Industrieller Metabolismus

Die industrielle Wirtschaftsweise gefährdet das globale ökologische System in doppelter Weise: Die anthropogen verursachten Stoffflüsse liegen durchwegs weit über den natürlichen, und die industriell bedingten Schadstoffemissionen übersteigen die Absorptionskapazität der natürlichen Senken. Das Konzept des „industriellen Metabolismus" eröffnet eine neue Perspektive für das Verstehen dieser Prozesse und den Umgang mit ihnen.

Metabolismus ist in den Naturwissenschaften ein wohl definierter Begriff. Er bezeichnet die Gesamtheit der biochemischen Vorgänge, die im pflanzlichen, tierischen und menschlichen Organismus ablaufen und dem Aufbau, Umbau und der Erhaltung der Körpersubstanz, sowie der Aufrechterhaltung der Körperfunktionen dienen. Diese Stoffwechselprozesse verbrauchen Energie, die durch Abbau zelleigener Substanzen exergon (energiefreisetzend) im Vorgang der Dissimilation gewonnen wird. Die hierdurch verbrauchten Substanzen werden durch endergone (energieverbrauchende) Reaktionen im Vorgang der Assimilation ersetzt. Die Stoffwechselvorgänge laufen als durch Enzyme gesteuerte Reaktionen ab; sie lassen sich nach Funktionskreisen in Assimilation, Ernährung, Atmung, Verdauung, Resorption und Exkretion unterteilen.

Zwischen biologischen Organismen und industriellen Aktivitäten bzw. dem gesamten Wirtschaftssystem besteht eine auffällige Analogie, die im Konzept des „Wirtschaftskreislaufs" in der Ökonomie früh Ausdruck gefunden hat – nicht jedoch in der Anwendung des Konzepts des Metabolismus.

Allgemein läßt sich *industrieller Metabolismus* als die Gesamtheit aller physikalisch-chemischen Prozesse beschreiben, die Materialien, Energie und Arbeit zu Endprodukten und Abfallstoffen verwandeln. Die Produktionsseite des Wirtschaftssystems reguliert sich durch das Kontrollverhalten des Menschen, in seiner dezentralen Wettbewerbsform getragen durch den Ausgleich von Angebot und Nachfrage nach Produkten und Arbeit mittels des Preismechanismus. So gesehen, ist das Wirtschaftssystem ein metabolisch regulierender Mechanismus.

Als Konzept läßt sich industrieller Metabolismus auf verschiedenen Ebenen anwenden, auf der nationalen und der regionalen Ebene, oder auf ein Flußeinzugsgebiet bezogen. Es läßt sich aber auch auf andere selbstorganisierende Einheiten anwenden, wie ein einzelnes Wirtschaftsunternehmen. So ist es relativ einfach, die physikalischen Bestände des Unternehmens zu beschreiben und die entsprechenden Stoffströme über seine Grenzen hinaus und zwischen seinen Abteilungen zu verfolgen. Das Unternehmen steht insofern in Analogie zum lebenden Organismus in der Biologie. Dabei gibt es jedoch einige gewichtige Unterschiede: Erstens reproduzieren sich biologische Organismen selbst; Unternehmen dagegen erzeugen Produkte oder Dienstleistungen, nicht aber andere Betriebe (außer durch Zufall). Zweitens brauchen Unternehmen nicht spezialisiert zu sein und können ihre Produktpalette oder ihren Tätigkeitsbereich variieren. Dagegen sind natürliche Organismen hoch spezialisiert und können ihr Verhalten nicht oder nur über einen langen, evolutionären Zeitraum hinweg verändern.

