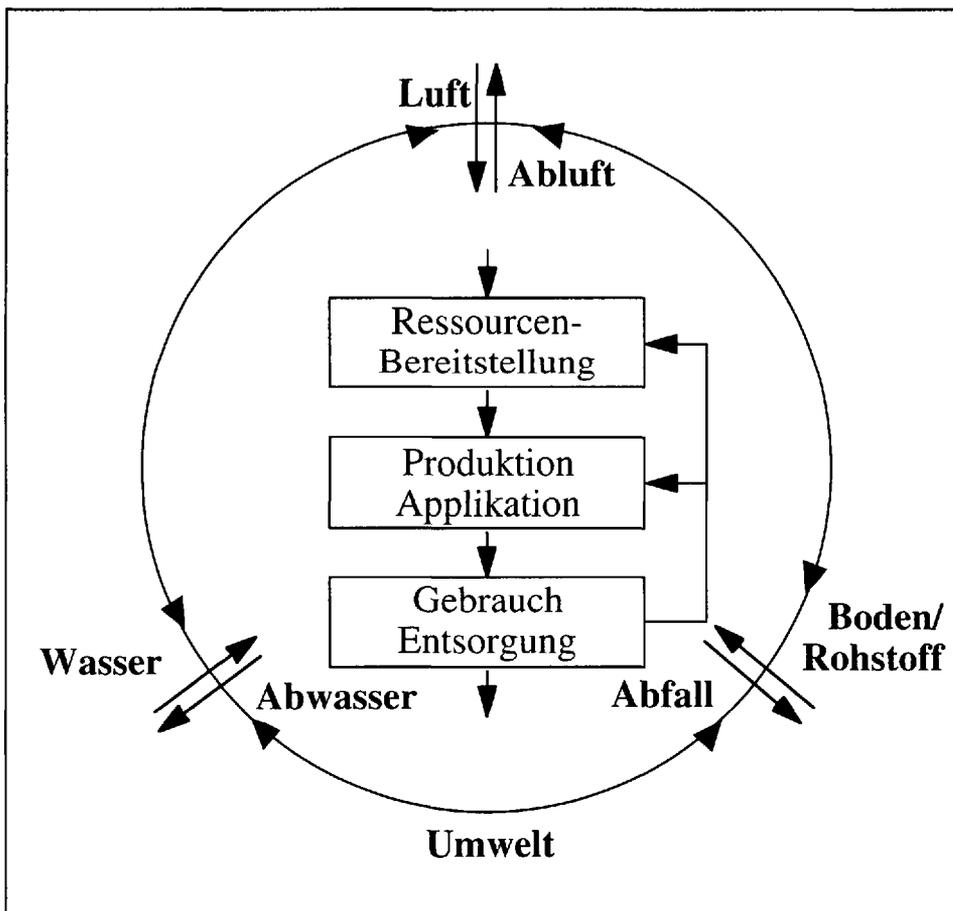


Fig. 2. Der Produkte-Lebenszyklus und seine Wechselwirkungen mit der Umwelt

zieren (z.B. durch höhere Selektivität, höheren Wirkungsgrad, Bildung von Stoffkreisläufen – auch unter Einbezug von Lieferanten und Kunden), wodurch ursächlich das Problem der Emissionen am effizientesten zu lösen ist.

Die weitgefassten Systemgrenzen der Lebenszyklusbetrachtung helfen, die grossen Zusammenhänge besser zu erkennen und erleichtern dadurch das Auffinden der wirklichen Probleme. Der Preis dieser Betrachtungsweise ist ein hoher Grad an Komplexität und Unsicherheit sowie die Notwendigkeit einer umfassenden Datenbasis.

Neben der Wechselwirkung mit der Umwelt hat der Produkte-Lebenszyklus auch einen engen Bezug zum Geschäftsprozess, d.h. zu einem Kontext, der durch Technik, Ökonomie, Umwelt und Gesellschaft bestimmt ist (Fig. 3). Der industrielle Herstellungsprozess ist eng verknüpft mit dem nachfolgenden Marktgeschehen. Der Geschäftskreis wird geschlossen und zugleich vorangetrieben durch die Innovationstätigkeit, die ihrerseits mit dem Markt rückgekoppelt ist. Dabei besteht auf der Produktions- wie auf der Applikationsseite die Problematik des Energie- und Ressourcenverbrauchs, der Emissionen und des Störfallrisikos.

Zentrale Grösse im Geschäftsprozess ist die Produkte-Wirkung. Bezugspunkt ist hier die Wirkungseinheit. Die Effizienz der Bereitstellung einer Wirkungseinheit – z.B. die Färbung eines kg Baumwolle mit spezifischen Anforderungen bezüglich Farbe (Nuance/Reinheit) und Gebrauchsechtheit – ist abhängig von der verwendeten Technologie und wird bestimmt durch den Energie- und Ressourcenverbrauch, die Emissionen sowie das Störfallrisiko. Chemische Produkte können aufgrund ihrer Wirkung und ihrer mit dem Lebenszyklus verbundenen Effizienz auch als Dienstleistung bzw. Problemlösung betrachtet werden. Dabei wird das einzelne Produkt durch ein System abgelöst (z.B. Farbstoff mit Hilfsmittel und Färbeverfahren), was eine Vielzahl neuer Innovations- und Marktchancen eröffnet.

Die Auswirkungen des Produkte-Lebenszyklus bezüglich des Rahmens (Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft) lassen sich über die Stufen Ressourcen (Bereitstellung), Produkt (Entwicklung, Herstellung und Vertrieb) und Markt (Applikationen, Gebrauch und Entsorgung) verfolgen (Tab. 1).

Die ökonomische Seite wird charakterisiert durch die Ressourcen-, Prozess- und Entsorgungskosten sowie durch den Umsatz (Menge und Preis). Die ökologische Dimension setzt sich aus den Umweltef-

