

UFZ-Diskussionspapiere

**Abteilung
Ökologische Ökonomie und
Umweltsoziologie (ÖKUS)**

1/2000

**Nicht-erneuerbare Massenressourcen
zwischen Dematerialisierung, Transmaterialisie-
rung
und globaler Umweltbelastung
– eine empirische Analyse ***

Frank Messner

März 2000

Dr. Frank Messner
UFZ–Umweltforschungszentrum Leipzig–Halle
Permoserstr. 15
D–04318 Leipzig
e-mail: messner@alok.ufz.de
Tel: +49 341 235–2204
Fax: +49 341 235–2511

* Für kritische Kommentare und Anmerkungen bedankt sich der Autor bei Bernd Klauer und Bernd Hansjürgens.

Zusammenfassung

Gegenstand dieses Beitrages ist die empirische Analyse von globalen Trends in der Nutzung von nicht-erneuerbaren Massenressourcen. Es werden im wesentlichen fünf Ergebnisse herausgearbeitet. 1. Die globale Nutzung von Massenressourcen im 20. Jahrhundert war durch enorme Zuwachsraten in der Ressourceninanspruchnahme in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts und durch eine Stagnation im absoluten Ressourcenverbrauch in der Endphase des Jahrhunderts gekennzeichnet. 2. Bei vielen Ressourcen sind zeitlich differenzierte Prozesse einer Dematerialisierung nachweisbar, die sich im Gesamtzusammenhang eines Transmaterialisierungsprozesses konjunkturtheoretisch erklären lassen. 3. Zwischen 1960 und 1995 kann bei bedeutsamen nicht-erneuerbaren Massenressourcen ein globaler aggregierter Dematerialisierungseffekt in Höhe von mindestens 20% nachgewiesen werden. 4. Trotz der Effekte der Dematerialisierung in den Ressourcennutzungstrends und der Erfolge durch neue Umwelttechnologien im 20. Jahrhundert kann nicht ausgeschlossen werden, daß diese Prozesse mit einer erhöhten Umweltbelastung einher gingen. 5. Eine nachhaltige Transformation in der globalen Ressourcennutzung wird sich durch freie Marktprozesse nicht einstellen. Weitere Politikmaßnahmen sind dafür notwendig.

Abstract

In this paper the global trends in the utilization of nonrenewable mass resources are empirically analyzed. Five results are presented and discussed. Firstly, it is shown that the pattern of global resource use in the twentieth century is characterized by increasing resource utilization rates in the second half and a stagnating resource use in the end of the century. Secondly, processes of dematerialization are revealed to have happened with regard to several resources. They can be explained in the context of the schumpeterian business cycle theory that considers them to be part of a broader process of transmaterialization. Thirdly, between 1960 and 1995 a global process of aggregate dematerialization of mass resources of at least 20 per cent could be confirmed. Fourthly, despite the effects of global dematerialization and of the application of new environmentally friendly technologies it cannot be excluded that the pattern of resource utilization in the twentieth century involved an increase in the level of environmental degradation. Finally, a sustainable transformation in the global resource use pattern can not be achieved through the driving forces of the free market. Instead, the sustainable utilization of nonrenewable mass resources requires further policy measures.

Keywords: *nonrenewable resources, sustainability, intensity of use, dematerialization, schumpeterian business cycle theory*

JEL-classification: *Q 32*

1. Einleitung

Jede Ökonomie und auch jede Art von Bedürfnisbefriedigung benötigt eine materielle Struktur in Form von Waren, Maschinen, Anlagen, Häusern etc. und eine energetische Basis, die ebenfalls eine materielle Struktur besitzt, wie z. B. die Kohle, das Erdöl und die Nahrungsmittel zur Regeneration der menschlichen Arbeitskraft. Die Bereitstellung der notwendigen Materialmengen kann ausschließlich durch Ausbeutung der natürlichen Ressourcen und durch deren Recycling und Wiedernutzung gewährleistet werden. Induziert durch das steigende Wirtschaftswachstum ist die materielle Ressourceninanspruchnahme in den vergangenen Jahrzehnten enorm angestiegen. Das beträchtliche Wachstum der globalen Wirtschaft und das Wachstum in der Ressourcennutzung ist u. a. dadurch möglich geworden, daß stets mehr nicht-erneuerbare Ressourcen eingesetzt wurden. Denn im Gegensatz zu erneuerbaren Ressourcen, deren Nutzung an relativ lange Zeitzyklen gebunden ist (z. B. in der Landwirtschaft: Zeiten des Anbaus, des Wachstums und der Ernte), können nicht-erneuerbare Ressourcen vergleichsweise schnell abgebaut und in den Wirtschaftsprozess eingebracht werden. Weiterhin weisen viele nicht-erneuerbare Ressourcen als funktionelle Werkstoffe für neue Technologien sehr spezielle und hochwertige Materialeigenschaften auf, die bei erneuerbaren Ressourcen nicht vorzufinden sind. Angesichts dieser Tatsachen ist es kaum verwunderlich, daß bereits in den 1980er Jahren von den jährlich etwa 27 Milliarden Tonnen der ökonomischen Primärmaterialströme der Weltwirtschaft ca. 80% nicht-erneuerbare Ressourcen waren.¹ Die Kehrseite der Medaille besteht darin, daß die Ausbeutung und die Entsorgung von nicht-erneuerbaren Ressourcen mit beträchtlichen Eingriffen in die Natur einhergehen.

Im Sinne des globalen Leitbildes einer nachhaltigen weltwirtschaftlichen Entwicklung, die auch zukünftigen Generationen noch einen akzeptablen ökonomischen Handlungsspielraum offenhält, kann der Prozeß der zunehmenden Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen langfristig nicht aufrechterhalten werden. Für die Nutzung von nicht-erneuerbaren Ressourcen bedeutet Nachhaltigkeit, daß ein weltwirtschaftlicher Transformationspfad in der Ressourcennutzung hin zu einer vermehrten Nutzung von erneuerbaren Ressourcen realisiert wird und dabei die Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen und ihre disperse Verteilung in der Umwelt sukzessive reduziert wird (Messner

¹ Die genannte Zahl ist eine Durchschnittsgröße der Jahre 1983-85. Vgl. Baccini / Brunner 1991: S. 24.

1999: S. 392 ff.). Um eine Reduzierung des Gesamtmaterialverbrauchs in der Weltwirtschaft zu erreichen, ist eine Dematerialisierung in allen Bereichen des Wirtschaftens notwendig. Dematerialisierung bedeutet, daß der Materialverbrauch pro Einheit Bruttoinlandsprodukt (BIP) einer Ökonomie sinkt. Forderungen nach einer Dematerialisierung und einer damit einhergehenden Ressourcenschonung sind in den vergangenen Jahren immer häufiger gestellt worden, und sie stehen heute als wichtiger Bestandteil auf der umweltpolitischen Agenda vieler Industrieländer. Ferner wurde von wissenschaftlicher Seite gezeigt, daß bei vielen Produkten und Dienstleistungen enorme Potentiale für eine Dematerialisierung bestehen (vgl. z. B. von Weizsäcker et al. 1995).

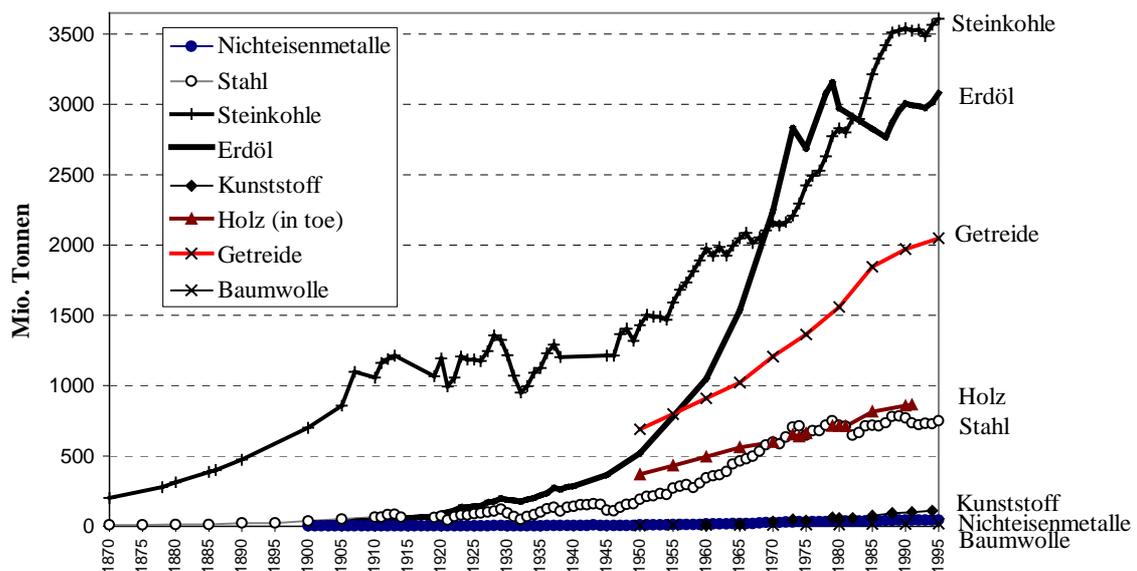
Aus ökonomischer Sicht stellen sich in diesem Kontext verschiedene Fragen. Erstens wäre es interessant zu wissen, wie sich die Ressourcennutzung in den vergangenen Jahren entwickelt hat, und ob aufgrund einer zunehmenden Ressourcenverknappung nicht bereits eine Tendenz zu einem verringerten Ressourcenverbrauch absehbar ist. Zweitens wäre zu fragen, ob Dematerialisierungsprozesse tatsächlich in einem bedeutsamen Ausmaß stattfinden. Wenn das der Fall ist, wäre zu untersuchen, ob mit Prozessen der Dematerialisierung automatisch Umweltentlastungen einhergehen. Aufbauend auf den Ergebnissen derartiger Analysen wäre schließlich zu prüfen, ob zur Realisierung eines nachhaltigen Pfades in der weltwirtschaftlichen Ressourcennutzung zusätzliche regulierende Politikeingriffe notwendig sind und wo sinnvolle Ansatzpunkte bestehen. Zur Beantwortung dieser Fragen wird im folgenden zuerst eine Darstellung der globalen Trends in der Ressourcennutzung des 20. Jahrhunderts präsentiert. Anschließend werden die Muster dieser Ressourcennutzung und ihre Umweltwirkungen einer Analyse unterzogen, um letztlich die Frage nach der Notwendigkeit bzw. der Ausgestaltung einer angemessenen Rohstoff- und Ressourcenpolitik zu beantworten.

2. Entwicklungstrends in der globalen Ressourcennutzung des 20. Jahrhunderts

In den Abbildungen 1 und 2 sind die globalen Produktionsentwicklungen wichtiger erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Massenressourcen seit 1870 abgebildet, während die Abbildung 3 die Produktionsentwicklung der wichtigsten Nichteisenmetalle (NE-Metalle) von 1900 bis 1995 zeigt. Ganz generell ist aus diesen Produktionsverläufen ein enormer Zuwachs in der globalen Nutzung sämtlicher Ressourcen abzulesen, und es ist zweifelsfrei

konstatierbar, daß sich die Ressourcennutzung in den vergangenen 120 Jahren vervielfacht hat. Aus Abbildung 1 läßt sich insbesondere die Größenordnung der globalen Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen gut erkennen.

Abbildung 1: Globale Produktion bedeutsamer erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Ressourcen von 1870 bis 1995 in Mio. Tonnen



Anmerkung „toe“ ist die Abkürzung für „tons of oil equivalent“ und weist das Holz, das ansonsten in Kubikmetern bemessen wird, gemäß seinem Energieinhalt in äquivalenten Ölmengen aus.

