



# Die Bedeutung energieintensiver metallurgischer Betriebe

Unter dem Aspekt des Recyclings von Eisen, Stahl und NE-Metallen

VON RÜDIGER DEIKE, DUISBURG

Die Herstellung von Eisen, Stahl und Nicht-Eisen (NE)-Metallen ist naturgemäß mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Bei der Primärherstellung von Eisen und Stahl wird das Roheisen in der Regel aus den oxidischen Verbindungen in den Erzen gewonnen. Bei der Herstellung von NE-Metallen werden die Metalle aus oxidischen und/oder sulfidischen Verbindungen in

den Erzen gewonnen. In diesen Verfahrensstufen zu Beginn der Herstellung von Eisen und NE-Metallen müssen somit existierende chemische Bindungskräfte überwunden werden, um die Metalle gewinnen zu können. Diese Bindungskräfte werden durch chemische Reaktionen, an denen sehr häufig Kohlenstoff beteiligt ist, bei hohen Temperaturen überwunden, sodass die Metalle anschließend in flüssiger Form, vergesellschaftet mit Begleitelementen vorliegen, die ebenfalls in

den Erzen vorhanden waren. Da je nach Metall bestimmte Begleitelemente charakteristische negative Einflüsse auf die Werkstoffeigenschaften der Metalle haben, müssen diese Begleitelemente in einer zweiten oder auch dritten Verfahrensstufe durch entsprechende Raffinationsprozesse entfernt werden.

Da die Metallherstellung durch große Massenströme gekennzeichnet ist, werden somit im Vergleich zu anderen industriellen Prozessen große Energiemengen

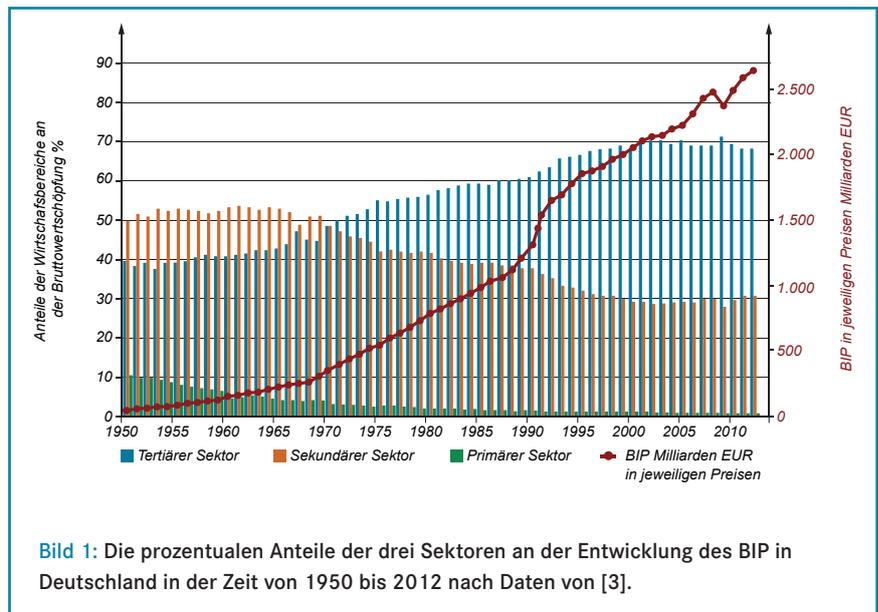
Die Erfolge der Gießerei-Industrie in Deutschland basieren unter anderem auch darauf, dass mit weniger Material bessere Ergebnisse, d. h. höherwertige Gussprodukte mit besseren Werkstoffeigenschaften produziert werden, die somit in geringeren Massenanteilen in die Endprodukte (z. B. in die Automobilindustrie) einfließen.

gen benötigt, die zu einem großen Teil durch die Verbrennung von Kohlenstoff erzeugt werden, sodass große Mengen an Prozessgasen anfallen. Aus diesen Prozessgasen wird im weiteren Verlauf, nach ihrer eigentlichen Nutzung, noch Energie in Form von Wärme und Strom gewonnen, wodurch aber entsprechende Mengen an CO<sub>2</sub> produziert werden.

