

Fortschrittsbericht · Progress Report

Kuppelproduktion und Umweltpolitik: Eine Fallstudie zur Chlorchemie und zur Schwefelsäureindustrie

Malte Faber, Frank Jöst, Reiner Manstetten und Georg Müller–Fürstenberger

Heidelberg, Alfred Weber-Institut, Ruprecht–Karls-Universität

Eingegangen am 29. Dezember 1994 bzw. 3. November 1995

Joint Production and Environmental Policy: A Case Study for the Chlorine and Sulphuric Acid Industry

Abstract. The chemical industry is a key sector of industrialised economy. Thus, environmental policy with a focus on the chemical industry is likely to affect the economy as a whole. In this article we show, that environmental regulation of the chemical industry has major consequences for other production sectors. Two major problem areas of the chemical industry are considered: the chlorine industry and the sulphur industry. While the chlorine industry can cope with environmental legislation by process and product innovation without a substantial impact on other sectors, this is not the

case with the sulphur industry. The production of its key product, sulphuric acid, utilises joint products of other sectors as inputs. The chemical industry offers these sectors the possibility to dispose of their unwanted by-products. Environmental policy, directed towards a reduction of sulphuric acid is likely to cause a waste disposal problem in sectors which manufacture sulphur or sulphur dioxide as by-products. Solving environmental problems within the chemical industry therefore creates new problems in other sectors.

Aus den meisten chemischen Reaktionen gehen zwangsläufig mehrere unterschiedliche Produkte hervor. Für die chemische Industrie bedeutet dies, daß aufgrund der Natur chemischer Reaktionen neben dem Zielprodukt fast immer zwangsläufig weitere Produkte entstehen. Diese Art der Produktion wird auch als Kuppelproduktion bezeichnet. Für die Entwicklung der chemischen Industrie ist seit ihren Anfängen im 18. Jh. die Kuppelproduktion von großer Bedeutung. Denn sie konfrontiert die chemische Industrie immer wieder mit der Frage, was mit den Kuppelprodukten geschehen soll.

Vier Fälle lassen sich unterscheiden:

1. Im günstigsten Fall lassen sich die Kuppelprodukte vermarkten oder in anderen Produktionsverfahren einsetzen. Ist das nicht möglich, dann stehen folgende Alternativen zur Verfügung:

2. Die Kuppelprodukte werden als Abfall, Abwasser und Abluft an die Umwelt abgegeben. Hierdurch kann allerdings die Aufnahmekapazität der Umweltmedien Boden, Luft und Wasser so sehr beansprucht werden, daß sich ihre Qualität wesentlich verschlechtert und Entsorgungsengpässe auftreten. Darauf können die Unternehmen mit den Alternativen 3 und 4 reagieren.

3. Es werden Entsorgungsverfahren wie Kläranlagen, Rauchgaswäscher, Elektrofilter etc. nachgeschaltet oder die Produktionsverfahren abgeändert, um die unerwünschten Kuppelprodukte zu vermeiden.

4. Durch Weiterverarbeitung der Kuppelprodukte werden marktfähige Güter hergestellt, oder die unerwünschten Kuppelprodukte werden in Stoffe umgewandelt, die problemlos entsorgt werden können.

Betrachtet man die Geschichte der chemischen Industrie, so stellt man fest, daß die Fälle 2–4 häufig nicht nebeneinander stehen, sondern eine zeitliche Struktur aufweisen. Vielfach wurden Kuppelprodukte zunächst in die Umwelt abgegeben (Fall 2), bis aufgrund von Umweltproblemen auf die Fälle 3 oder 4 übergegangen wurde. Diese Übergänge setzen in der Regel Innovationen sowie eine Ausweitung (Fall 3) und Umstrukturierung (Fall 4) des Kapitalgüterbestandes voraus. Es war häufig die Umweltpolitik, die mit neuen Gesetzen, Regelungen und Verordnungen solche Übergänge veranlaßte und damit zum Aufbau der für die chemische Industrie charakteristischen Produktionsverbände beitrug. Von dem Ideal einer vollständigen und rentablen Verwertung aller Kuppelprodukte innerhalb eines Produk-

tionsverbundes ist die chemische Industrie aber noch weit entfernt. Im Hinblick auf unerwünschte Kuppelprodukte der chemischen Industrie sind umweltpolitische Maßnahmen nach wie vor erforderlich [8]. Da die chemische Industrie zu den wichtigen Produktionssektoren unserer Volkswirtschaft gehört, haben größere umweltpolitische Eingriffe Auswirkungen auf die gesamte Wirtschaft, die von der Umweltpolitik zu berücksichtigen sind. Dabei muß man grundsätzlich zwei Problemfelder unterscheiden:

1. Es gibt Anpassungsprozesse in der chemischen Industrie, für die es typisch ist, daß andere Sektoren der Volkswirtschaft und die chemische Industrie selbst nur vergleichsweise kurz- oder mittelfristig betroffen sind. Diese Anpassungsprozesse können im wesentlichen innerhalb des Sektors der chemischen Industrie vollzogen werden, ohne daß Folgeprobleme größerer Art in anderen Sektoren zu erwarten sind. Sie sind daher, umweltpolitisch gesehen, intrasektoraler Art. Bei derartigen Anpassungsprozessen ist es hinreichend, wenn die Umweltpolitik einen Rahmen setzt, der innerhalb der chemischen Industrie die im Sinne des Umweltschutzes erwünschten Änderungen bewirkt. Beispiele dafür sind Probleme der gegenwärtigen Chlorchemie, die wir im folgenden Abschnitt genauer darstellen werden.

2. Es gibt aber auch umweltpolitisch notwendige Anpassungsprozesse in der chemischen Industrie, von denen sie selbst möglicherweise nur mittelfristig betroffen ist, die aber die Entwicklungsmöglichkeiten anderer Sektoren der Volkswirtschaft langfristig beeinflussen können. Da es hierbei um die Verflechtungen zwischen verschiedenen Sektoren geht, sprechen wir aus umweltpolitischer Sicht von intersektoralen Problemen. Ein Beispiel dafür stellt die Schwefelindustrie in ihrer Verflochtenheit mit den Unternehmen der Erdgas- und Mineralölverarbeitung und der Metallverhüttung dar. Wenn die Umweltpolitik zu einer Verringerung des Einsatzes von Schwefelsäure in der chemischen Industrie führt, dann hat das, wie wir unten ausführen werden, gravierende Auswirkungen auf die Unternehmen der Gas- und Mineralölverarbeitung und die Metallhütten. Eine langfristig angelegte Umweltpolitik muß derartige intersektorale Konsequenzen berücksichtigen. Mit anderen Worten: Die Umweltpolitik kann sich im Falle der Schwefelchemie nicht darauf beschränken, einen Rahmen für die chemische Industrie zu setzen, sondern muß beachten, daß umweltpolitische Maßnahmen bezüglich der Schwefelchemie in anderen Sektoren erhebliche Rohstoff- und Umweltprobleme mit sich bringen. Andernfalls würden die Anpassungskosten drastisch unterschätzt.

