

# Nachhaltige Entwicklung

## Beitrag von Stoffstrommodellen zur Operationalisierung

*Die Fragestellungen, die sich aus der Übertragung und Quantifizierung des Begriffs Nachhaltigkeit für den Bereich metallischer Rohstoffe ableiten lassen, werden zunächst am Beispiel Aluminium vorgestellt und computergestützte Modelle zur Abbildung des gegenwärtigen und möglicher zukünftiger Stoffströme beschrieben. Neben den Möglichkeiten sollen gleichzeitig aber auch die Grenzen einer solchen ganzheitlichen Betrachtung diskutiert werden.*

### SFB 525

Der Sonderforschungsbereich (SFB) 525 mit dem Titel Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe läuft seit 1997 und ist vorerst bis 2002 befristet. Der SFB 525 wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.

Das Leitbild Nachhaltige Entwicklung wurde 1987 von der Brundtland-Kommission (Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung) aufgenommen und dient heute als Orientierung für das Stoffstrommanagement. Daran anknüpfend hat die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ 1994 Stoffstrommanagement als das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffströmen und -systemen unter ökologischen,

ökonomischen und gesellschaftlichen Aspekten beschrieben [1]. In diesem Spannungsfeld hat sich der Sonderforschungsbereich (SFB) 525 (**Kasten**) das langfristige Ziel gesetzt, Handlungsoptionen für eine ressourcenschonende Bereitstellung und Verarbeitung metallischer Rohstoffe unter Berücksichtigung technischer Entwicklungen aufzuzeigen. Hierbei ist die Abbildung der fachübergreifenden Wirkungszusammenhänge eine Voraussetzung für die Operationalisierung des Leitbilds Nachhaltige Entwicklung [2].

### Nachhaltige Entwicklung im Bereich der Metallproduktion

Nachhaltige Entwicklung bedeutet die Sicherstellung der Entwicklungs- und Umweltbedürfnisse künftiger Generationen. Die Enquete-Kommission nennt in ihrem Bericht vier grundlegende Regeln zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit, von denen eine auch nicht erneuerbare Ressourcen berücksichtigt. Zu diesen Ressourcen zählen die primären metallischen

Rohstoffe. In der zweiten Regel heißt es: „Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen .... geschaffen wird. .... Dies setzt .... voraus, dass sich ein technischer Handlungsspielraum eröffnet, der eine Entkopplung von Entwicklung bzw. Wachstum und spezifischem Naturverbrauch gestattet“ [1]. Mit der angestrebten ressourcenorientierten Gesamtbetrachtung will der SFB 525 Handlungsspielräume unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer und sozialer Gesichtspunkte aufzeigen.

Bei der Gesamtbetrachtung müssen ebenfalls die anderen drei Regeln zur Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. In der ersten Regel wird Bezug auf erneuerbare Ressourcen genommen, die bei der Betrachtung metallischer Stoffströme beispielsweise in Form von Energieträgern, insbesondere Wasserkraft, berücksichtigt werden müssen. Die dritte Regel zielt auf die Inanspruchnahme der Aufnahmekapazität der Umwelt ab [1]. Mit Blick auf die Umweltwirkungsabschätzung des Stoffstroms tangiert die Gesamtbetrachtung auch diese Regel. In der vierten Regel wird auf die Beachtung des Zeitmaßes hingewiesen, die bei jeder Analyse von zukünftigen Systemen erfolgen muss. Um eine gesamtheitliche Betrachtung zu gewährleisten, werden im SFB 525 deshalb unter Ressourcen neben Stoffen, Energie und Umwelt auch Kapital und Arbeit verstanden.

Für die Entwicklung und Anwendung von Stoffstrommodellen ist die Quantifizierung einer nachhaltigen Nutzung von Ressourcen notwendig. Daraus lassen sich exemplarisch folgende Fragestellungen aufzeigen, deren Beantwortung mit zu den zentralen Aufgaben des SFB 525 gehört:

### AUTOREN

Dr.-Ing. Petra Zapp, Jahrgang 1967, Studium der Energie- und Verfahrenstechnik und Promotion an der Universität GH Essen, seit 1997 Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung des Forschungszentrums Jülich.