Stoffkreislauf

Ein dritter Aspekt der Analogie betrifft die sich im Kreislauf befindlichen einzelnen *Nährstoffe*. Der Wasser-, Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor- und Schwefelkreislauf sind bekannte Konzepte der Geowissenschaften. Hier liegt jedoch der größte Unterschied zwischen biologischem und industriellem Metabolismus: während die natürlichen Kreisläufe grundsätzlich *geschlossen* sind, sind die industriellen Kreisläufe *offen*. Das industrielle System führt seine *Nährstoffe* generell *nicht* im Kreislauf, vielmehr werden hochwertige Materialien und Energien (wie fossile Brennstoffe und Erze) der natürlichen Umwelt entnommen und in minderwertigem Zustand (Produktions- und Verbrauchs-Abfall) wieder an sie zurückgegeben.

Dieser Punkt ist besonders wichtig und bedarf der näheren Erläuterung. Der Stoffkreislauf kann als ein System einzelner Bereiche (Kompartimente) veranschaulicht werden, die *Bestände* einzelner oder mehrerer Nährstoffe enthalten, die durch *Stoffströme* miteinander verbunden sind. Im Fall des Wasserkreislaufs beispielsweise stellen Gletscher, Ozeane, Süßwasserseen und Grundwasserreservate die Bestände dar, während Niederschläge und Fließgewässer die Stromgrößen sind. Ein System ist dann *geschlossen*, wenn es keine externen Quellen oder Senken hat. In diesem Sinne ist die Erde als Ganzes ein geschlossenes System, abgesehen von gelegentlichen Meteoriteneinschlägen.

Ein geschlossenes System wird zu einem *geschlossenen Stoffkreislauf*, wenn sich das System in stabilem Zustand befindet, d. h. die Bestände in jedem Bereich (Kompartiment) im Mittel konstant sind (Bedingung der Materialbilanz). Ist dies nicht der Fall, so muß der Bestand in einem oder mehreren Bereichen ansteigen, während der Bestand in einem oder mehreren Bereichen absinkt.

