

# Rohstoffe und Gesellschaft

A. Grübler

Die Wechselwirkungen zwischen Rohstoffen und Gesellschaft werden an Hand der Entwicklungen seit der Industriellen Revolution mit Beispielen illustriert. Der Beitrag kommt zu dem Schluss, dass Rohstoffverfügbarkeit gesellschaftlich und nicht geologisch determiniert ist, wobei insbesondere technischer Wandel eine Schlüsselrolle spielt. Eine umfassende Kohlenstoffbilanz fossiler Energierohstoffe zeigt, dass Grenzen des Wachstums eher abfallseitig (Emissionen) als aufkommensseitig (Lagerstätten) sichtbar werden. Eine globale Materialbilanz macht deutlich, dass der industrielle Metabolismus bereits jetzt Größenordnungen globaler Veränderung erreicht hat, was Umweltschutz und Abfall- und Depo-niewirtschaft zu wichtigen Herausforderungen sowohl der Industrie- als auch der Entwicklungsländer macht.

*Resources and Society.* The interactions between resources and society are illustrated with selected examples since the onset of the Industrial Revolution. The paper concludes that resource availability is rather socially constructed than geologically preordained with technological change playing a critical role. A comprehensive carbon balance of all fossil fuel occurrences concludes that ultimate limits to growth are more visible from an environmental viewpoint (emissions) than from potential supply (availability of carbon in the Earth's crust). A global analysis of the industrial metabolism that has reached scales qualifying as global change reconfirms this conclusion. Environmental factors, waste minimization and management emerge thus as important new challenges for resource management in both industrial and developing countries.

## 1. Einleitung

Rohstoffe und Gesellschaft entwickeln sich dynamisch und in enger Wechselbeziehung<sup>1</sup>, was erst aus einer langfristigen Perspektive heraus voll ersichtlich wird<sup>2</sup>. In diesem Beitrag soll dies anhand dreier Kernthesen historisch kurz beleuchtet werden.

1. Die verfügbare Rohstoffbasis ist ein entscheidender prägender Faktor der materiellen Kultur einer Gesellschaft, wobei Verfügbarkeit durch Nachfrage, wirtschaftliche Anreize (Preise), sowie Technikentwicklung (Innovationen) gesellschaftlich „konstruiert“ wird.
2. Die vielbeschworenen „Grenzen des Wachstums“<sup>3</sup> ergeben sich weniger aufkommensseitig (geologische Verfügbarkeit) als abfallseitig, d. h. durch Umweltauswirkungen wie die Beeinflussung planetarer Stoffkreisläufe und Prozesse (z. B. Klimaveränderungen).
3. Die langfristige Entwicklung der Nachfrage nach Rohstoffen ist einerseits durch ein hohes Nachfragepotential auf Grund der Disparitäten wirtschaftlicher Entwicklung zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, andererseits auch durch kontinuierlichen Strukturwandel, Substitution und Entkoppelung von Wirtschafts- und Rohstoffnachfragewachstum („Ent-

materialisierung“) gekennzeichnet. Einfache Trendextrapolation erscheint auf Grund der komplexen Wechselwirkungen problematisch.

## 2. Rohstoffe und Gesellschaft: die historische Dimension

### 2.1 Von der Neolithischen ...

Die Bedeutung von Rohstoffen für die Entwicklung der Zivilisation und ihrer materiellen Kultur ist Allgemeinwissen. Nicht zuletzt benennen wir ganze Epochen der Menschheitsgeschichte nach verschiedenen Werkstoffen, beginnend mit der Steinzeit, der Bronzezeit, oder der Eisenzeit. Diese Epoche-Prägung bezieht sich allerdings nur auf die wenigen, mit großem Aufwand hergestellten – und daher teuren – Artefakte, die *Homo Faber* – der Werkzeugmacher – für Krieg und Frieden aus Feuerstein, Bronze oder Eisen hergestellt hat. Die, von einer quantitativen Sichtweise wichtigsten Rohstoffe, die die materielle Kultur fast der gesamten Menschheitsgeschichte bestimmt haben sind demgegenüber Holz, Lehm und Stein. Der Technik-Philosoph Lewis Mumford<sup>4</sup> hat bereits in den 30er Jahren darauf hingewiesen, dass wir eigentlich erst seit Beginn der Industriellen Revolution von einer Veränderung der Rohstoffbasis der Alltagskultur der Menschen sprechen können – einer Veränderung, die die Physiker Goeller und Weinberg<sup>5</sup> mit dem Begriff des „demandite“, der durchschnittlichen Nachfrageeinheit gemessen am „Atomcocktail“ aller verwendeten Rohstoffe, zu beschreiben versucht haben. Goeller und Weinberg wiesen insbesondere darauf hin, wie wichtig Kohlenstoff – d. h. fossile Energie – in der Rohstoffbilanz der Indus-

Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Arnulf Grübler, IIASA, A-2361 Laxenburg/Österreich. E-Mail: gruebler@iiasa.ac.at

Nach einem Festvortrag, gehalten am 16. Mai 2000 beim Österreichischen Bergbautag 2000 in Leoben. Farbillustrationen dieses Beitrages, sowie weiterführendes Bildmaterial sind im Internet verfügbar: [http://www.iiasa.ac.at/~gruebler/Presentations/Leoben2000/Presentation\\_full\\_files/frame.htm](http://www.iiasa.ac.at/~gruebler/Presentations/Leoben2000/Presentation_full_files/frame.htm)

trigesellschaft ist. Dies ist sicherlich zutreffend, wenn gleich wir aus neueren, vollständigeren Untersuchungen wissen, dass fossile Energie bei weitem nicht der „gewichtigste“ Rohstoff ist – wie später noch näher ausgeführt wird. Historiker der Zukunft werden vielleicht unser Zeitalter als die „Schotterzeit“ bezeichnen. Vor allem wenn wir bedenken, dass die Nachfrage nach Baurohstoffen mittlerweile rund 15 Tonnen jährlich pro Einwohner in Industrieländern wie Österreich beträgt und Baurohstoffe damit zum quantitativ wichtigsten Rohstoff machen.

Die Geschichte lehrt, dass es keine „Einbahnstraße“ in den Wechselwirkungen von Rohstoffen und Gesellschaft gibt. Beide sind miteinander mannigfaltig verknüpft und das mathematische Modell ist eines von vielfältigen Rückkopplungskreisläufen und nicht einer linearen Ursache-Wirkungsbeziehung. Als Schlüsselfaktor kann der menschliche Erfindungsgeist gelten. Neu entwickelte Werkstoffe erweitern die Rohstoffbasis und ermöglichen neue Anwendungen. Neue Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren erweitern ihrerseits wiederum die Vorratsbasis bereits genutzter Rohstoffe, bzw. verbilligen diese, was wiederum die Nachfrage stimuliert.

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen ist also in erster Linie gesellschaftlich – und nicht geologisch – determiniert. Innovationen und wirtschaftliche Anreize bestimmen, welche Rohstoffe verfügbar sind und in welchem Ausmaß Rohstoffe verwendet werden. Ohne technische Innovationen könnten wir zum Beispiel Erdöl aus der Nordsee nicht fördern. Anreize – in der Sprache der Ökonomen – Preise, bestimmen, wie viel Rohstoffe eine Gesellschaft verwendet. Sind die Preise niedrig, wird unsere Technik dahingehend angewandt, möglichst viel bekannte Rohstoffe zu nutzen. Sind die Preise hoch, wird Technik – bekannte und neu erfundene – dazu benutzt, Rohstoffe einerseits sparsam anzuwenden, bzw. knappe durch breiter verfügbare Rohstoffe zu ersetzen, zu *substituieren*. Die „Grenzen des Wachstums“ sind also äußerst dehnbar.

Nirgendwo wird dieser Zusammenhang so deutlich wie bei der seit der Antike immer wieder gestellten Frage wie viele Menschen die Erde ernähren kann<sup>6</sup>. Der amerikanische Wissenschaftler Bob Kates<sup>7</sup> hat (basierend auf den Arbeiten des Demographen Edward Deevey<sup>8</sup>) darauf hingewiesen, dass wir aus einer langfristigen Perspektive heraus 3 Phasen des Anstiegs der Weltbevölkerung feststellen können. Jede Wachstumsphase ist wiederum eng mit technologisch/gesellschaftlichen Veränderungen verbunden (Abb. 1).