Beide Problemfelder wollen wir in ihrer Eigenart anhand der oben genannten Beispiele darstellen und danach umweltpolitische Schlußfolgerungen bezüglich der Schwefelindustrie formulieren.

Die Auswirkungen von Anpassungsprozessen in der chemischen Industrie werden häufig unterschätzt. Es ist die Hauptabsicht unserer folgenden Ausführungen zu zeigen, wie weitreichend die Folgen umweltpolitisch bedingter Anpassungen in der chemischen Industrie für andere Sektoren sein können. Daher steht nicht die gegenwärtig vieldiskutierte Chlorchemie¹⁾ mit ihren intrasektoral zu lösenden Problemen, sondern die Schwefelsäureproduktion mit ihren intersektoralen Verflechtungen im Zentrum unserer Untersuchung.

1 Die Chlor-Alkali-Industrie

Viele Probleme der Kuppelproduktion lassen sich nur verstehen, wenn man zeitliche Entwicklungslinien berücksichtigt. Die Geschichte der Chlor-Alkali-Industrie liefert ein Beispiel dafür, wie die Notwendigkeit der Entsorgung unerwünschter Kuppelprodukte zum Aufbau eines heute bedeutenden Industriezweiges geführt hat²⁾. So war es in Großbritannien nach der Verabschiedung des Chlor-Alkali-Aktes (1864) nicht mehr möglich, das unerwünschte Kuppelprodukt Chlorwasserstoff aus der Sodaproduktion an die Umwelt abzugeben. Deshalb wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubte, aus dem umweltbelastenden Chlorwasserstoff vermarktungsfähiges Chlor herzustellen. Hieraus entwickelte sich die Chlorchemie, die heute europaweit einen großen Anteil am Umsatz (schätzungsweise 60%, vgl. [3]) der chemischen Industrie hat. Sie leistet damit einen volkswirtschaftlich signifikanten Beitrag zur Erstellung des Sozialproduktes.

Allerdings sind mit der Erzeugung von Chlor, der Verwendung von Chlor als Prozeßchemikalie sowie der Herstellung und Verwendung chlorhaltiger Verkaufsprodukte viele Umweltprobleme verbunden. Die Lösung des ursprünglichen Umweltproblems durch den Aufbau der Chlorchemie seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts hat also zu neuen Problemen geführt. Auch hierauf reagierte die chemische Industrie. Chlorparaffine als Kühlschmierstoffe beispielsweise, die einige Umweltschutzorganisationen als umweltgefährdend einschätzen, wurden von der Hoechst AG aus dem Produktionsprogramm entfernt [6]. Auch ist festzustellen, daß zwischen 1988 und 1991 die produzierte Chlormenge in den alten Bundesländern um ca. 13% [19] zurückging.

Zu einem signifikant verringerten Chlorbedarf haben Maßnahmen des produktionsintegrierten Umweltschut-

¹⁾ Eine detaillierte Betrachtung der Chlorchemie in ihrem Bezug zur Kuppelproduktion findet sich in [9].

²⁾ Eine ausführliche Darstellung der Geschichte der Chlor-Alkali-Industrie findet sich in [15].

zes in der chemischen Industrie beigetragen [8]. Es werden zunehmend neue Verfahren eingeführt, bei denen Prozeßchemikalien wie Chlor im Kreislauf geführt werden oder die es ermöglichen, mit weniger Inputs und damit auch mit weniger Abfällen den gleichen Output zu produzieren. Diese Prozeßsubstitutionen beeinflussen allerdings auch andere Produktionsbereiche innerhalb der chemischen Industrie. Da Chlor und Natronlauge Kuppelprodukte der Chlor-Alkali-Elektrolyse sind, führt ein Rückgang der Chlorproduktion nämlich gleichfalls zu einer Verminderung der Natronlaugeproduktion. Allerdings entstehen hierdurch keine größeren Probleme, denn Natronlauge ist in vielen Fällen durch Soda substituierbar bzw. aus Soda herstellbar. Damit kann also die starre Verbindung des Angebotes von Chlor und Natronlauge mittel- bis langfristig aufgelöst werden. Zwar ist auch die gegenwärtige Sodaproduktion nach dem Solvay-Verfahren nicht frei von unerwünschten Kuppelprodukten. Durch eine verstärkte Nutzung natürlicher Sodavorkommen, die in den USA in umfangreichem Maße vorhanden sind, lassen sich jedoch auch diese Kuppelprodukte vermeiden. Hinzu kommt, daß Natronlauge oftmals nur als Katalysator verwendet wird. Sie kann dann prinzipiell wieder aufbereitet werden, so daß die erforderliche Primärproduktion sinkt. Wegen der hohen Kosten unterbleibt die Aufbereitung von Natronlauge in der Praxis jedoch zumeist. Eines der wenigen Beispiele für Natronlaugeaufbereitung findet sich in der Viskosefaserherstellung, wo die verbrauchte Tauchlauge zu einer Löselauge aufbereitet wird. Charakteristisch für die Chlorchemie ist, daß entsprechende Umweltprobleme weitgehend durch Verfahrensänderungen und Produktsubstitutionen innerhalb der chemischen Industrie gelöst werden können [8]: So lassen sich beispielsweise bei der Herstellung von Isocyanaten chlorhaltige Rückstände durch Kreislaufführung nahezu vollständig vermeiden. Auch für chlorhaltige Verkaufsprodukte sind Ersatzstoffe entwickelt worden. Mit Polypropylen existiert beispielsweise in vielen Verwendungen ein Substitut für Polyvinylchlorid (PVC). Damit kann die chemische Industrie zumindest hinsichtlich der Kuppelproduktion von Chlor und Natronlauge auf veränderte Rahmenbedingungen mittelfristig reagieren.

Zusammenfassend ist festzuhalten: Bei den umweltpolitisch bedingten Strukturänderungen in der Chlorchemie treten sowohl für die chemische Industrie als auch für andere Sektoren der Volkswirtschaft allenfalls mittelfristige Anpassungsprobleme auf. Da, wie oben ausgeführt, mit Soda sowohl ein Substitut als auch ein Vorprodukt der Natronlaugeherstellung zur Verfügung steht, sind bei Produktionsprozessen, die Natronlauge benötigen, kaum größere Friktionen zu erwarten. Und für chlorhaltige Endprodukte existieren in vielen Verwendungen ebenfalls Substitute.