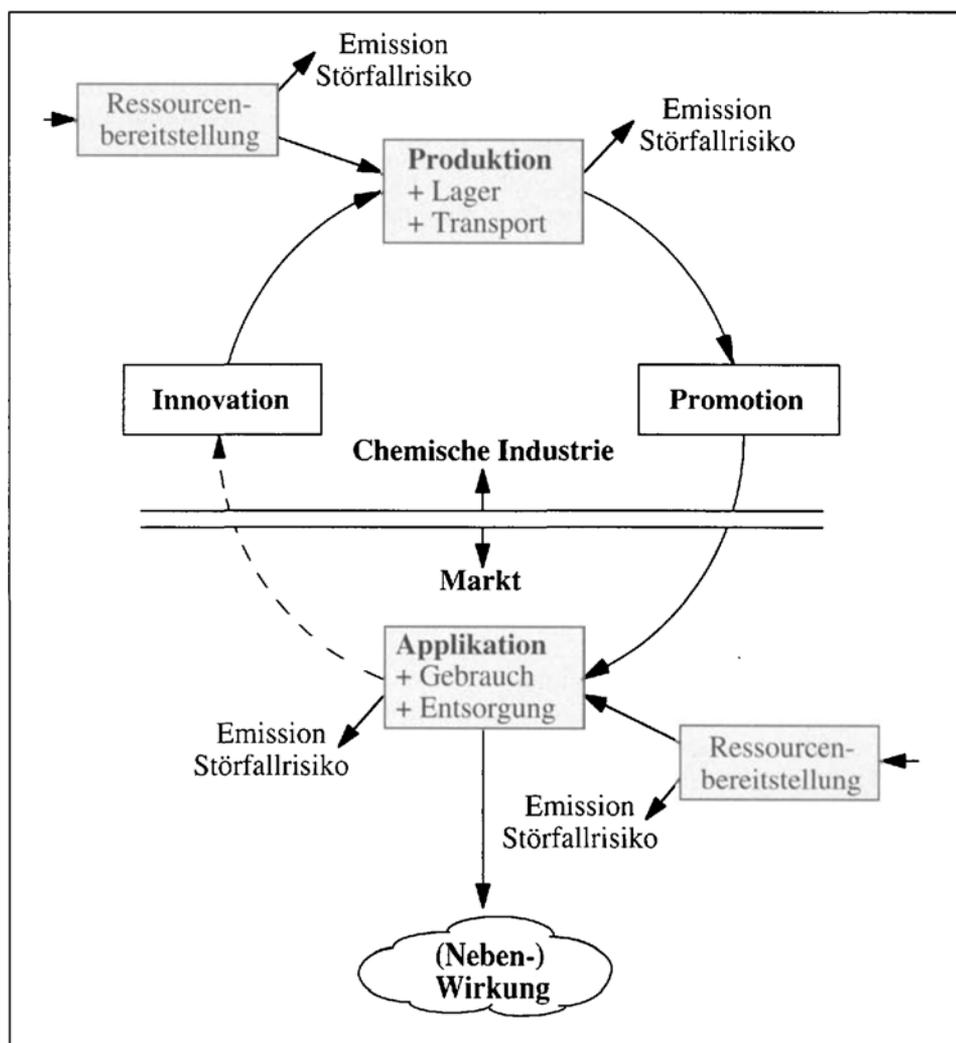


Fig. 3. Der Produkte-Lebenszyklus aus der Sicht von Ökonomie und Gesellschaft

Tab. 1. Auswirkungen des Produkte-Lebenszyklus auf Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft

	Ökonomie	Ökologie	Gesellschaft
Ressourcen	Ressourcenkosten	Umwelteffekte	Ressourcenverbrauch Nutzen/Risiko (Nicht-) Akzeptanz
Produkt	Prozesskosten Produktkosten	Umwelteffekte	Nutzen/Risiko (Nicht-) Akzeptanz
Markt	Umsatz (Menge/Preis) Entsorgungskosten	Umwelteffekte	Nutzen/Risiko (Nicht-) Akzeptanz
Lebenszyklus	Ökonomische Effizienz	Ökologische Effizienz	(Nicht-) Akzeptanz

fekten der einzelnen Stufen des Produktewerdeganges zusammen. Die gesellschaftliche Relevanz geht schliesslich aus Ressourcenverbrauch, Nutzen-Risiko-Verhältnis und der Akzeptanz hervor.

Über den ganzen Lebenszyklus wird die gesellschaftliche Auswirkung durch die Akzeptanz bestimmt. Die Auswirkung bezüglich der Umwelt lässt sich durch die

ökologische Effizienz, d.h. durch die gesamthafte Umweltbelastung pro Wirkungseinheit darstellen. Die wirtschaftliche Auswirkung kann durch die ökonomische Effizienz beschrieben werden, die ihrerseits durch den Net Present Value (NPV) charakterisiert wird, d.h. durch den integral über den Lebenszyklus geschaffenen und diskontierten Mehr- oder Minder-

wert (inklusive der Opportunitätskosten des Kapitals wie auch der Risikokosten) [4]. Kritisch sind die externalisierten Kosten, die heute zu einer Verzerrung des ökonomischen Bildes führen. Eine Wirtschaft mit umweltgerechten Preisen ist aber auch für die chemische Industrie eine wichtige Grundlage, um langfristig richtige unternehmerische Entscheidungen zu treffen.

3.3. Eine neue Dimension der Verantwortung

Bei der integrierten Entwicklung ist die Frage der Verantwortung für die potentiellen Auswirkungen eines neu zu schaffenden Produktes von zentraler Bedeutung. Eine Verantwortung, die völlig neuartige Dimensionen erhält, wie das Hans Jonas in seinem Buch 'Das Prinzip Verantwortung' postuliert:

'Die moderne Technik hat Handlungen von so neuer Grössenordnung, mit so neuartigen Objekten und so neuartigen Folgen eingeführt, dass der Rahmen früherer Ethik sie nicht mehr fassen kann.

Gewiss, die alten Vorschriften der 'Nächsten'-Ethik – die Vorschriften der Gerechtigkeit, Barmherzigkeit, Ehrlichkeit, usw. – gelten immer noch, in ihrer intimen Unmittelbarkeit, für die nächste, tägliche Sphäre menschlicher Wechselwirkung.

Aber diese Sphäre ist überschattet von einem wachsenden Bereich kollektiven Tuns, in dem Täter, Tat und Wirkung nicht

mehr dieselben sind wie in der Nahsphäre, und der durch die Enormität seiner Kräfte der Ethik eine neue, nie zuvor erträumte Dimension der Verantwortung aufzwingt [5].'

Diese neue Dimension der Verantwortung müsste nun als Leitgrösse über dem eingangs definierten Rahmen stehen. Sie umfasst die ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen eines chemischen Produktes bzw. Prozesses über dessen ganzen Lebenszyklus. Dabei erfordern grössere Auswirkungen auch grösseres Wissen und dieses grössere Wissen führt wiederum zu grösserer Verantwortung. Eine derart begründete Verantwortung verlangt sorgfältiges Abwägen auf dem neuesten Erkenntnisstand von Wissenschaft und Technik. Der abwägende Vergleich von Gestaltungs- und Handlungsoptionen hat dabei von den Prinzipien der Vorsorge, der Verhältnismässigkeit und den jeweiligen gesellschaftlichen Werten und Normen auszugehen. Um trotz Ungewissheit, Komplexität und Ambivalenz der Technik Mass und Normen für die Technikbewertung zu finden, (z.B. Tragbarkeit langfristiger Effekte bzw. verbleibender Risiken) kann die komplementäre Betrachtungsweise von Natur- und Geisteswissenschaft den Beurteilungshorizont entscheidend erweitern. Da entstehen neue Sichtweisen aus dem in Beziehung setzen von naturwissenschaftlicher Erkenntnis (Bereich der Logik) mit dem interpretierenden Verstehen aus geisteswissenschaft-

licher Reflexion (Bereich der Hermeneutik). Bei jeder Bewertung sind klar erkennbare Handlungsmöglichkeiten, sichtbare Wertmassstäbe und, daraus abgeleitet, möglichst objektiv kalkulierbare Entscheidungsgrundlagen wichtige Voraussetzungen für Kommunizierbarkeit und Akzeptanz.

4. Leitgrössen und Umsetzungsinstrumente der integrierten Entwicklung

Die integrierte Entwicklung von chemischen Produkten und Prozessen besitzt ein inhärentes Dilemma: Am Anfang steht ein grosser Gestaltungsraum einer schmalen Wissensbasis gegenüber. Am Ende ist es genau umgekehrt: Grösseres Wissen ist in der Umsetzung eng begrenzt durch die wenigen verbleibenden Freiheitsgrade. Dieses Dilemma lässt sich mittels einer stufengerechten Entwicklung, die auf den drei Grundpfeilern *gesellschaftliche Akzeptanz, inhärente Sicherheit* und *Ökoeffizienz* ruht, mindestens teilweise überwinden.