Datenquellen für Abbildung 1, 2 und 4:

Daten für Hüttenproduktion bzw. Produktion von raff. Nichteisenmetallen nach: Metallgesellschaft AG/ World Bureau of Metal Statistics (Hg.) 1996, Metallstatistik / Metal Statistics 1985-1995: S. 60-65.

Produktionsdaten zu Stahl, Eisen und Steinkohle nach: Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) 1996, Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1996: S. 345, 349-353 und Clark 1990: S. 104, 251.

Daten zu Erdöl nach: Clark 1990: S. 30, 110, 246, 264 und Tippee (Hg.) 1997, S. 314-319.

Daten zu Kunststoff nach: Glenz 1989: S. 1238 und o.V. 1995: S. 1761.

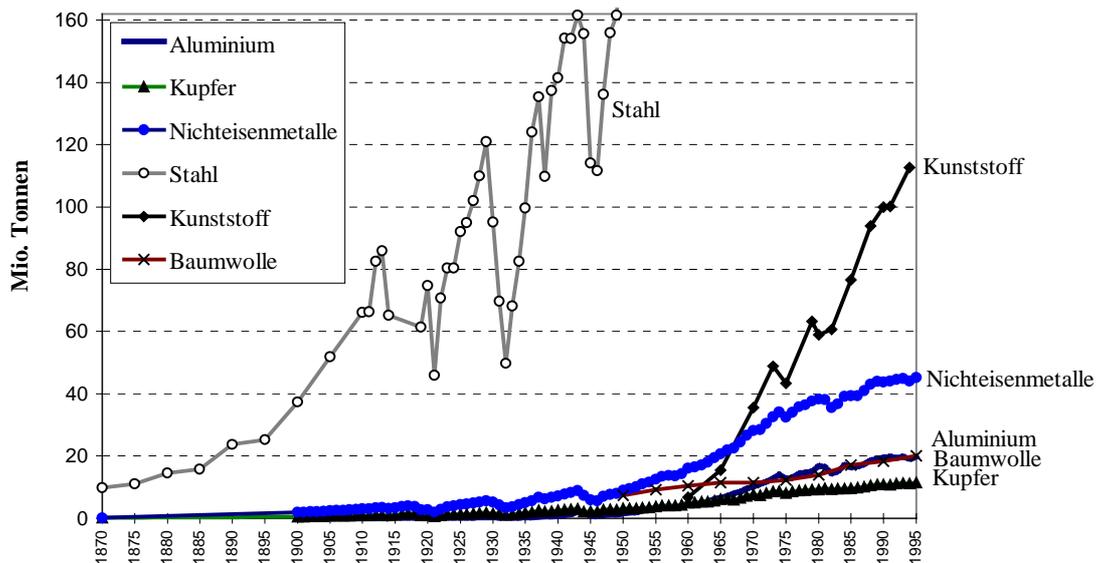
Daten zu Holz nach: Forest Products Society (Hg.) 1994: S. 22 und Alexandros (Hg.) 1995: S. 206-230.

Daten zu Getreide und Baumwolle nach: FAO (Hg.) 1969-1996, Production Yearbook.

Nicht abgebildet sind hier allerdings die im globalen Rahmen am meisten genutzten Ressourcen Steine, Sand und Kies, die gleichzeitig am wenigsten knapp sind, überall in der Erdkruste vorkommen und wegen ihrer geringen Preise und den vergleichsweise hohen Transportkosten nicht oder nur marginal Gegenstand von internationalem Handel sind. Die globale Produktionsmenge von Stein, Sand und Kies, denen im folgenden eher weniger

Aufmerksamkeit gewidmet wird, belief sich 1991 auf etwa 20 Milliarden Tonnen, und sie sind damit unbestritten die bedeutsamsten globalen Massenressourcen.²

Abbildung 2: Globale Produktion bedeutsamer Ressourcen im Bereich bis zu 160 Mio. Tonnen Jahresproduktion (1870-1995)



Datenquellen: Vgl. Angaben zu Abbildung 1.

Es folgen ihnen, wie aus Abbildung 1 ersichtlich, die fossilen Ressourcen Steinkohle und Erdöl mit Produktionswerten von über drei Milliarden Tonnen in den 1990er Jahren. Da der Großteil der fossilen Ressourcen zu energetischen Zwecken verfeuert wird, unterstreichen diese Daten im Kontext der Gesamtressourcennutzung die außerordentliche Bedeutung der energetisch genutzten Rohstoffe.³ An der vierten Stelle der globalen Massennutzung von Ressourcen ist mit dem Getreide die erste erneuerbare Ressource anzutreffen, von der derzeit etwa zwei Milliarden Tonnen pro Jahr produziert werden. Danach folgen auf etwa gleichem Niveau Stahl und Holz mit einer Produktionsmenge von etwa 800 Millionen Tonnen, wobei Stahl ausschließlich der materiellen Nutzung zuzuordnen ist, während das erneuerbare Holz zu fast gleichen Teilen energetisch (als Brennholz) und ma-

² Vgl. für weitere Produktionsdaten zu Steine und Erden: Young 1993: S. 9-10.

³ Die materielle Nutzung der fossilen Ressourcen ist bisher nicht sehr stark entwickelt. Im Fall des Erdöls werden weltweit nur acht Prozent des Mineralölverbrauchs für eine petrochemische Nutzung (hauptsächlich Kunststoffproduktion) eingesetzt. Vgl. Mineralölwirtschaftsverband e.V. (Hg.) 1996: S. 29. Die Diskrepanz zwischen materieller und energetischer Nutzung zeigt sich in der Abbildung 1 an den unterschiedlichen Größenordnungen in der Produktion von Erdöl und Kunststoff.

teriiell (als Baustoff, Papier etc.) verwendet wird.⁴ Diesen sechs Massenressourcen folgen im Abstand der Größenordnung von etwa einer Zehnerpotenz die ausschließlich materiell genutzten Kunststoffe (113 Mio. t in 1995), die Nichteisenmetalle (zusammen 45 Mio. t in 1995) und die Baumwolle (20 Mio. t in 1995).

Zur besseren Illustration der Ressourcennutzungstrends des 20. Jahrhundert ist es sinnvoll, die Ressourcennutzung im Kontext der historischen Wirtschafts- und Politikentwicklung zu betrachten. Es wurden für diesen Beitrag vier Zeitperioden ausgewählt, um die Veränderungen in der Ressourcennutzung zu verdeutlichen: Periode 1 (1880-1945): die Zeit vor dem Ende des zweiten Weltkrieges; Periode 2 (1945-1970): die Nachkriegszeit; Periode 3 (1970-1988): die Zeit der Erdölkrisen; und Periode 4 (1989-1995): die Zeit des Zusammenbruchs und der Transformation der sozialistischen Staatengemeinschaft.

Periode 1: Die Zeit vor Ende des Zweiten Weltkrieges (1880-1945)

Während das Holz im Mittelalter *die* dominierende Energie- und Materialressource war, bekam sie in den Jahren der industriellen Revolution mit der Durchsetzung der Dampfmaschine in den 1880er Jahren bedeutsame Konkurrenz im Bereich der Energieressourcen durch die Steinkohle. Nach kontinuierlichen Zuwächsen in der Steinkohleproduktion gegen Ende des 19. Jahrhunderts war die Kohle zur Jahrhundertwende mit einer Jahresproduktion von fast 700 Millionen Tonnen zur bedeutsamsten Energieressource in den sich industrialisierenden Ländern aufgestiegen.⁵ Gleichzeitig deutete sich zu Anfang des 20. Jahrhunderts die erstarkende Position des preiswerten Erdöls mit vergleichsweise hohem Energieinhalt⁶ an. Mit der zunehmenden Durchsetzung von ölbasierten Technologien – wie z. B. dem Verbrennungsmotor – begann ein ausgeprägter Substitutionsprozeß im Energiebereich, der sich insbesondere dadurch auszeichnete, daß die Kohleproduktion seit Beginn des ersten

⁴ Es sei angemerkt, daß ein mengenmäßiger Vergleich von Holz mit anderen Ressourcen problematisch ist, da es üblicherweise in der Volumeneinheit Kubikmeter bemessen wird. Angesichts des hohen Anteils der energetischen Holznutzung wurden für die Abbildung 1 die Volumenwerte des Holzes nach ihrem Energieinhalt umgerechnet in Gewichtstonnen von Erdöl mit gleichem Energieinhalt (die Einheit "toe" bedeutet "tons of oil equivalent"). 2,1 Milliarden Kubikmeter Holz entsprechen energetisch 520 Millionen Tonnen Erdöl. Vgl. Alexandratos (Hg.) 1995: S. 215-220.

⁵ Vgl. Clark 1990: S. 15-27. So basierte z. B. die Energieversorgung in der USA in 1900 zu 70% auf Kohle, 23% auf Holz, 4% auf Erdöl und 3% auf Wasserkraft und Erdgas. Vgl. ebd.: S. 16.

⁶ Der Energieinhalt von einer Tonne Erdöl übertrifft denjenigen einer Tonne Steinkohle um 50%. Vgl. WRI et al. 1994: S. 167, Tabelle 9.2.

Weltkrieges bis 1945 nahezu stagnierte, während sich die Ölproduktion im gleichen Zeitraum mehr als verachtfachte (vgl. Abbildung 1).⁷

Im Bereich der Materialnutzung war die Eisen- und Stahlerzeugung in den Frühphasen der Industrialisierung der heutigen Industrieländer durch starkes Wachstum gekennzeichnet. Mit jährlichen Wachstumsraten von 6-8% in den Jahren um die Jahrhundertwende und zweistelligen Raten in den 1920er Jahren konnte die globale Stahlproduktion von 1875 bis 1929 trotz der Rückschläge durch den ersten Weltkrieg von 11 auf 120 Millionen Tonnen mehr als verzehnfacht werden. Die weltwirtschaftliche Depression der 1930er Jahre und der zweite Weltkrieg führten in Folge zwar zu ausgeprägten Rückgängen in der globalen Stahlproduktion, doch aufgrund markanter Produktionszuwächse mit zweistelligen Zuwachsraten wurden die jeweiligen Produktionseinbußen sehr schnell wieder wettgemacht (vgl. Abbildung 2). Eine weit weniger herausragende Rolle spielten in jener Zeit die Nichteisenmetalle (insbesondere Blei, Kupfer, Zink und Aluminium), deren Gesamtproduktion zu Beginn des 20. Jahrhunderts nicht einmal 10% der Stahlproduktion entsprach. Nichtsdestotrotz waren aber auch in dieser Ressourcengruppe in den 1920er und ab Mitte der 1930er Jahre beachtliche Produktionszuwächse zu beobachten (vgl. Abbildung 3).