Darüber hinaus ist die Herstellung von Eisen, Stahl und NE-Metallen durch einen hohen Anteil an wieder eingesetzten Sekundärrohstoffen (recycled content) gekennzeichnet, die dem Wertstoffkreislauf wieder zugeführt werden. Somit handelt es sich bei diesen Prozessen um absolute Zukunftstechnologien. Denn in den nächsten 50 Jahren wird es die große Aufgabe auf der Welt sein, vor dem Hintergrund eines globalen Strukturwandels, mit wieder zunehmenden Rohstoffverbräuchen, hervorgerufen durch die Industrialisierungen in den Schwellenländern, industrielle Prozesse zu entwickeln, in denen möglichst in weitgehend geschlossenen Rohstoffkreisläufen gearbeitet werden kann. In bestimmten Prozessen wie bei der Herstellung von Stahl über einen Elektrolichtbogenofen, der Herstellung von Aluminium und Kupfer aus Sekundärrohstoffen, der Herstellung von Gusseisen ist dies bereits heute realisiert und es werden in Deutschland in modernen industriellen Prozessen hochwertige neue Produkte aus Stahl und Gusseisen in Millionen von Tonnen und aus NE-Metallen in mehreren hunderttausend Tonnen nahezu vollständig aus Schrott hergestellt. Diese Kreisläufe können in diesen Prozessen unendlich oft wiederholt werden, da die Qualität der Metalle im Verlauf des Recyclings nicht ab- sondern zunimmt. Da im Verlauf der Lebensdauer eines Produktes aus Metall in der Forschung Werkstoffentwicklung stattfinden, können nach dem Lebensende des Produktes durch das Recycling des Schrotts neue Produkte mit besseren Eigenschaften gefertigt werden.

Aus etwas Altem etwas Neues mit besseren Eigenschaften machen zu können, ist ein wesentliches Merkmal energieintensiver metallurgischer Betriebe und stellt die höchste Form des Recyclings dar. Zudem wird bei dieser Form der Metallherstellung spezifisch pro Tonne Metall weniger Energie verbraucht als bei der Primärherstellung.

Vor dem Hintergrund aktueller europäischer energie- und klimapolitischer Diskussionen besteht allerdings die Gefahr, dass diesen, im internationalen Wettbewerb stehenden Branchen in Deutschland die wirtschaftliche Basis entzogen



**Bild 1:** Die prozentualen Anteile der drei Sektoren an der Entwicklung des BIP in Deutschland in der Zeit von 1950 bis 2012 nach Daten von [3].

wird und wir uns gesellschaftlich von ressourcen- und energieeffizienten Zukunftstechnologien verabschieden, die dann in anderen Teilen der Welt unter Umständen weniger effizient betrieben werden. Ohne eigene energieintensive metallurgische Betriebe würde es in Deutschland ein Recycling von Eisen, Stahl und NE-Metallen dann nicht mehr geben.

### Die Entwicklungen in den Industriegesellschaften und ihre globalen gesellschaftlichen Auswirkungen

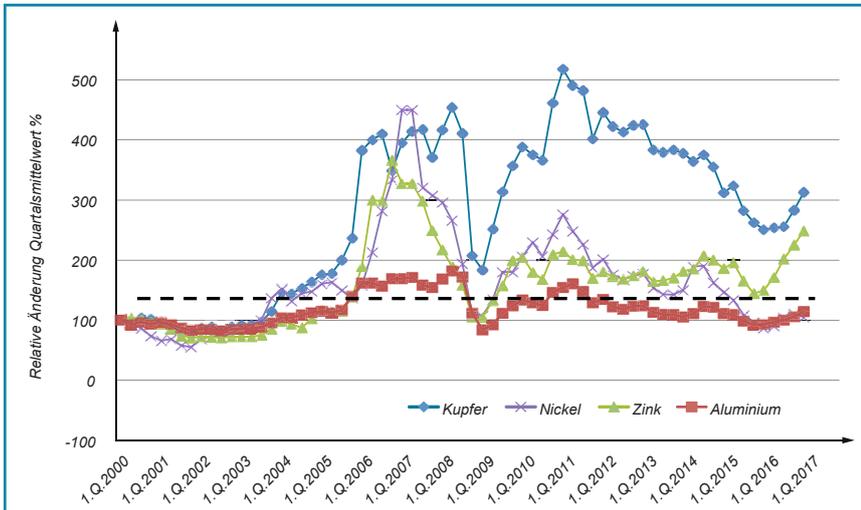
Nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges war die wirtschaftliche Entwicklung in Europa und in anderen Teilen der Welt aufgrund des Wiederaufbaus durch eine Dominanz der industriellen Produktion in der marktwirtschaftlich organisierten westlichen Welt gekennzeichnet. Diese Situation entsprach nach der Drei-Sektoren Hypothese von Clark, Fisher und Fourastié [2] dem sekundären Sektor, der vor dem Krieg in Europa schon einmal existierte, dann zerstört wurde und nach dem Krieg auf der Basis schon vorhandener industrieller Kenntnisse und Erfahrungen erneut entwickelt und mit einer sehr hohen Geschwindigkeit durchlaufen wurde. In Deutschland führte diese Entwicklung dazu, dass ab dem Jahr 1970 der Strukturwandel (Bild 1) vom sekundären Sektor (Industriegesellschaft) in den tertiären Sektor (Dienstleistungsgesellschaft) vollzogen wurde.