Der gesellschaftlichen Akzeptanz liegt als Umsetzungsprinzip der *Nutzen-Risiko-Dialog* zugrunde. Die inhärente Sicherheit – d.h. die innewohnenden Produkt-/ Prozesseigenschaften, die ein bestimmtes Sicherheitsniveau zwingend gewährleisten – hat die *Risikoanalyse* eines chemischen Produktes bzw. Prozesses als Umsetzungsinstrument. Der dritte Eckpfeiler wird aus der ökonomischen bzw. ökologischen Effizienz gebildet, deren Umsetzungsinstrument die entsprechende *ökonomische bzw. ökologische Bilanzierung* ist. Diese drei Grössen sind eng vernetzt über einen umfassenden Qualitätsbegriff, über die Zeitgerechtigkeit und schliesslich über eine stufengerechte Kommunikation.

Die generell abstrakten Grundgrössen der integrierten Entwicklung leben von deren praktischen Umsetzung. Dies führt zu konkreten Produkten und Prozessen, die zeitgebunden den Stand der Technik aufzeigen und damit auf dem Weg zu vermehrter Nachhaltigkeit stets nur ein Etappenziel sind.

5. Konkretisierung der Umsetzungsinstrumente

Im folgenden werden die drei grundlegenden Umsetzungsinstrumente der integrierten Entwicklung näher erläutert und mit Beispielen illustriert. Um Übersicht zu gewinnen, werden die einzelnen Werkzeuge isoliert betrachtet. In der Praxis verlangt die integrierte Entwicklung natürlich

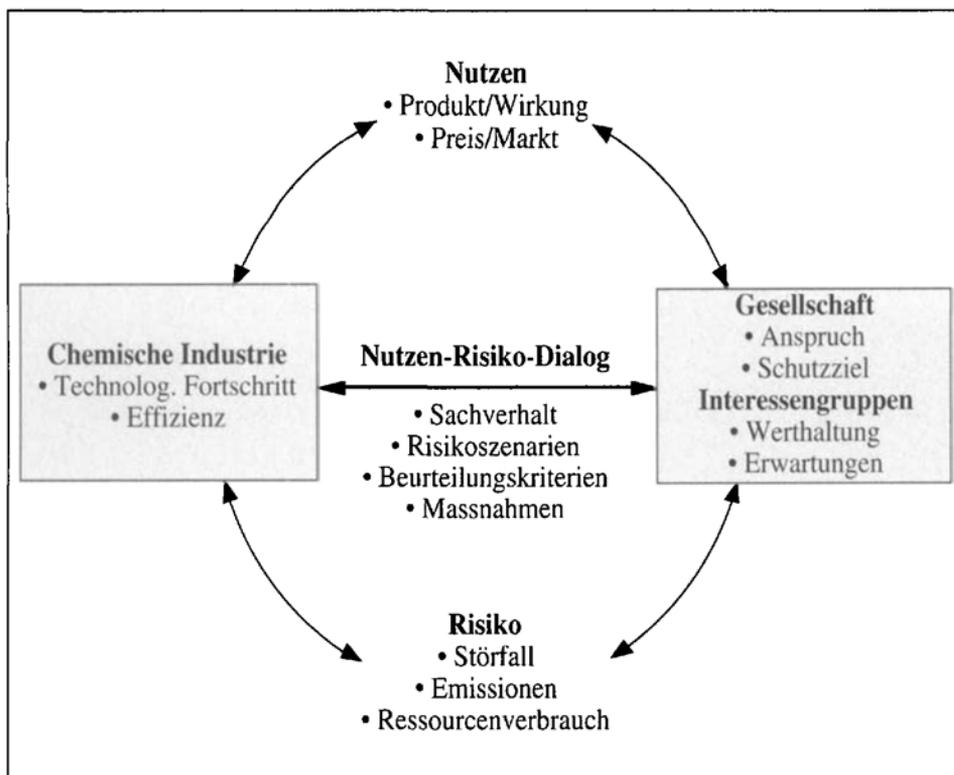


Fig. 4. Der Nutzen-Risiko-Dialog zwischen chemischer Industrie und Gesellschaft

eine enge Vernetzung von Risikoanalyse, Ökobilanz und Nutzen-Risiko-Dialog.

5.1. Der Nutzen-Risiko-Dialog

Die Akteure eines Nutzen-Risiko-Dialoges sind einerseits die chemische Industrie mit ihrem auf technologischem Fortschritt und Effizienz gründenden Wertsystem und auf der anderen Seite die Gesellschaft bzw. Interessengruppen mit ihren Ansprüchen, Schutzzielen und Werthaltungen [6] (Fig. 4).

Hier sucht jeder aufgrund seines sozialen Kontextes nach einer Internalisierung des Nutzens (Produkt-Wirkung mit Preis und Markt) und – zumindest partiell – einer Externalisierung möglicher Risiken (Störfall, Emissionen und Ressourcenverbrauch). Als Ausgleichsfunktion braucht es eine demokratische Diskussion über Nutzen und Risiken, eine Verständigung bezüglich Sachverhalt, Risikoszenarien, Risikoverteilung, Beurteilungskriterien und allenfalls zu treffenden Massnahmen; eine Verständigung über das was getan wird, wie es getan wird und was es bedeutet. In diesem Diskurs – unabhängig, ob es sich um den Normalfall, einen Konfliktfall oder einen Störfall handelt – sind Glaubwürdigkeit und Fachkompetenz von ausschlaggebender Bedeutung.

Falls bei einem neuen Produkt oder Prozess in einem Nutzen-Risiko-Dialog Neugierde geweckt wird, Mitwisser geschaffen werden und Betroffenheit ausgedrückt wird, führt dies in Richtung einer gemeinsamen Sprache, gemeinsamer Erkenntnis und gemeinsamer Verantwortung, was in jedem Fall ein Fortschritt ist.

5.2. Die Risikoanalyse

Die Risikoanalyse ist das zweite Instrument im stufengerechten Design eines Produkte-, bzw. Prozess-Lebenszyklus. Risiko – als die Möglichkeit, dass aus einem Gefahrenpotential Schaden entsteht – kann als Produkt von Eintretenswahrscheinlichkeit und Tragweite verstanden werden. Die Eintretensmöglichkeit als statistische bzw. probabilistische Grösse zeigt die Fehlermöglichkeiten von Technik, Organisation und Mensch. Die Tragweite dagegen ist eine absolute Grösse, die sich aus Menge und Wirkung von freigesetzten Stoffen und Energien zusammensetzt (unter Einbezug von Folgeereignissen und Langzeitschäden).