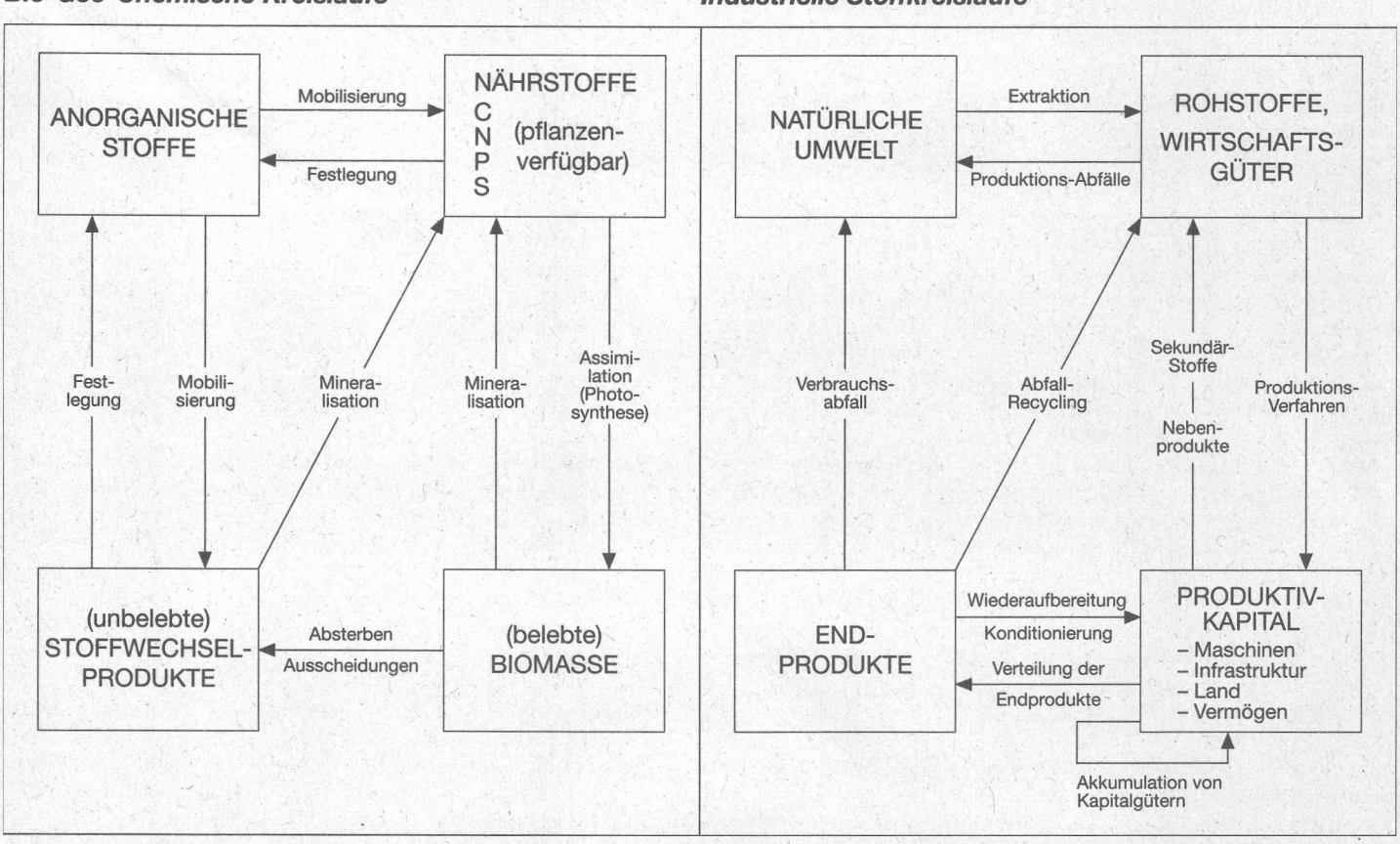
Es ist leicht zu erkennen, daß ein geschlossener Stoffkreislauf im obigen Sinne nur durch einen andauernden Fluß freier Energie aufrechterhalten werden kann. Das folgt unmittelbar aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, daß die Entropie in irreversiblen Prozessen zunimmt. Ein geschlossener Stoffkreislauf kann also nur so lange bestehen bleiben, wie ein externer Energiezufluß anhält. Ein offenes System hingegen ist in sich instabil; entweder es stabilisiert sich, oder es verfällt in einen thermodynamischen Gleichgewichtszustand, in dem alle Stoffströme, d. h. auch alle physikalischen und biologischen Prozesse enden.

Wie oben erläutert, zeichnet sich ein natürliches System durch geschlossene Kreisläufe aus, was die Nährstoffe (Kohlenstoff, Phosphor, Stickstoff, Schwefel usw.) betrifft, wobei biologische Prozesse eine wichtige Rolle beim Schließen des Kreislaufes spielen. Dagegen ist das industrielle System bisher ein offenes System, in dem *Nährstoffe* in *Abfallstoffe* verwandelt, nicht aber systematisch rezykliert werden. Das industrielle System, so wie es heute existiert, ist deshalb *ipso facto* nicht nachhaltig. Hier muß sogleich angemerkt werden, daß die wirklich kritischen Fragen offener Stoffkreisläufe noch nicht endgültig zu beantworten sind:

- Wird sich das industrielle System von selbst stabilisieren?
- Wenn ja, wie schnell und in welcher Form?
- Falls nein, gibt es dann einen stabilen Zustand, der mit Hilfe von Technologieänderungen erreicht werden kann?
- Wenn dem so ist, welcher Art muß die Änderung sein und ist sie durchführbar?
- Wenn dem nicht so ist, wieviel Zeit bleibt, bis der irreversible Zusammenbruch der Biosphäre die Erde unbewohnbar macht?