Dr.-Ing. Georg Rombach, Jahrgang 1964, Studium der Metallurgie und Promotion an der RWTH Aachen, seit 1992 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, Lehrstuhl und Institut der RWTH Aachen.

Dr. rer. pol. Wilhelm Kuckshinrichs, Jahrgang 1958, Studium der Ökonomie und Promotion an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, seit 1991 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung des Forschungszentrums Jülich.

Dipl.-Geol. Peter Sliwka, Jahrgang 1967, Studium der Geologie an der RWTH Aachen, seit 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen.

Dipl.-Geol. Christian Bauer, Jahrgang 1967, Studium der Geologie an der RWTH Aachen, seit 1996 Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich, Jahrgang 1958, Studium der Metallurgie und Promotion an der RWTH Aachen, seit 1999 Leiter des IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, Lehrstuhl und Institut der RWTH Aachen.

Dipl.-Math. Jürgen-Friedrich Hake, Jahrgang 1953, Studium der Mathematik/Physik an der Universität Bielefeld, seit 1992 Leiter der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung des Forschungszentrums Jülich.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Per Nicolai Martens, Jahrgang 1947, Studium des Bergbaus an der Montanuniversität Leoben, Aufbaustudium der Arbeits- und Wirtschaftswissenschaften und Promotion an der RWTH Aachen, seit 1992 Institutsdirektor des Instituts für Bergbaukunde 1 der RWTH Aachen, Sprecher des Sonderforschungsbereichs 525.

- ▶ Wie kann der Begriff Nachhaltige Entwicklung für Stoffströme metallischer Rohstoffe und den daraus resultierenden Umweltbelastungen übersetzt werden?
- ▶ Wie kann die Nachhaltigkeit von Stoffströmen metallischer Rohstoffe gemessen werden?
- ▶ In welchem Maße ist das bestehende System der Versorgung mit metallischen Rohstoffen nachhaltig?
- ▶ Welche Potentiale für eine nachhaltigere Metallversorgung existieren und wie können sie erschlossen werden?

Aus dieser Abfolge wird die Notwendigkeit einer Quantifizierung ebenso deutlich wie die Einordnung der Ausgangslage in eine mögliche Nachhaltigkeits-Skala. Erst dann kann auch der Erfolg von Maßnahmen oder die Auswirkung möglicher Szenarien beurteilt werden. Die Spannweite möglicher Fragestellungen reicht dabei von globalen Fragestellungen bis zu konkreten Auswirkungen veränderter Technik- oder Strukturparameter. Es wird deutlich, dass verschiedene Modelle auf unterschiedlich aggregierten Ebenen benötigt werden, um die bestehenden Optimierungspotentiale in den einzelnen Bereichen zu identifizieren und diese bewertet in eine Gesamtbetrachtung einzuordnen.

Die Frage nach vorhandenen Potenzialen wurde im SFB 525 zunächst am Beispiel Aluminium durch ausgesuchte Themenfelder konkretisiert. Diese beinhalten Innovation und technischen Fortschritt, Nachfrage und Nutzung, Recycling, Produktionsgeographie und Internalisierung externer Kosten.

In den Themenfeldern technischer Fortschritt und Recycling werden beispielsweise detaillierte technisch orientierte Analysen erstellt, die sowohl den mittel- und langfristigen Gesamtbeitrag von technischem Fortschritt und Innovation als auch einzelne Potentiale wie etwa durch den Einsatz der Inert-Anode bei der Schmelzflusselektrolyse aufzeigen oder Fragen nach den Grenzen des Recyclings für bestimmte Produktsysteme beantworten [3].



Bild | Aufbau und Einsatz computergestützter Werkzeuge im SFB 525.