Die Struktur der Kuppelproduktion erschwert zwar die Änderung der Produktionsverfahren in der chemischen Industrie, das Beispiel der Chlor-Alkali-Industrie zeigt aber auch in der Tendenz, daß die chemische Industrie derartige Probleme lösen kann (vgl. hierzu auch [4]).

2 Schwefelsäureproduktion und intersektorale Verflechtungen

Im Zentrum der Schwefelchemie steht die Schwefelsäure. Sie dient bei zahlreichen Produktionsverfahren der chemischen Industrie als Prozeßchemikalie und gilt als Schlüsselverbindung der chemischen Industrie. Mit einer weltweiten Produktion von 145 Mio Jahrestonnen [14] ist sie mengenmäßig das wichtigste Produkt der chemischen Industrie. Die Umweltprobleme, die durch Schwefelverbindungen in Form von Sulfaten und Dünnsäure verursacht werden, sind größtenteils auf den Einsatz von Schwefelsäure zurückzuführen.

Die spezifische Problematik mit schwefelhaltigen Produktionsrückständen besteht darin, daß (i) die Maßnahmen der chemischen Industrie zur Verringerung dieser Umweltprobleme denen der Chlorchemie zwar ähnlich sind, daß jedoch (ii) in viel stärkerem Ausmaße als bei der Chlorchemie andere Sektoren der Volkswirtschaft von Anpassungsmaßnahmen betroffen werden. Um diese beiden Gesichtspunkte zu verdeutlichen, wollen wir zunächst einige historische Entwicklungslinien der Schwefelsäureproduktion nachzeichnen (Eine Beschreibung der frühen Geschichte der Schwefelsäureindustrie findet sich auch in [5], vgl. auch [13]).

2.1 Historische Entwicklung der Schwefelsäuretechnik

Die Entwicklung der Schwefelsäureherstellung vollzog sich in vier Phasen: In der ersten Phase (1774–1838) benötigte der britische Textilsektor große Mengen Schwefelsäure. Denn zum einen eignete sich Schwefelsäure zum Waschen von Rohmaterialien, zum anderen wurde zur Herstellung von Soda, einer wichtigen Chemikalie der Textilproduktion innerhalb des damals gebräuchlichen Leblanc-Verfahrens, Schwefelsäure als Prozeßchemikalie benötigt.

Die Herstellung der Schwefelsäure basierte auf elementarem, aus Sizilien importiertem Schwefel. Dieser Elementarschwefel wurde in sogenannten Bleikammeranlagen zunächst zu Schwefeldioxid und dann zu Schwefeltrioxid oxidiert. Darauf folgte die Umsetzung zu Schwefelsäure. Die Schwefelverbrennung in den Bleikammeranlagen führte aber auch zu Kuppelprodukten. Insbesondere ging ein erheblicher Teil des dabei entstehenden Schwefeldioxids aufgrund technischer Unzulänglichkeiten verloren und gelangte in die Umwelt. In diesem Fall bestand ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen emittiertem Schwefeldioxid, Um-

weltbelastung und verringerter Säureausbeute.

Die erste Phase der Schwefelsäureproduktion beendete unwillentlich der König von Sizilien, indem er den Schwefelexport monopolisierte. Denn aufgrund der daraus folgenden drastischen Preiserhöhungen wurde aus der Sicht der nachfragenden Länder eine Rohstoffsubstitution notwendig.

Diese Rohstoffsubstitution markiert den Beginn der zweiten Phase, die von 1838–1900 währte. In diesem Zeitraum wurden schwefelhaltige Metallerze, vor allem Pyrite, als Rohstoffquelle entdeckt und erschlossen. In dieser Phase begann auch der Aufbau der deutschen Schwefelsäureindustrie. In Deutschland diente die Schwefelsäureproduktion hauptsächlich der Verwertung eines lästigen Kuppelproduktes der Metallhütten, nämlich des Schwefeldioxides. Die Metallhütten verarbeiteten schwefelhaltige Metallerze als Rohstoff, was beim Röstvorgang zu Emissionen von Schwefeldioxid führte. Die negativen Folgen für die Umwelt zogen Entschädigungsansprüche nach sich, welche wiederum die Verarbeitung des Schwefeldioxids zu Schwefelsäure motivierten.

Indem die chemische Industrie mit Schwefeldioxid auf ein Kuppelprodukt aus den Metallhütten zurückgriff, ergaben sich Vorteile für beide Seiten: Die Metallhütten hatten eine Entsorgungsmöglichkeit für das Schwefeldioxid, und die chemische Industrie hatte ein Substitut für den elementaren Schwefel aus Sizilien.

In der zweiten Hälfte der zweiten Phase veränderten sich auch die Nachfragebedingungen. Zwei Nachfragekomponenten kamen hinzu: die Düngemittelproduktion und die Teerfarbenherstellung. Für die Teerfarbenherstellung wurde hochkonzentrierte Schwefelsäure, das Oleum, benötigt. Der hohe Preis für Oleum veranlaßte die Innovation des Winklerschen Kontaktverfahrens, der Kniesch mit seine systematischen Studien den Weg bereitet hatte [14]. Dieses Verfahren wurde in den Folgejahren so weit verbessert, daß auch die Herstellung von Kammersäure (so wurde die in den Bleikammern hergestellte Schwefelsäure genannt) nach dem Kontaktverfahren rentabel wurde.

Die dritte Phase ist gekennzeichnet von der Ablösung des Bleikammer- durch das Einfachkontaktverfahren. Sie dauerte von 1900–1963. Der Anlagenbestand der Bleikammeranlagen konnte zum Teil weiterverwendet werden, bis er durch Gebrauch abgenutzt war, denn die mittlere Lebensdauer einer Bleikammeranlage betrug bei intensiver Nutzung nur acht bis zehn Jahre. Da der Bestand nicht mehr erneuert werden mußte, brachte dieser kontinuierliche Technikwechsel keine unmittelbaren Kapitalverluste mit sich.