Mit der Risikoanalyse gilt es ab frühestem Entwicklungsstadium in einem iterativen Prozess die wichtigsten Risiken zu erkennen und durch technische, organisatorische und personelle Massnahmen zu reduzieren. Insbesondere ist durch gezieltes Design ein optimales Mass an inhären-

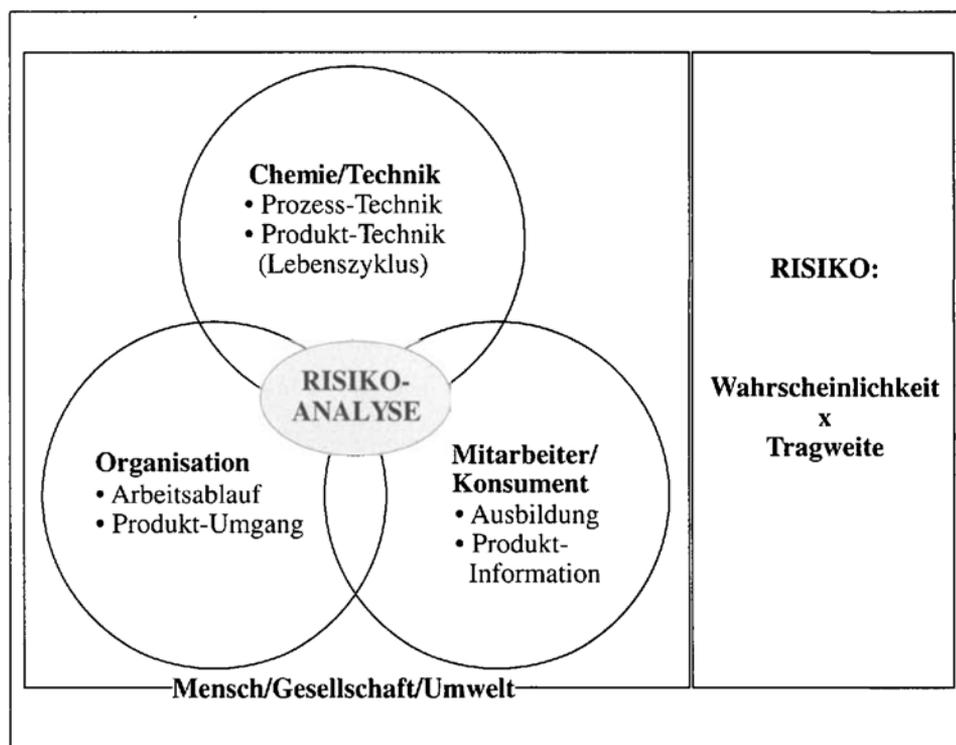


Fig. 5. Die Risikoanalyse als Basis für die Sicherheit von Mensch und Umwelt

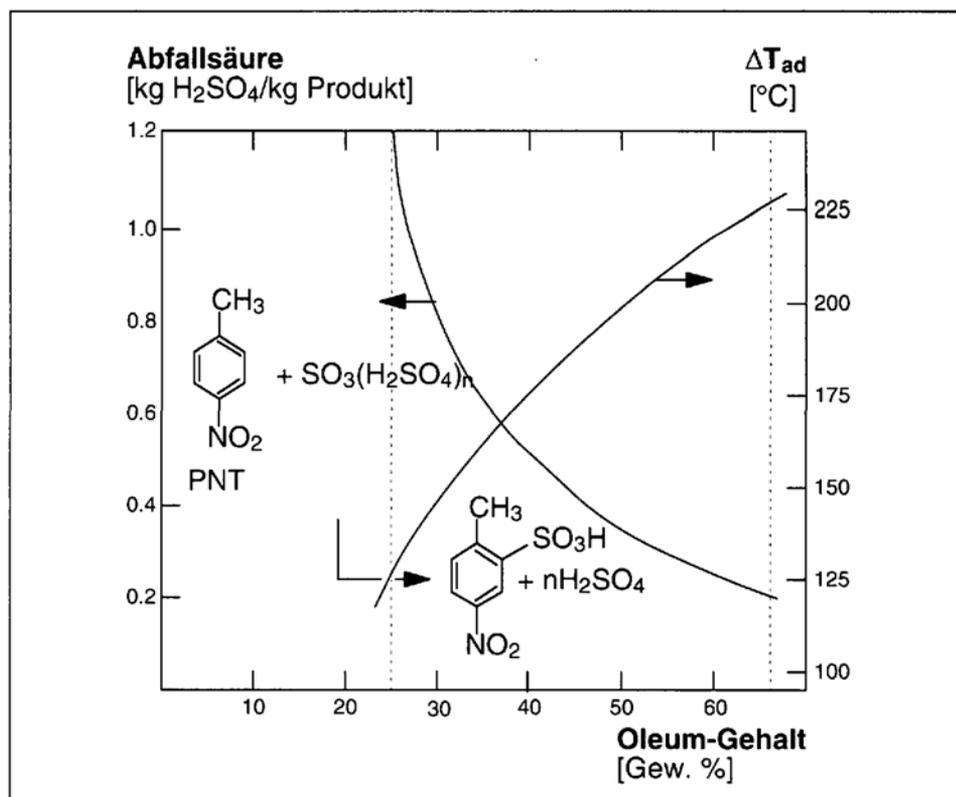


Fig. 6. Sulfonierung von p-Nitrotoluol: der Einfluss des Oleum-Gehalts auf die Menge an Abfallschwefelsäure und auf den adiabaten Temperaturanstieg

ter Sicherheit, d.h. an Gefährdungsbegrenzung (Limitierung von Tragweite) zu suchen (Fig. 5). Eine sinnvoll gestaltete Interaktion zwischen Mensch und Technik sowie eine sicherheitsbewusste und motivierende Führung sind dabei wichtige psychologische Momente zur Minimierung der fundamentalen Risikokomponente

‘menschlicher Fehler’ (d.h. Einflussnahme auf Bewusstseins- und Verhaltensebene).

5.2.1. Die Risikoanalyse chemischer Prozesse

Die Prozessrisikoanalyse chemisch technischer Systeme hat zum Ziel, voraus-

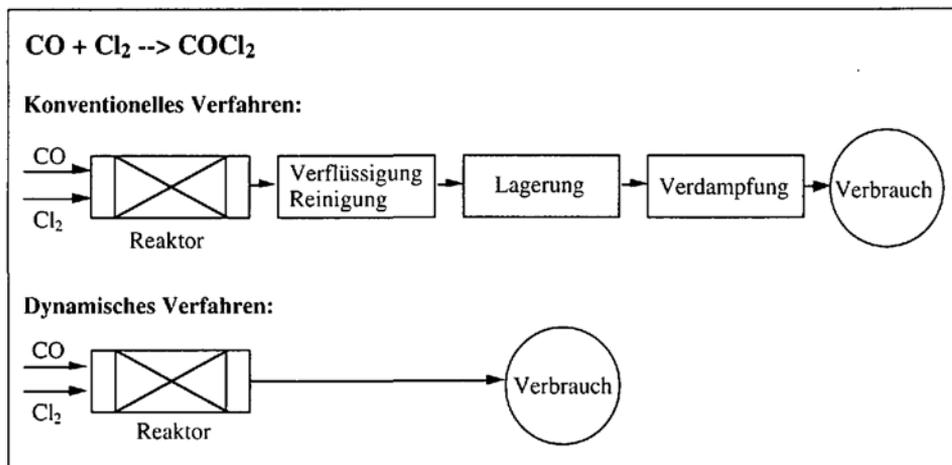


Fig. 7. Zwei Prozessvarianten zur Phosgenherstellung: konventionelles Verfahren mit Zwischenlagerung sowie dynamischer Prozess