Es ist wichtig, auf diese Fragen alsbald Antworten zu finden. Man muß jedoch darauf hinweisen, daß auch die Biosphäre, wie wir sie kennen, keineswegs schon immer ein stabiles System geschlossener Stoffkreisläufe war. Die frühesten lebenden Zellen auf der Erde gewannen ihre Nährstoffe durch von organischen Molekülen durchgeführte Fermentation, deren Ursprung noch nicht vollständig geklärt ist. Zu dieser Zeit enthielt die Atmosphäre keinen freien Sauer- oder Stickstoff; wahrscheinlich bestand sie hauptsächlich aus Wasserdampf, Wasserstoff, Methan und Ammoniak. Der Fermentationsprozeß setzte Ethanol und Kohlendioxid frei. Das System stabilisierte sich, als ein neuer Organismus (Blaualgen oder Cyano-Bakterien) auftauchte, der in der Lage war, Kohlendioxid in Zucker und Cellulose zu verwandeln, womit der Kohlenstoffkreislauf erneut geschlossen wurde. Dieser neue Prozeß war die anaerobe Photosynthese.

Die Photosynthese hatte jedoch auch ein Abfallprodukt, nämlich Sauerstoff. Für eine lange Zeit (über eine Millarde Jahre) wurde der durch Photosynthese erzeugte Sauerstoff von gelöstem Eisen aufgenommen und mit Hilfe anderer Organismen, den Stromatoliten, abgeschieden. Das daraus entstehende unlösliche Eisenoxid lagerte sich auf dem Meeresboden ab. Ergebnis sind die großen Lager von angereichertem Eisenerz, die wir heute abbauen. Zu diesem Zeitpunkt war das System noch instabil. Erst die evolutionäre Entwicklung zweier biologischer Vorgänge, nämlich aerobe Atmung und aerobe Photosynthese, schlossen auch den Sauerstoff-



kreislauf. Weitere biologische Vorgänge, wie Nitrifikation und Denitrifikation mußten entstehen, um den Stickstoffkreislauf zu schließen. Die biologische Evolution antwortete offensichtlich auf in sich instabile Zustände, indem sie neue Prozesse (Organismen) „erfand", um das System zu stabilisieren. Diese Fähigkeit, sich selbst zu organisieren, ist die Essenz dessen, was *Gaia* genannt wird. Die instabilen Zustände, um die es hier geht, haben sich jedoch nur langsam entwickelt und die evolutionären Antworten bildeten sich ebenfalls erst langsam heraus. Es dauerte einige Milliarden Jahre, ehe die Biosphäre ihren gegenwärtigen Stabilitätsgrad erreichte.

Im Falle des Industriesystems haben sich die instabilen Zustände in kürzester Zeit entwickelt und die Frage ist, ob sich evolutionäre Antworten rechtzeitig einstellen werden. Die Aktivitäten des Menschen übertreffen die natürlichen Prozesse bereits in vielerlei Hinsicht. Während die kumulierten anthropogenen Veränderungen in den meisten natürlichen Nährstoff*beständen* noch gering sind, liegt die *Rate* der Nährstoffmobilisierung durch menschliche Eingriffe in den meisten Fällen um ein Mehrfaches (!) über der der Natur.

Auf lange Sicht gesehen gibt es bezüglich der Abfallstoffe des Industriesystems zwei Möglichkeiten: Recycling und Wiederverwendung oder dissipativer Verlust. Dies folgt aus dem Satz von der Erhaltung der Masse (Massenwirkungsgesetz). Je mehr Abfallstoffe rezykliert werden, desto weniger werden in die natürliche Umwelt zurückgegeben und umgekehrt; dissipative Verluste wiederum werden durch Nachschub aus noch ungenutzten Quellen ersetzt.

Meßgrößen für industriellen Metabolismus

Eine wichtige Folgerung aus den obigen Betrachtungen besteht darin, daß für eine nachhaltige industrielle Wirtschaftsweise alle giftigen oder gefährlichen Stoffe praktisch vollständig rezykliert werden müßten, ebenso wie ein Großteil der Kunststoffe, Papiere und anderer Materialien, deren Entsorgung ein Umweltproblem darstellt. Es ist allerdings unmöglich, von vornherein alle Giftstoffe zu erkennen, so daß man wohl mit unangenehmen Überraschungen rechnen muß. Man kann jedoch mit Bestimmtheit sagen, daß Schwermetalle zu der Gruppe von Stoffen gehören, die nahezu vollkommen rezykliert werden müßten, um das Kriterium der Nachhaltigkeit zu erfüllen. Der zum Ausgleich dissipativer Verluste erforderliche Anteil an der gegenwärtigen Metallerzeugung mag daher ein erster nützlicher Maßstab dafür sein, wie groß die „Entfernung" von einer nachhaltigen Nutzung ist.