Die Entwicklung von vanadiumhaltigen Kontakten als Katalysatoren war die Voraussetzung für den Beginn der vierten Phase ab 1963. In diesem Jahr führte die Bayer AG das Doppelkontaktverfahren ein, das eine

verbesserte Ausbeute an Schwefelsäure und damit eine weitere Verringerung der Schwefeldioxidemissionen ermöglicht. Das Doppelkontaktverfahren ist bis heute Stand der Technik. Die Herstellung der Schwefelsäure mit dem Doppelkontaktverfahren führt zu vernachlässigbar geringen Schadstoffemissionen. Da als Vorprodukt Schwefeldioxid benötigt wird, eignet sich das Verfahren sogar zur Verwertung dieses Schadstoffes. Das Schwefeldioxid muß jedoch relativ hoch konzentriert sein. Gase aus der Röstung sulfidischer Erze oder aus dem Müller–Kühne-Verfahren erreichen diese Konzentration beispielsweise nicht. Bei und nach der Verwendung von Schwefelsäure treten jedoch erhebliche Umweltprobleme auf. Durch ihre Verwendung als Prozeßchemikalie erfährt die Schwefelsäure chemische und/oder physikalische Veränderungen und wird zum unerwünschten Kuppelprodukt in Form von Dünnsäure oder schwefelhaltigen Salzen wie Natriumsulfat.

2.2 Mögliche künftige Entwicklungen der Schwefelsäuretechnik

Die Geschichte der Schwefelchemie hat gezeigt, wie sehr ihre Entwicklung durch Rohstoff-, Umweltschutz- und Nachfragebedingungen beeinflusst wurde. Weiter wurde deutlich, daß viele schwierige Probleme durch die Kreativität von Wissenschaftlern, Technikern und Unternehmern gelöst werden konnten. Es waren aber große Zeiträume nötig, um die Lösungen wissenschaftlich, technisch und wirtschaftlich durchzusetzen: Verfahren mußten gefunden sowie technisch und betriebswirtschaftlich realisiert werden. Vor diesem Hintergrund ist es zulässig, von der Hypothese einer sehr anpassungsfähigen Technologie im Bereich der Schwefelchemie auszugehen. Zusätzlich stützen die bereits absehbaren Möglichkeiten, Stoffkreisläufe in der Schwefelchemie zu schließen, diese Hypothese. Eine dieser Möglichkeiten stellen wir im folgenden dar. Es handelt sich um die Kuppelproduktion von Natriumsulfat, das unter der Bezeichnung Glaubersalz bekannt ist. Informationsgrundlage ist die verfahrenstechnische Literatur [1]. Auf die Möglichkeiten, andere Rückstände der Schwefelchemie wie Abfallsäuren und Gips mit produktionsspezifischen Beimengungen zu verwerten, wird in [12] eingegangen.

Glaubersalz ist ein typisches Produkt mit dualem Charakter: Einerseits wird es bei der Glasherstellung als Hilfsstoff benötigt, andererseits entspricht es im Abwasserstrom chemischer Betriebe einem unerwünschten Kuppelprodukt. Einer der wenigen dokumentierten Fälle, in denen die Produktion nachweislich wegen umweltpolitischer Maßnahmen eingestellt wurde, ist auf Glaubersalz als unerwünschtes Kuppelprodukt zurückzuführen. Es handelt sich dabei um die Herstellung von Resorcin und β -Naphthol durch die Hoechst AG. Die

Produktion dieser wichtigen Verbindungen wurde 1992 eingestellt, weil die vorgeschriebene Entfernung des Glaubersalzes aus dem Abwasserstrom zu teuer war [7].

Da es auch nützliche Verwendungen des Glaubersalzes gibt, ist es nicht in allen Fällen gerechtfertigt, von unerwünschter Kuppelproduktion auszugehen. Jedoch sind die anfallenden Mengen an Glaubersalz so hoch, daß sie insgesamt weit über das erwünschte Maß hinausgehen. Allein die Herstellung von Viskose-Fasern bedingt in Europa einen Zwangsanfall von ca. 305.000 Jahrestonnen Glaubersalz [17]. Zum Vergleich hierzu, belief sich die gesamte Produktion von Glaubersalz in der Bundesrepublik Deutschland 1988 auf ca. 175.000 Tonnen [17].

Bei der Herstellung folgender Erzeugnisse kann Glaubersalz als Kuppelprodukt anfallen: Viskose-Fasern, Natriumdichromat, Ascorbinsäure nach dem Reichenstein-Güssner-Prozeß, Borsäure, Chlordioxid, Hydroxylamin, Lithiumcarbonat, Resorcin, Methionin, Ameisensäure. Ob Glaubersalz als unerwünschtes Kuppelprodukt auftritt, hängt vom jeweils technisch realisierten Reaktionsweg ab. Bei der Bayer AG beispielsweise erfolgt die Produktion von Natriumdichromat und Hydroxylamin weitestgehend ohne den Einsatz von Schwefelsäure und damit auch ohne Glaubersalz als Kuppelprodukt³⁾.

Ursächlich für die Kuppelproduktion von Glaubersalz bei der Herstellung von Viskose-Fasern ist der Spinnvorgang in einem Schwefelsäurebad. Bis heute ist kein Verfahren der Viskosefaser-Herstellung bekannt, bei dem sich Schwefelsäure substituieren läßt.

Bei den anderen Erzeugnissen besteht im Gegensatz zu den Viskose-Fasern die Möglichkeit, das Kuppelprodukt Glaubersalz durch Verfahrensumstellungen zu vermeiden. Beispielsweise kann Ameisensäure auf Synthesegasbasis ohne das Kuppelprodukt Glaubersalz hergestellt werden. Die Methionin-Herstellung nach der Bucherer-Aminosäure-Synthese erfolgt ebenfalls ohne Glaubersalz als Kuppelprodukt. Es bleibt damit festzuhalten: Durch Prozeßsubstitution ist das Kuppelprodukt Glaubersalz in den meisten Fällen zu vermeiden, abgesehen von der Herstellung von Viskose-Fasern.

Existiert keine Prozeßalternative, um Glaubersalz zu vermeiden, so bleibt immer noch die technisch mögliche Entfernung aus dem Abwasser. Das so gewonnene Glaubersalz kann elektrochemisch zerlegt werden, wobei Schwefelsäure und Natronlauge entstehen.

An dieser Stelle besteht ein Zusammenhang zu den Stoffströmen der Chlor-Alkali-Industrie. Durch die Verwertung von Glaubersalz kann Natronlauge hergestellt werden, die bisher hauptsächlich in Kuppelproduktion mit Chlor erzeugt wird. Die elektrochemische Zerlegung von Glaubersalz ermöglicht somit eine Fle-

xibilisierung der Kuppelproduktion von Chlor und Natronlauge. Bei einer umweltpolitisch bedingten Verwendungseinschränkung von Chlor besteht somit die Möglichkeit eines anderen Zugangs zur Natronlauge. Der erforderliche Energieeinsatz zur Herstellung einer Tonne Natronlauge über die elektrochemische Zersetzung von Glaubersalz beträgt allerdings 3.500–4.000 kWh je Tonne Natronlauge, ist also höher als bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse, bei der in modernen Anlagen nur 2.200 kWh je Tonne benötigt werden. Neuere Entwicklungen von Allied-Signal auf dem Gebiet der Elektrodialyse erlauben jedoch die Herstellung von Natronlauge über Glaubersalz mit einem Energieeinsatz von nur 1.700 kWh/t Natronlauge. Allerdings sind die Elektrolysezellen für Glaubersalz technisch aufwendiger und erfordern somit einen höheren Kapitaleinsatz. Bei einem Kostenvergleich sind zudem die Gutschriften aus dem Verkauf des Chlors zugunsten der Chlor-Alkali-Elektrolyse zu berücksichtigen. Einem niedrigeren Energieverbrauch steht somit eine höhere Kapitalbindung und fehlende Gutschriften aus dem Verkauf von Kuppelprodukten entgegen. Unter diesen Bedingungen ist die Elektrodialyse von Glaubersalz nicht konkurrenzfähig.