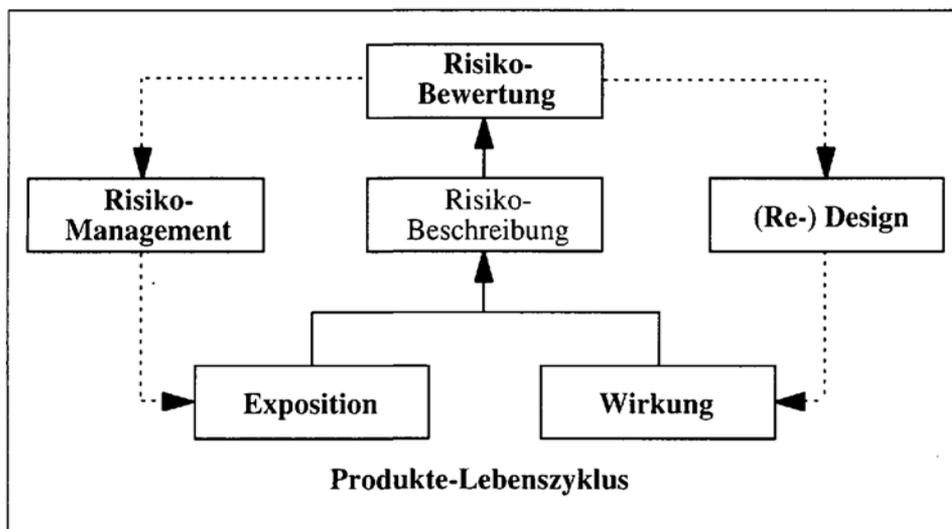


Fig. 8. Die Risikobewertung chemischer Produkte

Tab. 2. Nutzen-/Risikobewertung von Insektiziden: Pymetrozine (Ciba) im Vergleich mit einem Carbamat

	Pymetrozine		Referenzprodukt Carbamat		
• Wirkung nach 14 d (bei gleicher Applikationsmenge)	Pfirsichblattlaus	95%	Pfirsichblattlaus	45%	
• Selektivität	Schädlinge	0.2 mg/l	Pfirsichblattlaus	7 mg/l	
	Nützlinge	>8100 mg/l	Blumenwanze	>160 mg/l	
• Akute Toxizität	LC ₅₀ (Ratte)	5820 mg/kg	LC ₅₀ (Ratte)	100–200 mg/kg	
• Aqu. Toxizität	EC ₅₀ (Daphnien)	>100 mg/l	EC ₅₀ (Daphnien)	0.2 mg/l	
• Persistenz (Boden)	t _{1/2} =	3–9 d	t _{1/2} =	7–234 d	
• Applikationskosten	Schweiz	Kartoffeln 130.– SFr./ha	Kartoffeln	80.– SFr./ha	
	Aegypten	Kartoffeln	65.– SFr./ha	Kartoffeln	10.– SFr./ha

schauend zu vermeiden, dass es zu Störfällen kommen kann (insbesondere mit der Folge von unerwünschter Stoff- bzw. Energiefreisetzung). Mit der Abgrenzung sicherer Prozessbedingungen wird die Basis für den zentralen Schritt der Gefahrensuche gelegt. Bei der Gefahrenermittlung sind Verständnis für Ursachen und Folgen von möglichen Ereignissen, Denken in Szenarien sowie die praktische Erfahrung eines interdisziplinären Teams von besonderer Bedeutung. Dass die gewonnenen Erkenntnisse auch in Massnahmen umgesetzt und im Betriebsalltag gelebt werden, ist schliesslich eine Frage der Ausbildung, der Führung und des Verantwortungsbewusstseins [7].

Beispiel: Die Sulfonierung von p-Nitrotoluol

Die Sulfonierung von *p*-Nitrotoluol (PNT) führt zu 4-Nitrotoluol-2-sulfonsäure, einem Zwischenprodukt zur Herstellung optischer Aufheller für die Papier- und Waschmittelindustrie (Fig. 6). Dabei steht einem Oleum-25%-Verfahren ein Oleum-66%-Prozess gegenüber. Mit zunehmendem Oleum-Gehalt (d.h. mit abnehmender Schwefelsäuremenge) wird die Abfallschwefelsäuremenge pro kg Produkt stark reduziert (linke Skala). Problematisch hinsichtlich der thermischen Prozesssicherheit (Zersetzung der Nitroverbindungen) ist die bei höherem Oleumgehalt stärkere adiabatische Erwärmung der Reaktionsmasse (rechte Skala).

Die technische Lösung für den abfallarmen Oleum-66%-Prozess ist ein kontinuierlicher Schlaufenreaktor mit einem dickwandigen Wärmetauscher (dessen hohe Wärmekapazität thermisch einem Ersatz von Lösungsmittel gleichkommt). Mit diesem Prozessdesign konnte die Sulfonierung von PNT bei Ciba Grenzach in ökonomischer und insbesondere ökologischer Hinsicht – ohne Einbusse an inhärenter Sicherheit – deutlich verbessert werden [8].

Beispiel: Die Herstellung von Phosgen

Phosgen, ein wichtiges technisches Zwischenprodukt unter anderem in der Agrochemie für die Synthese von Alkylchloriden bzw. Isocyanaten, zeichnet sich einerseits durch hohe Reaktivität und Selektivität aus, ist andererseits jedoch hoch toxisch.

Neben einem konventionellen Verfahren, bei dem Phosgen nach Herstellung und Verflüssigung zwischengelagert wird (bis zu 25 t; danach folgt Verdampfung und chemische Umsetzung beim Verbraucher), gibt es ein neues dynamisches Verfahren, bei dem Phosgen ohne Zwischen-

lagerung direkt zur Weiterverarbeitung gelangt (Ciba Monthey, Fig. 7) [8]. Neben einem grundsätzlichen Umdenkprozess bei den Verbrauchern, war insbesondere die Einhaltung der Produktespezifikation beim An- und Abfahren des Reaktors bzw. bei Durchsatzänderungen das Hauptproblem.

Trotz anspruchsvoller Prozessregelung kostete die Realisierung dieses dynamischen Verfahrens schliesslich ungefähr halb so viel wie eine ansonsten ohnehin notwendige Sanierung des Phosgenlagers. Das neue Prozesskonzept hat damit neben dem grossen Gewinn an inhärenter Sicherheit auch ökonomische Vorteile.

5.2.2. Die Risikobewertung chemischer Produkte

Die Risikobewertung chemischer Produkte umfasst den ganzen Produkte-Lebenszyklus und hat einerseits eine Dosis-Wirkungs- und andererseits eine Expositionsdimension (Fig. 8). Durch das Verhältnis von Nicht-Wirkungskonzentration (aus extrapoliertem Effektkonzentration) zur konkret erwarteten Konzentration in der Umwelt (aus Expositionsszenarien) lassen sich spezifische Risiken für Gesundheit bzw. Umwelt vorausschauend abschätzen. Dabei hängt die Aussagekraft stark von den Prämissen und der Modellbasis ab. Diese Risiken können anschliessend an den Schutzziele gemessen werden [9]. Es folgt die Risikobewertung, welche über das Risikomanagement zur Exposition zurückführt bzw. wirkungsseitig auf das Design des Produkte-Lebenszyklus Einfluss nimmt. Die Risikobewertung ist damit ein hervorragendes Instrument, um stufengerecht – auch in frühen Entwicklungsphasen – die Produkt-Innovationen zu leiten.

Beispiel: Das Insektizid Pymetrozine

Pymetrozine ist ein zur Bekämpfung von Pflanzensaugern neu eingeführtes Insektizid, das vor allem im Gemüseanbau angewendet werden kann. Seine chemische Struktur basiert auf einem Pyridinazomethin in Kombination mit einem asymmetrischen Triazinon. Pymetrozine, eine Innovation von Ciba, zeichnet sich durch eine ungewöhnlich hohe Wirkungs-Selektivität aus [10]. Als Vergleich kann beispielsweise das in der Tab. 2 aufgeführte Carbat dienen (gleiches Einsatzgebiet). Gemäss Tab. 2 zeigt Pymetrozine im Vergleich zur Referenzsubstanz eine längere Wirkungs-dauer und eine wesentlich höhere Wirkungs-Selektivität sowie bessere Eigenschaften bezüglich der Sicherheit von Mensch und Umwelt.