In der Vergangenheit haben sich die meisten Ressourcenanalysen auf die Frage der quantitativen Verfügbarkeit von Ressourcen konzentriert. Die Daten über die verschiedenen Ressourcenkategorien repräsentieren die tatsächlich vorhandenen Ressourcen jedoch nur näherungsweise, weil die meisten Unternehmen die Suche nach neuen Rohstoffvorkommen einstellen, wenn die Reserven für 20 und mehr Jahre ausreichen. Die Nachhaltigkeit des Industriesystems ist jedoch vermutlich weniger eine Frage der Verfügbarkeit von Ressourcen als vielmehr eine der Effizienz des Recycling.

Wie oben angemerkt, sind die Anteile dissipativer Verluste von Stoffen ein erster brauchbarer Maßstab für nicht-nachhaltige Nutzung. Das führt zur Unterscheidung zwischen inhärent dissipativen Nutzungen und Nutzungen, bei denen Stoffe prinzipiell rezykliert werden könnten, dies aber nicht geschieht. Man muß also insgesamt drei Fälle unterscheiden:

1) Nutzungen, die unter den gegebenen Preisen und Regulierungen wirtschaftlich und technisch mit Recycling vereinbar sind;
2) Nutzungen, bei denen Recycling (noch) nicht wirtschaftlich, aber technisch durchführbar ist;
3) Nutzungen, bei denen Recycling ausgeschlossen erscheint.

Generell läßt sich sagen, daß die meisten Metalle zur *ersten* Kategorie gehören, während die meisten Konstruktions- und Verpackungsmaterialien, Kühl- und Lösungsmittel in die *zweite* Kategorie fallen. Demgegenüber gehören Beschichtungen, Pigmente, Pestizide, Herbizide, Desinfektionsmittel, Konservierungsstoffe, Frostschutzmittel, Sprengstoffe, Flammschutz-,

Wasch-, Düngemittel usw. vermutlich alle zur *dritten* Kategorie, wie auch die meisten chemischen Stoffe, bis auf diejenigen, die physikalisch in Kunststoffen, synthetischem Gummi oder synthetischen Fasern eingebunden sind.
Hinsichtlich der potentiell rezyklierbaren Stoffe (Kategorien 1 und 2) könnte man den Anteil der tatsächlich rezyklierten Stoffe als Maßstab für den Grad der Nachhaltigkeit nehmen. Bei Metallen dürfte das Verhältnis von sekundärer Verwendung zu Gesamtverwendung ein vernünftiger Näherungswert sein.
Als weiterer Maßstab kann das Wirtschaftsergebnis (Output) je Einheit an Materialinput gelten, die *Materialproduktivität*. Steigende Materialproduktivität wäre dementsprechend ein Anzeichen für die zunehmende Effizienz des industriellen Metabolismus. Dieses Maß kann und sollte für die Wirtschaft als ganzes, aber auch für jeden einzelnen Sektor ermittelt werden. Weiterhin könnte es auch für die wichtigsten *Nährstoffe* bestimmt werden, für Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel, usw.
Maßstäbe dieser Art sind allerdings noch keine verläßlichen Indikatoren langfristiger Nachhaltigkeit des Industriesystems, und zwar deshalb nicht, weil zunehmende Effizienz von Strukturveränderungen der Wirtschaft überlagert werden kann. So führen Investitionen in die Schwerindustrie zum Beispiel zu vermehrtem Material- und Energieeinsatz. Grundsätzlich sollte man für jeden einzelnen Sektor und für die Wirtschaft insgesamt aber erwarten, daß die Materialproduktivität über die Zeit zunimmt. Daß sie um den Faktor 10 zunehmen müßte, um der Industriegesellschaft Nachhaltigkeit attestieren zu können, ist die dazu jüngst formulierte These (Schmidt-Bleek).