Vor mehr als 100 000 Jahren beschränkte sich die Weltbevölkerung auf maximal eine Million Menschen. Erst mit der Erfindung von Werkzeugen, einem Kernpunkt der Neolithischen Revolution, wurde es möglich, Nahrungsmittelbeschaffung und Zubereitung zu verbessern und dadurch mehr Menschen zu ernähren. Die Weltbevölkerung wuchs auf geschätzte 5 Millionen Menschen. Die zweite, als „landwirtschaftliche“ Revolution bezeichnet, machte den Menschen sesshaft. Das Sammeln natürlicher Rohstoffe, wurde durch gezielte Produktion dieser Rohstoffe abgelöst. Der Anbau von Feldfrüchten und das Halten von Haustieren steigerte das Nahrungsmittelangebot derart, dass nicht nur eine größere Bevölkerung ernährt werden konnte, sondern auch Menschen, die nicht in der Landwirtschaft beschäftigt waren, miternährt werden konnten. Dies war der Ursprung der Städte.

Um 1700, dem Zeitpunkt der ersten Anfänge der Industriellen Revolution, betrug die Weltbevölkerung über

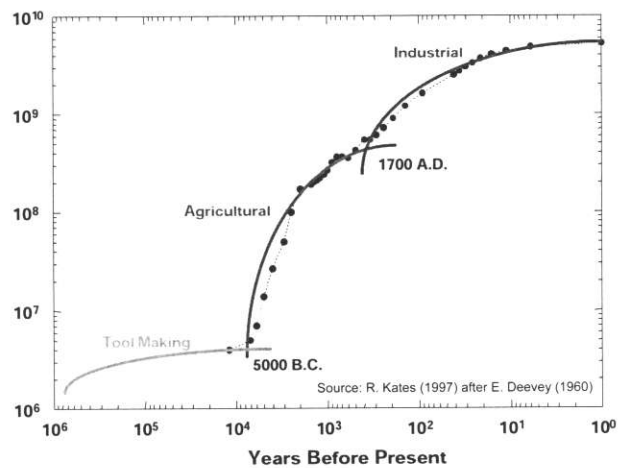


Abb. 1. Entwicklung der Weltbevölkerung während der letzten Million Jahre in logarithmischem Maßstab. Drei Wachstumschübe, die eng mit technisch-gesellschaftlichen Innovationen verbunden sind, werden sichtbar. Quelle: <sup>7, 8</sup>

500 Millionen Menschen, d. h. einen Faktor 100 mehr als zu Ende der Neolithischen und zu Beginn der landwirtschaftlichen Revolution. Gegenwärtig beträgt die Weltbevölkerung rund 6 Milliarden Menschen, d. h. die Menschheit ist seit Anbeginn der Industriellen Revolution um mehr als einen Faktor 10, oder um 5,5 Milliarden Menschen angewachsen. Demographische Studien am IIASA deuten auf eine Stabilisierung der Weltbevölkerung in einem Bereich zwischen 7 und 10 Milliarden Menschen zu Ende des 21. Jahrhunderts hin<sup>9</sup>. Ohne drastische Verbesserungen der landwirtschaftlichen Produktivität und der Verfügbarkeit neuer energetischer und mineralischer Rohstoffe wäre ein Anstieg der Weltbevölkerung um bis zu 5 Milliarden nicht möglich, weder in der Vergangenheit noch in der Zukunft. Das Wachstum der Weltbevölkerung und das trotz des von Thomas Malthus<sup>10</sup> verbreiteten Pessimismus ist vielleicht der nachhaltigste Effekt der Industriellen Revolution, weshalb sie mit einigen Beispielen kurz erläutert werden soll.

## 2.2 ... zur Industriellen Revolution...

David Landes hat in seinem Buch „Der entfesselte Prometheus“<sup>11</sup> die wichtigsten Charakteristika der Industriellen Revolution zusammengefasst:

- Ersatz menschlicher Arbeit durch Maschinen,
- Ersatz traditioneller durch fossile Energie (Kohle),
- Nutzung neuer und (durch technischen Fortschritt) breit verfügbarer Rohstoffe.

Wie diese Charakteristika in einem positiven Rückkopplungskreislauf zusammenwirken sei im Folgenden an einigen Schlüsseltechnologien der Industriellen Revolution illustriert, wobei sowohl Angebots- als auch Nachfrageseite und ihre Wechselwirkungen behandelt werden.

Bergbau wird oft zu Unrecht allein mit der Produktion energetischer und mineralischer Rohstoffe gleichgesetzt. Von einer Perspektive einer Materialstromanalyse sind viele Bergwerke jedoch in erster Linie „Wasserverke“. Die Kontrolle des Wasserspiegels durch Abpumpen war und ist dementsprechend eine wichtige Herausforderung des Bergmanns (Abb. 2).

Wie die linke Abbildung von Agricola illustriert, wurden die Wasserpumpen durch menschliche oder tie-

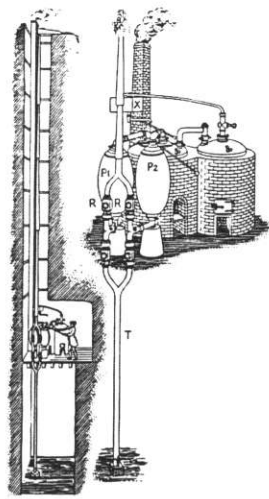
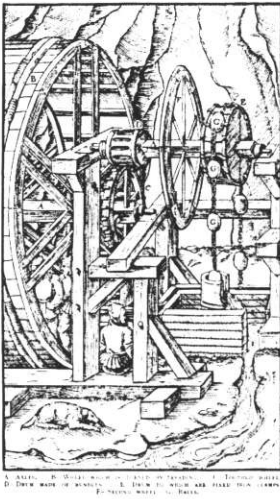


Abb. 2. Technischer Wandel am Beispiel der Wasserhaltung in Bergwerken. Links: Darstellung einer von Menschenkraft angetriebenen Wasserpumpe bei Agricola. Rechts: Savary's stationäre Dampfmaschine. Quelle: Privatarchiv des Autors

rische Arbeitskraft angetrieben, wobei die größten uns bekannten Pumpen mehr als 50 Pferde benötigten. Trotzdem war die Fördermenge und damit die Abbauteufe beschränkt. Die rechte Abbildung zeigt eine der ersten Dampfmaschinen, die stationäre Dampfmaschine die von Savary entworfen wurde. Diese Maschine wurde völlig zurecht als „Freund des Bergmanns“ bezeichnet, ermöglichte sie doch eine viel effektivere Kontrolle des Wasserspiegels und dadurch erhöhte Sicherheit. Gleichzeitig wurde durch die Dampfmaschine auch der Abbau tieferer Lagerstätten möglich, womit sich die verfügbare Rohstoffbasis erhöhte. Anwendungen von Dampfkraft bei der Förderungs-, Transport- und Bewetterungstechnik bewirkten eine Erhöhung der Produktivität, eine Steigerung und Verbilligung der Produktion und damit steigendes Angebot und Nachfrage. Eine Nachfrage, die durch neue, mobile Anwendungen der Dampfkraft in Form von Lokomotiven und Schiffen noch weiter gesteigert wurde.

Kurzum, es handelt sich hier um ein klassisches Fallbeispiel eines positiven Rückkopplungskreislaufes: je mehr man mit einer neuen Technik experimentiert, je mehr sie verbessert wird, desto breiter sind mögliche Anwendungen, und desto geringer die Kosten, was wiederum zu gesteigerter Nachfrage und diese wiederum zu weiteren Verbesserungen und Verbilligung der Technik führt. Dieses Prinzip der steigenden Skalenerträge auf das bereits der Ökonom Allyn Young in den 20er Jahren hingewiesen hat<sup>12</sup> und das heute vor allem der „neuen Wachstumstheorie“<sup>13</sup> zugrunde liegt, erklärt auch warum bislang die von der ökonomischen Theorie postulierten abnehmenden Grenzerträge und damit einhergehenden Verknappungstendenzen und Kostensteigerungen beim Rohstoffabbau nicht eingetreten sind<sup>14</sup>.