Allerdings beschränkt das aus der hohen Selektivität resultierende enge Ein-

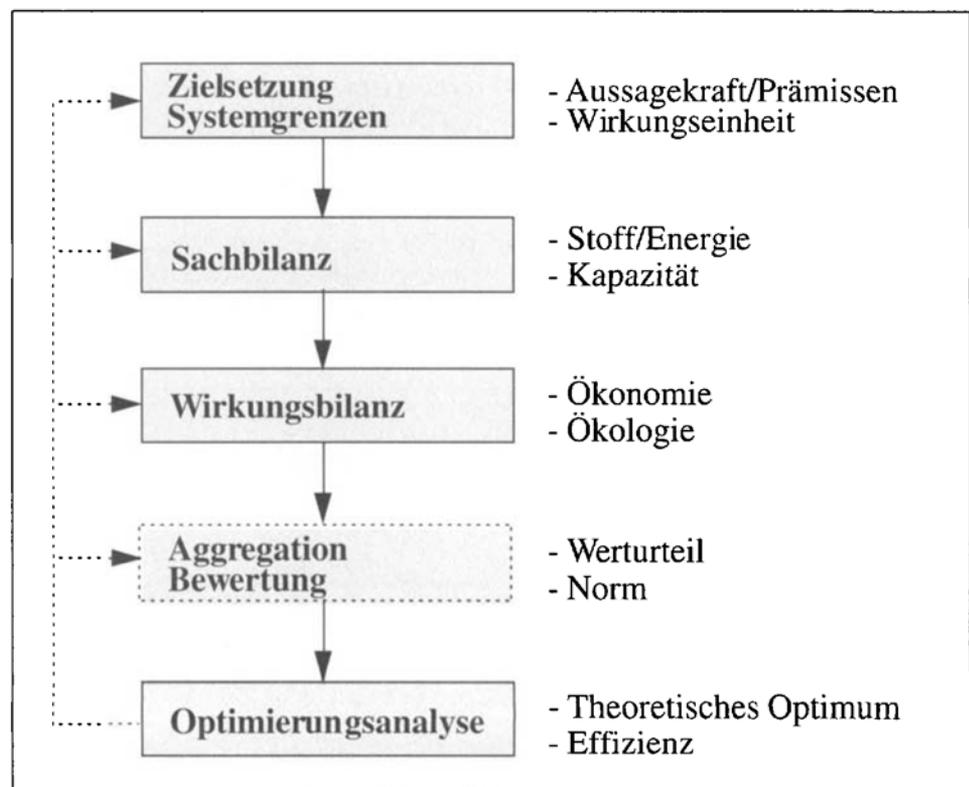


Fig. 9. Ökobilanzierung über den Produkt-/Prozess-Lebenszyklus

Tab. 3. Drei mögliche Varianten zur Abfallminimierung bei der Essigsäureentwässerung

Variante	Ökologie		Ökonomie	
	Abwasser organische Fracht [kg/h]	Abluft CO ₂ [kg/h]	Energiekosten [SFr/J]	zusätzliche Investitionskosten [SFr]
I LM: Ethylacetat	8.5	575	1 006 000.–	–
II LM: MTBE	1.4	234	430 000.–	–
III LM: MTBE Azeotrope Entwässerung: zweistufig	1.4	171	325 000.–	520 000.–

satzgebiet von Pymetrozine das ökonomische Potential. Die Problematik des Spezialitätenpreises führt überdies zu einem Dilemma. Der Preis ist zu hoch für die dritte Welt. Ein Umstand, der die Bedeutung des Produktes hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung in diesen Ländern stark relativiert.

5.3. Die Ökobilanz

5.3.1. Das Instrument der Ökobilanz

Die Ökobilanz, das dritte Instrument der integrierten Entwicklung, ist ein Hilfsmittel zur Beurteilung der Effizienz. Im Gegensatz zum rein umweltbezogenen Begriffsverständnis (Englisch: Life Cycle Analysis) soll im vorliegenden Kontext unter Ökobilanz eine Bilanzierung bezüg-

lich der ökonomischen wie der ökologischen Auswirkungen verstanden werden (Fig. 9). Ausgangspunkte der Bilanzierung sind die Zieldefinition und die Festlegung der Systemgrenzen sowie ein möglichst breites Spektrum an Prozess- bzw. Produktevarianten. Konsistenz und Umfang der Systemgrenzen entscheiden dabei, ob ein Problem im richtigen Rahmen betrachtet oder z.B. einfach verschoben wird. Sachbilanzen bezüglich Stoff/Energie, respektive bezüglich Kapazität, bilden in einem nächsten Schritt die Basis der Ökobilanz. Die möglichst vollständige quantitative wie qualitative Charakterisierung der Stoff- und Energieflüsse (d.h. umfassende Analytik) bildet die Bilanzgrundlage. Auf dieser Grundlage charak-

terisiert die Wirkungsbilanz die ökonomischen bzw. die ökologischen Effekte. Es folgt ein normativer Schritt der Aggregation und Bewertung. Wichtig ist schliesslich die Optimierungsanalyse, die anhand von theoretischen Optimalwerten eine Beurteilung der Effizienz eines Produkte- bzw. Prozess-Lebenszyklus erlaubt.

Das Instrument der Ökobilanzierung ist ein weiteres Werkzeug für gezieltes

Produkt- und Prozessdesign. Es dient aber auch der stufengerechten Kommunikation mit der Gesellschaft über die Auswirkungen einer Neuentwicklung. Dabei sind sämtliche Schlüsse einer Ökobilanz bezüglich Aussagekraft und Vollständigkeit bzw. Richtigkeit der Prämissen kritisch zu prüfen, sind doch eine Vielzahl von methodischen Fragen – wie Probleme der Aggregation, der Bewertung oder der ex-

ternalisierten Kosten – noch mitten in einem Entwicklungsprozess.

Beispiel: Die Abfallminimierung bei der Essigsäureregeneration

Die Aufkonzentrierung wässriger Essigsäure von 36 auf 99.9% (Essigsäure *v/v*) erfolgt über einen Extraktionsschritt mit nachfolgender azeotropen Entwässerung (Fig. 10). Dazu wird ein Lösungsmittel verwendet, welches in der Folge vollständig regeneriert und rezykliert wird. Bei Lonza in Visp kamen verschiedene Prozessvarianten in Frage, die aufgrund von vollständigen Stoff- und Energiebilanzen verglichen werden können. Schlüsselgrösse ist der Energiebedarf. Die Energie hat einerseits ökologische Relevanz durch die Emissionen bei deren Bereitstellung (z.B. CO₂); andererseits sind Energiekosten und Ressourcenverbrauch von ökonomischer und gesellschaftlicher Bedeutung. Tab. 3 zeigt drei mögliche Prozess-Varianten auf: Als Stand der Technik Variante I mit Ethylacetat (als Lösungsmittel), Variante II mit Methyl-*t*-butylether (MTBE) und Variante III mit MTBE und einer zweistufigen azeotropen Entwässerung [11].