Andererseits sind ökonomisch orientierte Analysen gefragt, die entweder einzelne standort- und technikspezifische Veränderungen oder global bzw. regional aggregierte Stoffströme abbilden. Diese können sich bei einer absoluten und/oder strukturellen Veränderung der Nachfrage oder gesetzlichen Vorgaben einzelner Länder ergeben. Ein weiteres wichtiges Themenfeld ist die Quantifizierung, Monetarisierung und Internalisierung externer Effekte, die den ökonomischen Ansatz in Richtung ökologischer und sozialer Aspekte öffnet.

Die ökologischen Analysen der Rohstoffbereitstellung und der folgenden Verarbeitungsschritte der Aluminiumproduktion müssen bei einer globalen Stoffstromanalyse die verschiedenen Umwelteigenschaften der weltweit verteilten Standorte berücksichtigen. Aufbauend auf vorhandene Methoden des Life Cycle Impact Assessment (LCIA) werden dazu vom SFB die wesentlichen Umweltfaktoren bei der Umweltwirkungsabschätzung berücksichtigt und in die weiterführenden Betrachtungen der Stoffstromanalysen für die verschiedenen Themenfeldern integriert.

Eine Analyse kann neben der Nutzung von Modellen nur unter Einbezug von projektinternem und -externem Expertenwissen zu Ergebnissen führen. Darüber hinaus

gibt es zahlreiche Fragen, die nur gemeinsam mit den jeweiligen am Stoffstrom beteiligten Akteuren aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft analysiert werden können:

- ▶ Welche Einflüsse haben Anforderungen an die Rohstoffqualität, Energie, Transport, Arbeitskosten und Umweltstandards auf die Standortwahl?
- ▶ Unter welchen Voraussetzungen kann Deutschland auch zukünftig ein Standort der Aluminiumerzeugung bleiben?

#### Vergleich der genutzten Stoffstrommodelle

Für die Analyse von Material-, Energie- und Produktflüssen sind eine Reihe methodischer Ansätze entwickelt worden. Zu den Methoden, die sich an der Beschreibung und Analyse physischer Flüsse und technischer Systeme ausrichten, zählen auch die Prozesskettenanalyse und das Life Cycle Assessment. Diesen Ansätzen mangelt es jedoch meist an einer Integration von ökonomischen Mechanismen (beispielsweise Optimierung und Substitution) sowie von Kosten und Erträgen. Zu den Methoden, die sich an der Beschreibung und Analyse ökonomischer Systeme ausrichten, zählen die Input-Output-Analyse, partielle und allgemeine Gleichgewichtsmodelle sowie makroökonomische Modelle. Nachteilig ist hier jedoch, dass sie oft eine hinreichend detaillierte Abbildung von Transformationsprozessen und Flüssen von Materialien, Energieträgern und Produkten vermissen lassen [4]. Ein richtungsweisender Weg besteht darin,

	<b>GlobAl</b>	<b>ProkAl</b>
Konzeption	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Partielles Gleichgewichtsmodell (Simulation eines Aluminiummarktes bei vollständiger Konkurrenz)</li> <li>+ Optimierungskalkül (Kriterium Kosten)</li> <li>+ Vollständiges Mengengerüst</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Prozesskettenmodell zur Simulation einer technischen Vernetzung</li> <li>+ Vollständiges Mengengerüst</li> </ul>
Transformation und Flüsse	Aggregiert	Detailliert
Ökonomische Mechanismen	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Kostenorientierung</li> <li>+ Allokation von Produktion/Investition</li> <li>+ Substitution von Prozessen und Standorten</li> </ul>	
Betrachtungsräum	Global	Regional/länderspezifisch
1. geographisch		
2. Wertschöpfungsstufen	Bauxitförderung, Tonerdeproduktion, Primäraluminiumherstellung	Bauxitförderung bis Halbzuegfertigung bzw. Formguss inkl. Aufbereitung und Verhüttung sekundärer Rohstoffe
Modellparameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Nachfrage</li> <li>+ Prozessparameter</li> <li>+ Kostenparameter</li> <li>+ Zölle</li> <li>+ Preislenkende umweltpolitische Instrumente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Prozessparameter</li> <li>+ Allokationsparameter</li> </ul>
Modellvariablen	Regional/Wertschöpfungsstufen: <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Investition</li> <li>+ Produktion</li> </ul>	Auf Wertschöpfungsstufen: <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Produktion</li> </ul>
Bilanzierung		
1. technisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Bedarf Haupteingangsmaterial</li> <li>+ Andere Inputs: z. B. Energie, Natronlauge, Anoden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Bedarf Haupteingangsmaterial</li> <li>+ Andere Inputs: z. B. Energie, Natronlauge, Petrokokos, Pech, Kalk, Kathodenmaterial, <math>AlF_3</math></li> </ul>
2. ökologisch	Umweltbelastungen <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Emissionen: <math>CO_2</math>, <math>CF_4</math>, <math>C_2F_6</math></li> </ul>	Umweltbelastungen <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Emissionen: <math>CO_2</math>, <math>CF_4</math>, <math>C_2F_6</math>, HF, ...</li> <li>+ Rotschlamm</li> <li>+ Abwasser</li> <li>+ Flächennutzung</li> <li>+ Ressourcennutzung</li> </ul>
3. sozial	Direkter Beschäftigungseffekt	