Unser Ergebnis bezüglich der Möglichkeiten, Schwefelkreisläufe in der chemischen Industrie zu schließen, lautet: Aufgrund der Vielfalt möglicher Verfahren und eines Verwertungsprozesses verfügt die chemische Industrie über die nötige Flexibilität, das Kuppelprodukt Glaubersalz weitgehend zu vermeiden oder zu verwerten. Umweltpolitisch bedingte Entsorgungseingpässe führen folglich nicht zwangsläufig zu Produktionsstillegungen. Die Verwertung von Glaubersalz zu Schwefelsäure und Natronlauge ermöglicht zudem eine Flexibilisierung des Produktmengenverhältnisses von Chlor und Natronlauge und eine Senkung der Primärproduktion von Schwefelsäure und Natronlauge.

Diese Maßnahmen des produktionsintegrierten Umweltschutzes führen dazu, daß der Nettoverbrauch von Schwefelsäure und damit auch der Schwefelverbrauch in der chemischen Industrie zurückgeht. Dies ist im Sinne geschlossener Materialkreisläufe zu begrüßen. Allerdings verursacht diese Entwicklung nicht unerhebliche Folgeprobleme in anderen Sektoren der Volkswirtschaft. Das Problem einer Verringerung der Schwefelsäureproduktion besteht nämlich darin, daß ein großer Teil des Schwefels in anderen bedeutenden Sektoren der Volkswirtschaft als Kuppelprodukt zwangsläufig anfällt. Damit sind wir mit einem im Vergleich zur Chlorchemie neuen Problem konfrontiert, und zwar dem Problem der sektorübergreifenden Kuppelproduktion.

Dies wird anhand der Bezugsquellen des Schwefels deutlich.

³⁾ Diesen Hinweis erhielten wir von Herrn Dr. W. Becker, Bayer AG.

2.3 Die Herkunft des in der Schwefelsäureproduktion eingesetzten Schwefels

Der in der chemischen Industrie zur Schwefelsäureproduktion eingesetzte Schwefel stammt aus mehreren Quellen, die in Tabelle 1 angegeben sind.

Tab.1 Rohstoffquellen der Schwefelsäureproduktion in Deutschland (1991) (berechnet auf SO₃). Quelle: [20].

Herkunft	Menge (Tonnen)
Sulfide (außer Kies)	745.185
Schwefelkies	348.810
Schwefel	1.109.850
Sonstige	951.300

Aus Zeile 1 dieser Tabelle wird deutlich, daß ein großer Teil der Schwefelsäure ein Kuppelprodukt der Metallverhüttung ist. Insbesondere bei der Verarbeitung von Nichteisenmetallerzen (Sulfide) entstehen aufgrund des Schwefelgehaltes der Erze erhebliche Mengen Schwefeldioxid, die zu Schwefelsäure weiterverarbeitet werden. Da diese Säure mit Schwermetallen verunreinigt ist, eignet sie sich nicht für alle Schwefelsäureanwendungen. Nicht von ungefähr wird die Schwefelsäure aus den Nichteisenmetallhütten als Acid fatale bezeichnet [18]. Verlieren die Metallhütten diese Verwertungsmöglichkeit, so müssen die üblichen Rauchgaswäschen mit Gips als Kuppelprodukt durchgeführt werden. Dadurch verschlechtert sich aber die Wirtschaftlichkeit der Metallhütten. Denn statt eines Gewinns durch den Verkauf von Schwefelsäure, entstehen dann Kosten für die Entsorgung. Zudem wird durch die Aufarbeitung zu Gips ein Abfallbestand aufgebaut, der sich zwangsläufig zu einem Mengenproblem auswachsen wird.

An zweiter Stelle steht die Herstellung von Schwefelsäure auf der Basis von Schwefelkies (Pyrit), vgl. Tabelle 1, Zeile 2. Auch hier erfolgt die Schwefelsäureproduktion in Kuppelproduktion mit Metallen, die im sogenannten Abbrand enthalten sind. Schwefelsäure aus Schwefelkies ist doppelt so teuer wie Schwefelsäure aus elementarem Schwefel. Dieses Kostendifferential besteht trotz Gutschriften aus der Weiterverarbeitung des Abbrandes in der eisenschaffenden Industrie und der Zementherstellung. Die Gutschriften reichen nicht aus, um eine signifikante Verbilligung der Schwefelsäure aus dieser Rohstoffquelle zu ermöglichen.

An dritter Stelle steht die Herstellung von Schwefelsäure, die auf elementarem Schwefel basiert (vgl. Tabelle 1, Zeile 3) und mengenmäßig die Tabelle anführt. Ein Großteil dieses elementaren Schwefels ist sogenannter Rekuperationsschwefel, der bei der Erdöl- und Erdgasreinigung anfällt. Bevor Erdöl und Erdgas weiterverarbeitet, bzw. verteilt werden kann, muß es von Be-

gleitstoffen gereinigt werden. Zu diesen Begleitstoffen gehören Schwefelverbindungen. Beim Erdgas handelt es sich um Schwefelwasserstoff, beim Erdöl um diverse Schwefelverbindungen, die erst bei der Hydorraffination zu Schwefelwasserstoff reagieren. Mit dem Claus-Verfahren ist es möglich, Schwefelwasserstoff zu Elementarschwefel weiterzuverarbeiten, dem sogenannten Rekuperationsschwefel. 1980 stammten weltweit 65% des Schwefels aus diesen Quellen. Rekuperationsschwefel wird zum größten Teil zu Schwefelsäure weiterverarbeitet. Damit ermöglicht die chemische Industrie den Sektoren Mineralölverarbeitung und Erdgasaufbereitung bislang die Verwertung eines Kuppelproduktes. In Tabelle 2 ist die Herkunft des Rekuperationsschwefels für Deutschland angegeben:

Fassen wir zusammen: Schwefelsäure ist ein Folge-

Tab. 2 Herkunft des Rekuperationsschwefels in %, Deutschland 1993. Quelle: [2].

