

10. Damit Kernenergieausstieg und Klimaschutz mittel- und langfristig miteinander verbunden werden können und eine Annäherung an das Leitziel "Zukunftsfähigkeit" stattfinden kann, sind folgende Eckpunkte richtungsweisend (vergl. auch Tabelle 1):

- Wachstum der Energieproduktivität pro Jahr um etwa 3% (bisher etwa 1,7% p.a.)
- Verdoppelung der industriellen und kommunalen KWK/K bis Jahr 2010
- Verdreifachung der Energiebereitstellung aus REG bis 2010
- gezielte Mobilisierung der Energiesparpotentiale, die sich durch nachhaltigere Konsummuster, energiesparende Lebensstile und energiebewußtes Verhalten (Suffizienz) sowie neue Wohlstandsmodelle ergeben.

Zur Umsetzung dieser Ziele könnte ein *energiepolitischer "Effizienzpakt"* geschlossen werden, wobei die genannten Eckpunkte als energiepolitische Orientierungsmarken für die gesellschaftlich relevanten Akteursgruppen und nicht als verbindliche Planvorgaben dienen. Eine breite Allianz von Herstellern und Investoren von REN-, KWK- und REG-Technologien, kommunalen und regionalen Energiedienstleistungsunternehmen, IPP, Contracting-Firmen und Energieagenturen bis hin zu Gewerkschaften und Umwelt- und Verbraucherverbänden könnte an der Umsetzung dieser Ziele interessiert sein. Bei entsprechend veränderten Rahmenbedingungen und bei einem unumkehrbaren Ausstiegsfahrplan wäre auch möglich, daß sich ehemalige Betreiber dieser Allianz anschließen.

#### Kontakt

Prof. Dr. Peter Henricke  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie  
Vizepräsident, Direktor der Abteilung Energie  
Döppersberg 19, D-42004 Wuppertal  
Tel.: + 49 (0) 202/2492-109  
Fax: + 49 (0) 202/2492-198  
E-mail: Peter.Henricke@wupperinst.org

»

## Dynamische Analyse von Umweltproblemen durch Kuppelproduktion

von J. Schiller und Malte Faber, Alfred Weber-Institut für Sozial- und Staatswissenschaften der Universität Heidelberg

**Umweltprobleme sind sehr oft dynamischer Art: Schadstoffströme akkumulieren sich im Laufe der Zeit zu Beständen, die ihrerseits Rückwirkungen auf natürliche und ökonomische Systeme haben und so weitere Reaktionen auslösen. In Arbeiten zum Thema Umweltprobleme herrscht jedoch häufig eine statische Sichtweise vor, d.h. Auswirkungen bestimmter Technologien oder gewisser umweltpolitischer Maßnahmen werden oft unter Festschreibung des jeweils gerade bestehenden Zustands von Umwelt und Volkswirtschaft beurteilt.**

**In diesem von der Volkswagen-Stiftung finanzierten Projekt werden in empirischen Fallbeispielen Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Produktion über längere Fristen analysiert, die durch Kuppelproduktion verursacht werden. Davon ausgehend wird eine dynamische ökonomische Modellierung von Produktionssystemen entwickelt, die Kuppelproduktion als den Normalfall von Produktion berücksichtigt.**

#### Einleitung

Umweltprobleme entstehen an Schnittstellen zwischen ökonomischen Systemen und ihrer natürlichen Umwelt. Ihre Entwicklung im Laufe der Zeit wird deshalb vom dynamischen Verhalten sowohl der auslösenden ökonomischen Systeme als auch der reagierenden natürlichen Systeme bestimmt. Ein Verständnis des intertemporalen Charakters von Umweltproblemen ist daher nur möglich, wenn beide Systeme berücksichtigt und modelliert werden.

Die Wechselwirkungen zwischen ökonomischen Systemen und ihrer natürlichen Umwelt sind vielfältiger Natur. Eine bedeutende Beeinflussung natürlicher Systeme durch ökonomische entsteht dadurch, daß bei der Produktion von ökonomisch erwünschten Gütern durch das Auftreten von *Kuppelproduktion*, d.h. der zwangsweise gemeinsamen Entstehung mehrerer Outputs, unerwünschte Nebenprodukte (z.B.