Diese extrem schnelle Entwicklung des sekundären Sektors, der durch Unternehmen der Kohle-, der Eisen- und Stahl- sowie der Chemieindustrie geprägt war, hat in der marktwirtschaftlich organisierten westlichen Welt zu einem dras-

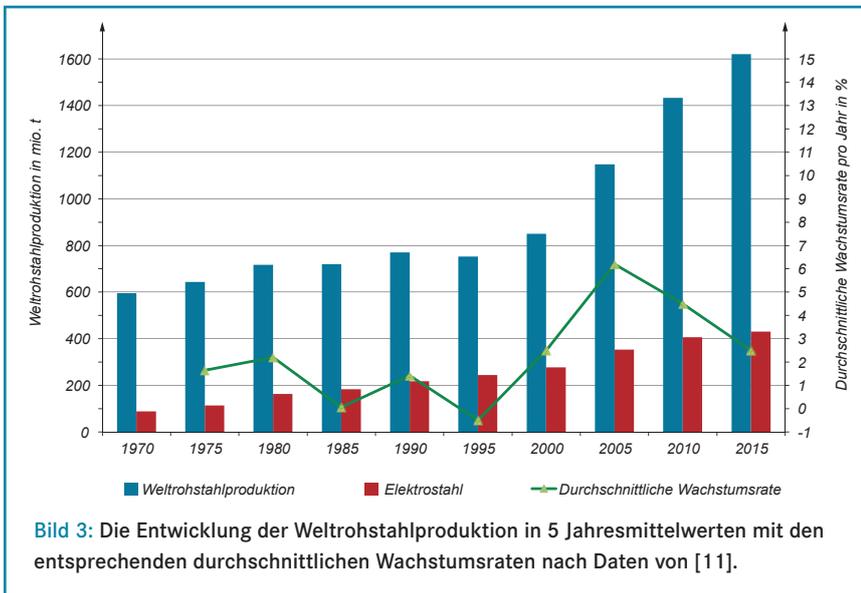
tischen Anstieg des Verbrauchs an Energie, an Rohstoffen und zu einer extremen Umweltverschmutzung geführt, die die Lebensgrundlagen der eigenen Generation und der zukünftiger Generationen zu zerstören drohte. Mit diesen Bildern der Vergangenheit, die sich tief in das gesellschaftliche Bewusstsein eingepreßt haben, sehen sich Unternehmen der Eisen-, Stahl- und NE-Metallindustrie auch heute noch sehr häufig in der gesellschaftlichen Diskussion konfrontiert, obwohl vieles nicht mehr ist, wie es einmal war. Darüber hinaus überdecken diese Bilder der Vergangenheit auch die einzigartigen Erfolge der metallurgischen Betriebe bei der Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz in den letzten Jahrzehnten. Durch eine kontinuierliche Entwicklung sind industrielle Prozesse entstanden, die teilweise (die Produktion von Elektro Stahl, Sekundäraluminium und -kupfer, Eisenguss..) schon mit sehr weit geschlossenen Rohstoffkreisläufen arbeiten.

Im Wahlkampf 1961 forderte der Kanzlerkandidat Willy Brandt, dass der Himmel über dem Ruhrgebiet wieder blau werden muss. Mit dem Beginn der 70er-Jahre setzte in den Industrienationen, zwar mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, aber dennoch generell ein Umdenken ein, in dessen Verlauf Studien wie „Die Grenzen des Wachstums“ der Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit [4] und „Global 2000“ der Bericht an den amerikanischen Präsidenten [5] veröffentlicht wurden.

Der Philosoph H. Jonas kam in seinem Buch „Das Prinzip Verantwortung“ [6] zu dem Schluss, dass mit der neuen Macht des Menschen, die die Lebensgrundlagen zukünftiger Generationen zerstören kann,



**Bild 2:** Die Änderungen von Metallpreisen auf der Basis von Quartalsmittelwerten bezogen auf die Preise des 1. Quartals des Jahres 2000 (100 %) nach Daten von [9].