Konsequenzen

Zwei Schlußfolgerungen sind offensichtlich: Erstens ist die Perspektive des industriellen Metabolismus im Kern *holistisch*, indem sie die gesamte Bandbreite von Interaktionen aufzeigt, die sich zwischen Materialien, Energie und Umwelt abspielen. Zweitens ist sie *global* und macht deutlich, daß auf kurze Sicht und engen Raum angelegte Optimierungen weit vom globalen Optimum entfernt sein können.
Am besten kann man die Vorzüge einer umfassenderen Perspektive dadurch verdeutlichen, daß man sie der enger gefaßten Perspektive gegenüberstellt. Ein Beispiel ist die Müllbeseitigung. Aus dem Satz von der Erhaltung der Masse folgt, daß die Gesamtmenge der aus der natürlichen Umwelt entnommenen Stoffe letztendlich in irgendeiner Form von Abfall an sie zurückgegeben wird. Die Umweltpolitik hat diese grundlegende Erkenntnis jedoch ignoriert, indem sie Emissionsbestimmungen für jedes Umweltmedium einzeln erlassen hat. Der entsprechende Gesetzesakt bewirkt dabei, daß eine Reihe von Bestimmungen in Kraft setzt werden, die sich mit medienspezifischen Emissionen aus Punktquellen befassen, beispielsweise mit Luftemissionen von Kohlekraftwerken. Eine andere gesetzliche Regelung schafft eine Bürokratie, die sich nur mit wasserbezogenen Emissionen beschäftigt usw. Es überrascht daher nicht, daß als Ergebnis eine bestimmte Form der Luftverschmutzung beseitigt wird (zum Beispiel Flugasche und SO_2 aus der Verbrennung), indem man sie in eine andere Verschmutzungsform verwandelt, die auf dem Land deponiert wird. Solche Deponierung kann aber selbst wiederum zu Wasser- und Luftverschmutzung führen, durch Sickerwässer und anaerobe Abbauprozesse. In ähnlicher Weise werden wasserbelastende Stoffe eingefangen und auf dem Landweg entsorgt oder gar durch Verbrennung „beseitigt".
Zu kurz greifende Umweltstrategien haben so jahrzehntelang Emissionen von einem Medium in das andere verschoben, ohne die Gesamtemissionen wirklich zu verringern. Höhere Schornsteine, längere Abwasserrohre und Katalysatoren sind Symbole für diese Vorgehensweise; Problemverlagerung also statt Problemlösung. Demgegenüber hätte eine holistische und globale Perspektive von vornherein die Stoffintensität der industriellen Wirtschaftsweise reduziert und die Materialproduktivität erhöht – also mehr aus weniger zu machen versucht.
Ein anderes Beispiel sind die fossilen Brennstoffe. Große Investitionen in sogenannte saubere Kohletechnologien würden sicherlich den Gebrauch von Kohle als Brennstoff stabilisieren oder erhöhen, statt ihn zu senken, und gleichzeitig die Emission großer Mengen an Schwefel, Flugasche und Kohlendioxid zur Folge haben. Der Abgaskatalysator ist ein weiteres einschlägiges Beispiel. Mit dem verbreiteten Einsatz dieser Technologie wurde nur der Tag weiter hinausgeschoben, an dem die konventionellen Verbrennungsmotoren durch eine saubere Antriebstechnologie ersetzt werden. Wenn dieser Tag dann tatsächlich kommt, wird der Autofuhrpark der Welt zwei- oder dreimal größer sein, als es sonst der Fall gewesen wäre – und die Kosten für den Ersatz werden um ein Vielfaches höher liegen.
Es ergibt sich, daß die Überlegungen zum Konzept des „industriellen Metabolismus" eine Fülle bisher ungelöster umweltstrategischer Fragen aufdecken – und damit zugleich auch ein weites Feld zukünftiger Umweltforschung aufzeigen, insbesondere wenn man an die analoge Bestimmung der „Stoffwechselkrankheiten" des Industriesystems denkt.