Herkunft	Menge (%)
Erdgas	57,5
Öl	42,5

produkt von Schwefeldioxid oder Elementarschwefel. Sowohl Schwefeldioxid als auch Elementarschwefel sind Kuppelprodukte in anderen Sektoren, denen die Schwefelsäureherstellung bisher eine Verwertungsmöglichkeit öffnet. Eine Verringerung der Schwefelsäure-Primärproduktion würde deshalb zu Entsorgungsengpässen des Schwefels- bzw. Schwefeldioxids in diesen Sektoren führen. Drei Industriezweige sind, wie oben schon erwähnt, besonders betroffen: die Metallhütten sowie die Mineralöl- und Erdgasverarbeitung.

Bis heute stellt die chemische Industrie damit drei wichtigen Sektoren der Volkswirtschaft einen Entsorgungsweg für ihre unerwünschten Kuppelprodukte zur Verfügung. Diese Struktur der sektorübergreifenden Kuppelproduktion ist in Abbildung 1 graphisch dargestellt. In Abbildung 1 erkennt man, daß im Gegensatz zur Chlorchemie die Lösung von Problemen im Bereich der unerwünschten Schwefelverbindungen eine über die chemische Industrie hinausgehende Betrachtungsweise erfordert. Denn durch die Verringerung des Einsatzes von elementarem Schwefel oder von Schwefeldioxid zur Schwefelsäureherstellung – sei es durch Kreislaufführung oder sei es durch Verfahrenssubstitution in der chemischen Industrie – entfallen Entsorgungsmöglichkeiten des unerwünschten Kuppelproduktes Schwefel bzw. Schwefeldioxid für die Metallhütten sowie für die Mineralöl- und Erdgasverarbeitung. Dies ist von erheblicher Bedeutung, da es sich bei diesen Sektoren um Schlüsselsektoren der Volkswirtschaft handelt. Dies

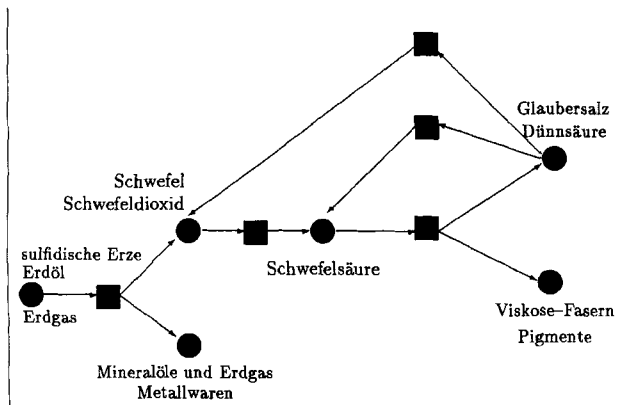


Abb. 1 Schematische Darstellung der Struktur der sektorübergreifenden Kuppelproduktion. Die Kästchen stehen für die jeweiligen Produktionsverfahren; die Kreise bezeichnen deren Inputs bzw. Outputs.

gilt sowohl hinsichtlich ihrer Funktion als Lieferanten essentieller Inputs für die gesamte volkswirtschaftliche Produktion als auch hinsichtlich ihres Anteils am Sozialprodukt. Eine für die Metallhütten sowie Mineralöl- und Erdgasverarbeitung restriktive Umweltpolitik bezüglich der Entsorgungsmöglichkeiten ihrer schwefelhaltigen Produktionsrückstände in der chemischen Industrie würde somit vielfältige Rückwirkungen auch in den oben genannten Sektoren hervorrufen.

Daraus ergibt sich ein Dilemma: Die chemische Industrie verfügt über erhebliche Potentiale, um ihren Schwefelsäureverbrauch zu verringern. Dem dadurch geringeren Verbrauch an Schwefel und Schwefeldioxid steht jedoch ein gleichbleibendes oder sogar steigendes Angebot an Schwefel und Schwefelverbindungen aus der Mineralöl- und Erdgasverarbeitung sowie den Metallhütten gegenüber [15]. Verringert also die chemische Industrie ihre Schwefelnachfrage, dann stellt sich die Frage, was mit den schwefelhaltigen Kuppelprodukten aus den beiden anderen Sektoren geschehen soll.

3. Umweltpolitische Schlußfolgerungen

Bei der Gestaltung umweltpolitischer Maßnahmen in Form von markt- und ordnungsrechtlichen Instrumenten müssen ganz allgemein die folgenden beiden Gesichtspunkte beachtet werden (vgl. z.B. [11]):

Den direkt und indirekt betroffenen Industrien müssen genügend große Zeiträume für ihre Anpassungsreaktionen eingeräumt werden, denn sonst würde es zu beträchtlichen und volkswirtschaftlich unerwünschten Friktionen kommen. Diese bestehen in der vorzeitigen Entwertung von Kapitalgütern und Anlagen sowie in Preisverschiebungen, welche nicht zuletzt aufgrund der Gefährdung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit zu beträchtlichen Beschäftigungseinschränkungen führen.

Die Umweltvorschriften müssen so gewählt werden, daß den Unternehmern, Technikern und Wissenschaftlern ausreichende Spielräume zur selbständigen Gestaltung belassen werden. Denn die Problematik und die Interdependenz der Zusammenhänge ist so komplex, daß eine ins Detail gehende staatliche Vorschrift die Kreativität der betroffenen Industrie zu sehr einschränken würde.

Im Falle der Chlorchemie kann die Berücksichtigung dieser beiden Gesichtspunkte mittelfristig zu einer Lösung der mit Chlorprodukten zusammenhängenden Umweltprobleme führen. Eine maßvolle Umweltpolitik hat in diesem Fall nur die Aufgabe, einen Rahmen zu setzen, der die Tendenz der heutigen chemischen Industrie zu Maßnahmen des produktionsintegrierten Umweltschutzes fördert.

Betrachtet man die Schwefelindustrie nun isoliert von anderen Sektoren der Volkswirtschaft, so könnten hier Empfehlungen gegeben werden, die denen bezüglich der Chlorchemie weitgehend entsprechen: Umweltpolitische Maßnahmen sollten die Schließung von Schwefelkreisläufen sowie die Senkung der Primärproduktion von Schwefelsäure im Rahmen des produktionsintegrierten Umweltschutzes fördern.