Rohstoffverfügbarkeit wird also durch Innovationen (und diese wiederum durch geeignete Rahmenbedingungen) gesellschaftlich „konstruiert“. Neue Technologien führen zu breiterer Verfügbarkeit bereits genutzter Rohstoffe bzw. zur Verfügbarkeit neuer Rohstoffe. Der grundlegende Mechanismus ist der gleiche, unabhängig davon ob wir Savarys Dampfmaschine oder eine zeitgenössische Off-shore-Plattform betrachten.

Als Illustration neuer Anwendungsbereiche und damit der Nachfrageseite der Industriellen Revolution



Abb. 3. Die erste Gusseisenbrücke der Welt: Coalbrookdale 1779. Beispiel für neue Anwendungen, die neue Werkstoffe und ihre Erzeugungsverfahren ermöglichen.

Quelle: <http://www.david-morse.com/gorge.html>

sei auf die Eisen- und Stahlindustrie verwiesen. Abbildung 3 zeigt die berühmte Gusseisenbrücke von Coalbrookdale, die 1779 fertiggestellt wurde. Gegossen wurden die Bogenelemente der Brücke übrigens in der Fabrik von Abraham Darby III, dessen Vater und Großvater die Erfinder der Kohle-Verkokung waren. Dadurch wurde es erstmals möglich, aus gewöhnlicher Kohle erzeugten Koks anstatt der teuren Holzkohle bei der Verhüttung von Eisenerz einzusetzen. Eine wichtige Erweiterung der Rohstoffbasis und letzte Rettung der beinahe völlig verschwundenen Wälder Englands. Mehr als 200 Jahre mussten vergehen bis der menschliche Erfindungsgeist letztlich auch Alternativen zur wichtigsten Erfindung der Darby-Familie entwickelte. Das COREX-Verfahren kommt ohne den Zwischenschritt der Kokserzeugung aus und verwendet direkt gewöhnliche Kohle.

Die Baurevolution, die mit der eisernen Brücke von Coalbrookdale eingeleitet wurde, ist durch die Nutzung eines neuartigen Werkstoffes, die Verwendung standardisierter, vorgefertigter Teile, und deren Massenproduktion gekennzeichnet, wie sie vor allem nach der Entdeckung eines ökonomischen Massenstahlproduktionsverfahren durch Henry Bessemer weite Verbreitung fand. Das wohl bekannteste Bauwerk das diese Prinzipien verkörpert, ist der Pariser Eiffelturm entworfen von Gustave Eiffel, der neben dem Eiffelturm vor allem Stahlbrücken baute. (Eine Charakterisierung Gustave Eiffels als „pontifex maximus“ des Industriezeitalters wäre also durchaus angebracht.) Zeitgenössische Fotos (Abb. 4) illustrieren die Errichtung des Eiffelturms, die vor allem wegen der kurzen Bauzeit von rund 2 Jahren verblüffte.

Mittlerweile über 100 Jahre alt, ist der Eiffelturm zweifelsohne ein Triumph der Ingenieurskunst. Der Begriff „Kunst“ ist hier nicht zufällig gewählt, sondern soll die Techniker erinnern, dass sich das Wort Technik vom Griechischen *τεχνη* (*techne*), also Kunst herleitet. Vielleicht eine Dimension, die heutzutage viel zu wenig beachtet wird.\* Als kleine Illustration der Fortschritte die

\* Anfangs wurde der Eiffelturm übrigens als technische Monströsität teilweise heftigst abgelehnt. Vom Schriftsteller Victor Hugo wird berichtet, dass er – als vehementer Eiffelkritiker, dennoch bevorzugt im Restaurant des Eiffelturmes speiste: Zitat: „der einzige Ort, wo ich diese Scheußlichkeit nicht sehen muss.“ Sowohl die Pariser als auch die Touristen haben den Eiffelturm mittlerweile in ihr Herz geschlossen. Ob wir das in 100 Jahren auch von den allgegenwärtigen Handymasten sagen werden können?



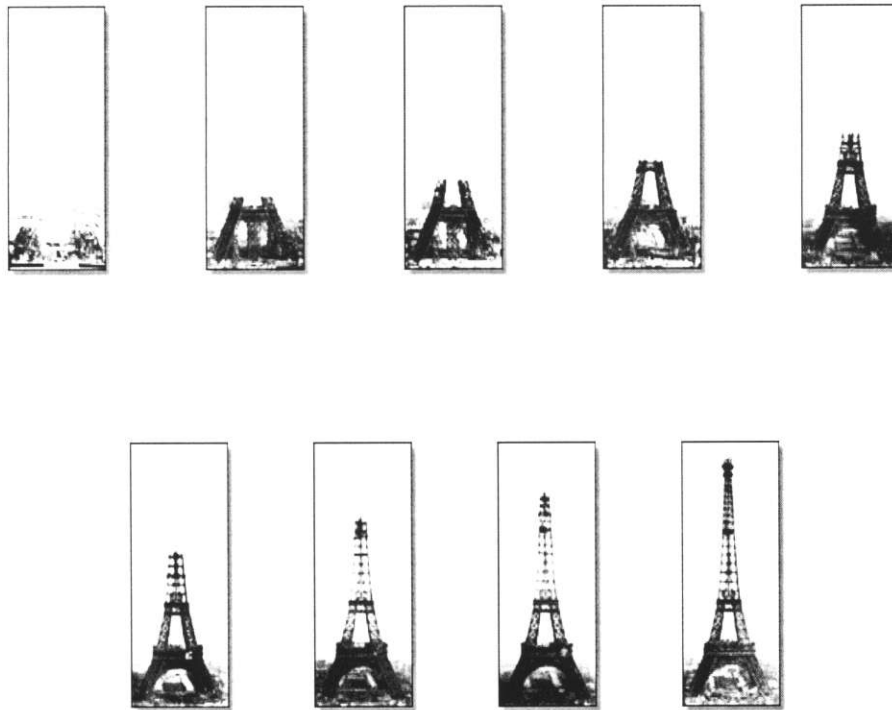


Abb. 4. Die Errichtung des Eiffelturms in Paris, dargestellt in zeitgenössischen Fotos. Quelle: [www.tour-eiffel/tour\\_uk](http://www.tour-eiffel/tour_uk)

Materialtechnik und Statik in der Zwischenzeit gemacht haben: Heute würde man für den Bau des Eiffelturms lediglich 2000 Tonnen Stahl benötigen im Vergleich zu den 7000 Tonnen die Gustave Eiffel einsetzte<sup>15</sup>.

### 2.3 ... und zu einer neuen Phase der Industrialisierung

Verfügbarkeit billigen Massenstahls bei hervorragender Qualität, neue Anwendungen im Eisenbahnbau und in der Architektur: Nicht umsonst war Stahl über mehr als ein Jahrhundert synonym mit industriellem Wachstum, ja das Symbol der Industriellen Revolution schlechthin. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Welt-Rohstahlproduktion seit der Mitte des 19. Jahrhunderts in Form von zwei S-förmigen Wachstumsimpulsen, bei denen sich Perioden stetigen Wachstums mit Perioden der Stagnation und erhöhter Volatilität ablösen. Diese sogenannten „Wechsellagen der Konjunktur“ sind uns vor allem durch die Arbeiten Joseph Schumpeters als „Lange Wellen“ oder Kondratieff-Zyklen bekannt<sup>16, 17</sup>.