Tabelle | Charakterisierung der Modellansätze.

vorhandene Ansätze weiter zu entwickeln und deren jeweilige Vorzüge durch abgestimmten Einsatz mit Blick auf eine Fragestellung zu nutzen.

Der Sonderforschungsbereich 525 verfolgt diesen Weg. Für die Analysen und zur Herleitung von Handlungsoptionen werden computergestützte Werkzeuge entwickelt, abgestimmt und eingesetzt (**Bild**). Diese Werkzeuge umfassen ein zentrales Informationssystem, teilprojektbezogene Modelle einzelner Prozesse sowie Modelle zur Analyse von Stoff- und Energieflüssen in Prozessketten und der globalen Wirtschaft von metallischen Rohstoffen.

Die für die Bilanzierungen entlang der Bereitstellungskette im SFB entwickelten Ansätze des Prozesskettenmodells (ProkAl) und des Modells der globalen Aluminiumwirtschaft (GlobAl) sind beide prozessbasierte Modellierungen, die mit unterschiedlicher Ausrichtung und Aussagefähigkeit zur ressourcenorientierten Gesamtbeurteilung beitragen. Die Modelle ergänzen sich, da sie unterschiedliche Schwerpunkte setzen und die Stoff- und Energieflüsse aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten.

Während beim Prozesskettenmodell die Vernetzung detaillierter technischer Prozesse im Vorder-

grund steht, ist GlobAl als partielles Gleichgewichtsmodell durch eine ökonomische Ausrichtung geprägt. Beide Ansätze zeigen den Stoff- und Energiefluss entlang der Bereitstellungskette für Aluminium und verwenden das Konzept der Prozessbeschreibung durch In- und Outputs. In der derzeitigen Fassung beschreibt GlobAl die Aluminiumkette von der Bauxitförderung bis zur Herstellung von Primäraluminium in ihrer globalen Dimension. Die Nebenketten konzentrieren sich auf die Bereitstellung von Energieträgern, die Herstellung von Anoden sowie die Produktion von Natronlauge. ProkAl geht darüber hinaus und führt die Hauptkette weiter bis zum Halbzeug sowie Formguss und zur Aufbereitung sekundärer Rohstoffe. Zusätzlich werden weitere Nebenketten wie auch Rotschlamm Entsorgung und Herstellung von Aluminiumfluorid berücksichtigt. ProkAl ist als standortunabhängiges Modell oder als Modell für räumlich enger begrenzte Systeme mit höherem Grad technischer Disaggregation konzipiert. Es konzentriert sich auf die Bilanzierung technischer und ökologischer Aspekte, während GlobAl die Bilanzierung um den sozialen Aspekt der Quantifizierung direkter Beschäftigungseffekte erweitert. Die **Tabelle** vergleicht die wesentlichen Modellcharakteristika.

Mit Hilfe der beiden Modelle werden die Umweltbelastungen zunächst in Form einer Sachbilanz quantifiziert. Die anschließende ökologische Analyse der Ergebnisse wird im SFB methodisch um den Standortbezug erweitert.