Diese Empfehlung wird indessen problematisch, wenn man ihre Folgen für andere wesentliche Sektoren unserer Wirtschaft berücksichtigt. Zwar ist es zutreffend, daß jede umweltpolitische Veränderung in einem Produktionssektor aufgrund der Lieferverflechtungen auch Auswirkungen auf andere Industriezweige hat. Dennoch sind wir hier mit einem besonderen Fall konfrontiert. Wie oben ausgeführt, stellt die chemische Industrie wichtigen Sektoren in der Wirtschaft Entsorgungskapazitäten für die Kuppelprodukte Schwefeldioxid und Elementarschwefel zur Verfügung. Bis dato sorgt also die unter Umweltschutzgesichtspunkten bedenkliche Schwefelchemie dafür, daß die anderen Sektoren hinsichtlich der mit Schwefelverbindungen zusammenhängenden Kuppelproduktion keine Entsorgungsprobleme haben. Fallen die Entsorgungskapazitäten der chemischen Industrie durch die entsprechenden Umweltschutzmaßnahmen weg, dann entstehen in den Sektoren Mineralöl- und Erdgasverarbeitung und in den Metallhütten neue Umweltprobleme. Das bedeutet aber: Je erfolgreicher die chemische Industrie der Schwefeltechnik ihre Umweltprobleme löst, insbesondere je geringer die Primärproduktion von Schwefelsäure im Rahmen des produktionsintegrierten Umweltschutzes ausfällt, desto größer werden die Umweltprobleme in den Metallhütten bzw. in der Mineralöl- und Erdgasverarbeitung. Mit anderen Worten: Eine Lösung der Umweltprobleme innerhalb der Schwefelchemie führt zum Auftreten größerer Umweltprobleme in den Unternehmen der Metallverhüttung und der Mineralölverarbeitung und Gasaufbereitung.

Nun hat es den Anschein, daß diese Verschiebung von Umweltproblemen weg von der chemischen Industrie zu den genannten beiden Sektoren nichts Negatives sein müßte. Denn man könnte annehmen, daß sich unter Beachtung der zu Beginn dieses Abschnittes genannten Gesichtspunkte (i) und (ii) für die Unternehmen der Metallverhüttung und der Mineralöl- und Erdgasverarbeitung ein umweltpolitischer Rahmen setzen ließe, der entweder zur Vermeidung der schwefelhaltigen Kuppelprodukte oder zu ihrer Umwandlung in verwertbare bzw. problemlos zu entsorgende Produkte führen könnte.

Kurzfristig spricht einiges für diese Annahme. Demgemäß könnte die Umweltpolitik durch ordnungsrechtliche oder marktwirtschaftliche Instrumente darauf hinwirken, daß die Metallhütten die Verwendung nichtschwefelhaltiger Erze intensivieren und die Unternehmen der Mineralölverarbeitung zu schwefelärmeren Erdölvorkommen übergehen. Ein solches Verhalten der betroffenen Unternehmen würde jedoch langfristig, insbesondere wenn es in anderen Ländern Schule machen würde, die Menge der erschöpfbaren Rohstoffe durch den Ausschluß stark schwefelhaltiger Materialien beträchtlich verringern und damit die Rohstoffbasis der Weltwirtschaft bezüglich Metallen und Mineralöl deutlich verkleinern. Hinzu kommt, daß viele Metalle, wie Cobalt, Nickel, Zink und Blei, in der Natur fast nur als sulfidische Erze vorkommen. Die Substitutionsmöglichkeiten sind deshalb sehr eingeschränkt. Versuchte man, das Mineralöl wenigstens bei der Energieproduktion durch schwefelfreies Erdgas zu ersetzen⁴⁾, so würde das eine gewaltige Umstrukturierung des Kapitalgüterbestandes bedeuten. Außerdem wäre auch in diesem Fall die Rohstoffbasis verringert worden.

Angesichts der Schwierigkeiten, die bei der Vermeidung auftreten, kann man sich überlegen, ob der in den Sektoren Nichteisenmetalle sowie Mineralöl- und Erdgasverarbeitung anfallende Schwefel, wenn er nicht mehr in der chemischen Industrie verwendet werden kann, nicht auf andere Weise verarbeitet und verwertet werden könnte. Bei einer energetischen Verwertung würde Schwefeldioxid entstehen, das mit Hilfe von Rauchgaswäschen in Gips verwandelt werden könnte. Diese Verfahren sind aus den Kohlekraftwerken bekannt. Allerdings entsteht bereits bei der Rauchgasreinigung in den Kohlekraftwerken weit mehr Gips, als vom Markt aufgenommen werden kann. Schon jetzt bestehen Deponieprobleme, die durch Auswaschung verschärft werden. Diese Probleme würden sich gewaltig vergrößern, wenn der gesamte Schwefel aus den Unternehmen der Metallverhüttung und der Mineralöl- und Erdgasverarbeitung zu Gips weiterverarbeitet würde.

Wenn wir die Problematik der bisher vorgeschlagenen Lösungen zusammenfassen, ergibt sich: Für die Entsorgung des Schwefels aus den beiden genannten Sektoren ist bisher keine Lösung zu sehen. Gelingt es dagegen den beiden Sektoren, durch die Verwendung weniger schwefelhaltiger Rohstoffe den Ausstoß an Schwefel zu verringern, so führt das zu Rohstoffproblemen. Allerdings könnten diese Probleme auf dreierlei Weise entschärft werden:

1. Die Kreativität von Wissenschaftlern, Technikern und Unternehmern könnte zu Erfindungen führen, die die Rohstoffbasis und die Verwertungsmöglichkeiten entscheidend verbessern. Damit würde die Angebotsseite einer Wirtschaft grundlegend in einer für die Umwelt günstigen Weise verändert. Dabei ist allerdings zu beachten, daß solche Erfindungen nicht zwangsläufig stattfinden, wenn eine Wirtschaft in Rohstoff- und Entsorgungsprobleme gerät.

2. Auch die Bedingungen auf der Nachfrageseite könnten sich im Sinne des Umweltschutzes verbessern. So ist es denkbar, daß Produkte, deren Herstellung die Rohstoffbasis oder die Umweltqualität einer Wirtschaft gefährdet, in erheblich geringerem Maße nachgefragt würden. Das würde in dem hier behandelten Falle bedeuten, daß die Nachfrage nach Erzeugnissen der Metallhütten bzw. nach Mineralölerzeugnissen und Gas stark zurückginge. Dabei ist jedoch zu beachten, daß Produkte dieser Industrien für unsere heutige Art zu leben in vielen Bereichen unentbehrlich erscheinen.