Die Bilanzierung zeigt, dass der Wechsel des Extraktions- und Schlepptomittels von Ethylacetat zu MTBE sowohl ökonomisch als auch ökologisch von grossem Vorteil ist. Die weitere Energiekosteneinsparung mit einer zweistufigen Destillation bringt aufgrund der zusätzlichen Investitionskosten bezüglich des 'Net Present Value' (bei den heutigen Energiekosten) keine wesentliche Verbesserung. Der stufengerechte Einsatz der Bilanzierung ist hier eine wichtige Hilfe, um zielgerichtet zu einem Prozessdesign zu gelangen, das bezüglich Wirtschaftlichkeit wie Umweltschutz einen klaren Fortschritt bringt.

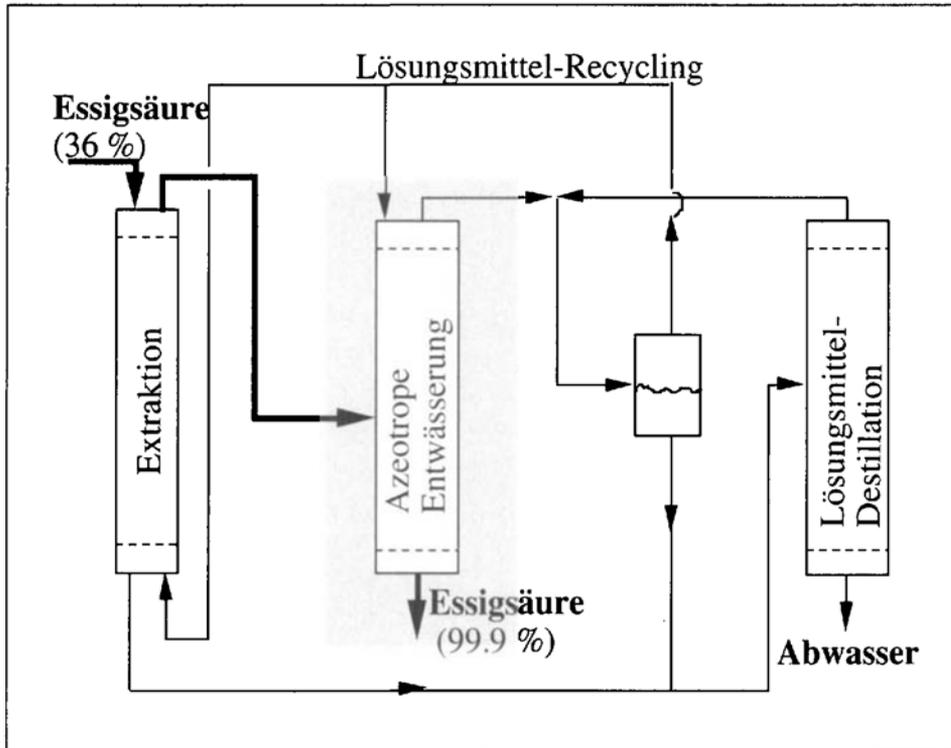


Fig. 10. Essigsäureregeneration durch Kombination von Extraktion und azeotroper Entwässerung

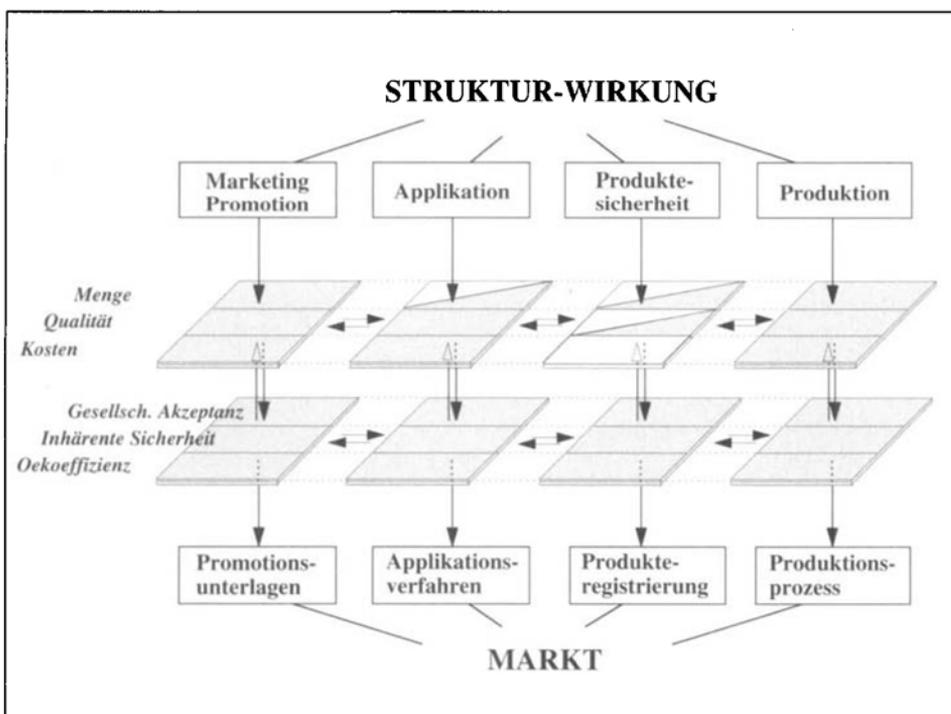


Fig. 11. Von der Struktur-Wirkung zum Markt: der Produktewerdegang
 □: Wechselwirkung zwischen Querschnittebene und Entwicklungsachse

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1. Integrierte Entwicklung im Produktewerdegang

Operationsbasis der integrierten Entwicklung ist der Produktewerdegang. Dieser führt von der Struktur-Wirkung bis zum Markt über vier parallele Hauptentwicklungsachsen (Fig. 11):

- Die *Produktion* mit Synthese, Verfahrensentwicklung, Scale up und Betriebseinführung (evtl. mit Projektierung und Bau von Anlage).
- Die behördliche *Produktregistrierung* mit der Risikobeurteilung bezüglich der Produktesicherheit (Nebenwirkungen auf Mensch und Umwelt, Sicherheitsmassnahmen).
- Die *Produktapplikation* mit Optimie-

rung des Anwendungsverfahrens sowie der applikatorischen Prüfung von Labor- und Betriebsmustern (Wirkung).

- Die *Produktpromotion* mit Einschätzung von Markt und Wirtschaftlichkeit (→ Preis, Qualität, Vertrieb) sowie der Erstellung der Promotionsunterlagen.

Zwei Querschnittebenen sorgen für den Verbund. Auf der Stufe des Produktes sind Menge, Qualität und Kosten die verbindenden Grössen, wogegen auf der Stufe des Produkte-Lebenszyklus die gesellschaftliche Akzeptanz, die inhärente Sicherheit und die Ökoeffizienz die integrierenden Prinzipien sind. Diese Verbundenebenen – insbesondere die Ebene auf Stufe Lebenszyklus – führen zu einer hohen allseitigen Vernetzung und damit zur Möglichkeit, ein Problem gemäss unserer Rahmen- und Zielsetzung als Ganzes zu erfassen. Dabei können Kommunizierbarkeit, Toxizitäts- bzw. Explosionsindex, Stoff- und Energieeffizienz, etc. Kenngrössen sein, die erlauben, den Fortschritt bei der integrierten Entwicklung möglichst quantitativ zu messen.