Die Grundlage hierfür bildet die Sammlung und das Management einer Vielzahl von Umweltinformationen. Aufbauend auf einem Geographischen Informationssystem (GIS) werden global verfügbare Daten unter anderem zur Topografie, zum Klima, zur Morphologie, zur Landbedeckung sowie zum Aufbau des Bodens und des Untergrundes gesammelt und strukturiert. Weltweit wurden nahezu 100 % der Standorte der Primäraluminiumproduktion geographisch erfasst sowie durch ihre

charakteristischen Umwelteigenschaften beschrieben. Über eine einheitliche Zuordnung von Techniken zu Standorten und Standorten zu Standortbezogenen Umweltinformationen werden diese Daten in den aufsetzenden Modellen zur standortbezogenen Umweltwirkungsabschätzung genutzt.

Die standortbezogene ökologische Analyse der Umwelteinwirkungen beschäftigt sich zunächst mit denjenigen Wirkungskategorien des LCIA, die einen eindeutigen lokalen Wirkungsbezug haben. Dazu gehören die Umwelteinwirkungen, die im Zusammenhang mit der Landnutzung stehen, oder auch die Wirkungen, die aus der Nutzung lokal begrenzt zur Verfügung stehender Ressourcen resultieren (Beispiel Wasser).

## FAZIT

Die Übertragung und Quantifizierung des Begriffs Nachhaltige Entwicklung für den Bereich metallischer Rohstoffe ist eine Voraussetzung für die ressourcenschonende Bereitstellung und Verarbeitung metallischer Rohstoffe. Daher orientiert sich der Aufbau und Einsatz eines Instrumentariums zur Entwicklung und Folgeabschätzung von Handlungsoptionen im SFB 525 an technischen, ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten. Die vorgestellten Stoffstrommodelle dienen primär der Ermittlung vorhandener Potentiale einer nachhaltigeren Aluminiumversorgung. Mittels Szenariotechnik werden zukünftige technische und strukturelle Veränderungen des Aluminiumstoffstroms unter Berücksichtigung standort- und länderspezifischer Aspekte abgebildet. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung und insbesondere für die Bewertung der Nachhaltigen Entwicklung selbst ist die Anwendung der eingesetzten Modelle jedoch nur als Teil eines iterativen Prozesses zur optimalen Gestaltung von Stoffströmen und der Ressourcennutzung zu verstehen. Hier sind die Aussagen der verschiedenen Modelle zu verbinden und letztlich gemeinsam mit den Entscheidungsträgern und Akteuren zu beurteilen.

Zu diesen Aspekten wurden Methoden entwickelt, die die Standorteigenschaften in der Umweltwirkungsabschätzung berücksichtigen. Schwerpunkte der Bearbeitungen waren bisher die Landnutzung bei der Bauxitgewinnung mit den resultierenden Umwelteinwirkungen wie Bodenerosion und Landdegradation [5] und die Bewertung der Wasseranspruchnahme der verschiedenen Standorte der Tonerderaffination und Aluminiumelektrolyse unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit dieser Ressource [6].

Auf diese Weise werden neue Charakterisierungsfaktoren bereitgestellt, die die Quantifizierung standortspezifischer Wirkungsindikatoren erlauben. Diese stehen für die Modelle ProkAI und GlobAI zur Verfügung und ermöglichen eine räumlich differenzierte Interpretation des globalen Aluminiumstoffstroms im Hinblick auf die Umweltrelevanz struktureller Änderungen sowie Technikvariationen.

## Aufgaben und Grenzen der Modellanwendung

Mit dem Aufbau der beschriebenen Stoffstrommodelle stellt der SFB 525 das Grundgerüst zur Operationalisierung des Nachhaltigkeits-Gedankens zur Verfügung. Die Nutzung der Modelle ermöglicht die Beantwortung konkreter Fragestellungen. Zur Erarbeitung von Handlungsoptionen werden die unterschiedlichen Modelle darüber hinaus genutzt, um künftige Entwicklungen eingrenzen zu können.