Abfälle) entstehen, die in die Umwelt abgegeben werden. Entscheidend dabei ist, daß aus thermodynamischen Gründen die Entstehung von Kuppelprodukten im allgemeinen nicht grundsätzlich vermieden werden kann. Lediglich Art, Eigenschaften und Mengen dieser Abfallstoffe können in bestimmten Grenzen beeinflußt werden. Ein Beispiel für ein derartiges Kuppelprodukt ist CO<sub>2</sub>, das aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zwangsläufig emittiert wird.

Die in die natürlichen Systeme eingebrachten Kuppelprodukte ökonomischer Aktivitäten werden dort in Abhängigkeit der Eigenschaften des jeweiligen Stoffes und des aufnehmenden Systems zu Beständen akkumuliert. Oft sind es diese Schadstoffbestände, die zu Veränderungen des natürlichen Systems führen, wobei u.U. nicht-lineares Verhalten, wie Schwelleneffekte, eine Rolle spielen können. So führt der akkumulierte Bestand von CO<sub>2</sub> in der Erdatmosphäre zu Klimaveränderungen.

Solche Veränderungen können ihrerseits verschiedenartige Rückwirkungen auf ökonomische Systeme haben. Erstens können sie von Wirtschaftssubjekten direkt als Übel empfunden werden, womit sie zu 'Umweltproblemen' werden. Zweitens können sie die Produktion direkt beeinflussen (z.B. in der Land- und Forstwirtschaft). Drittens aber können sie sozio-politische Prozesse auslösen, die in umweltpolitischen Regularien resultieren. Durch diese werden ökonomische Aktivitäten dann ebenfalls beeinflußt.

Durch die geschilderten Rückwirkungen von Veränderungen natürlicher Umweltsysteme auf ökonomische Systeme wird deren Zustand, vor allem aber deren zeitlich Entwicklung beeinflußt, was wiederum zu neuen Umweltproblemen führen kann.

### Methoden und Ziele

Ziel dieses Projektes ist es, die geschilderten Wechselwirkungen zu verstehen und ökonomisch zu modellieren. Dabei soll zunächst eine dynamische Modellierung der ökonomischen Systeme (der Schwerpunkt liegt hier auf Produktionssystemen) entwickelt werden, die speziell die langfristigen Entwicklungen dieser Systeme beschreibt, d.h. Aspekte wie Technik- und Strukturwandel. Zugleich ist das Auftreten

des Phänomens Kuppelproduktion integraler Teil dieser modelltheoretischen Beschreibung von Produktion, steht Kuppelproduktion doch im Zentrum der Entstehung von Umweltproblemen durch Produktionsaktivitäten.

Ansatzpunkt der ökonomischen Modellierung sind verschiedene Fallstudien, die sich mit der Rolle von Kuppelproduktion bei der Entwicklung von Industrien beschäftigen. Hier kann teilweise auf Ergebnisse von abgeschlossenen Forschungsprojekten zurückgegriffen werden. So existiert beispielsweise eine – ebenfalls von der VW-Stiftung geförderte – umfassende Sammlung von empirischen Fallstudien zur Kuppelproduktion in der chemischen Industrie (vgl. [1] und [2]), die insbesondere die historische Entwicklung bestimmter Industriezweige nachzeichnet. Weitere Fallstudien zur Entwicklung der Zementindustrie und zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme sind Bestandteil des Projekts.

Aus diesen Fallstudien werden Prinzipien abgeleitet, die einerseits das Verhalten der relevanten ökonomischen Akteure charakterisieren, andererseits die technisch-physikalische Grundlage der zu modellierenden Produktionssysteme berücksichtigen. Diese Prinzipien bilden die Grundlage der ökonomischen Modellierung. Neben dem Verständnis der zeitlichen Entwicklung von Produktionssystemen, die durch Materie- und Energieaustausch mit der sie umgebenden Umwelt gekennzeichnet sind, liegt ein weiterer Zielpunkt des Forschungsprojektes in der Grundlegung einer dynamischen *und* physikalisch-technisch fundierten Produktionstheorie.

Mit den so gewonnenen Erkenntnissen sollen dann allgemeinere Aussagen hinsichtlich

- der langfristigen Umweltfolgen der Nutzung bestimmter Technologien,
- des Zusammenhangs zwischen Umweltproblemen sowie Struktur- und Technikwandel und
- der Frage nach den langfristige Wirkungen von Umweltgesetzgebung

abgeleitet werden.