Der Produktwerdegang erfordert heute paralleles Arbeiten in intensiv kommunizierenden Unterteams. Nur so gelingt es, ein Produkt als erster auf den Markt zu bringen, was für den wirtschaftlichen Erfolg von entscheidender Bedeutung ist. Diese 'Minimum Time to Market' dürfte auch künftig im globalen Wettbewerb weiter an Bedeutung gewinnen. Zeitminimierung kann aber nur auf der Basis einer integrierten Betrachtung erfolgen; in einem Entwicklungsprozess bei dem die wichtigsten Fragen bezüglich Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft bereits am Entwicklungsbeginn gestellt werden.

6.2. Integrierte Entwicklung: Industrie und Hochschule

Integrierte Entwicklung von chemischen Produkten und Prozessen heisst Synergien nutzen; Synergien zwischen Ökonomie, Umweltschutz/Sicherheit und der gesellschaftlichen Akzeptanz. Zweifellos ist die Ausnützung dieser Synergien eine entscheidende Voraussetzung für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit. Innovation durch integrierte Entwicklung ist ein anspruchsvoller aber chancenreicher Weg. Ein Weg, den die chemische Industrie in den letzten Jahren vermehrt zu beschreiten begann.

Künftig dürfte diese ganzheitliche Verantwortung für die Praxis noch wichtiger werden. Dies ist auch eine Herausforderung für die Hochschule, die hierfür die entsprechende Lehre und Forschung im interdisziplinären Hochschulverbund und

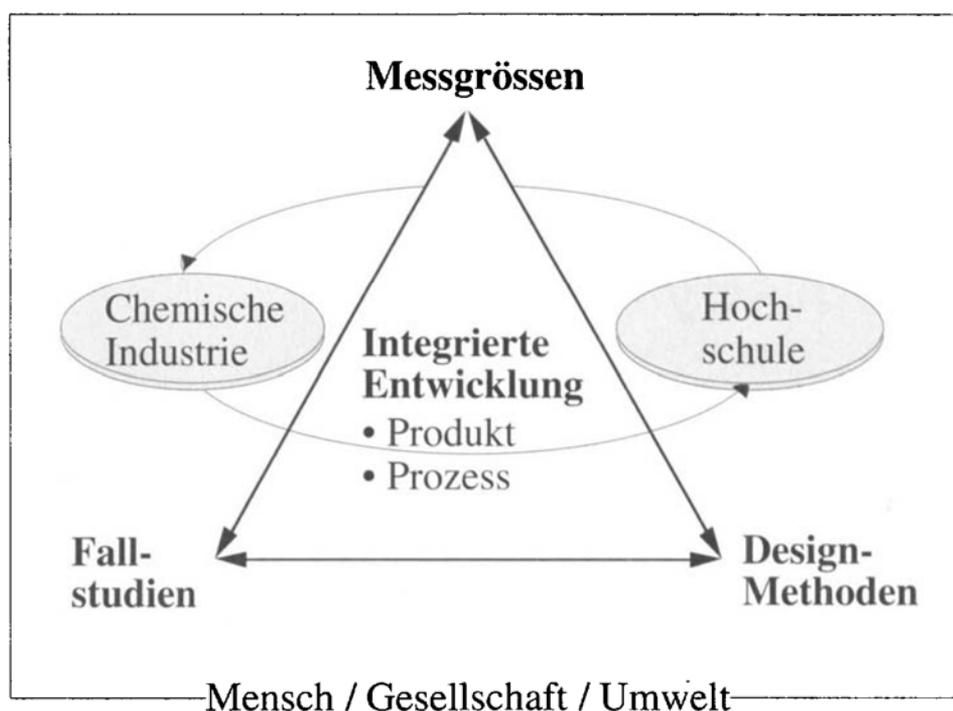


Fig. 12. Integrierte Entwicklung: Synergien zwischen Hochschule und Industrie

in enger Zusammenarbeit mit der chemischen Industrie aufzubauen hat (Fig. 12).

Im Vordergrund stehen dabei die drei Eckwerte:

- Aufarbeitung von Fallstudien für Lehre und Forschung
- Entwicklung stufengerechter Evaluations- und Designmethoden
- Charakterisierung relevanter Messgrössen.

Auf diesem Gebiet zu lernen, zu lehren und zu forschen, ist eine Aufgabe, die anspruchsvoll, aber für die Zukunftssicherung eine Notwendigkeit ist. Unsere noch junge Gruppe für Sicherheits- und Umwelttechnologie in der Chemie an der ETH-Zürich ist diesbezüglich im vollen Aufbruch. Basis für Lehre und Forschung sind aktuelle Innovationsbeispiele aus der industriellen Praxis. Dass hier Interessen der Geheimhaltung auch Grenzen setzen, ist verständlich. Das Schützenswerte gilt es dabei zu schützen, allerdings ohne das Substrat des Lehr- und Forschungsprozesses zu gefährden. Das ist eine wichtige gemeinsame Verantwortung von Hochschule und Industrie, geht es doch um die zukunftsweisende Chance, *Umweltschutz und Sicherheit von einer reaktiven und effizienzmindernden Grösse in eine proaktive und effizienzsteigernde Grösse überzuführen*. Geht es doch auch um die Chance, dass dieser Grundgedanke breiten Eingang in das Innovationsverständnis einer künftigen Chemie-Führungsgeneration findet. Diese Chancen für eine nachhaltige chemische Technologie gilt es zu nutzen.

Für die Hilfe bei der Redaktion danke ich Dr. A. Weidenhaupt und für die Gestaltung der Grafiken Frau S. Kriesi. Viele wertvolle Hinweise habe ich aus Diskussionen mit meiner Gruppe und mit Kollegen aus Industrie und Hochschule erhalten.

Eingegangen am 13. März 1995

- [1] S.M. Lemkowitz, *Plant/Operations Progress* **1992**, *11*, 140.
- [2] P. Coombes, *Chem. week* **1991**, *9*; A.F. Leuenberger, *Swiss. Chem.* **1993**, *15*, 7.
- [3] J.B. Wiesner, 'Produktionsintegrierter Umweltschutz in der chemischen Industrie', DECHEMA, GVC & SATW, Frankfurt/Main, 1990; G. Lipphardt, *Chem. Ing. Tech.* **1989**, *61*, 855.
- [4] R.A. Brealy, S.C. Myers, 'Principles of Corporate Finance', 4th edn., McGraw-Hill, Inc., New York, [a. o.], 1991.
- [5] H. Jonas, 'Das Prinzip Verantwortung: Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation', Insel Verlag, Frankfurt/Main, 1979.
- [6] O. Renn, *Gaia* **1993**, *2*, 67.
- [7] R.B. Gygas, 'Thermische Prozess-Sicherheit', Heft 8, 2. Aufl., ESCIS, Basel, 1989.
- [8] W. Regenass, U. Osterwalder, F. Brogli, *J. Chem. E. Symp. Ser.* **1984**, *87*, 369.
- [9] J. Ahlers, R. Diderich, U. Klaschka, A. Marschner, B. Schwarz-Schulz, *Environ. Sci. Pollut. Res.* **1994**, *1*, 117.
- [10] C.R. Flückiger, H. Kristinsson, R. Senn, A. Rindlisbacher, H. Buholzer, G. Voss, in 'Proceedings of Brighton Crop Protection Conference - Pests and Diseases', BCPC Registered Office, 1992, p. 43.
- [11] S. Kürüm, Z. Fonyo, O.M. Kut, *Chem. Eng. Commun.* **1995**, in press.