Udo E. Simonis, Berlin

Literatur

- Ayres, R. U. 1989: Industrial Metabolism. In: J. H. Ausubel and H. E. Sladovich (Eds.): Technology and Environment, Washington, D. C., S. 23–49
- Ayres, R. U. and A. V. Kneese 1989: Externalities: Economics and Thermodynamics. In: F. Archibugi and P. Nijkamp (Eds.): Economy and Ecology: Towards Sustainable Development, Dordrecht u. a., S. 89–118.
- Ayres, R. U. and U. E. Simonis (Eds.) 1993: Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development, Tokyo u. a. (in Druck)
- Georgescu-Roegen, N. 1971: The Entropy Law and the Economic Process, Cambridge
- Herman, R., S. A. Ardekani and J. H. Ausubel 1989: Dematerialization. In: J. H. Ausubel and H. E. Sladovich (Eds.): Technology and Environment, Washington, D. C., S. 50–69.
- Jänicke, M., H. Mönch, M. Binder u. a. 1992: Umweltentlastung durch industriellen Strukturwandel?, Berlin
- Nriagu, J. O.: Global Metal Pollution. Environment, Vol. 32, 7, 1990, S. 7–32.
- Olbrich R. and U. E. Simonis 1993: Bibliography on Industrial Metabolism and Industrial Restructuring. In: R. U. Ayres and U. E. Simonis (Eds.) s. o.
- Schmidt-Bleek, F. 1992: Eco-Restructuring Economies: Operationalizing the Sustainability Concept. Fresenius Environmental Bulletin, Vol. 46, 1
- Zimmermann, K., V. J. Hartje und A. Ryll 1990: Ökologische Modernisierung der Produktion. Strukturen und Trends, Berlin

Informationen aus dem IÖW

Personalia: Renate Streuer arbeitet im Forschungsfeld Ökologische Unternehmenspolitik im Projektbüro Hannover und betreut u. a. das Projekt „Öko-Controlling in Kleinbetrieben in Schleswig Holstein". Cornelia Weskamp arbeitet im Regionalbüro Nordrhein-Westfalen. Sie ist dort für das Forschungsfeld Ökologischer Konsum zuständig. Simone Hellenbrandt ist neue Mitarbeiterin des Heidelberger Regionalbüros und kümmert sich dort vorwiegend um das Projekt „Umwelteinflüsse neuer Werkstoffe" und die Vorbereitung der IÖW-Jahrestagung.
Auf einige neu akquirierte **Projekte** soll an dieser Stelle hingewiesen werden: Dazu zählt das Projekt Umweltberichterstattung im Auftrag der Landesregierung NRW, das zusammen mit future realisiert wird (Kontakt: Jens Clausen, Klaus Fichter; Büro Hannover / Berliner Geschäftsstelle). U. a. geht es in diesem Projekt auch um das Problem der Vereinheitlichung von ökologischen Kennzahlen. Das IÖW ist ferner von der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages mit der Untersuchung der Konzepte Ökoleasing und Chemiedienstleistung beauftragt worden (Kontakt: Hans-Knud Arndt, Stefan Zundel; Berliner Geschäftsstelle). Ferner wird das IÖW das Projekt „Perspektiven einer sozial-ökologischen Bilanzierung" (Kontakt: Frieder Rubik, Volker Teichert; Regionalbüro Baden-Württemberg) im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung bearbeiten.

(c) 2010 Authors; licensee IÖW and oekom verlag. This is an article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial No Derivates License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.