### Fallstudien

Aufgrund chemisch-physikalischer Zusammenhänge entstehen in der chemische Industrie bei

der Produktion eines Gutes zwangsläufig weitere Nebenprodukte (Kuppelproduktion). Bei der Analyse von Fallstudien lassen sich verschiedene Strategien zum Umgang damit identifizieren:

- Die Nebenprodukte können verkauft werden, falls sie an anderer Stelle erwünscht sind (z.B. Abwärme zu Heizzwecken).
- Ist dies nicht möglich, können sie als Müll oder Emissionen in die Umwelt abgegeben werden. Dies führt oft zu Umweltproblemen.
- Es können Technologien zur Entsorgung dieser Emissionen implementiert werden (sogenannte 'End-of-pipe technologies'). Dies ist i.d.R. kostenaufwendig und führt in einigen Fällen nur zur Abschwächung oder Verlagerung des Problems (z.B. Filterstäube, deren Entsorgung aufwendig ist).
- Es kann versucht werden, neue Technologien zu entwickeln und zu implementieren, durch die die unerwünschten Kuppelprodukte entweder vermieden oder zu erwünschten Produkten weiterverarbeitet werden können.

Entscheidend für die zeitliche Entwicklung von Produktionssystemen ist die Tatsache, daß die vier genannten Strategien i.d.R. *nacheinander* verfolgt werden. Dies wird deutlich an der Fallstudie zur Entwicklung der britischen Sodafabrikation im 19. Jahrhundert, die hier stellvertretend für die Fallstudien des Projektes skizziert werden soll. Der Fall ist paradigmatisch für die Rolle, die Kuppelprodukte bei der Entwicklung von Produktionssystemen spielen können (vgl. hierzu [2]).

Der 1792 eingeführt Leblanc-Prozeß zur Herstellung von Soda führte zur Emission großer Mengen hochgiftigen Chlorwasserstoffs (HCl), das als Kuppelprodukt bei diesem Prozeß entsteht. Starkes Wachstum der Branche verschärfte die Probleme so sehr, daß 1863 in einem Umweltgesetz die Emission des gasförmigen HCl quasi verboten wurde. Eine Reaktion darauf lag in der Überführung des HCl in Salzsäure und deren Einleitung in Oberflächengewässer, was ca. 10 Jahre später ebenfalls stark reglementiert wurde.

Der schon länger spürbare sozio-politische Druck auf die Sodaindustrie führte zur Entwicklung des Deacon-Verfahrens, das die Her-

stellung elementaren Chlors aus HCl ermöglichte. Chlor jedoch war ein Gut mit positivem Wert und ließ sich beispielsweise als Chlorkalk gut verkaufen.

Ebenfalls in den 1870er Jahren wurde das völlig neue Solvay-Verfahren zur Sodaproduktion entwickelt, bei dem nur vergleichsweise harmlose Kuppelprodukte entstanden. Obwohl technisch, und langfristig auch wirtschaftlich überlegen, war dieses Verfahren in der Anfangszeit kaum konkurrenzfähig, da die Leblanc-Industrie ironischerweise aus dem Verkauf des Nebenproduktes Chlor soviel Einnahmen hatte, daß sie ihr Leblanc-Soda damit quersubventionieren konnte. Dementsprechend kam das endgültige 'Aus' für die Leblanc-Technologie auch erst Ende des 19. Jahrhunderts, als mit der Chlor-Alkali-Elektrolyse ein neues (besseres) Verfahren zur Chlorherstellung gefunden war. Es war also das Kuppelprodukt Chlor des Leblanc-Verfahrens mit all seinen Eigenschaften, das die Entwicklung der Soda-Industrie über 100 Jahre hinweg entscheidend beeinflusst hat.

### Ökonomische Modellierung

Die zeitliche Entwicklung der in den Fallstudien untersuchten Produktionssysteme wird im Rahmen des Projektes ökonomisch modelliert. Dabei werden folgende grundlegende Charakteristika verwendet, die zuvor aus den Fallstudien gewonnen wurden:

- Es werden aggregierte Produktionssysteme modelliert, die mit den sie umgebenden natürlichen und ökonomischen Systemen Energie- und Materieflüsse austauschen. Ein Beispiel für ein solches System ist die britische Sodafabrikation.
- Im Hinblick auf die Möglichkeiten der Substitution zwischen verschiedenen Inputs sowie zwischen verschiedenen Outputs nehmen wir für die einzelnen Produktionsprozesse an, daß Inputs in festem Verhältnis eingesetzt werden müssen und Outputs in festem Verhältnis entstehen. Dadurch können wir die insbesondere in der Grundstoff-Industrie auf aggregierter Ebene relevanten physikalisch-technischen Grundlagen, wie z.B. das Auftreten von Kuppelproduktion, erfassen.