**Bild 3:** Die Entwicklung der Weltrohstahlproduktion in 5 Jahresmittelwerten mit den entsprechenden durchschnittlichen Wachstumsraten nach Daten von [11].

die bisherigen ethischen Prinzipien, die sich auf das Hier und Jetzt beziehen, nicht mehr ausreichen, um dem Schutz zukünftiger Generationen gerecht zu werden. Für die Entwicklung neuer ethischer Prinzipien muss seiner Meinung nach die vorausgedachte Gefahr der Kompass sein, mit dem diese ethischen Prinzipien entdeckt werden können, aus denen sich die Pflichten der neuen Macht herleiten lassen. Dieses weitsichtig vorausschauende Denken ist heute in weiten Teilen der Gesellschaft und Politik zur Maxime gesellschaftlichen Handelns und Entscheidens geworden und hat in den letzten Jahrzehnten zu einer deutlichen Verbesserung des Schutzes der Umwelt und damit zu einer Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen, insbesondere in industriellen Ballungsräumen geführt, wobei auch hier noch zukünftig viel zu tun ist. Wenn auf der Basis dieses Denkens grundlegen-

de und weit in die Zukunft hineinreichende Entscheidungen getroffen werden, dann muss zwingend notwendig die Voraussetzung erfüllt sein, dass die vorausgedachte Gefahr auch weitgehend zweifelsfrei definiert werden kann. Darin liegt allerdings auch der besondere Anspruch, da zukunftsbezogene Aussagen naturgemäß mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Des Weiteren muss dieses Denken nicht nur die langfristig, sondern auch die kurzfristig vorausgedachte Gefahr berücksichtigen.

Vor dem Hintergrund der Daten der Vergangenheit wurde in der Studie „Die Grenzen des Wachstums“ im Jahr 1973 ein „superexponentielles“ Bevölkerungswachstum [4] identifiziert, in dessen Folge unter Berücksichtigung der damaligen realen Bedingungen eine Zunahme der Industrialisierung, der Nahrungsmittelproduktion, der Ausbeutung der natürlichen

Rohstoffe und der Umweltverschmutzung prognostiziert wurde. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass bei einer anhaltenden Entwicklung in dieser Form innerhalb von einhundert Jahren absolute Wachstumsgrenzen erreicht werden, was zu einem Zusammenbruch des Systems und einer Abnahme der Weltbevölkerung führen würde. In dem Sinne der vorausgedachten Gefahr haben die Ergebnisse dieser Studie in einem sehr wesentlichen Maße dazu beigetragen, dass sich das Denken in den Industrienationen in den folgenden Jahrzehnten veränderte. Der Zusammenbruch sollte nach Auffassung der Autoren daraus resultieren, dass

- > durch den exponentiellen Wachstumsprozess Rohstoffvorräte in großen Mengen verbraucht werden,
- > infolgedessen die Preise steigen,
- > immer mehr Kapital zur Beschaffung der Rohstoffe aufgewandt werden muss,
- > immer geringere finanzielle Mittel für das Wachstum eingesetzt werden können,
- > letztendlich die Kapitalinvestitionen mit der Rohstoffausschöpfung nicht mehr Schritt halten können,
- > die industrielle Basis dadurch zusammenbricht und den Dienstleistungssektor und das landwirtschaftliche System mit sich reißt, da beide von den industriellen Investitionen (Energieversorgung, Umweltschutzmaßnahmen, Medizinische Versorgung, Düngemittelindustrie, usw.) abhängig sind.

Auch wenn die grundsätzliche Aussage, dass eine Wohlstandsgesellschaft in ungeheurem Tempo unersetzbare Rohstoffe verbraucht, prinzipiell richtig ist und die extremen Preissteigerungen der Metalle in der Zeit von 2003 bis 2009 (Bild 2) durchaus den Eindruck vermittelt haben, mitten in der prognostizierten Phase zu sein, dass mehr und mehr Kapital zur Rohstoffbeschaffung aufgewandt werden muss, macht es gerade in heutiger Zeit besonders Sinn, sich mit den kritischen wissenschaftlichen Kommentaren zu den Modellrechnungen zu beschäftigen, die nach der Veröffentlichung der Studie vorgebracht wurden, da sie nach 40 Jahren zum Teil anhand der realen Entwicklungen überprüft werden können.

In der damaligen Diskussion zu der Studie wurde unter anderem bereits darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der Modellrechnungen sehr anfällig gegenüber veränderten Annahmen seien [7] und dass derartige Berechnungen viele Unsicherheitsfaktoren [8] enthielten. Insbesondere wurde darauf hingewiesen, dass

Wachstumsvorgänge bei längerer Betrachtung nicht exponentiellen, sondern logistischen Funktionen folgen, d. h. dass sich das Wachstum asymptotisch, mit immer geringer werdenden Wachstumsraten bestimmten Sättigungsgrenzen nähert.