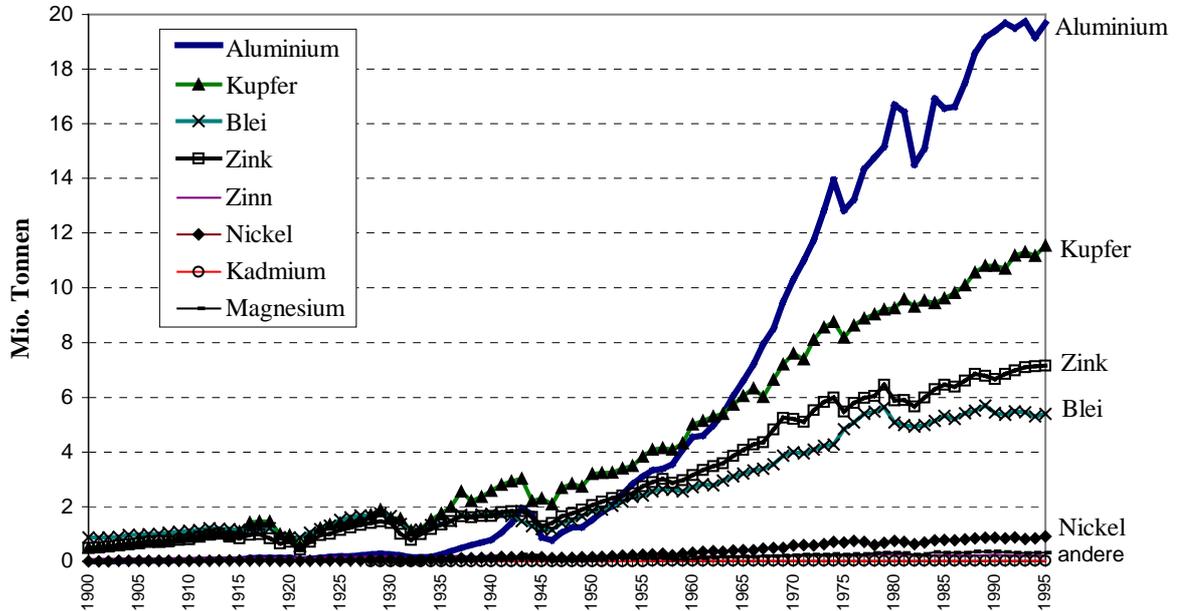
So lagen z. B. die Wachstumsraten der Kupferproduktion jener Zeit im zweistelligen Bereich und in 1943 wurden weltweit über drei Millionen Tonnen raffinierten Kupfers erzeugt – eine im Vergleich zu 1900 versechsfachte Jahresproduktion. Damit übertraf das Rotmetall in der Gruppe der Nichteisenmetalle das zuvor führende Blei und avancierte zum wichtigsten NE-Metall der Vorkriegszeit.⁸ Eine bemerkenswerte Entwicklung dieser Zeit war der Aufstieg des Leichtmetalls Aluminium, das 1821 entdeckt und dessen profitable Massenproduktion erst 1886 möglich wurde. Während Aluminium um 1900 herum noch unbedeutend war, wuchs seine Produktion besonders in den Jahren nach der großen Depression (1934-1943) sprunghaft mit Zuwachsraten bis zu 50% an. In nur zehn Jahren wurde die Produktion verzehnfacht, und mit einer Jahresproduktion von annähernd 2 Mio. t übernahm das Aluminium 1943 die Rolle des zweitwichtigsten Nichteisenmetalls.⁹

⁷ Vgl. Clark 1990: S. 27-34 und S. 59-62.

⁸ Alle Datenangaben über Produktionsmengen basieren auf den Quellen, die unter der Abbildung 2 angegeben sind. Die Angaben zu Wachstumsraten basieren auf eigenen Berechnungen.

⁹ Vgl. Moser/Moser 1994: S. 14 und Ray 1986: S. 58.

**Abbildung 3: Globale Produktion von Nichteisenmetallen von 1900-1995
in Mio. Tonnen**



Daten aus: Metallgesellschaft AG/ World Bureau of Metal Statistics (Hg.) 1996, Metallstatistik / Metal Statistics 1985-1995: S. 60-65.

Periode 2: Die Nachkriegszeit (1945-1970)

In der Nachkriegszeit vollzog sich ein sehr ausgeprägter Aufschwung, der durch die voranschreitende Industrialisierung der heutigen OECD-Länder und insbesondere durch Ausweitung und Wiederaufbau der verarbeitenden und der Schwerindustrie getragen wurde. Die entsprechend erhöhte Ressourcennachfrage der Industrieländer, die vor dem Krieg noch zum Großteil durch heimische Vorkommen gedeckt worden war, wurde jetzt zunehmend durch Exportbergwerke in den Kolonien erfüllt (Lechner et al. 1987: S. 163).

Bei den Energieressourcen setzte sich die Vorkriegsentwicklung fort. Trotz des beachtlichen weltwirtschaftlichen Aufschwungs hielten die stagnierenden Tendenzen in der Kohleproduktion an, die lediglich in den Jahren 1955-60 ansprechende Zuwachsraten über 4% aufwies. Im Gegensatz dazu wurde die Erdölproduktion bei kontinuierlichen Wachstumsraten bis zu 10% zwischen 1945 und 1970 mehr als verfünffacht. Das Erdöl wurde

schließlich in 1970 mit einer Jahresproduktion von über zwei Milliarden Tonnen zur mengenmäßig bedeutsamsten Energieressource (vgl. Abbildung 1).¹⁰

Enorme Produktionszuwächse fanden auch bei den nicht-erneuerbaren materiell genutzten Ressourcen statt. Während sich der Nachkriegsboom lediglich moderat auf die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen auswirkte (jährliche Zuwachsraten von 1-4%), kam es bei den nicht-erneuerbaren Ressourcen in der Nachkriegszeit zu einer Vervielfachung ihrer Produktion. Die Stahlproduktion wurde verfünffacht auf eine Jahresproduktion von 600 Millionen Tonnen in 1970, und die Produktion aller Nichteisenmetalle zusammen wuchs um den Faktor 4,6. Besonders hervorzuheben sind dabei die Entwicklungen bei den noch jungen NE-Metallen Aluminium und Nickel. Nickel als ein bedeutsames Legierungsmetall in der Stahlproduktion zeigte eine Vervielfachung in der Jahresproduktion, während sich beim Leichtmetall Aluminium der Wachstumspfad der Vorkriegszeit fortsetzte und ein Wachstum um den Faktor 12 von 1945-1970 realisiert wurde. Mit der Überschreitung von zehn Millionen Jahrestonnen in den 1960er Jahren wurde Aluminium zum wichtigsten Nichteisenmetall. Einen noch beachtlicheren Aufstieg als das Aluminium legten die polymeren Kunststoffe zurück, deren ersten Vertreter in Form von Kunstseide und Zellophan zu Beginn des 20. Jahrhunderts Anwendung fanden (Ray 1986: S. 62). Mit durchgängig zweistelligen Zuwachsraten in den Nachkriegsjahren erreichten diese neuen Materialien bereits 1960 höhere Produktionszahlen als das Aluminium, und bis 1970 wurde mit 35 Millionen Tonnen eine Jahresproduktion realisiert, die größer war als die aller Nichteisenmetalle zusammen (vgl. Abbildungen 2 und 3).

Periode 3: Die Zeit der Erdölkrisen (1970-1988)

Gedämpft wurde der Wachstumsboom und die Wachstumseuphorie der Nachkriegszeit einerseits 1972 durch den vielbeachteten Club-of-Rome-Bericht, der unter der Annahme gleichbleibender Wachstumsraten beim Ressourcenverbrauch eine Erschöpfung diverser Ressourcen und eine verheerende Umweltverschmutzung für Mitte des 21. Jahrhunderts prognostizierte (Meadows et al. 1972). Andererseits führten das Erdölembargo der OPEC-Staaten von 1973 und die reduzierten Ölexporte im Zuge der iranischen Revolution 1978

¹⁰ Vgl. für eine ausführliche Schilderung der globalen Energienutzung nach dem zweiten Weltkrieg: Clark 1990: S. 95-145. Hinsichtlich des *Energieinhalts* der Jahresproduktion wurde das Erdöl bereits 1963 zur bedeutsamsten Energieressourcen. Vgl. WRI et al. 1994: S. 167 und eigene Berechnungen.

zu extremen Energiepreiserhöhungen, die als Konsequenz in 1975 eine Weltwirtschaftskrise nach sich zogen (Clark 1990: S. 230-320). In dieser Zeit der Erdölkrise, die ebenfalls durch eine zunehmende umweltpolitische Regulierung in den Industrieländern charakterisiert war, vollzog sich in der globalen Ressourcennutzung der Übergang von einem exponentiellen Wachstum in der Ressourcenproduktion zu einem Pfad mit abnehmenden Wachstumsraten der Ressourceninanspruchnahme (vgl. Abbildungen 1-3).

Bei den Energieressourcen fand der exponentielle Wachstumspfad des Erdöls ein Ende. Die OECD-Länder stiegen in Reaktion auf die künstliche Erdölverknappung durch die OPEC vermehrt auf andere Energiequellen wie Atomkraft, Kohle und Gas um. Damit war der Boom in der Erdölnutzung beendet. Nach 1979 fiel die Erdölproduktion bis 1987 um 12%, und auch nach dem Verfall der Ölpreise konnten die Zuwachsraten der Produktion die Werte aus den 1960er Jahren nicht mehr erreichen. Als Konsequenz waren Produktionszuwächse bei den anderen Energieressourcen zu verzeichnen. Besonders die Steinkohle fand vermehrten Einsatz in der Stromerzeugung und konnte daher von 1973 bis zum Ende der 1980er Jahre jährliche Produktionszuwächse bis zu 5% verzeichnen. In 1984 wurde die Kohle mit über drei Milliarden Tonnen Jahresproduktion erneut zur meistverwendeten Energieressource der Welt (vgl. Abbildung 1).¹¹

Die Erhöhung der Energiepreise und die nachfolgende Weltwirtschaftskrise hatten auch deutliche Auswirkungen auf die Nachfrage nach materiellen Ressourcen, so daß es in den Jahren der Ölkrise bei allen Ressourcen zu Produktionsrückgängen kam. Die künstliche Ölverknappung durch die OPEC wurde im Lichte der Diskussion um den Club-of-Rome-Bericht auf Seiten der Ressourcenproduzenten als Vorbote der Erschöpfung diverser nicht-erneuerbarer Ressourcen gedeutet. Als Reaktion auf diese Stimmungslage verstärkten viele Bergbauunternehmen ihre Anstrengungen zur Exploration und Neuerschließung neuer Rohstofflagerstätten, um die erwartete erhöhte Rohstoffnachfrage der Zukunft bedienen zu können. So ergab sich in den 70er Jahren – mit Ausnahme des Krisenjahres 1975 – ein wachstumsorientierter Trend in der Erweiterung und Neuerschließung von Bergwerken bei gleichzeitig stagnierender Rohstoffproduktion. Die Erwartung der Rohstoffbesitzer, daß sich das Nachkriegswachstum und die Rohstoffnachfrage nach der Weltwirtschaftskrise

¹¹ Vgl. Clark 1990: S. 243-260. Gemessen am Energieinhalt der Jahresproduktion behielt das Erdöl allerdings auch nach 1984 seine globale Führungsrolle. Vgl. WRI et al. 1994: S. 167 und eigene Berechnungen.

von 1975 wieder einstellen würde, wurde jedoch nicht erfüllt. Es kam zur Krise in der traditionellen Rohstoffproduktion mit nur mäßigen Zuwachsraten zwischen 1975 und 1988. Erklärbar ist diese Krise hauptsächlich durch fünf Sachverhalte. *Erstens* führten die Erdölkrise zu deutlich verringerten ökonomischen Wachstumsraten in den 1970er Jahren.¹² *Zweitens* waren in den Industrieländern im Zuge der Bedeutungszunahme des Dienstleistungssektors Sättigungserscheinungen in bezug auf den Verbrauch traditioneller Rohstoffe festzustellen (MacMillan/Norton 1992: S. 490). *Drittens* stieg der Ressourcenverbrauch der Entwicklungsländer weit weniger stark an als vermutet, da nur einige wenige Schwellenländer erfolgreiche Industrialisierungspfade einschlagen konnten (Warhurst 1994: S. 40). *Viertens* brachten die 1980er Jahre im Zuge einer aufkommenden Umweltpolitik in den Industrieländern technologische Entwicklungen mit sich, die sich nachfragemindernd auf den Verbrauch der traditionellen Rohstoffe auswirkten (Technologietrends zur Miniaturisierung und zum Leichtbau) (Lechner et al. 1987: S. 5-6). Schließlich ist *fünftens* anzuführen, daß der Bestand an recycelbaren Altmaterial in vielen Industrieländern stetig zugenommen hatte und daher Sekundärressourcen aus dem Recycling an Bedeutung gewannen (Messner 1999: S. 421).