Aus der Vielzahl von Vorhersage-Instrumenten wie beispielsweise Delphi-Studien oder Benchmarking-Methoden wird im SFB 525 die Methode der Szenarioentwicklung eingesetzt. Es werden zur Untersuchung der verschiedenen Themenfelder explorative Szenarien entwickelt, in denen auf das Expertenwissen der unterschiedlichen Fachbereiche zurückgegriffen wird. Ein exploratives Szenario basiert auf dem Ist-Zustand und

stellt Entwicklungsmöglichkeiten dar (Was-wäre-wenn-Szenario) [7, 8]. Unter Einbezug gegebener und veränderter Rahmenbedingungen lässt der Vergleich von Referenz- und Zielszenario eine Analyse möglicher Entwicklungen zu. Der Gesamteffekt kann dabei in Einzelleffekte zerlegt werden. So lassen sich beispielsweise Technischeffekte durch den Austausch von Technikmodulen oder Struktureffekte durch veränderte Importstrukturen, Nachfragen oder Recyclinganteile abbilden. Für die im SFB konkretisierten Themenfelder werden somit die verschiedenen Effekte quantifiziert und einzelne Facetten einer Nachhaltigen Entwicklung isoliert.

Die Bewertung der Ergebnisse und die Formulierung von Handlungsoptionen für die am Stoffstrom beteiligten Akteure können jedoch nur erfolgen, wenn die Einzelergebnisse der Modelle zu einer multikriteriellen Analyse zusammengeführt werden. Eine abschließende Bewertung der Ergebnisse muss durch ein Expertengremium erfolgen. Hiermit ist die Grenze der Modellanwendung zur Operationalisierung der Nachhaltigen Entwicklung erreicht.

Die Umsetzung von Handlungsoptionen muss dann auf der Ebene der Akteure erfolgen. So lassen sich beispielsweise Auswirkungen umweltpolitischer Maßnahmen objektiv darstellen und diskutieren. Auf der betrieblichen Ebene kann die Umsetzung durch Prozess- und Produktinnovation, Standortevaluation etc. unterstützt werden.

Die eingesetzten Modelle im SFB sind dabei als beratendes wissenschaftliches Instrumentarium zu verstehen, mit dem verschiedene Optionen simuliert und eine präventive Abschätzung resultierender Auswirkungen in der ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension durchgeführt werden kann.

## Literatur

- [1] Bericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 12. Deutschen Bundestages: Die Industriegesellschaft gestalten – Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn: Economica Verlag, 1994.
- [2] Hake, J.-Fr.; Kuckshinrichs, W.; Schwarz, H.-G.; Zapp, P.: Elemente einer ressourcenorientierten Gesamtbetrachtung des Aluminiumstoffstroms. In: „Nutzen von Ökobilanzen“. Heft 85 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik. Clausthal-Zellerfeld 1999, S. 91–111.
- [3] <http://sfb525.rwth-aachen.de/>
- [4] Bouman, M. et al.: Material flows and economic models: an analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models. *Ecological Economics* 32 (2000), Issue 2, S. 195–216.
- [5] Sliwka, P.: Environmental impact assessment of land use for quantifying emission factors. *Proceedings of the Third SETAC World Congress – Global Environmental Issues in the 21st Century: Problems, Causes and Solutions*, Brighton, U.K. 21-25 May 2000. SETAC, Brussels, S. 78.
- [6] Bauer, C.: An Environmental Information System to Characterise Metallic Raw Material Flows. *Proceedings of the Third SETAC World Congress – Global Environmental Issues in the 21st Century: Problems, Causes and Solutions*. Brighton, U.K., 21-25 May 2000. SETAC, Brussels, S. 293.
- [7] Faucheux, S.: From technological to social foresights: New concertative tools for sustainable development policies. *Transitions Towards a Sustainable Europe Ecology – Economy – Policy*. 3rd Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics. Vienna, 3-6 May 2000
- [8] Ducot, C.; Lubben, G.J.: A typology for scenarios. *Future* (1980), Vol. 12, S.51-57.