In diesem Kontext ist heute auch die aktuelle Wachstumsrate der Weltbevölkerung zu diskutieren, deren jährlicher Zuwachs [10] in der Zeit von 1965-1970 mit 2 % ein Maximum erreichte und seit dieser Zeit stetig abnimmt und im Jahr 2010 nur noch 1,1 % betrug. So wurde in der Diskussion bereits 1974 die Vermutung geäußert, dass die wirtschaftlichen Wachstumsraten nicht wegen des Hungers und der Umweltverschmutzung geringer werden, „sondern wegen der Prosperität, weil die Menschen mehr haben als sie brauchen“ [8].

Dass sich wirtschaftliches Wachstum und damit einhergehend auch der Rohstoffverbrauch langfristig eher nach logistischen als nach exponentiellen Funktionen vollzieht, ist heute, 40 Jahre später, sehr deutlich an den produzierten Stahl- und NE-Metallmengen (Bilder 3 u. 4) in den letzten Jahrzehnten zu erkennen.

Insbesondere bei der Weltrohstahlproduktion (Bild 3) lässt sich erkennen, dass in der Zeit von 1970 – 1995 abnehmende Wachstumsraten sogar zu einer absoluten Abnahme der Weltrohstahlproduktion führten. Diese Entwicklung ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass bis zum Zusammenbruch des kommunistischen Blocks ein Weltmarkt im eigentlichen Sinne nicht existierte [13], sondern bis zum Jahr 1989 zwei Wirtschaftssysteme existierten, das westliche, marktwirtschaftlich organisierte und das östliche, planwirtschaftlich organisierte System. Wobei sich globales wirtschaftliches Handeln im Wesentlichen auf das westliche Wirtschaftssystem bezog, das bezüglich des Stahlverbrauchs nach Bild 4 als Folge eines logistischen Wachstums Sättigungserscheinungen aufwies.

Diese Entwicklung der Weltrohstahlproduktion wird von D. Meadows, J. Randers und D. Meadows [14] in positiver Weise so interpretiert, dass bis dahin gültige exponentielle Wachstumstrends und damit einhergehende Rohstoffverbräuche prinzipiell gestoppt werden können. Die Entwicklung der Stahlproduktion wird als ein Beispiel dafür gesehen, dass eine hohe Lebensqualität auch mit einer geringeren Schädigung des Planeten aufrechterhalten werden kann, als ein Beispiel dafür, dass „...die Welt die Lektion langsam lernt“ [14].

Von den Autoren wird als ein Grund für diese Entwicklung der aufkommenden

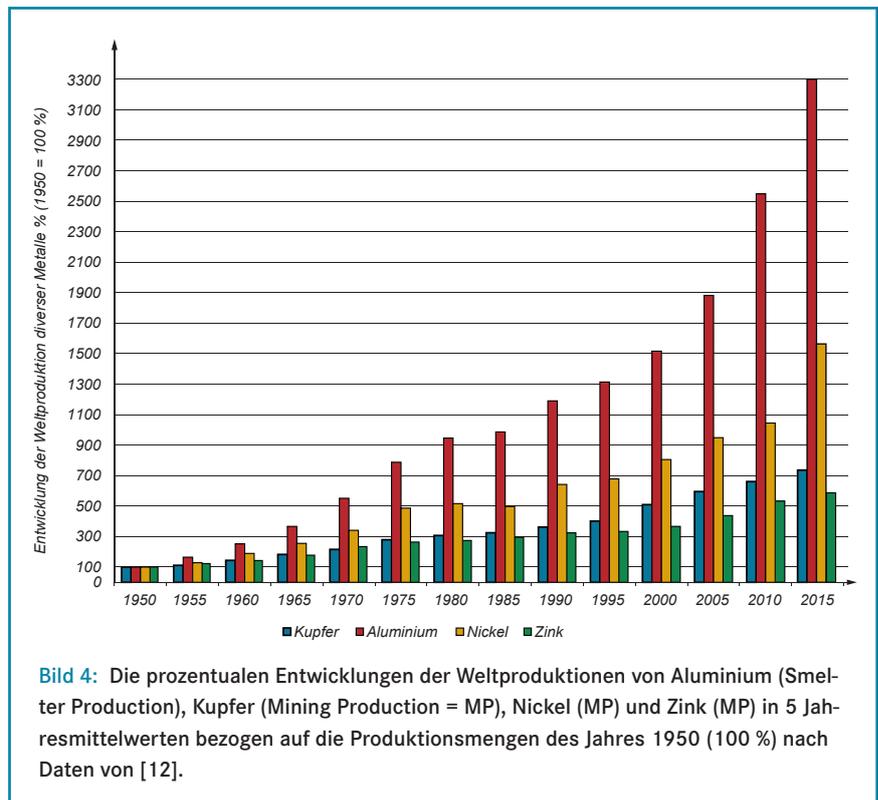
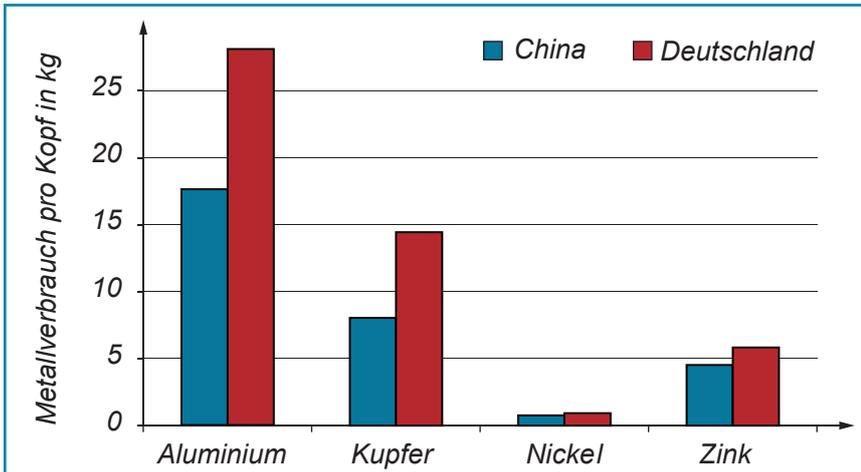