- Es wird in der Modellierung berücksichtigt, daß für die jeweiligen Prozesse spezifische materielle Bestände von Kapitalgütern notwendig sind. Diese Kapitalbestände müssen über längere Zeiträume hinweg aufgebaut (und erhalten) werden. Dadurch wird die Dynamik von Produktionssystemen wesentlich beeinflusst. Insbesondere wird die kurzfristige Flexibilität im Hinblick auf beispielsweise Technikwechsel eingeschränkt.
- Das Verhalten der ökonomischen Akteure in bezug auf Investitionsentscheidungen in Kapitalbestände ist von einem zeitlich beschränkten Entscheidungshorizont geprägt. Insbesondere wird bei der Modellierung des ökonomischen Verhaltens die in ökonomischen Modellen oft getroffene Annahme der 'perfekten Voraussicht' hier nicht verwendet.

In früheren von uns durchgeführten Studien hat sich erwiesen, daß eine auf diesen Grundlagen beruhende und das Auftreten von Kuppelproduktion explizit berücksichtigende *statische* Modellierung von Produktion im Bereich der chemischen Industrie sehr erfolgreich angewandt werden kann (vgl. z.B. [2]). In diesem Projekt wird untersucht, inwieweit eine auf den o.g. Prinzipien beruhende *dynamische* Modellierung ähnlich erfolgreich ist.

#### Implikationen für die Umweltpolitik

Die erste Zielsetzung für die beschriebene ökonomische Modellierung liegt darin, zu verstehen,

- nach welchen Mustern sich Produktionssysteme historisch im Laufe der Zeit entwickelt haben und
- welche Auswirkungen dies auf die natürliche Umwelt dieser Systeme gehabt hat.

Diese Zielsetzung ist deskriptiv. Einige der Annahmen für eine solche Modellierung lassen sich nur unzureichend direkt beobachten. Dies gilt vor allem für die Verhaltensannahmen der Akteure. Aus einer erfolgreichen Modellierung lassen sich jedoch Rückschlüsse darüber gewinnen, wie sinnvoll diese Modellannahmen

sind. Auf diese Weise können die Annahmen getestet werden.

Mit diesen Modellbeschreibungen können nun verschiedene umweltpolitische 'Szenarien' in bezug auf die modellierten Systeme untersucht werden. Auf diese Weise soll getestet werden, welche langfristigen Wirkungen sich bei verschiedenen umweltpolitischen Regulierungen, wie beispielsweise einer Energie- oder Emissionsbesteuerung oder der Einführung handelbarer Emissionslizenzen, eingestellt hätten.

Unsere Art der Vorgehensweise bringt es allerdings mit sich, daß die Aussagekraft der Szenarioanalysen beschränkt ist. Denn eine Übertragbarkeit auf tatsächliche zukünftige Entwicklungen kann nicht sichergestellt werden, da viele Modellparameter unsicher sind. 'Schnelle und einfache' Lösungen sind hier nicht zu erwarten.

#### Literatur

- [1] Faber, M., F. Jöst, R. Manstetten und G. Müller-Fürstenberger, 1995: Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz in der chemischen Industrie – eine Fallstudie. Spektrum der Wissenschaft, 112 - 114.
- [2] Müller-Fürstenberger, G., 1995: Kuppelproduktion - Eine theoretische und empirische Analyse am Beispiel der chemischen Industrie. Physica-Verlag, Heidelberg.

#### Kontakt

Johannes Schiller  
 Alfred Weber-Institut für Sozial- und  
 Staatswissenschaften, Universität Heidelberg  
 Grabengasse 14  
 D-69117 Heidelberg  
 Tel.: +49 (0) 6221/542948  
 Fax: + 49 (0) 6221/543630  
 E-mail: schiller@mail.eco.uni-heidelberg.de

«