Im Gegensatz zu den traditionellen Metallrohstoffen waren die Kunststoffe von der Weltwirtschaftskrise kaum betroffen. Obwohl in den Jahren 1975 und 1980/81 konjunkturbedingt Produktionsrückgänge zu verbuchen waren, konnten in den nachfolgenden Jahren sofort wieder durchschnittliche Zuwachsraten von 5-7% erreicht werden. Bei innovativen neuen Kunststoffarten, wie z. B. dem Polypropylen, wurden in den 1980er Jahren sogar durchgängig zweistellige Wachstumsraten realisiert (vgl. Barnettson 1997: S. 5). Somit hielt der Wachstumstrend der Kunststoffe an, und die Jahresproduktion wurde von 1973 bis 1988 trotz der Krisen verdoppelt (vgl. Abbildung 2).

Periode 4: Die Zeit des Zusammenbruchs und der Transformation der sozialistischen Staatengemeinschaft (1989-1995)

Der sukzessive Zusammenbruch der sozialistischen Ökonomien in Osteuropa nach 1989 war neben der abebbenden Weltkonjunktur zu Anfang der 1990er Jahre ein wesentlicher

¹² In 1960-73 betragen die durchschnittlichen BSP-Wachstumsraten 5,2% (5% in OECD-Ländern, 6,7% in Entwicklungsländern). In den Jahren 1973-79 lagen die Raten um etwa 2% niedriger und bis 1987 sanken die durchschnittlichen Welt-Wachstumsraten auf 2,7%. Vgl. Warhurst 1994: S. 40.

Einflußfaktor auf den Weltrohstoffmärkten für nicht-erneuerbare Ressourcen. Die Bedeutung Osteuropas für die Rohstoffmärkte ergibt sich insbesondere aus dem Rohstoffreichtum dieser Region und den beachtlichen Anteilen an der Weltrohstoffproduktion, die 1988 bei wichtigen Roh- und Grundstoffen wie Stahl, den Nichteisenmetallen, Erdöl und Kunststoff zwischen 9% und 26% betrug (Messner 1999: S. 423). Mit dem Niedergang der sozialistischen Ökonomien sank insbesondere die Rohstoffnachfrage dieser Staaten drastisch ab, da einerseits die wirtschaftlichen Aktivitäten deutlich zurückgingen¹³, wodurch die Binnennachfrage nach Roh- und Grundstoffen markant abnahm, und zum anderen der Ressourcensektor seine strategische Bedeutung verlor, so daß aufgrund unterbleibender Subventionsleistungen und wegfallender Nachfrage aus dem Rüstungssektor¹⁴ die ökonomisch unrentabelsten Rohstoffproduktionsstätten geschlossen wurden. Als Resultat war die osteuropäische Rohstoffproduktion zwischen 1988 und 1991 stark rückläufig – so sank u. a. die Produktion bei den Nichteisenmetallen bis zu 60%, während die Erdölförderung um etwa 20% zurückging – und das, obwohl sich gleichzeitig der Rohstoffexport zu einem der wichtigsten Stützen der osteuropäischen Ökonomien entwickelte.¹⁵

Die Instabilitäten auf den Rohstoffmärkten nach dem Umbruch in Osteuropa, die durch die Weltwirtschaftskrise 1990/91 verstärkt wurden, hielten bis 1993/94 an. Insgesamt war von 1989-94 die globale Produktion bei allen Metallen und Energierohstoffen rückläufig oder stagnierend. Als Ausnahme können erneut die Kunststoffe gelten, deren Produktion im Krisenjahr 1990 zwar stagnierte, aber danach sofort wieder anwuchs. Bei diesem Grundstoff war der Zusammenbruch der osteuropäischen Ländern weniger wichtig. Bedeutsamer war hier vielmehr der zunehmende Verbrauch in den südostasiatischen Schwellenländern, die auch als Standort der Kunststoffproduktion an Bedeutung gewannen, während gleichzeitig die Produktion von Kunststoff in Osteuropa von 1988-94 halbiert wurde (o. V. 1995: S. 1762). Für alle nicht-erneuerbaren Ressourcen läßt sich abschließend sagen,

¹³ In Rußland sank das BIP von 1991 bis 1995 um 36,3%. Vgl. Manaktala 1995: S. 14.

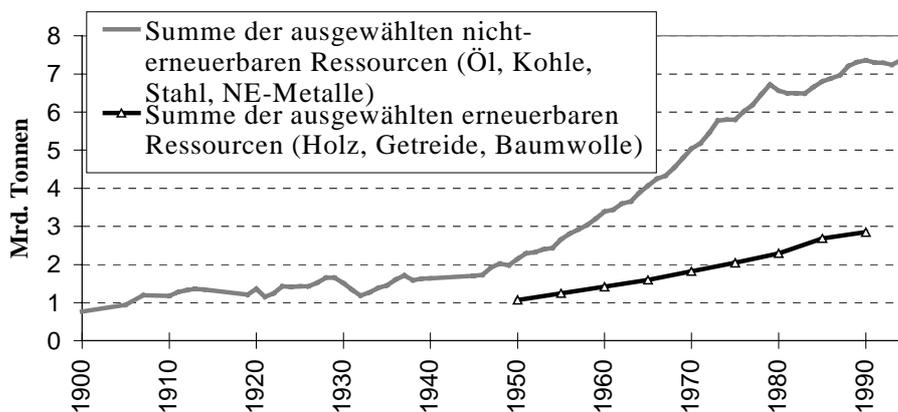
¹⁴ In der Sowjetunion wurden z. B. über 70% der Aluminiumproduktion in der Wehrtechnik verwandt. Vgl. Wobbe 1992: S. 473 und Manaktala 1995: S. 14.

¹⁵ Die massive Ausweitung der osteuropäischen Rohstoffexporte in Zeiten einer generell abflauenden weltwirtschaftlichen Konjunkturentwicklung, in deren Zuge diverse Rohstoffe teilweise weit unter Weltmarktpreis angeboten wurden, führte zu Eruptionen auf den internationalen Rohstoffmärkten. Die Märkte für Nickel, Stahl und Aluminium wurden im wahrsten Sinne des Wortes "überschwemmt", wodurch die Rohstoffpreise verfielen und diverse westliche Rohstoffproduzenten in den Konkurs getrieben wurden. Vgl. Messner 1999: S. 423 f.

daß seit der Erholung der Weltkonjunktur in 1994 ein generell leicht zunehmender Trend in der Weltproduktion und im Verbrauch zu konstatieren ist (vgl. Abbildungen 1 bis 3 und Munson 1995: S. 54-58).

Zusammenfassend läßt sich hinsichtlich des Trends in der globalen Ressourcennutzung konstatieren, daß *erstens* die Nutzung von nicht-erneuerbaren Ressourcen in diesem Jahrhundert stark anstieg und die Inanspruchnahme von erneuerbaren Ressourcen weit übersteigt, während *zweitens* der Verlauf in der Ressourcenproduktion eine logistische Form aufweist, mit intensiven exponentiellen Wachstumsphasen bis 1970, die danach in einen abgeschwächten Produktionsverlauf mit abnehmenden Wachstumsraten übergehen. Diese Feststellung wird auch durch die Abbildung 4 untermauert, wo die Produktionsverläufe der Abbildungen 1-3 in aggregierter Form dargestellt sind.

Abbildung 4: Globale Produktion ausgewählter erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Ressourcen in Milliarden Tonnen (1900-1995)



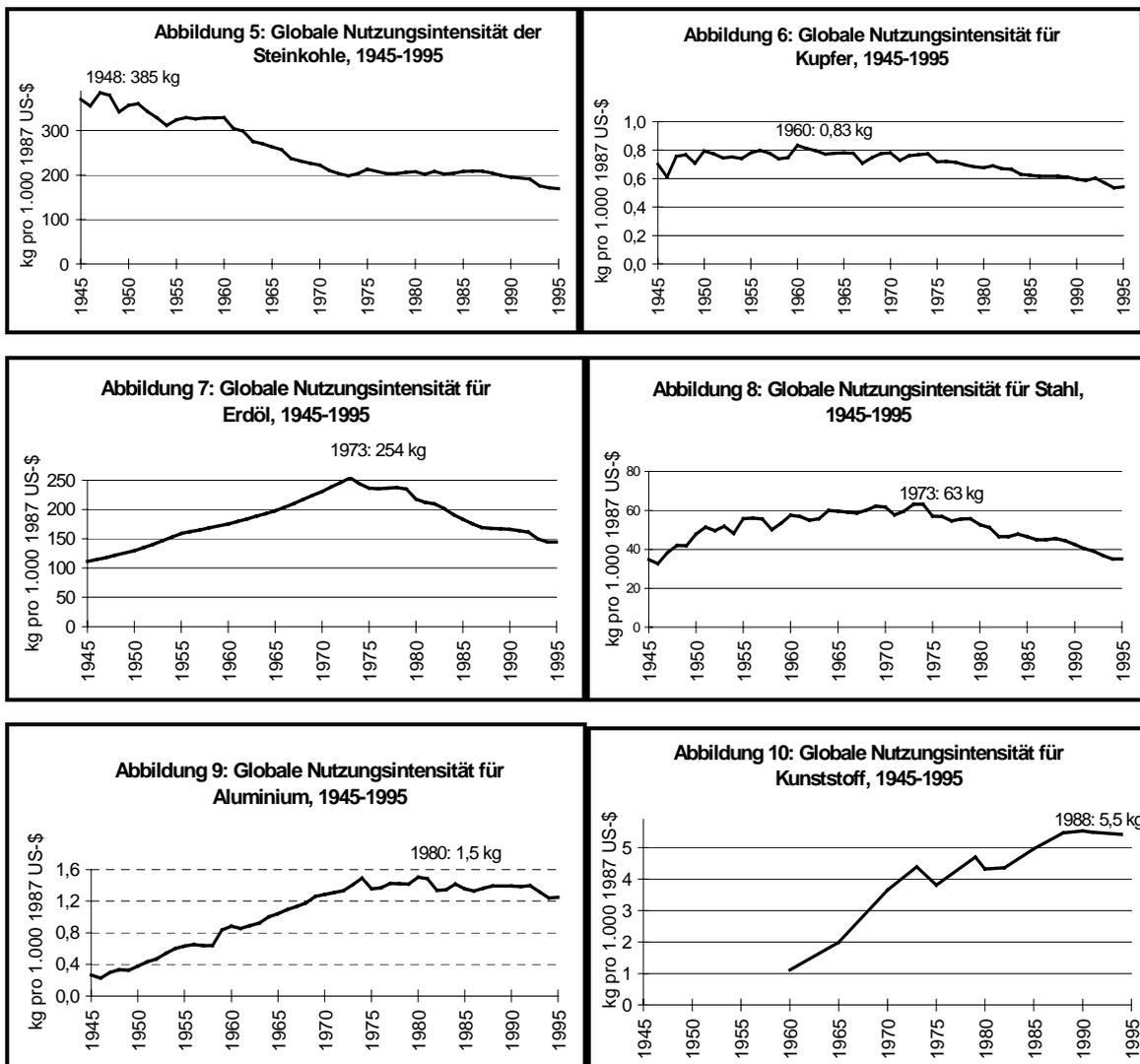
Datenquellen: siehe Angaben zu Abbildung 1.

Diese Abbildung impliziert, daß ein Prozeß globaler Stagnation in der Ressourcennutzung im Gange ist, ohne daß entsprechende den Ressourcenverbrauch regulierende Politiken notwendig waren, um diese Stagnation bewußt herbeizuführen. In der Tat scheint sich eine "natürliche" Sättigung im globalen Ressourcenverbrauch eingestellt zu haben. Gleichzeitig ist hingegen zu betonen, daß von einer absoluten Reduzierung in der Ressourcennutzung nicht die Rede sein kann.