Bild 4: Die prozentualen Entwicklungen der Weltproduktionen von Aluminium (Smelter Production), Kupfer (Mining Production = MP), Nickel (MP) und Zink (MP) in 5-Jahresmittelwerten bezogen auf die Produktionsmengen des Jahres 1950 (100 %) nach Daten von [12].

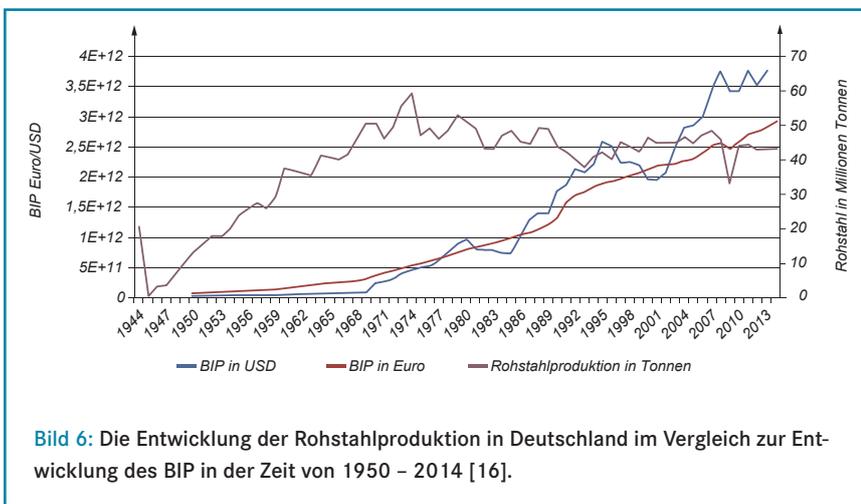
Trend zur Entmaterialisierung gesehen, d.h. mit weniger mehr zu erreichen. Neben der Substitution von Eisen- und Stahl durch andere Werkstoffe (Kunststoffe, NE-Metalle usw.) haben in der Tat die Entwicklungen zum Leichtbau in der modernen Eisen-, Stahl- und Gießerei-Industrie in den letzten Jahrzehnten in umfassender Art und Weise zur Entmaterialisierung geführt, da heute Produkte mit deutlich besseren Werkstoffeigenschaften mit wesentlich weniger Material hergestellt werden können.