Den ersten Wachstumsimpuls haben die neuen Anwendungen der Entwicklung des Eisenbahnbaus und der Infrastruktur der schwerindustriellen Dampfwirtschaft getragen. Vereinfacht könnte man diesen ersten Wachstumsimpuls nach Gustave Eiffel benennen. Den zweiten Wachstumsimpuls trugen neue Anwendungen wie zum Beispiel die rasch wachsende Automobilindustrie aber auch die Ausbreitung der Industrialisierung vor allem nach Russland und Japan. Vereinfacht könnte man diesen zweiten Wachstumsschub nach Henry Ford, der den Automobilbau revolutionierte, benennen. Die Graphik, die am IIASA Mitte der 80er Jahre erstellt wurde<sup>18</sup>, enthält auch eine Marktprognose bis zum Jahr 2000, die wie letzte Statistiken des Internationalen Eisen- und Stahlinstituts belegen<sup>19</sup> einigermaßen richtig war. Es ist vielleicht erwähnenswert, dass die einschlägige Industrie auch in Österreich diese einschneidende Trendwende nur sehr langsam akzeptiert hat. Der Über-

gang von der Wachstums- in die Sättigungsphase eines Technologiezyklus ist immer sehr schmerzhaft, da diese mit großen Schwankungen und chronischer Überkapazität verbunden ist. Wachstum ist in solchen Phasen nicht mehr mengenmäßig, wohl aber qualitativ, z. B. bei Spezialstählen, möglich, was mittlerweile von der Industrie auch erfolgreich praktiziert wird. Die Sättigungsphase ergibt sich auf Grund des Zusammentreffens einer Reihe von Faktoren: Sättigung wichtiger Abnehmermärkte, Abschluss der „Aufhol-Industrialisierung“ wichtiger Schwellenländer, Verbesserungen in der Effizienz des Materialeinsatzes, verstärktes Recycling, Substitution, aber auch wirtschaftlicher Strukturwandel. All dies kann zu einer (oft Jahrzehnte andauernden) Entkoppelung zwischen Industrie- und Rohstoffproduktion führen, bevor wiederum eine neue Phase der Industrialisierung eingeleitet werden kann, die aber nicht notwendigerweise auf den gleichen Rohstoffen und Anwendungen basiert wie frühere Industrialisierungsphasen.

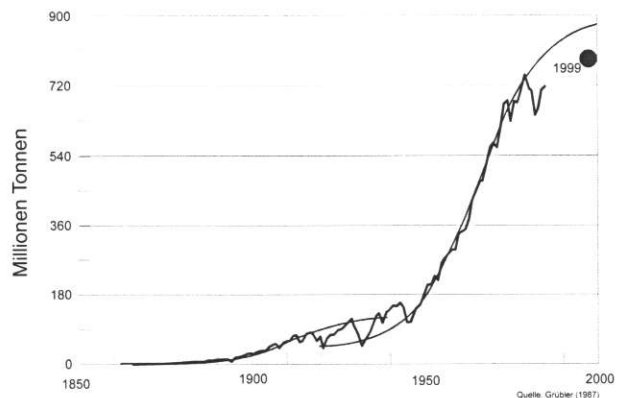
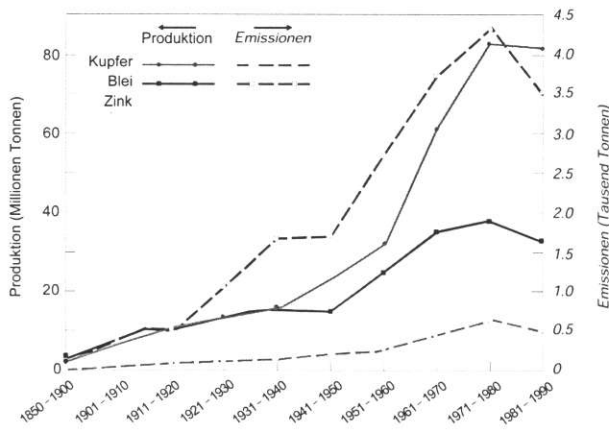


Abb. 5. Weltrohstahlproduktion (in Millionen Tonnen) seit 1850. Zwei Wachstumsphasen werden sichtbar, die durch Perioden der Stagnation und Marktvolatilität unterbrochen werden: Wechsellagen der Konjunktur (Kondratieff-Zyklen). Quelle: <sup>18</sup>



Quelle: J.O. Nriagu, 1996

Abb. 6. Weltproduktion (Millionen Tonnen) und Emissionen (Tausend Tonnen) von Kupfer, Blei und Zink seit 1850. Man beachte insbesondere die zunehmende Entkoppelung von Metallproduktion und Emissionen seit ca. 1970. Quelle: <sup>20</sup>

Insofern muss trotz eines prinzipiellen Zusammenhangs zwischen Wirtschaftswachstum und Rohstoffproduktion, der seit Anbeginn der Industriellen Revolution gilt, dennoch die Geschichte der Industrialisierung immer neu geschrieben werden.

Wie Abb. 6, die auf den Arbeiten des Umwelthistorikers Nriagu zu der Weltproduktion von Kupfer, Blei und Zink<sup>20</sup> basiert, zeigt, ist der Übergang in eine Sättigungsphase nicht nur auf die Stahlerzeugung beschränkt. Bei allen drei Produkten sind seit den 70er Jahren die Wachstumsraten drastisch zurückgegangen. Die traditionellen Märkte der Industrieländer sind zunehmend gesättigt, und die Entwicklungsländer werden noch mehrere Jahrzehnte des Wachstums benötigen bevor sie die globalen Statistiken, die weiterhin von den Industrieländern dominiert werden, merklich beeinflussen können.

An Hand von Abb. 6 kann noch eine weitere Entkoppelung illustriert werden. Die erste Entkoppelung ist jene des Wachstums der Wirtschaft und Industrie vom Wachstum der Metallnachfrage, die bereits diskutiert wurde. Die zweite Entkoppelung ist jene zwischen Metallproduktion und damit einhergehender Schwermetallemissionen, d. h. zwischen Produktion und Umweltbelastung. Wie aus den entsprechenden Schätzungen von Nriagu ersichtlich wird, die als gestrichelte Linien und in einem Faktor 1000 geringerm Maßstab in Abb. 6 dargestellt sind, sinken seit den 70er Jahren weltweit die Emissionen. Erste Erfolge der Umweltpolitik sind also deutlich ablesbar.

#### 2.4 Ein Paradoxon

Neben der Nachfrageentwicklung gibt es aber noch einen weiteren Trend, der sich im Rhythmus der Kondratieff-Zyklen entwickelt: der Strukturwandel<sup>21</sup>. Abbildung 7 (oberes Bild) zeigt die Veränderung in der Struktur der Weltprimärenergieversorgung<sup>22</sup>. Bemerkenswert ist insbesondere der spektakuläre Anstieg des Anteils der Kohle im 19. Jahrhundert, und von Erdöl im 20. Das Wachstum der Dampfwirtschaft spiegelt sich in den steigenden Anteilen der Kohle wieder. Der Kohleanteil stieg kontinuierlich und erreichte um 1920 ein Maximum, in dem Kohle rund 60 Prozent des Weltenergieverbrauchs abdeckte. Mit der Sättigung und der darauffolgenden Schrumpfung der Dampfwirtschaft sank auch der Anteil der Kohle. Gleichzeitig stieg der Anteil des Erdöls pa-

rallel zum Aufstieg entsprechender Industrien: Automobil, Petrochemie, Agrarchemie um nur einige zu nennen. Rund 50 Jahre nach Kohle, hat auch Erdöl seinen maximalen Anteil am Weltenergiemarkt erreicht. Seit 1975 sind die historischen Strukturveränderungsraten deutlich abgeschwächt, nicht zuletzt Folge der Energiepolitik. Wo diese zu einer Diversifizierung der Rohstoffbasis beigetragen hat, war sie sicherlich sinnvoll. Eher kontraproduktiv war die Energiepolitik aber in Bereichen wo man Alternativen aus unbegründeten Knappheitsängsten bewusst blockiert hat, wie es etwa beim Einsatz von Erdgas in der Stromerzeugung lange der Fall war.