3. Dematerialisierung als Phänomen eines Transmaterialisierungsprozesses

Die Stagnation in der Ressourcennutzung deutet angesichts der stetigen Tendenzen im Wachstum des globalen BIP darauf hin, daß in einigen Bereichen Prozesse einer Dematerialisierung stattgefunden haben könnten. Zur expliziten Messung von Dematerialisierungsprozessen wurde von Malenbaum (1977) der Indikator der Nutzungsintensität vorgeschlagen, die sich aus dem Rohstoffverbrauch¹⁶ einzelner Rohstoffe bezogen auf das BIP eines Landes ergibt. Von unterschiedlichen Autoren wurden Analysen zur Nutzungsintensität verschiedener Ressourcen für verschiedene Länder und Ländergruppen durchgeführt (Malenbaum 1977; Humphreys/Briggs 1983; Labys/Waddell 1989: S. 244-250; Lohani/Tilton 1993: S. 145-151 und Warhurst 1994: S. 40-41). Dabei zeigte sich u. a. bei einigen Ressourcen zuerst ein Trend zu steigenden und anschließend zu sinkenden Nutzungsintensitäten. Weiterhin wurde beobachtet, daß sich die Nutzungsintensitäten einzelner Ressourcen in unterschiedlichen Ländern sehr verschieden darstellen. So waren z. B. die eingesetzten Mengen der traditionellen Metalle Stahl, Kupfer, Zink und Blei pro Einheit BIP in Industrieländern zwischen 1960 und 1990 rückläufig, während die Werte in Entwicklungsländern anstiegen. Aus derartigen Ergebnissen ist allerdings keine eindeutige Aussage zu einer globalen Dematerialisierung ableitbar. Weiterhin ist der Indikator der Nutzungsintensität in bezug auf *ein* Land wenig aussagekräftig, da zwar Daten zu Rohstoffimporten und -exporten berücksichtigt werden, aber das Material, das bereits verarbeitet in Form von Vorprodukten importiert und exportiert wird, unbeachtet bleibt. Damit ergibt sich eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle in der Berechnung von länderbezogenen Nutzungsintensitäten (vgl. Al-Rawahi/Rieber 1991).

Sinnvoll ist die Verwendung von Nutzungsintensitäten hingegen auf globaler Ebene. Hier gleichen sich Import- und Exportströme von Rohstoffen und Vorprodukten aus, und die Ergebnisse ermöglichen exakte Aussagen hinsichtlich globaler Dematerialisierungsprozesse. Messner (1999: S. 595-599) berechnete globale Nutzungsintensitäten für 12 Rohstoffe und identifizierte Rohstoffgruppen mit ähnlichen Nutzungsintensitätsverläufen. Auf der folgenden Seite sind die Nutzungsintensitätskurven für sechs wichtige Rohstoffe abgebildet.



Quelle: Messner 1999: S. 598-599.

Besonders auffällig sind die sehr verschiedenen Muster dieser Kurven und der deutlich verschobene Zeitpunkt, an dem die verschiedenen Rohstoffe ihren Höhepunkt in der globalen Nutzungsintensität aufweisen. Unter Einbeziehung der zusätzlichen Kurven in Messner (1999) läßt sich konstatieren, daß Steinkohle, Zinn und Magnesium ihren Nutzungshöhepunkt vor 1955 haben. Kupfer, Blei, Zink und Kadmium weisen ihr Maximum zwischen 1955 und 1969 auf. Erdöl, Stahl und Nickel haben die höchsten Nutzungsintensitäten in den 1970er Jahren, während bei Aluminium und Kunststoffe die höchste Nutzung in den 1980er Jahren erkennbar ist, ohne daß ein eindeutiger Höhepunkt identifiziert werden

¹⁶ Rohstoffverbrauch ist definiert als heimische Rohstoffproduktion (primär und sekundär) plus Importe minus Exporte plus/minus Vorratsveränderungen. Vgl. Messner 1999: S. 595.

kann. Der Begriff der Dematerialisierung trifft im globalen Kontext also eher auf die Rohstoffe Kohle, Kupfer, Erdöl und Stahl zu (Abbildungen 5-8), nicht jedoch auf Aluminium und Kunststoffe (Abbildungen 9 und 10).

Eine theoretische Erklärung für diese empirisch beobachtbaren Trends differenziert verlaufender Nutzungsintensitätskurven für verschiedene Rohstoffe läßt sich mit Bezug zur Schumpeterschen Konjunkturtheorie finden. Diese Theorie besagt, daß die Konjunkturerwicklung in direkter Abhängigkeit von der Diffusion grundlegender technologischer Innovationen steht (Schumpeter 1961: S. 140-180). Für die Ressourcennutzung bedeutet das, daß in jedem Aufschwung besonders diejenigen Ressourcen stark nachgefragt werden, die für die Verbreitung der konjunkturtragenden Technologie benötigt werden.

Da im Zeitverlauf stets andere technologische Innovationen mit anderen Ressourcenerfordernissen für ökonomische Aufwärtstrends verantwortlich sind, kommt es zu dem Phänomen, daß einige Ressourcen in bestimmten Perioden besonders ausgeprägte Wachstumsraten in der Nutzung aufweisen. Ähnlich wie für den Lebenszyklus eines innovativen Produkts oder einer Technologie gilt damit auch für die zugrundeliegenden Ressourcen, daß mit Einführung des Produkts zuerst eine langsame Verbreitung eintritt, die dann in der Phase der Marktexpansion in eine überproportionale Wachstumsphase übergeht, während schließlich mit der Marktsättigung eine Stagnation der Ressourcennutzung einsetzt (Labys/Waddell 1989: S. 240-242).

Aus dieser Sicht der Dinge läßt sich konjunkturtheoretisch erklären, warum verschiedene Ressourcen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ihren Höhepunkt in der globalen Nutzungsintensität erreichen. So war z. B. die Steinkohle der Grundstoff bzw. die *Wachstumsressource* der industriellen Revolution; die Schwerindustrie mit den traditionellen Metallen lagen der Industrialisierung der OECD-Länder zugrunde; die Metalle Nickel und Aluminium waren nach seit den 1970er Jahren grundlegende Basisstoffe für neue Stahllegierungen und Innovationen im Leichtbau; das energiereiche Erdöl war die energetische Wachstumsressource der Nachkriegszeit; schließlich beruhte die Durchsetzung von Kunststoffen und anderen neuen Werkstoffen in der jüngeren Vergangenheit auf diversen Innovationen im Bereich der strukturellen und funktionellen Werkstoffanwendung. Waddell und Labys (1988) bezeichnen derartige Muster des Wandels in der Ressourcennutzung mit sich gegenseitig ablösenden Wachstumsressourcen als Prozeß einer *Transmaterialisierung*.

Hinsichtlich des konkreten Verlaufs der globalen Nutzungsintensitätskurven ist darauf hinzuweisen, daß dieser hauptsächlich durch das Muster der ökonomischen Entwicklung der heutigen Industrieländer geprägt ist, die den Großteil des globalen Ressourcenverbrauchs auf sich vereinen. Ein Vergleich der globalen Kurven mit denjenigen der USA aus Labys/Waddell (1989) zeigt allerdings, daß die Höhepunkte der globalen Kurven mindestens um etwa ein Jahrzehnt später anzutreffen sind. Dieser Tatbestand weist darauf hin, daß sich "nachholende Industrialisierungsprozesse" diverser Entwicklungsländer durchaus in der globalen Ressourcennutzung bemerkbar machen.

Im Lichte dieser Erklärung ist zu konstatieren, daß Dematerialisierung bei einzelnen Ressourcen ein ganz gewöhnlicher Vorgang im Verlauf des Transmaterialisierungsprozesses ist, der immer dann eintritt, wenn diejenige Technologie, die hauptsächlich für den Ressourcenverbrauch eines Rohstoffs verantwortlich ist, in ihrem Lebenszyklus die Marktsättigung erreicht. In den Abbildungen zur Gesamtressourcennutzung (Abbildungen 1-3) schlägt sich diese Sättigung in Form der Stagnation in der Ressourcennutzung nieder.

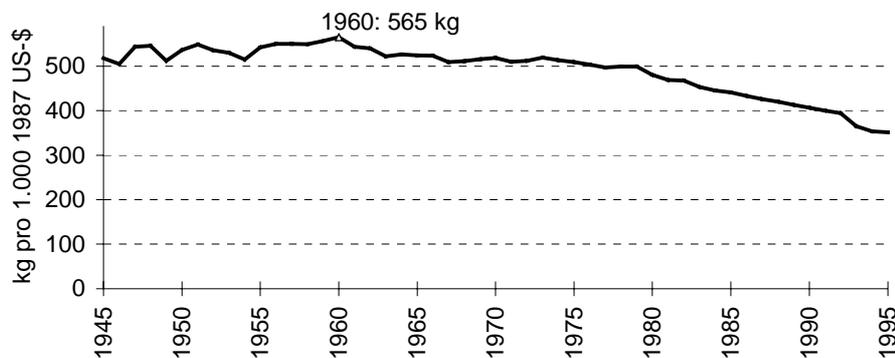
Nichtsdestotrotz kann mit Hilfe der ermittelten Nutzungsintensitäten auch untersucht werden, ob in der *aggregierten* Ressourcennutzung ein Trend zu einer globalen Dematerialisierung beobachtbar ist. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt den entsprechenden Kurvenverlauf für eine aggregiert globale Nutzungsintensität von nicht-erneuerbaren Ressourcen, wie er sich aus der Summe der Nutzungsintensitäten der wichtigsten nicht-erneuerbaren Massenressourcen (Kohle, Erdöl/Kunststoff, Stahl und die acht wichtigsten Nichteisenmetalle) ergibt.

Der Höhepunkt der aggregierten globalen Nutzungsintensität der nicht-erneuerbaren Massenressourcen wird 1960 erreicht, ist danach leicht sinkend und stagnierend und fällt nach 1979 schließlich deutlich ab. Somit ist zu schlußfolgern, daß im Prozeß der globalen Transmaterialisierung seit 1945 nicht nur eine Dematerialisierung bei einzelnen Rohstoffen stattgefunden hat, sondern auch der aggregierte globale Ressourcenverbrauch pro Einheit BIP um mehr als 20% gesunken ist. Somit ist als Ergebnis festzuhalten, daß sich insbesondere in den vergangenen 20 Jahren eine unverkennbare Dematerialisierung des globalen Wirtschaftens bei den wichtigsten Massenressourcen vollzogen hat.

Für eine Erklärung dieses Musters der aggregierten globalen Ressourcennutzung kann eine genauere Betrachtung der einzelnen Nutzungsintensitätskurven der Abbildungen 5 bis 10 dienlich sein. Neben der Tatsache, daß verschiedene Ressourcen im Zeitablauf die be-

deutsame Rolle als Wachstumsressource übernehmen und danach an weltwirtschaftlicher Bedeutung verlieren, ist hinsichtlich der Stagnation in der aggregierten Ressourcennutzung ein weiterer empirischer Tatbestand zu beachten. Fakt ist, daß die massenmäßig mit Abstand bedeutsamsten Ressourcen Kohle, Öl und Stahl mit Produktionszahlen im Bereich von hunderten von Millionen Tonnen in den 1990er Jahren (vgl. Abbildung 1) und Nutzungsintensitätswerten von 50-400 kg pro 1.000 1987er US-Dollar den Höhepunkt ihrer Nutzung vor 1975 hatten und danach deutlich rückläufig waren (vgl. Abbildungen 5, 7 und 8). Dementgegen bewegten sich die Wachstumsressourcen der späten 70er und 80er Jahre mengenmäßig in wesentlich geringeren Dimensionen. Kunststoff und Aluminium erreichten zusammen lediglich globale Produktionswerte unterhalb von 150 Millionen Tonnen, und die Nutzungsintensitäten sind geringer als 6 Kilogramm pro Tausend US-Dollar. Der mengenmäßige Bedeutungsverlust der Massenressourcen Kohle, Erdöl und Stahl wurde folglich durch die nachfolgenden Wachstumsressourcen Aluminium und Kunststoff nicht kompensiert.