Die Tatsache, dass sich diese Situation wieder änderte, als in China im Jahr 1992 die Reformbewegung wieder aufgenommen und die Phase der intensiven Industrialisierung fortgeführt wurde, deutet aber darauf hin, dass die abnehmende Rohstahlproduktion in der Zeit von 1970 – 1990 weniger auf Trends zur Entmaterialisierung als vielmehr auf einen Sättigungseffekt zurückzuführen war. Diese Phase der Sättigung ist im Moment dadurch aufgehoben, da durch das Entstehen eines wirklichen Weltmarkts nach 1989 und durch das industrielle Wachstum in China temporär eine neue Phase exponentiellen Wachstums eingeleitet worden ist, das sich aber gemäß einer logistischen Funktion kurz- bis mittelfristig einem Sättigungsgrenzwert nähern wird. Möglicherweise hat diese Phase der erneuten Sättigung zwischenzeitlich bereits begonnen, allerdings auf einem mehr als doppelt so hohen Niveau im Vergleich

zu der Zeit von 1970 bis 1990 mit rund 750 Mio. t /a. Denn im Jahr 2015 ist erstmals wieder seit der Wirtschaftskrise im Jahr 2007, die die Weltrohstahlproduktion von 1615 Mio. t um 3,3 % gegenüber dem Vorjahr gefallen. Wobei an dieser Stelle darauf hinzuweisen ist, dass die Weltrohstahlproduktion im Jahr 2016 [11] erneut um 0,8 % auf 1629 Mio. t angestiegen ist. Hier kann aber vermutlich mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass es sich nicht um eine Trendwende, sondern um ein Einpendeln auf den Sättigungsgrenzwert handelt. In diesem Sinne zeigt auch die Entwicklung der durchschnittlichen Wachstumsraten der Weltrohstahlproduktion (Bild 4) seit dem Jahr 2005 die für ein logistisches Wachstum typische Entwicklung abnehmender Wachstumsraten. Tendenziell ähnliche logistische Wachstumskurven sind bei den weltweit produzierten Mengen an Aluminium, Kupfer, Nickel und Zink (Bild 4) ebenfalls zu erkennen, wobei mögliche Sättigungsgrenzen eher in der Zeit zwischen 1975 bis 1985 erreicht wurden, die allerdings nicht so deutlich wie beim Stahl sichtbar sind. Eventuell neue zukünftige Sättigungsgrenzen, denen sich die Produktionsmengen asymptotisch nähern, sind derzeit bei den NE-Metallen nicht eindeutig zu identifizieren. Allerdings ist zu erkennen, dass in der Zeit von 2013 bis 2015 die Produktionsmengen [12] von Nickelerzen von 2,59 Mio. t auf 2,15 Mio. t entsprechend



**Bild 5:** Die Pro-Kopf-Verbräuche von Aluminium, Kupfer, Nickel und Zink im Vergleich zwischen China und Deutschland im Jahr 2014 nach Daten von [3, 15].



**Bild 6:** Die Entwicklung der Rohstahlproduktion in Deutschland im Vergleich zur Entwicklung des BIP in der Zeit von 1950 – 2014 [16].

17 % und die von Zinkerzen von rund 13,4 Mio. t auf 12,8 Mio. entsprechend 4,5 % zurückgegangen sind. Bei der Versorgung mit Zink bestand im Jahr 2015 die Situation, dass die Produktion die Nachfrage nach Zink überstieg, sodass in der Folge durch Minenschließungen im Jahr 2016 die Produktion von Zinkerzen auf 11,9 Mio. t reduziert wurde. Allein in Australien sank die Erzproduktion von 1,6 Mio. t/a im Jahr 2015 auf 0,85 Mio. t/a im Jahr 2016. In der Folge hat sich im Jahr 2016 bei einer annähernd konstanten Nachfrage nach Zinkmetall von 13,57 Mio. t/a eine Unterdeckung von ca. 349 000 t [12] ergeben, die vermutlich zu dem in Bild 2 erkennbaren Anstieg der Zinkpreise im Jahr 2016 geführt hat.

Da die Metallverbräuche in einem sehr hohen Maß durch die Verbräuche in China bestimmt werden [1], lassen sich in einem ersten Ansatz zukünftige Wachstumspotenziale an den jeweiligen Pro-Kopf-Verbräuchen abschätzen. Im Jahr 2014 betrug die Bevölkerung in China 1364 Mio. Menschen [3] und der Ver-

brauch an Stahl betrug 711 Mio. t, [15] sodass sich ein Stahlverbrauch von 521 kg/Kopf ergab. Im Vergleich dazu betrug im Jahr 2014 die Bevölkerung in Deutschland 80,9 Mio. Menschen und der Verbrauch an Stahl betrug 39,2 Mio. t, so dass sich ein Stahlverbrauch von 485 kg/ Kopf ergab. Auch wenn in Phasen der Industrialisierung der Stahlverbrauch tendenziell höher sein kann, so kann wahrscheinlich davon ausgegangen werden, dass der Stahlverbrauch in China nicht mehr sehr wesentlich zunehmen wird, insbesondere vor dem Hintergrund, dass im Jahr 2013 in China der tertiäre Sektor erstmals einen höheren Anteil am BIP als der sekundäre Sektor [15] hatte. Die entsprechenden Pro-Kopf-Verbräuche für die NE-Metalle sind in Bild 5 dargestellt. Aus dieser Darstellung lässt sich entnehmen, dass möglicherweise zukünftig noch die Verbräuche an Aluminium, Kupfer und Zink in China ansteigen könnten.