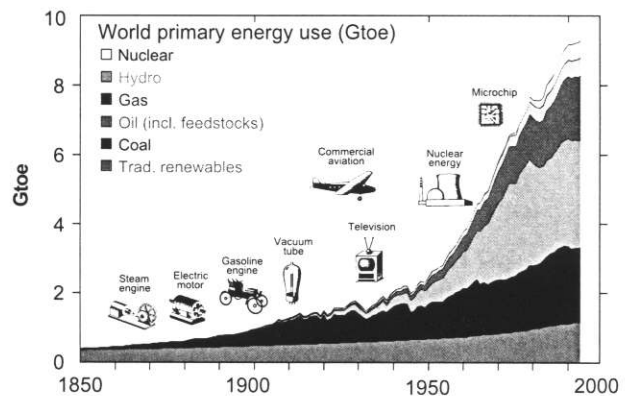
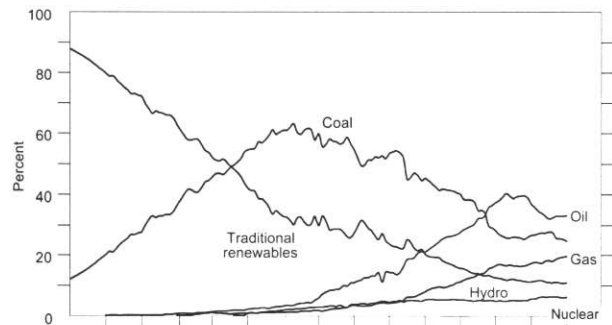


Abb. 7. Entwicklung des Weltprimärenergieverbrauchs seit 1850. Oben: Entwicklung der Marktanteile in Prozent; unten: absolute Nachfrage in Milliarden Tonnen Erdöläquivalent. Paradoxon des Strukturwandels: traditionelle Rohstoffe verlieren ständig Marktanteile, die absolute Nachfrage indes steigt. Quelle: <sup>2, 22, 26</sup>

Das untere Bild in Abb. 7 zeigt den gleichen Sachverhalt, diesmal aber nicht in Prozentanteilen, sondern in absoluten Mengen (in Milliarden Tonnen Erdöläquivalent). Die dominierende Energieeinheit wechselt ebenso wie der dominierende Energieträger. Vor 50 Jahren verwendete man Tonnen Kohleäquivalent, heute Erdöläquivalent, und in 50 Jahren wird man vielleicht Erdgasäquivalent verwenden. Ebenso werden in der Graphik bedeutende Meilensteine der Neuerungen der Energietechnik sowohl angebots- and auch nachfrageseitig illustriert. Dies soll darauf hinweisen, dass Wachstum nur mit neuen Technologien möglich war und ist. Joseph Schumpeter schrieb einmal: „auch noch so viele Postkutschen ergeben keine Eisenbahn“<sup>23</sup>, eine Einsicht die sicherlich auch auf den Energiesektor zutrifft.

Die beiden Bilder in Abb. 7 illustrieren ein interessantes Paradoxon des Strukturwandels. Obwohl der Anteil traditioneller Biomassenutzung wie Brennholz oder

Dung drastisch zurückging, ist die absolute Nachfrage größer denn je. Das gleiche gilt für Kohle. 1925 als Kohle rund 60 Prozent Marktanteil hatte, belief sich die Welt-nachfrage auf rund 1,2 Milliarden Tonnen. Jetzt, wo Kohle nurmehr einen Marktanteil von rund 25 Prozent hält, beläuft sich Produktion und Verbrauch auf rund 3,3 Milliarden Tonnen, also rund das dreifache von 1925. Strukturwandel oder „Substitution“ in der Rohstoffwirtschaft bedeutet also keineswegs einen absoluten Rückgang der Nachfrage. Die war in der Vergangenheit so und wird auch in Zukunft so bleiben, wenn man einschlägige Energieprognosen analysiert, die im folgenden Abschnitt zusammengefasst werden.

### 3. Grenzen des Wachstums

#### 3.1 Nicht die Geologie, sondern die Umwelt setzt langfristige Grenzen

In den bisherigen Ausführungen zur Geschichte der Industrialisierung ist das Wort Rohstoffknappheit nicht gefallen. Der Grund ist ganz einfach: Historisch gesehen war Knappheit im globalen Maßstab noch nie gegeben. Der historische Strukturwandel erfolgte in erster Linie auf Grund technischer Innovationen und nicht durch Knappheit. Die Meinungen ob und wann in der Zukunft Strukturwandel durch Rohstoffknappheit ausgelöst werden kann gehen weit auseinander. Einige Geologen publizieren düstere Prognosen<sup>24</sup>. Beobachter der technischen Entwicklung geben Entwarnung.\* Um diesbezüglich die Faktenlage zu klären, wird im folgenden Abschnitt eine umfassende Bilanz fossiler Energierohstoffe vorgenommen. Diese Bilanz soll die zweite Kernthese dieses Beitrages untermauern, die lautet, dass Rohstoffknappheit weniger aufkommenseitig, d. h. durch Geologie, als abfallseitig, d. h. durch Umweltbeschränkungen, gegeben ist. In anderen Worten: Beschränkungen ergeben sich nicht so sehr durch das was der Mensch Mutter Natur entnehmen kann, sondern dadurch wie viel er an sie zurückgeben kann. Wie am Beispiel des Kohlenstoffs näher erläutert wird, enthalten alle fossilen Lagerstätten zusammen ungefähr 20000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Demgegenüber enthält die Atmosphäre weniger als 800 Milliarden Tonnen, d. h. 25-mal weniger. Man braucht kein kompliziertes Klimamodell um einzusehen, dass gravierende Umweltauswirkungen zu erwarten sind, falls wirklich ein größerer Teil der fossilen Lagerstätten abgebaut und verbrannt werden würde.

#### 3.2 Eine Kohlenstoffbilanz

In Abb. 8 wird die historische und aktuelle Nachfrage nach fossilen Energieträgern mit Größenordnungen zukünftiger Nachfrage, bzw. dem potentiellen Angebot in Milliarden Tonnen Kohlenstoff gegenübergestellt<sup>26, 27, 28, 29, 30</sup>. Seit Anbeginn der Industriellen Revolution hat die Menschheit fossile Energie im Ausmaß von rund 300 Milliarden Tonnen Kohlenstoff genutzt. Momentan nutzt sie rund 7 Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich.

\* Der ehemalige saudiarabische Erdölminister Scheich Jamani meinte unlängst in einem Interview in dem er die Entwicklung in den Gebieten erneuerbare Energiequellen, Brennstoffzellen und Wasserstoff und ihre Auswirkungen auf die OPEC kommentierte: „Die Steinzeit endete nicht weil wir keine Steine mehr hatten, und die Ölzeit wird nicht enden, weil uns das Öl fehlt.“<sup>25</sup>

	Kohle	Erdöl	Erdgas	Summe
Verbrauch 1800-2000	148	103	38	289
Verbrauch 2000	2,5	2,8	1,4	6,7
Prognose IIASA-WEC bis 2100	170-950	200-600	300-500	560-1600*
Reserven konventionell	650	130	80	860
Ressourcen nicht-konventionell	2850	540	420	3810
Andere Vorkommen	3000	1500	11000	15500
Summe	6500	2170	11500	-20000

\* Min/Max nicht additiv Quelle: Fettweis (1979), IPCC (1996), Rogner (1997), IIASA-WEC (1998).

Abb. 8. Geschichte, Gegenwart, und Zukunftsprognosen fossiler Rohstoffnutzung und Klassifikation ihrer Verfügbarkeit in Milliarden Tonnen Kohlenstoffgehalt. Die Kohlenstoffbilanz zeigt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit mehr fossiler Kohlenstoff über die nächsten 100 Jahre genutzt werden wird als insgesamt seit Anbeginn der Industriellen Revolution. Nicht das Vorkommen an Kohlenstoff in der Erdkruste, sondern eher die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre werden Grenzen des Wachstums bestimmen. Quelle: <sup>26, 27, 28, 29, 30</sup>

Historisch gesehen ist der Anteil der Kohle am höchsten. Nicht nur auf Grund der Dominanz der Kohle im 19. Jahrhundert, sondern auch weil Kohle pro Einheit Energie am meisten Kohlenstoff enthält. Das Wasserstoff-Kohlenstoffverhältnis ist bei Kohle besonders ungünstig (Kohle: 1 : 1, Erdgas: 4 : 1). Der historische Anteil von Erdgas ist relativ bescheiden: zu lange war Erdgas die ungeliebte Stiefschwester der Erdölindustrie, seine Markteinführung ist relativ rezent. Darüber hinaus enthält Erdgas am wenigsten Kohlenstoff pro Energieeinheit aller fossiler Energieträger.

Die dritte Zeile in Abb. 8 fasst die Szenarien, die das IIASA gemeinsam mit dem Weltenergieerat entwickelt hat<sup>26, 27</sup>, zusammen. Obwohl die Szenarien eine breite Bandbreite zukünftiger Entwicklungen und damit von Unsicherheit abdecken ergeben sich trotzdem zwei robuste Schlussfolgerungen. Erstens wird auch im jeweils ungünstigsten Szenario mehr Kohle, Erdöl oder Erdgas in Zukunft abgebaut werden als insgesamt seit Anbeginn der Industriellen Revolution. Zweitens, ist das prognostizierte Wachstum von Erdgas in allen Szenarien am höchsten, was nicht zuletzt seine Verfügbarkeit und Umweltfreundlichkeit widerspiegelt.