Abbildung 11: Globale Nutzungsintensität für nicht-erneuerbare Massenressourcen in kg pro 1.000 1987 US-\$, 1945-1995 *



* enthalten sind: Steinkohle, Erdöl/Kunststoffe, Stahl und die acht wichtigsten Nichteisenmetalle.

Quelle: Messner 1999: S. 599.

Noch ausgeprägter ist dieser Prozeß bei den Wachstumsressourcen der 1980/90er Jahre festzustellen. Die in diesem Zeitraum boomenden Ressourcen sind u. a. neue Werkstoffe wie Germanium, Silizium und Platin als Grundstoffe der Elektronikindustrie. Diese Stoffe sind zwar extrem wertschöpfungsintensiv, aber ihre globalen Einsatzmengen liegen lediglich bei einigen hundert Tonnen, und ihre Nutzungsintensitäten bewegen sich in Dimensio-

nen von Gramm oder gar Milligramm pro Tausend US-Dollar (Labys/Waddell 1989: S. 249, Sterk 1994: S. 49-50 und Wernick 1994: S. 39). Das empirische Phänomen der Dematerialisierung erklärt sich somit daraus, daß sich die im Transmaterialisierungsprozeß gegenseitig ablösenden Wachstumsressourcen in den vergangen 35 Jahren stets geringere Verbrauchsmengen pro Einheit BIP aufwiesen, so daß der mengenmäßige Zuwachs in der Nutzung der jüngeren Wachstumsressourcen pro Einheit BIP nach 1960 geringer war als die Nutzungsintensitätsrückgänge ihrer Vorgänger.

Diese Interpretation im Schumpeterschen Sinne läßt allerdings *nicht* den Schluß zu, daß sich dieses Muster der Transmaterialisierung mit abnehmenden aggregierten globalen Nutzungsintensitäten der Wachstumsressourcen in der Zukunft weiter fortsetzen muß. Es wäre denkbar, daß weltwirtschaftliche Konjunkturaufschwünge der Zukunft erneut auf ressourcenintensiven Technologien oder Industrien basieren könnten, wenn sich z. B. in bevölkerungsreichen und flächenmäßig großen Entwicklungsländern, wie z. B. in China, ressourcenintensive Industrialisierungsprozesse vollziehen würden, die als Wachstumsmotoren der Weltwirtschaft fungierten. Auch ist es nicht abwegig, zu erwägen, daß Schlüsseltechnologien der Zukunft wieder ressourcenintensivere Züge annehmen.

Weiterhin läßt diese Interpretation der Ressourcennutzung die Möglichkeit zu, daß eine Ressource im Zeitablauf nicht nur einmal, sondern mehrere Male als Wachstumsressource auftritt. In dieser Weise ließe sich insbesondere der Ressourcennutzungspfad der Steinkohle in Abbildung 1 deuten. Ein erster ausgeprägter exponentieller Wachstumspfad fand zwischen 1880-1910 statt mit einer anschließend 35jährigen Stagnationsphase; ein zweiter Aufschwung ist in den Nachkriegsjahren zu datieren und stagniert 1960, während ein dritter Kohleboom mit der Erdölkrise 1973 beginnt und gegen Ende der 1980er Jahre ein Ende findet. Entsprechend ist auch der Verlauf der Steinkohle-Nutzungsintensität (Abbildung 5) nicht stetig sinkend, sondern weist einige zeitlich begrenzte Aufschwungphasen auf. Ähnliche Ressourcennutzungsmuster könnten auch bei anderen Ressourcen auftreten.¹⁷

¹⁷ Entsprechende Entwicklungen sind in der Tat beobachtbar. So ist z. B. das "alternde" Nichteisenmetall Kupfer mit seinem Nutzungsintensitätshöhepunkt im Jahre 1960 derzeit in diversen innovativen Anwendungsfeldern ein grundlegender Werkstoff, z. B. als Grundstoff der neuen Dünnschicht-Solarzellen. Außerdem wird das Kupfer voraussichtlich als Werkstoff der neuen Chipgeneration in der Mikroelektronik das Aluminium ablösen, da letzteres Grenzen bei der Miniaturisierung aufweist. Vgl. Meliß/Sandtner 1996: S. 17, Handelsblatt vom 29.7.98 sowie für weitere Beispiele der innovativen Kupferanwendung Messner 1999: S. 558. Sofern sich diese kupferbasierten Innovationen durchsetzen, mag das Kupfer eine Wachstumsressource der Zukunft sein.

Diese Ausführungen haben gezeigt, daß das Ausmaß der globalen Ressourcennutzung von der Durchsetzung von Basisinnovationen abhängt. Die Entwicklungen seit 1960 weisen im Prozeß der Transmaterialisierung das Phänomen einer aggregierten globalen Dematerialisierung bei nicht-erneuerbaren Massenressourcen auf. Daraus sollte aber nicht voreilig geschlossen werden, daß sich ein nachhaltiger Pfad in der globalen Ressourcennutzung, der durch eine reduzierte und ressourcenschonende Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen, durch vermehrte Nutzung von erneuerbaren Ressourcen und durch eine globale Entlastung der Natur charakterisiert ist, automatisch einstellt. Es sollte vielmehr beachtet werden, daß eine Ressourcenverbrauchsreduzierung pro Einheit BIP von mehr als 20% zwischen 1960 und 1995 in der absoluten Ressourcennutzung nicht einmal eine Reduzierung, sondern lediglich eine Stagnation bewirkt hat. Weiterhin ist es in Hinblick auf das Vorsorgeprinzip im Sinne des gerade erwähnten Kohlebeispiels ebenso gut möglich, das derzeit beobachtbare aggregierte globale Dematerialisierungsphänomen als mögliche Stagnationsphase vor einer neuen Wachstumsperiode zu interpretieren, als von einer automatischen "natürlichen" Sättigung im globalen Ressourcenverbrauch auszugehen und dann von einem erneuten Boom in der Ressourcennachfrage und den damit einhergehenden Umweltbelastungen überrascht zu werden.

4. Entwicklungstendenzen in der Ressourcennutzung und Einschätzung der globalen Umweltbelastungstrends

Die bisherige Diskussion der Ressourcennutzung fokussierte auf die mengenmäßige Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen. Für nachfolgende Generationen, die voraussichtlich mit einer stetig sinkenden Menge von nicht-erneuerbaren Ressourcen werden auskommen müssen, ist aber nicht nur die Größenordnung des Ressourcenverbrauchs von Interesse, sondern auch das Ausmaß der Umweltbelastung und die Beeinträchtigung der erneuerbaren Ressourcen, die mit der jeweiligen Ressourcennutzung einhergeht. Die Erschöpfung wichtiger nicht-erneuerbarer Ressourcen wird sich für nachfolgende Generationen um so gravierender auswirken, je drastischer die natürliche Lebensgrundlage und damit die Quelle potentieller erneuerbarer Substitutressourcen geschädigt ist.

In der Tat ist die Umweltbelastung durch die Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen beachtlich. In den verschiedenen Lebenszyklusstadien einer Ressource werden beginnend bei ihrer Ausbeutung, über ihre Verfeinerung und Raffinierung, ihren Einbau in

Technologien und Produkte, über ihre Phase der Produktnutzung bis hin zu ihrer Entsorgung verschiedene Arten von Umweltbelastungen erzeugt. Dabei entstehen bisweilen umweltschädigende Stoffströme, die in ihrem mengenmäßigen Gesamtausmaß um ein Vielfaches größer sind als das Endprodukt.¹⁸

Im Hinblick auf die oben empirisch festgestellte Tendenz zu einer globalen Dematerialisierung bei nicht-erneuerbaren Massenressourcen könnte in diesem Zusammenhang die Schlußfolgerung gezogen werden, daß sich im Vergleich zu den 1970er Jahren, als noch eine höhere Zuwachsrate in der globalen Ressourcennutzung realisiert wurde, der Druck auf die Natur *pro Einheit BIP* gesunken ist. Da jedoch die Gesamtressourcennutzung in absoluten Werten immer angestiegen ist und auch mit anhaltendem Wachstum der Weltwirtschaft zu rechnen ist, scheint eher eine stets steigende Umweltbelastung vorzuliegen. Das wäre jedoch nur der Fall, wenn sich die Prozesse in den einzelnen Lebenszyklusstadien von Ressourcen und Produkten und die mit ihnen verbundenen Umweltbelastungen nicht verändert hätten. Da aber erhebliche Änderungen in den vorhandenen Prozessen stattfanden und durch neue Wachstumsressourcen neue Prozesse und neue Umweltbelastungen hinzukamen, ist eine Abschätzung der Entwicklung in der Umweltbelastung durch die globalen Ressourcennutzungsmuster der vergangenen Jahrzehnte keine einfache Aufgabe.

Die Trends in der Umweltbelastung durch die Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen lassen sich mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 12 veranschaulichen. In der Abbildung werden die verschiedenen Stadien im Lebenszyklus einer ökonomisch genutzten Ressource mit Bezug auf die Ressourcenkonzentration gezeigt. Für den Lebenszyklus einer energetisch oder materiell nutzbaren Ressource kann konstatiert werden, daß eine bestimmte Mindest-Ressourcenkonzentration für eine ökonomisch lohnende Ausbeutung erforderlich ist. Nach ihrer Förderung wird die Ressource raffiniert, ihre Konzentration wird also erhöht. Diese Konzentrationserhöhung – wie auch jeder andere Prozeß im Lebenszyklus der Ressourcen – erfordert den Einsatz von Energie, Materie und Naturfläche und geht weiterhin mit einer gewissen prozeßbedingten Umweltbelastung einher.

In den sich anschließenden Stadien im Ressourcenlebenszyklus sinkt dann die Konzentration der Ressource in der Verarbeitung, in der industriellen Fertigung des Produkts, im

¹⁸ Allein bei der Raffinierung von Metallen, die derzeit Erzkonzentrationen zwischen 1-40% aufweisen, fallen bei der Produktion einer Tonne Metall bis zu 99 Tonnen hochgiftiger mit Schwermetallen und Chemikalien versetzter Erzabfall an. Vgl. Warhurst 1994: S. 20. Vgl. zu Umweltauswirkungen von Res-