3. Eine dritte Möglichkeit wäre die Ausweitung der Produktion schwefelhaltiger Endprodukte. Das größte Potential liegt hierbei bei den schwefelhaltigen Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln. Schwefel ist ein wichtiger Stoff für das Pflanzenwachstum, da er zur Produktion essentieller Aminosäuren benötigt wird. In [16] wird sogar darauf hingewiesen, daß die Böden in manchen Regionen der Welt ein Schwefeldefizit aufweisen, was vor allem auf eine Steigerung der Produktion, auf einen veränderten Einsatz von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln und auf einen Rückgang des atmosphärischen Schwefelangebotes durch die Kontrolle der Schwefeldioxidemissionen zurückzuführen ist.

Zusätzliche Verwendungsmöglichkeiten, die Entsorgungseingänge abschwächen können, bestehen in der Verwendung von Schwefel als Ersatz, bzw. Zusatz von Beton und Asphalt. In Kanada wird der Einsatz von Schwefel im Bauwesen bereits erprobt. Als Ersatz für Beton eignet sich Schwefel im Tiefbau (diese Hinweise verdanken wir einem anonymem Referee).

Realisierungen der ersten beiden Lösungsmöglichkeiten sind bisher nicht sichtbar. Auch die dritte Möglichkeit stößt an Grenzen. So ist zu fragen, welche wei-

⁴⁾ Der Schwefelgehalt von Erdgasen ist je nach Herkunftsgebiet sehr unterschiedlich. Die Bandbreite reicht von schwefelfreien Erdgasen bis hin zu einem Gehalt von 30% H₂S bei kanadischen Gasen.

tergehenden ökologischen Probleme entstehen, wenn vermehrt schwefelhaltige Dünge- und Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden. Die Diskussion um die ökologischen Folgen der modernen Landwirtschaft zeigt, daß hier enge Grenzen bestehen. Der vermehrte Einsatz von Schwefel im Beton und Asphalt ist gegenwärtig – von dem oben genannten Versuch in Kanada abgesehen – noch nicht wirtschaftlich, und mögliche ökologische Folgen sind bisher nicht untersucht (vgl. [16]⁵⁾).

So müssen wir abschließend feststellen: Für die hier behandelten Probleme ist gegenwärtig keine Lösung abzusehen.

Dieser Aufsatz entstand im Rahmen des von der Volkswagen-Stiftung finanzierten Forschungsprojektes "Die ökonomischen Folgen der Produktion von Nebenerzeugnissen in der chemischen Industrie unter besonderer Berücksichtigung von Umweltaspekten der Abfallproduktion." Wir danken Herrn Dr. rer. nat. Wolf Becker, Herrn Dr. rer. nat. Kurt-W. Eichenhofer und Frau Dr. rer. nat. Ute Müller-Eisen von der Bayer AG sowie einem anonymen Referee für zahlreiche kritische Anmerkungen und konstruktive Hinweise. Herrn Dipl. Physiker Stefan Baumgärtner danken wir für die kritische Durchsicht.

Literatur

- [1] E. Bartholome, E. Biekert, H. Hellmann, H. Ley, E. Weise: (Hrsg.): Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie; 4. Aufl., Bd 21. Verlag Chemie, Weinheim 1982
- [2] British Sulphur Publishing, World Sulphur and Sulphuric Acid Plant List & Atlas, 6th edition, London 1993
- [3] R. Buttgerit, Die Chlorchemie auf dem Prüfstand – gibt es Alternativen? Spektrum der Wissenschaft, August 1994, S. 108
- [4] C. Christ, Produktionsintegrierter Umweltschutz in der chemischen Industrie – Chancen und Grenzen. Chemie-Ingenieur-Technik **64** (1992) S. 889
- [5] E. Drösser, Die technische Entwicklung der Schwefelsäurefabrikation, Verlag Dr. W. Klinkhardt, Leipzig 1908
- [6] Europa-Chemie, Internationaler Informationsdienst für Chemie, Umwelt und Wirtschaft, Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf, Heft 29, 1992, S. 2
- [7] Europa-Chemie, Internationaler Informationsdienst für Chemie, Umwelt und Wirtschaft, Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf, Heft 15, 1995, S. 6
- [8] M. Faber, F. Jöst, G. Müller-Fürstenberger, Umweltschutz und Effizienz in der chemischen Industrie – Eine empirische Untersuchung mit Fallstudien, Z. Angew. Umweltforschung, **8** (1995) 168
- [9] M. Faber, R. Manstetten, G. Müller, Ökologische Herausforderung für die chemische Industrie, Ruperta Carola 2, 1993
- [10] M. Faber, R. Manstetten, G. Müller, Interdisziplinäre Umweltforschung aus ökonomischer Sicht, Naturwissenschaften **81** (1994) 193
- [11] M. Faber, G. Stephan, P. Michaelis, Das Mengenproblem in der Abfallwirtschaft, Spektrum der Wissenschaft, Digest: Umwelt – Wirtschaft, 1994, S. 100
- [12] G. Fleischer, M. Bargfrede, U. Schiller, Untersuchung des Standes der Technik zur Vermeidung und Verwertung von Abfallsäuren und Gipsen mit produktionspezifischen Beimengungen, Forschungsbericht 10301375, Umweltbundesamt, Berlin 1994
- [13] B. Meyer, Sulphur, Energy and Environment, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 1997
- [14] H. Müller, Sulfuric Acid and Sulfur Trioxide, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, VCH, Weinheim, Vol. 25 (1994) S. 635
- [15] G. Müller-Fürstenberger, Kuppelproduktion – Eine theoretische und empirische Untersuchung am Beispiel der chemischen Industrie. Physika-Verlag, Heidelberg 1995
- [16] W. Nehb, K. Vydra, Sulphur, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, VCH, Weinheim, Vol. 25 (1994) S. 507
- [17] V. Plessen, Sodium Sulfates, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, VCH, Weinheim, 5th edition., 1989
- [18] U. Sander, R. Rothe, R. Kola, Schwefelsäure, Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Aufl. Bd 21, Verlag Chemie Weinheim, Deerfield Beach, Basel, 1982
- [19] Statistisches Bundesamt (StBA): Produktion im produzierenden Gewerbe, Fachserie 4, Reihe 3.1. Metzler-Poeschel Stuttgart, lfd. Jgg.
- [20] H. U. Strenge Vermeidung und Verwertung von Abfallsäuren aus der Chemischen Industrie, UTA Umwelttechnologie Aktuell 1995

Korrespondenzanschrift:

Prof. Dr. M. Faber
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Lehrstuhl Wirtschaftstheorie II
Alfred Weber-Institut
Grabengasse 14
D-69117 Heidelberg, Germany

⁵⁾ Sowohl eine drastische Verringerung der Rohstoffbasis als auch eine Verminderung der Aufnahmekapazität der Umwelt für unerwünschte Kuppelprodukte gehören einem Problembereich an, den wir an anderer Stelle unter dem Begriff der absoluten Knappheit untersucht haben [10].