Als nächsten Schritt stellen Zeilen 4 bis 7 in Abb. 8 die Angebotsseite der fossilen Rohstoffbilanz dar. Hierzu bedarf es eines kurzen terminologischen Exkurses. Wie die Arbeiten von Professor Fettweis an der Montanuniversität Leoben zur Klassifikation von Rohstoffvorräten<sup>28</sup> gezeigt haben, kann nichts so sehr irreführen wie der Wunsch nach einfachen Zahlen. In Wirklichkeit können Vorräte nur als sich dynamisch veränderndes Resultat geologischen Wissens und wirtschaftlicher und technischer Rahmenbedingungen definiert werden (s.a.<sup>15</sup>). In der engsten Definition, den Reserven, werden nur Mengen betrachtet, die mit heutigem Wissen, heutigen Preisen und heutiger Technik gewonnen werden können.\*\* Aber wie die Vergangenheit gezeigt hat, verändern sich diese Variablen ständig. Es ist deshalb notwendig die Grenzen der Bilanzierung zu erweitern, wie es zum Beispiel beim Begriff der „Ressourcen“ geschieht, die so definiert sind, dass sie jene Mengen dar-

\*\* Dies erklärt auch den (unangemessen) alarmistischen Ton der Petroconsultants Studie<sup>22</sup>.



stellen, die mit absehbaren Fortschritten in Wissen und Technik gewinnbar werden können, ohne aber dass wie bei den Reserven eine Bankgarantie darauf gegeben würde. Schließlich umfasst die fossile Rohstoffbasis auch noch enorme Mengen sogenannter nichtkonventioneller Kohlenwasserstoffe wie Ölschiefer oder Methanhydrate, deren Mengenangaben nur ganz grob geschätzt sind und deren Gewinnbarkeit momentan noch nicht abgeschätzt werden kann.\* Es ist dennoch wichtig darauf hinzuweisen, dass neuere Forschungsergebnisse davon ausgehen, dass nicht Kohle der weitverbreitetste Kohlenwasserstoff ist, sondern Erdgas.

Im Rahmen des IPCC, des Intergovernmental Panel on Climate Change, wurde am IIASA eine Bilanz aller verschiedenen Kategorien an fossilen Vorkommen erstellt<sup>29, 30</sup>. Als Ergebnis finden sich rund 900 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, der in Reserven gebunden ist, rund 4000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Ressourcen, und weitere 15000 Milliarden Tonnen in anderen Vorkommen, zusammen also rund 20000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, der potenziell zur Verfügung steht. Demgegenüber ist der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre rund 760 Milliarden Tonnen und ist seit Anbeginn der Industriellen Revolution um rund 30 Prozent angestiegen<sup>31</sup>. Die Klimawissenschaftler des IPCC sprechen in Folge von einem – Zitat: „merkbar menschlichen Einfluss auf das Klimasystem“<sup>31</sup>. Wenn also bereits 200 Milliarden Tonnen einen merkbar menschlichen Einfluss darstellen, braucht man keine komplizierten Klimamodelle um festzustellen, dass eine Freisetzung von bis zu 20000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff wohl eher nicht in Frage kommen dürfte. Fazit: die langfristige Knappheit ist also wohl eher die Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre, und nicht wie viel Kohlenstoff aus der Erdkruste entnommen werden kann.

Auch wenn weiterhin große Unsicherheiten und Unbekannte die Klimadebatte prägen<sup>32</sup>, erscheinen Vorsicht und das rechtzeitige Entwickeln von langfristigen Alternativen angebracht. Hier ist sowohl eine langfristige Technologie- und Energiepolitik gefordert. Unrealistische kurzfristige Panikmaßnahmen à la Kyoto sind aus wissenschaftlicher Sicht weder notwendig noch eine sinnvolle Investition, was aber nicht bedeutet, dass man kurzfristig nur abwarten (und weiterhin unbeschränkt CO<sub>2</sub> emittieren) kann. Handlungsbedarf ergibt sich weniger bei kurzfristigen drastischen Emissionsminderungsmaßnahmen als vielmehr bei verstärkten F & E-Anstrengungen und der Förderung von Nischenmärkten, die die Voraussetzungen sind um langfristige Alternativen zu entwickeln. Dass diese Erkenntnis in Zeiten der Markt deregulierung und schwindender öffentlicher und privater F & E-Ausgaben wenig rezipiert wird ist ein weiteres Beispiel eines Paradoxons, diesmal im Bereich Umwelt- und Energiepolitik.

Im folgenden Abschnitt werden zusätzlich zur fossilen Energie auch alle anderen Rohstoffe in einer globalen Materialstromanalyse betrachtet.

### 3.3 Globale Materialstromanalyse

\* Dank technischen Fortschritts werden bereits heute bedeutende Mengen an nicht-konventionellen Kohlenwasserstoffen gewonnen, wie es bei den nicht-konventionellen Erdgaslagerstätten in den USA oder den Teersanden in Canada der Fall ist. Die Grenzziehung zwischen konventionellen Reserven und nicht-konventionellen Ressourcen ist also fließend.

	Fossile Energie	Metall-Rohstoffe	Industrie-Rohstoffe	Bau-Rohstoffe	Erdbe-wegung	Nahrung Natur-fasern	Gesamt
Abbau	9,5	>5	2,5	~16	--	>5	-40
Abraum, Abfälle... (ohne Wasser)	>20	>15?	<1	>1	>50	<5	<100

Quelle: Argawal (1991), Grübler (1998), Nötstaller (1998).

Abb. 9. Globale Materialstrombilanz (in Milliarden Tonnen pro Jahr, Schätzungen für ca. AD 2000). 40 Milliarden Tonnen Rohstoffproduktion bedingen rund 100 Milliarden Tonnen zusätzliche Materialmobilisierung pro Jahr. Quelle: <sup>2, 33, 34</sup>

Abbildung 9 erstellt eine globale Materialstromanalyse<sup>2, 33, 34</sup>. Wie ersichtlich, stellt die Produktion von fossiler Energie einen zwar wichtigen Bestandteil aber quantitativ eben doch nur eine Teilmenge der globalen Materialströme dar. Insgesamt werden jährlich rund 40 Milliarden Tonnen Rohstoffe abgebaut. Baurohstoffe dominieren mit rund 16 Milliarden Tonnen (weshalb in der Einleitung dieses Beitrages auch von der „Schotterzeit“ gesprochen wurde), gefolgt von Energie und metallischen und biogenen Rohstoffen. Der Abbau von Rohstoffen bedingt zusätzlich noch weitere Materialströme, oft als ökologischer oder Material-„Rucksack“ bezeichnet. Entfernen von Abraum, Materialbewegungen bei Infrastrukturbauten, Abfälle in der Aufbereitung und selbstverständlich auch Abfälle nach erfolgter Nutzung ergeben eine Gesamttonnage von geschätzten 100 Milliarden Tonnen, wobei Erdbewegungen mit rund 50 Milliarden Tonnen dominieren. Alles in allem weltweit also 140 Milliarden Tonnen Material jedes Jahr. Ein Vergleich mit der Natur, z. B. dem Geschiebetransport aller Flüsse der Erde, der weniger als 25 Milliarden Tonnen jährlich beträgt<sup>35</sup>, zeigt, dass auch bei den nicht-energetischen Rohstoffen Grenzen des Wachstums wohl eher von der Abfall- und Deponieseite zu erwarten sein werden als von der Aufkommenseite.

## 4. Zur Struktur und Zukunft der Rohstoffnachfrage

Die weltweit 140 Milliarden Tonnen Materialströme entsprechen mehr als 20 Tonnen pro Erdenbewohner jährlich. Hierbei ist zu beachten, dass diese Durchschnittszahl das extreme Ungleichgewicht zwischen Industrie- und Entwicklungsländern nicht wiedergibt und auch wichtige Unterschiede in der Struktur der Nachfrage außer Acht lässt. Abbildung 10 vergleicht deshalb den durchschnittlichen Materialeinsatz pro Kopf der Bevölkerung der USA und Deutschlands [36] mit dem Österreichs, wobei für Österreich erst unlängst genaueres Zahlenmaterial auf Grund der Untersuchungen von Wagner, Nötstaller und Hüttler vorliegen<sup>37, 38</sup>. Vergleichbares Zahlenmaterial für Entwicklungsländer fehlt völlig.