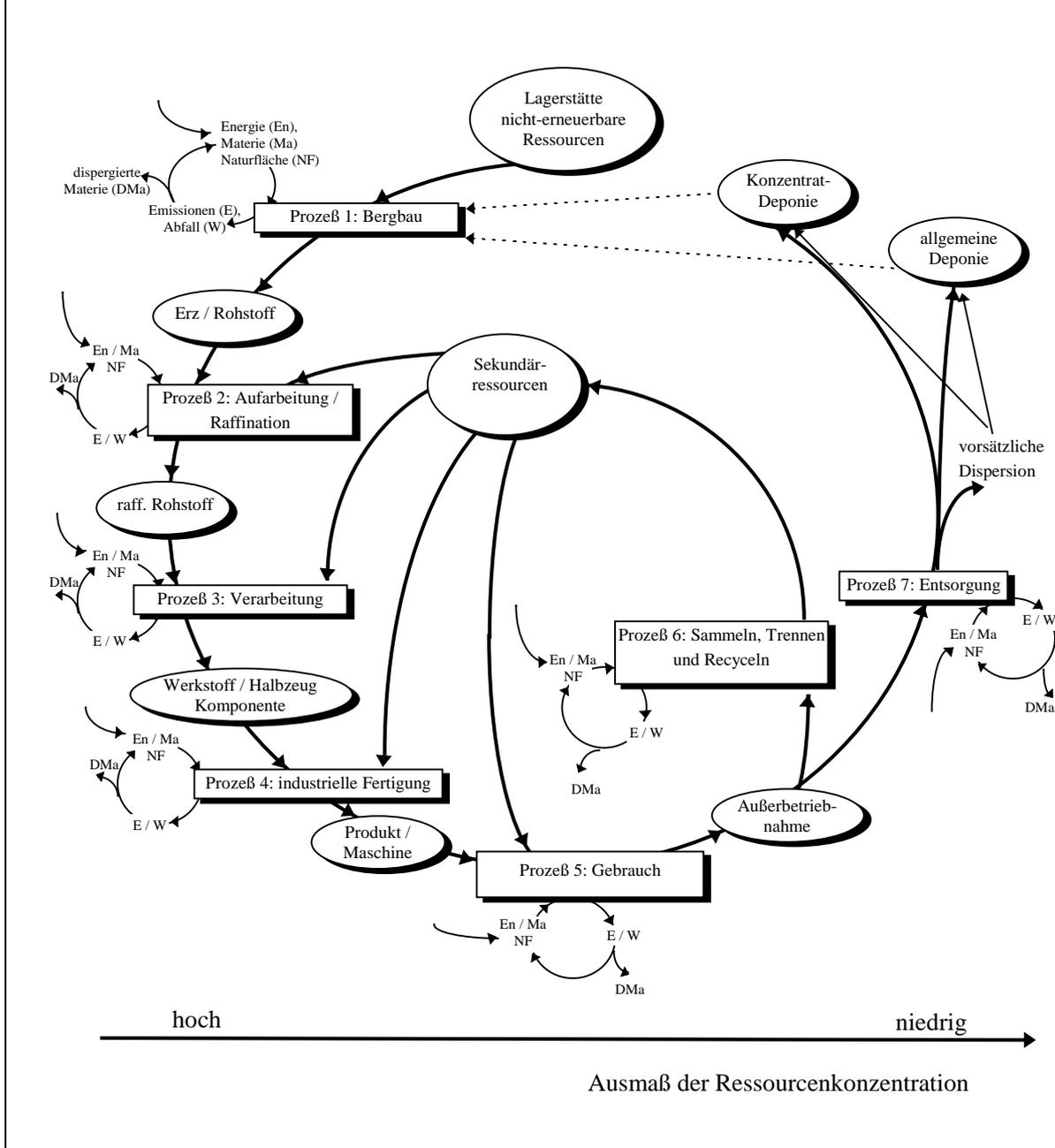
Laufe der Nutzung bis hin zur Entsorgung. In diesen Prozessen wird die Ressource zuerst mit anderen Ressourcen kombiniert und schließlich durch Nutzungsverschleiß und Entsorgung (möglicherweise durch Verbrennung) dispers in der Natur verteilt. Durch Einsatz von Energie, Material und Arbeit kann dem Prozeß der sinkenden Ressourcenkonzentration durch Recycling, Wiedernutzung von Bauteilen und Lagerung von Abfällen in Konzentratdeponien (zur möglichen zukünftigen Nutzung als Rohstofflagerstätte) entgegengewirkt werden.

Insgesamt stellt sich der Lebenszyklus einer Ressource also als Kreislauf dar, wobei jeder Prozeß der Konzentrationsänderung mit Umweltbelastungen verbunden ist. Besonders energie- und umweltintensiv sind diesbezüglich diejenigen Prozesse, die mit der Konzentrationserhöhung der Ressource einhergehen (Raffination, Recycling).¹⁹ Aus dieser Betrachtungsweise läßt sich der Grundsatz für einen umweltschonenden Umgang mit nicht-erneuerbaren materiell genutzten Ressourcen ableiten, daß Materialkreisläufe möglichst klein sein sollten. Das bedeutet im Sinne der Abbildung 12 insbesondere für die Wiedernutzbarmachung einer weitgehend verschlissenen Ressource, daß die Überwindung großer Konzentrationsdifferenzen (z. B. Recycling von Maschinenteilen durch Einschmelzen) zu vermeiden wäre und statt dessen eher Lösungen zu realisieren wären, die lediglich geringe Konzentrationsänderungen erfordern (z. B. Wiedernutzung von Bauteilen, Modulbauweise) (Messner 1999: S. 351-358).

In bezug auf die globale Ressourcennutzung in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten lassen sich nun vier Tendenzen ausmachen, die deutliche Auswirkungen auf das Ausmaß der Umweltbelastung durch die Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen hervorgerufen haben. Die erste Tendenz wirkt *umweltentlastend*, die anderen drei zeichnen sich durch einen *umweltbelastenden* Charakter aus.

Erstens ist zu betonen, daß sich in vielen Ländern durch den Einsatz von Umwelttechnologien und durch ein effizienteres Ressourcenmanagement sowohl die Menge der eingesetzten Material- und Energieressourcen in vielen Prozessen des Ressourcenlebenszykluses als auch das Ausmaß der freigesetzten Emissionen und Abfälle verringert werden konnten. So wurde beispielsweise in der Kupferproduktion der notwendige Energieeinsatz in der

Abbildung 12:
Lebenszyklus-Stationen einer nicht-erneuerbaren Ressource im
stofflichen Wirtschaftskreislauf



Raffination einer Tonne Kupfer durch Einsatz verbesserter Technologien in verschiedenen Industrieländern in den vergangenen 50 Jahren nahezu halbiert, während die emittierten

19 Vgl. dazu z. B. die Diskussion der Ökobilanz zu Kupferdrähten in Messner 1999: S. 487-496.

Schwefeldioxidemissionen durch eine nachgeschaltete Schwefelsäuregewinnung annähernd um den Faktor 100 reduziert werden konnten.²⁰ Die Umweltbelastungen in den Prozessen der Ressourcennutzung, die in Abbildung 12 durch die Inputs von Energie, Materie und Naturfläche sowie die Outputs in Form von Abfällen und Emissionen bei allen Prozessen im Lebenszyklus dargestellt sind, konnten pro Einheit produzierter Ressource also deutlich gesenkt werden.

Zweitens fand in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg eine zunehmende Verlagerung der Rohstoffgewinnung in Entwicklungsländer statt. Die Industrieländer haben den Großteil ihrer heimischen Ressourcenvorkommen weitgehend für ihre Industrialisierung verbraucht, so daß heute viele der besten Rohstofflagerstätten in Entwicklungsländern gelegen sind (Warhurst 1994: S. 38-39 und Lechner et al. 1987: S. 163). Das technologische Niveau in diesen Ländern, und insbesondere bei den Umwelttechnologien, ist zumeist längst nicht so hoch wie in den Industrieländern, und selbst multinationale Konzerne, die Rohstoffe in Entwicklungsländern gewinnen, verwenden nicht immer die umweltfreundlichsten Technologien, da die Umweltgesetze jener Länder es nicht verlangen (Warhurst 1994: S. 44-51). Als Konsequenz existieren zwischen den Ländern im Norden und im Süden beträchtliche technologische Lücken und enorme Unterschiede in der Umweltbelastung durch Ressourcengewinnung.²¹ Diese Tendenz ist als teilweise kompensierende Gegenbewegung zu dem oben beschriebenen Umweltentlastungseffekt durch Umwelttechnologien in Industrieländern zu interpretieren.

Drittens ist darauf hinzuweisen, daß in den vergangenen Jahrzehnten aus einer Sicht der absoluten Ressourcennutzung nicht nur eine steigende Ressourcenproduktion stattfand, sondern auch die Ressourcenkonzentrationen im Erzgestein deutlich abgenommen haben. Mit Bezug auf die Abbildung 12 hat sich das Konzentrationsniveau der Rohstofflagerstätten verringert (nach rechts verschoben), so daß sowohl der Energieaufwand als auch die Abfall- und Emissionsmengen zur Gewinnung einer raffinierten Ressource gestiegen sind. Wieder kann als Beispiel die Kupfergewinnung genannt werden. Hier sank die mittlere Erzkonzentration von den 60er zu den 80er Jahren von 2,15% auf 0,77% (Lechner et al.

²⁰ Vgl. für einen umfassenderen Überblick über die umweltentlastenden Wirkungen durch innovative Umwelttechnologien im Lebenszyklus des Kupfers: Messner 1999: S. 497-511.

²¹ So zeigte z. B. Messner 1999 (S. 508-517) für den Raffinationsprozeß in der Kupferproduktion, daß durch weltweite Verbreitung der besten verfügbaren Raffinationstechnologien SO₂-Reduktionen möglich wären, die den Emissionsmengen von Industrieländern wie Dänemark oder Irland entsprechen.

1987: S. 104). Dadurch erhöhte sich die zu verarbeitende Erzmeng (und auch die hochgiftige Erzabfallmenge) zur Gewinnung der gleichen Rohstoffmenge in nur 20 Jahren um den Faktor 2,8. Mit einer Verringerung der Ressourcenkonzentration ist außerdem ein erhöhter Flächenverbrauch verbunden, da mehr Erdoberfläche zur Ausbeutung der gleichen Ressourcenmenge umgegraben bzw. freigelegt werden muß. Auch die Tendenz der sinkenden Ressourcenkonzentrationen wirkt also dem Umweltentlastungseffekt durch Umwelttechnologien entgegen.

Viertens ist im Zusammenhang mit neuen innovativen Werkstoffen und Technologien, die als Wachstumsressourcen der Gegenwart anzusehen sind, eine Tendenz zu großen und größer werdenden Materialkreisläufen beobachtbar. So sind einerseits die Anforderungen an die Reinheit der Ressourcen extrem hoch und tendenziell steigend (sehr hohe Konzentration). Als Beispiel sei angeführt, daß heute für elektronische Funktionswerkstoffe Reinheitsgrade zwischen 99,999% und 99,9999999% erforderlich sind (Sterk 1994: S. 49). Für die Erreichung derartiger Reinheitsgrade sind extrem hohe Einsatzmengen an Energie notwendig. Andererseits nimmt die Komplexität der Werkstoffe in Verbundform stetig zu, und auch die Technologien werden hinsichtlich ihrer Werkstoffzusammensetzung immer komplexer (niedrige und sinkende Konzentration der Einzelressource im Endprodukt). Die Vermischung der Ressourcen untereinander steigt auf diese Weise, und sowohl die Herstellung der Produkte als auch ihre Wiederverwertung werden dadurch immer schwieriger bzw. energie- und materialeinsatzintensiver. In diesem Kontext ist des weiteren darauf hinzuweisen, daß durch Innovationen in der Ressourcennutzung die Anzahl der genutzten Stoffverbindungen stetig ansteigt und damit neue Stoffe, deren toxisches Potential gegenwärtig noch unbekannt ist, in die Natur gelangen, die unabsehbare Wirkungen auslösen können. Im Gegensatz zum umweltschonenden Prinzip der kleinen Materialkreisläufe in der Ressourcennutzung zeigt sich bei den innovativen Ressourcen also die Tendenz zu großen Kreisläufen mit wachsenden Konzentrationsdifferenzen, für deren Umsetzung umweltintensive Prozesse erforderlich sind (Messner 1999: S. 386-392).

Angesichts dieser vier zu beobachtenden empirischen Tendenzen hinsichtlich der Umweltwirkungen durch die Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen läßt sich die Frage, ob das oben dargestellte Entwicklungsmuster in der Nutzung von natürlichen Ressourcen (globale Dematerialisierung bzw. Stagnation in der globalen Ressourcennutzung) mit einer Umweltbe- oder -entlastung einherging, nicht exakt beantworten. Ange-

sichts der zuletzt genannten drei Tendenzen kann nicht ausgeschlossen werden, daß die absolute Umweltbelastung durch alle Prozesse der Ressourcennutzung in den vergangenen Jahren zugenommen hat und auch in Zukunft zunehmen kann – selbst wenn die globale Dematerialisierung bei den nicht-erneuerbaren Massenressourcen andauert.