Der Materialbedarf – ohne Baustoffe und ohne Abraum und Erdbewegungen zu rechnen – liegt in Österreich und Deutschland bei rund 10 Tonnen jährlich, im Vergleich zu 15 Tonnen in den USA. Auch ist die Struktur der Materialnachfrage anders. In Österreich fällt vor allem der geringere Anteil fossiler Energie und der höhere Anteil der Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft auf. Beziehen wir Baurohstoffe in die Materialbilanz ein, so ergibt sich eine weitgehende Annäherung zu den USA. Der Materialeinsatz in allen 3 Ländern liegt bei rund 23 Tonnen jährlich pro Kopf. Das Volk der „Häuselbauer“ benötigt also mit mehr als 12 Tonnen pro Jahr um

**Materialdurchsatz pro Einwohner 1994-1996  
(ohne Wasser und Luft)**

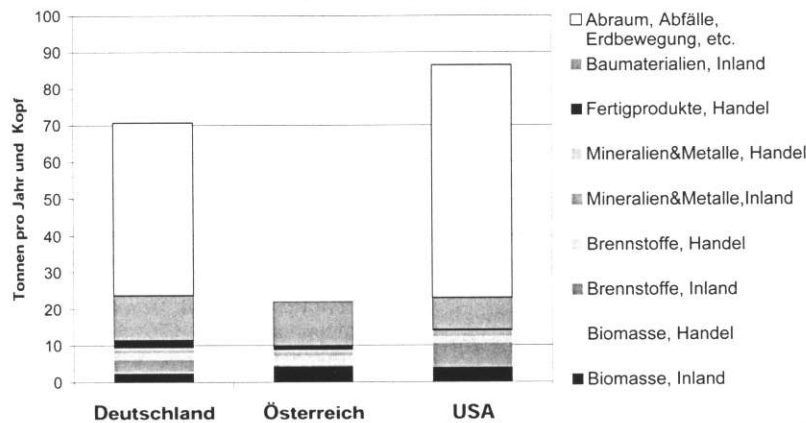


Abb. 10. Jährlicher Pro-Kopf Materialdurchsatz in den USA, Deutschlands und Österreichs, ca. AD 1995 (in Tonnen). Insbesondere die große Menge an Baurohstoffen ist bemerkenswert. Quelle: <sup>36, 37, 38</sup>

ein Drittel mehr Baurohstoffe als der Durchschnitts-Amerikaner mit 9 Tonnen. Der gesamte Häuserbestand Österreichs wird mit rund 3000 Milliarden Tonnen geschätzt<sup>39</sup>, also mit rund 400 Tonnen pro Einwohner. Auch aus dieser Sicht ist der Durchschnittsösterreicher keinesfalls „leichtgewichtig“.

Leider liegen für Österreich noch keine vergleichbaren Zahlen zur Abraum- und Erdbewegung im Inland und die durch Importe im Ausland induzierten Materialströme vor. Größenordnungsmäßig werden aber die Zahlen wohl mit jenen Deutschlands vergleichbar sein, also rund 50 Tonnen pro Kopf und Jahr. Das wohl erstaunlichste Ergebnis der österreichischen Materialbilanz ist der Wasserverbrauch von rund 400 Tonnen pro Jahr und Kopf, sowie eine Menge von insgesamt mehr als 1000 Milliarden Tonnen Wasser (rund 125 000 Tonnen pro Einwohner und Jahr!), die über die Turbinenschaufeln unserer Wasserkraftwerke fließen<sup>40</sup>.

Angesichts solcher Materialströme in Industrieländern erhebt sich die Frage welche Faktoren bei der zukünftigen Entwicklung der Rohstoffnachfrage zu beachten sind. Erst aus einer langfristigen Perspektive heraus ist erkennbar, wie groß die Verbesserungen der Rohstoffproduktivität, d. h. der Rohstoffverbrauch pro erzeugter Einheit sind. So wird heute eine Tonne Eisen mit weniger als einem Zehntel der Energie als noch vor 100 Jahren erzeugt<sup>18</sup>. Ebenso wichtig sind die Materialsubstitution und der Strukturwandel, die sowohl kontinuierlich als auch in Brüchen vor sich gehen, wie bereits ausgeführt wurde. Das Wirtschaftswachstum in „post-industriellen“ Gesellschaften wird in erster Linie durch Dienstleistungen, bzw. zunehmend durch die elektronischen Transaktionen der sogenannten „new economy“ bestimmt. Nichtsdestotrotz scheinen die Prognosen einer weitgehenden „Entmaterialisierung“ unserer Volkswirtschaften mehr als voreilig. In der Tat sinkt der spezifische Rohstoffeinsatz (pro erzeugter Einheit des Brutto-sozialproduktes [BSP]), trotzdem ist die absolute Rohstoffnachfrage keineswegs gesunken. (Dies als weitere Illustration des bereits diskutierten „Paradoxon“ des Strukturwandels in der Rohstoffwirtschaft.) Sogar bei traditionellen Rohstoffen, wie Bauholz, wo die Materialintensität des BSP seit 100 Jahren sinkt, ist die absolute Nachfragemenge auf einem historischen Höchststand, wie entsprechende Untersuchungen für die USA, wo langfristige Zeitreihen verfügbar sind, gezeigt haben<sup>41</sup>.

Bestenfalls kann deshalb von einer Sättigung der Nachfrage der Industrieländer auf hohem Niveau ge-

sprochen werden. Und langfristig werden auch die Entwicklungsländer zu einem weiteren Anstieg der Rohstoffnachfrage beitragen. Zeitpunkt und Geschwindigkeit dieses Prozesses sind gegenwärtig indes schwer abschätzbar. Normative Vorgaben über wünschenswerte rasche wirtschaftliche Entwicklung aber auch Annahmen einer weitgehenden Angleichung an den Pro-Kopf Rohstoffverbrauch der Industrieländer unter Außerachtlassung wirtschaftlichen und technischen Strukturwandels haben in der Vergangenheit zu zahlreichen Fehlprognosen geführt, was zu entsprechender Vorsicht in Erstellung und in Aufnahme einschlägiger Prognosen mahnen sollte. Aber sowohl Industrie- als auch Entwicklungsländer werden sich auf veränderte Rahmenbedingungen einstellen müssen. Insbesondere werden Umweltbeschränkungen verstärkt auf Angebot und Nachfrage Einfluss nehmen.

## 5. Schlussfolgerungen

Die materielle Kultur der Menschheit und der damit einhergehende Rohstoffeinsatz hat Größenordnungen erreicht, die die Wissenschaft völlig zurecht von „globaler Veränderung“ sprechen lässt<sup>2, 42</sup>. Der industrielle Metabolismus ist zum Rivalen natürlicher Stoffströme geworden (Abb. 11).

Die Menschheit nutzt bereits rund 60 Prozent des verfügbaren Bodens und 30 Prozent des verfügbaren Süßwassers, vor allem in der Landwirtschaft. Die rund 100 Milliarden Tonnen, die weltweit in Form von Abraum und Erde jedes Jahr bewegt werden um 40 Milliarden Tonnen Rohstoffe bereitzustellen sind rund 4-mal so

	Land 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	Wasser km <sup>3</sup>	Material 10 <sup>9</sup> t	Schadstoffe 10 <sup>6</sup> t			
				Arsen	CFCs	Schwefel	Stickstoff
Anthropogen	47	3.000	<100	0,06	1,5	75	150
Natürlich	84	10.000	<25	<0,02	-0	<25	<50
Mensch/Natur	56%	30%	400%	400%	~∞	300%	300%

Quelle: Turner et al. (1990), Grubler (1998)

Abb. 11. Mengenvergleich menschlicher und natürlicher Stoffströme und Ressourcennutzung, ca. AD 2000. Anthropogene Material- und Schadstoffströme übertreffen natürliche bereits um ein Vielfaches. Quelle: <sup>2, 42</sup>



groß wie der gesamte Geschiebetransport aller Flüsse. Schadstoffemissionen wie Arsen, Schwefel oder Stickstoff übertreffen natürliche Quellen um rund das dreifache. Gleichzeitig werden auch völlig neue Stoffe in der Umwelt freigesetzt, die in der Natur gar nicht vorkommen, wie z. B. CFCs, die, wie wir mittlerweile wissen, die Ozonschicht zerstören.

Forschung, Lehre und Praxis werden also zunehmend nicht nur ein eindimensionales Ziel zu verfolgen haben, nämlich maximal viele Rohstoffe möglichst kostengünstig aus der Erdkruste zu gewinnen. Zunehmend werden Überlegungen angestellt werden müssen, wie Rohstoffe effizienter eingesetzt, Stoffkreisläufe durch Recycling geschlossen, Abfälle minimiert, und umweltgerecht entsorgt und deponiert werden können. Im Vergleich zur Erdkruste sind die ökologisch wichtigen Reservoirs der Atmosphäre, der Ozeane und der Biosphäre ungleich kleiner. Grenzen des Wachstums werden deshalb weniger offenbar wie viel wir der Natur entnehmen, sondern eher wie viel wir ihr als Abfall zurückgeben können.

#### Literaturverzeichnis

<sup>1</sup> *Fettweis, G. B. L.*: Urproduktion mineralischer Rohstoffe und Zivilisation – geschichtliche Entwicklungen und aktuelle Probleme. In: *Zeman, J.* (Hrsg.), *Energievorräte und mineralische Rohstoffe: Wie lange noch?* Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien 1998, 7–46. – <sup>2</sup> *Grübler, A.*: Technology and global change. Cambridge University Press 1998. – <sup>3</sup> *Meadows, D., D. Meadows, J. Randers und W. W. Behrens*: The limits to growth. Signet, New York 1972. – <sup>4</sup> *Mumford, L.*: Technics and civilization. Hartcourt, New York 1934. – <sup>5</sup> *Goeller H. E. und A. M. Weinberg*: The age of substitutability, or what do we do when the mercury runs out. Mimeo, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 1975. Kurzfassung in: *Science* 191 (1976), 683–689. – <sup>6</sup> *Cohen, J. E.*: How many people can the earth support? W. W. Norton & Co., New York 1995. – <sup>7</sup> *Kates, R. W.*: Population, technology, and the human environment: a thread through time. *Daedalus* 125 (3) (1996), 47–71. – <sup>8</sup> *Deevey, E. S. Jr.*: The human population. *Scientific American* 203 (1960), 195–204. – <sup>9</sup> *Lutz, W., W. Sanderson und S. Scherbov*: Doubling of world population unlikely. *Nature* 387 (1997), 803–805. – <sup>10</sup> *Malthus, T.*: An essay on the principle of population. Penguin Paperback, London 1798. Reprint 1986. – <sup>11</sup> *Landes, D. S.*: The unbound prometheus: technological change and industrial development in western Europe from 1750 to the present. Cambridge University Press, Cambridge, UK 1969. Deutsche Übersetzung: *Der entfesselte Prometheus*. dtv, München 1983. – <sup>12</sup> *Young, A. A.*: Increasing returns and economic progress. *Econ J.* 152 (XXXVIII) (1928), 527–542. – <sup>13</sup> *Romer, P. M.*: Increasing returns and long-run growth. *J. Political Economy* 98 (5) (1986), 1002–1037. – <sup>14</sup> *Barnett H. J. und C. Morse*: Scarcity and growth: the economics of natural resource availability. Johns Hopkins University Press, Baltimore 1967. – <sup>15</sup> *Wellmer F.-W.*: Lebensdauer und Verfügbarkeit energetischer und mineralischer Rohstoffe. *Erzmetall* 51 (10) (1998), 663–675. – <sup>16</sup> *Kondratiev, N. D.*: Die

langen Wellen in der Konjunktur. *Arch. Sozialwissenschaft und Sozialpolitik* 56 (1926), 573–609. – <sup>17</sup> *Schumpeter, J. A.*: Business cycles: a theoretical, historical and statistical analysis of the capitalistic process. 2 Bände, McGraw Hill, New York 1936. – <sup>18</sup> *Grübler, A.*: Technology diffusion in a long wave context: The case of the steel and coal industries. Tagungsbeitrag, conference life cycles and long waves, Montpellier, Frankreich 8.–10. Juli 1987. IIASA, Laxenburg, Österreich 1987. – <sup>19</sup> IISI (International Iron and Steel Institute): World steel in figures 1999. IISI, Brüssel 2000. [http://www.worldsteel.org/trends\\_indicators/contents.html#production](http://www.worldsteel.org/trends_indicators/contents.html#production). – <sup>20</sup> *Nriagu, J. O.*: A history of global metal pollution. *Science* 272 (1996), 223–224. – <sup>21</sup> *Grübler, A. und N. Nakicenovic*: Long waves, technology diffusion and substitution. *Review* XIV(2) (1991), 313–343. – <sup>22</sup> *Nakicenovic, N. und A. Grübler*: Energy and the protection of the atmosphere. *Int. J. Global Energy* 13 (1, 2, 3) (2000), 4–57. – <sup>23</sup> *Schumpeter, J. A.*: Capitalism, socialism and democracy. Harper & Brothers, New York 1942. – <sup>24</sup> *Campbell, C. J.*: The coming oil crisis. Petroconsultants, Genf und Multi-Science Publishing, Brentwood, UK 1997. – <sup>25</sup> *Jamani, A.*: Interview. *Sunday Telegraph* (London) 25. Juni 2000. – <sup>26</sup> *Nakicenovic, N., A. Grübler und A. McDonald* (Hrsg.): Global energy perspectives. Cambridge University Press, Cambridge, UK 1998. – <sup>27</sup> *Grübler, A.*: Von der Lagerstätte zum Konsumenten: Langfristige Energieperspektiven. *BHM* 143 (12) (1998), 449–456. – <sup>28</sup> *Fettweis, G. B.*: World coal resources: methods of assessment and results. Elsevier, Amsterdam 1979. – <sup>29</sup> *Nakicenovic, N. et al.*: Energy primer. In: *Climate change 1995, impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses*. IPCC, Genf, und Cambridge University Press, Cambridge, UK 1996. – <sup>30</sup> *Rogner, H.-H.*: An assessment of world hydrocarbon resources. *Ann. Rev. Energy Environm.* 22 (1997), 217–262. – <sup>31</sup> IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): *Climate change 1995: the science of climate change, summary for policy makers*. IPCC, Genf, und Cambridge University Press, Cambridge, UK 1996. – <sup>32</sup> *Grübler, A.*: Managing the global environment. *Environment. Sci. Technol.* 34 (7) (2000), 184A–187A. – <sup>33</sup> *Argawal, J. C.*: Minerals, energy and the environment. In: *Tester, J. W. et al.* (Hrsg.), *Energy and environment in the 21st century*. MIT Press, Cambridge, USA (1991), 389–395. – <sup>34</sup> *Nöstaller, R.*: persönliche Mitteilung, 1998. – <sup>35</sup> *Douglas, I.*: Sediment transfer and siltation. In: *Turner, B. L. et al.* (Hrsg.), *The earth transformed by human action*. Cambridge University Press, Cambridge, UK 1990, 215–234. – <sup>36</sup> *Adriaanse, A. et al.*: Resource flows: the material basis of industrial economies. World Resources Institute, Washington D.C. 1997. – <sup>37</sup> *Hüttler, W., H. Payer und H. Schandl*: National material flow analysis for Austria, Bd. 4, Schriftenr. BMUJF, Wien 1996. – <sup>38</sup> *Wagner, H. und R. Nöstaller*: Zur Frage der Versorgung Österreichs mit mineralischen Rohstoffen aus heimischen Vorkommen. *BHM* 147 (8) (1997), 339–349. – <sup>39</sup> *Hüttler, W., H. Payer und H. Schandl*: Bauen und nachhaltige Entwicklung. In: *Haberl, H. et al.* (Hrsg.), *Colonizing landscapes, indicators for sustainable land-use*. BMWA und BMWV, Wien 1999. – <sup>40</sup> *Hüttler, W.*: Regionalisierte Wassernutzungsbilanz Österreich 1994. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* 48 (11/12) (1996), 301–310. – <sup>41</sup> *Wernick, I.K.*: Consuming materials the American way. *Technol. Forecasting and Social Change* 53 (1) (1996), 111–122. – <sup>42</sup> *Turner, B. L. II et al.* (Hrsg.): *The earth as transformed by human action*. Cambridge University Press, Cambridge, UK 1990.