5. Ausblick: Bausteine für eine Regulierung der nachhaltigen Ressourcennutzung

Angesichts der hier formulierten empirisch begründeten Aussagen zur globalen Ressourcennutzung, zur globalen Dematerialisierung in den Prozessen der weltwirtschaftlichen Transmaterialisierung sowie zu den dadurch verursachten Umweltbelastungen und ihren Entwicklungstendenzen kann die Schlußfolgerung gezogen werden, daß die nachhaltige Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen einer politischen Regulierung auf mehreren Ebenen bedarf und sich auf keinen Fall automatisch aus dem freien Spiel der ökonomischen Kräfte ergibt. Da verschiedene Arten der Regulierung im Sinne der ressourcen- und umweltschonenden Ressourcennutzung in einigen Ländern bereits existieren, sollen nachfolgend lediglich diejenigen Politikbereiche genannt werden, wo noch deutlich intensivierete Politikanstrengungen notwendig sind.

In bezug auf die direkte Ressourcennutzung ist zwar der Trend zur globalen Dematerialisierung bzw. zur Stagnation in der Gesamtressourcennutzung erkennbar, doch es ist nicht gewährleistet, daß dieser Trend anhält oder die Ressourcennutzung in absehbarer Zeit sogar absolut sinkt. Letzteres wäre für einen nachhaltigen Umgang mit nicht-erneuerbaren Ressourcen in mittlerer Zeitfrist hingegen unumgänglich, um einen schockfreien Übergang zu einer vermehrt auf erneuerbaren Ressourcen basierenden Wirtschaftsweise zu realisieren. Gerade angesichts der Preisfluktuationen auf den Rohstoffmärkten, die nicht selten aufgrund von (unökonomischen) Überproduktionsverhalten der Ressourcenanbieter in Entwicklungsländern sehr niedrige Preise hervorbringen und damit Anreize zu einer übermäßigen Nutzung von Rohstoffen generieren, wäre eine mengenbezogene oder steuerlich ansetzende Regulierung der Ressourcengewinnung und -nutzung auf globaler und nationaler Ebene im Sinne der Ressourcenschonung angebracht.

Auch die Durchsetzung einer nationalen ressourcensparenden Kreislaufwirtschaft mit niedrigen Konzentrationsdifferenzen ist ohne staatlichen Eingriff kaum denkbar. Ganz abgesehen von den fehlenden Marktanreizen ist in diesem Bereich auch die Überwindung der

auf Massendurchsatz konzentrierten institutionellen Strukturen der Produktions- und Recyclingwirtschaft nicht ohne reformerische Staatseingriffe möglich. Außerdem darf gerade im Bereich der materiellen Ressourcennutzung nicht vergessen werden, daß für viele hochwertige Materialanwendungen ausschließlich nicht-erneuerbare Ressourcen verwendet werden und erneuerbare Substitute in den meisten Fällen nicht vorhanden oder unökonomisch sind. Hier ist es die Aufgabe des Staates, entsprechende Grundlagenforschung zu forcieren, um erneuerbare Substitutressourcen frühzeitig erforschen zu lassen bzw. die Anwendung erneuerbarer Ressourcen durch Anreize zu begünstigen.

Auch hinsichtlich der Umweltbelastung, die mit der Ressourcennutzung einhergeht, ist staatliche Regulierung vonnöten. Hier sind umweltpolitische Rahmenbedingungen zu schaffen, die umweltschonende Produktions- und Konsumweisen und ihre stetige Verbesserung unterstützen. In diesem Zusammenhang ist besonders der Aufbau von umweltpolitischen Gesetzgebungen und Institutionen zu ihrer Umsetzung in Entwicklungsländern erforderlich, wo häufig sehr hohe Umweltbelastungen durch Produktionsprozesse zu beobachten sind. In internationaler Kooperation sind hier u.a. Mechanismen für einen Transfer von Umwelttechnologien zu schaffen, um die beachtlichen technologischen Lücken in den Prozessen der Ressourcenverarbeitung zu verringern.

Weiterhin ist es dringend notwendig, daß innovative Werkstoffe der Gegenwart, die die Wachstumsressourcen der Zukunft darstellen, frühzeitig auf ihre Umweltbelastungspotentiale für den Fall der Massenanwendung überprüft werden. Trotz bestehender Prozeduren zur Technikfolgenabschätzung in vielen Industrieländern fehlen in Hinblick auf den Prozeß der Transmaterialisierung geeignete Instrumente für eine vorsorgende Umweltpolitik für den Bereich der dispersen Materialnutzung.

Schließlich sollte es auch Ziel einer nachhaltigen Ressourcen- und Rohstoffpolitik sein, die Artenvielfalt der Natur zu bewahren, denn sie ist letztlich die materielle und energetische Basis einer zukünftigen Wirtschaft, in der nicht-erneuerbare Ressourcen zunehmend erschöpft sein werden. Im Sinne des Leitziels der Nachhaltigkeit sollten daher Politiken zur Sicherung der ökonomischen Ressourcenverfügbarkeit und Politiken zum Schutz von Natur, Landschaft und Artenvielfalt stets Hand in Hand gehen.²²

²² Für eine ausführlichere Diskussion der Bestandteile einer nachhaltigen Rohstoffpolitik vgl. Messner 1999: S. 453-471.

6. Literatur

- Alexandros, Nikos (Hg.) 1995**, World Agriculture: Towards 2010 – An FAO Study, FAO der USA, Chichster, New York et al.: John Wiley & Sons.
- Al-Rawahi, K.; Rieber, M. 1991**, Embodied Copper – Trade, Intensity of Use and Consumption Forecasts. In: Resources Policy, Vol. 17, Nr. 1, March 1991, S. 2-12.
- Baccini, Peter; Brunner, Paul H. 1991**, Metabolism of the Antroposhere. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London
- Barnetson, Andrew 1997**, Advances in Polymers – Market and Technical Trends, Report from Rapra's Industry Analysis Department, Rapra Technology Limited.
- Clark, John G. 1990**, The Political Economy of World Energy – A Twentieth Century Perspective. Chapel Hill & London: University of Carolina Press.
- FAO (Hg.) 1969-1996**, FAO Production Yearbook, Vol. 23-50, FAO.
- Forest Products Society (Hg.) 1994**, The Globalization of Wood: Supply, Processes, Products, and Markets, Proceedings No. 7319, Pulication of Conference Papers, Portland/Oregon.
- Glenz, W. 1989**, Die Kunststoffindustrie der Welt, in: Kunststoffe, Jg. 79, Heft 11, Nov. 1989, S. 1238-1266.
- Humphreys, D.; Briggs, S. 1983**, Mineral Consumption in the UK, 1945-1980: A Statistical Analysis. In: Resources Policy, Vol. 9, No. 1, March 1983, S. 4-22.
- Labys, W.C.; Waddell, L.M. 1989**, Commodity Lifecycles in US Materials Demand, in: Resources Policy, Vol. 15, Nr. 3, September 1989, S. 238-252.
- Lechner, H.; Sames, C.W.; Wellmer, F.W. 1987**, Mineralische Rohstoffe im Wandel, Schriftenreihe Bergbau, Rohstoffe, Energie, Band 25, Essen: Verlag Glückauf GmbH.
- Lohani, Prem R.; Tilton, John E. 1993**, A Cross-Section Analysis of Metal Intensity of Use in the Less Developed Countries, in: Resources Policy, Vol. 19, Nr. 2, June 1993, S. 145-154.
- MacMillan, Angus; Norton, Karen 1992**, Zur Zukunft der Primärhütten für Basismetalle in Europa, in: Metall, Jg. 46, Heft 5, Mai 1992, S. 490- 493.
- Malenbaum, W. (1977)**, World Demand for Raw Materials in 1985 and 2000, McGraw-Hill, New York
- Manaktala, S. C. 1995**, The Russian AL Industry's Difficult Transition to a Market Economy, in: Journal of Metals, Vol. 47, Nr. 5, May 1995, S. 14-18.
- Meadows, D.H.; Meadows, D.L. Randers, J.; Behrends, W.W. 1972**, The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome, New York: Universe.
- Meliß, Michael; Sandtner, Walter 1996**, Der Forschungsstand bei den regenerativen Energiequellen, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 46, Heft 1/2 (1996), S. 14-23.
- Messner, Frank 1999**, Nachhaltiges Wirtschaften mit nicht-erneuerbaren Ressourcen – Die vier Ebenen einer nachhaltigen Materialnutzung am Beispiel von Kupfer und seinen

- Substituten, Peter Lang Verlag, Frankfurt am Main, Berlin, Bern, Bruxelles, New York, Wien.
- Metallgesellschaft AG; World Bureau of Metal Statistics (Hg.) 1996**, Metallstatistik / Metal Statistics 1985-1995, 83. Jg., Frankfurt am Main: Metallgesellschaft AG und Ware/GB: World Bureau of Metal Statistics.
- Moser, Claudio; Moser, Christine 1994**, Streitfall Aluminium, Materialien zum GKKE-Dialogprogramm, Heft D9, Bonn.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.) 1996**, Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1996, Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH.
- Mineralölwirtschaftsverband e.V. (Hg.) 1996**, Öl – Rohstoff und Energieträger, Ribbesbüttel: Saphir Druck und Verlag.
- O. V. 1995**, Die Kunststoffindustrie der Welt, in: Kunststoffe, Jg. 85, Heft 10/1995, S. 1761-1762.
- Munson, Mark C. 1995**, Events and Trends in Metal and Mineral Commodities, in: Journal of Metals, Vol. 47, Nr. 4, April 1995, S. 54-58.
- Ray, George F. 1986**, Innovation in Materials, in: MacLeod, Roy; Freeman, Christopher (Hg.) 1986, Technology and the Human Prospect, London and Wolfeboro N.H.: Frances Printer, S. 55-70.
- Schumpeter, Joseph A. 1961**, Konjunkturzyklen – Eine theoretische, historische und statistische Analyse des kapitalistischen Prozesses, erster Band, Vanderhoeck & Ruprecht: Göttingen, Originalausgabe New York 1939.
- Sterk, G. 1994**, Rohstoffe für neue Technologien, Wien, New York: Springer-Verlag.
- Tippee, Bob (Hg.) 1997**, International Petroleum Encyclopedia, Tulsa: Penn Well Publishing Co.
- Young, John E. 1993**, Umweltproblem Bergbau – Strategien gegen die Ausbeutung der Erde, Worldwatch Paper, Band 5, Schwalbach: Wochenschau Verlag.
- Waddell, L.M.; Labys, W.C. 1988**, Transmaterialization: Technology and Materials Demand. In: Materials and Society, Vol. 12 (1988), S. 59-88.
- Warhurst, Alyson 1994**, Environmental Degradation from Mining and Mineral Processing in Developing Countries: Corporate Resonances and National Policies, Paris: OECD.
- Weizsäcker, Ernst Ulrich von; Lovins, A. B.; Lovins, L. H. 1995**, Faktor VIER. Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome. München: Droemer Knauer.
- Wernick, Iddo K. 1994**, Dematerialization and Secondary Materials Recovery in the U.S., in: Journal of Metals, Vol. 46, Nr. 4, S. 39-42.
- Wobbe, Karl-Dieter 1992**, Die Aluminium-Industrie der GUS – Auswirkungen auf den Weltmarkt, in: Metall, Jg. 46, Heft 5, Mai 1992, S. 473-475.
- WRI (World Resources Institute); UNEP; UNDP 1994**, World Resources 1994-95. People and the Environment. New York and Oxford: Oxford University Press.