Im Gegensatz zu den Umständen, unter denen im Jahr 1973 die Studie „Die Gren-

zen des Wachstums“ erstellt wurde, zeigen heute deutlich verbesserte Umweltbedingungen in den traditionellen Industrienationen, die durch optimierte industrielle Prozesse sowie effiziente Abgas- und Abwasserreinigungssysteme erreicht wurden, dass wirtschaftliches Wachstum und Umweltschutz in der modernen Welt keine Gegensätze mehr sind, sondern sich gegenseitig bedürfen, um einen bestimmten gesellschaftlichen Wohlstand mit entsprechenden sozialen Errungenschaften aufrecht erhalten zu können.

In diesem Zusammenhang ist der jüngste Milleniumsbericht der UN [16], der erkennen lässt, dass durch ein globales wirtschaftliches Wachstum z.B. bei der Bekämpfung von Hunger und extremer Armut, der Verwirklichung der allgemeinen Grundschulbildung, der Förderung der Gleichstellung der Geschlechter durchaus deutliche Fortschritte erzielt werden konnten, ein Zeichen der Hoffnung, obwohl nach wie vor noch viel zu tun ist.

### Die zukünftige Bedeutung der metallurgischen Industrie in der globalen Entwicklung

Mit den Erfahrungen und Kenntnissen der traditionellen Industrienationen, unter Berücksichtigung des Schutzes der Umwelt auf einem hohen Standard industriell produzieren zu können, werden die Rahmenbedingungen für zukünftige globale technologische Entwicklungen definiert, die sich durch Energieproduktivität und Rohstoffeffizienz auszeichnen.

Die Entwicklung der Rohstahlproduktion in Deutschland [16] im Vergleich zu der Entwicklung des BIP (Bild 6) zeigt, dass der Wohlstand in modernen Volkswirtschaften auch dann wächst, wenn die Produktion von z. B. Rohstahl, einem industriellen Basisprodukt, das am Anfang der industriellen Wertschöpfungskette steht, einen Sättigungszustand erreicht hat.

Ein Vergleich mit Bild 1 zeigt, dass dieser Sättigungszustand mit dem Übergang von der Industriegesellschaft in die Dienstleistungsgesellschaft erreicht wurde. Einhergehend mit diesem Sättigungszustand kann auch ein mehr oder weniger konstanter Verbrauch an Rohstoffen erwartet werden, wobei die Bilder 7 und 8 zeigen, dass in Deutschland darüber hinaus die spezifischen Verbräuche an Rohstoffen und Energie pro Tonne Rohstahl in den letzten 20 Jahren deutlich reduziert werden konnten. In der Stahlindustrie wurde damit in den letzten Jahrzehnten und auch künftig das praktiziert, was als effizientere Quellennutzung [14] bezeich-

net wird, nämlich mit weniger Material das gleiche Ergebnis zu erzielen. Dabei gehen die Erfolge der Stahlindustrie in diesem Sinne noch darüber hinaus, da mit weniger Material Stähle mit besseren Werkstoffeigenschaften produziert werden, die somit in geringeren Massenanteilen in den Endprodukten (z. B. in einem Auto) eingesetzt werden.

Die in Bild 7 dargestellten geringeren Verbräuche an Rohstoffen im Vergleich des Jahres 2011 zu dem Jahr 1980 sind sehr wesentlich darauf zurückzuführen, dass im Jahr 1980 die Elektrostahlproduktion nur ca. 14 % der gesamten Rohstahlproduktion ausmachte und dass der Anteil im Jahr 2011 auf ca. 32 % angestiegen [11] ist. Da bei der Elektrostahlerzeugung metallisches Eisen in Form von Schrott und kein Eisenerz eingesetzt wird, ist der Rohstoffeinsatz dementsprechend geringer und durch den Einsatz des Sekundärrohstoffes Schrott die Ressourceneffizienz im Gesamtsystem deutlich höher.

Aus Bild 8 ist zu entnehmen, dass mit der Reduktion des spezifischen Energieverbrauches außerdem eine Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen einhergeht.

Trotz logistischer Wachstumsfunktionen werden die endlichen Ressourcen mineralischer Rohstoffe mit der weiteren wirtschaftlichen Entwicklung der Welt verbraucht und von daher ist es eine absolute Notwendigkeit, auch bei momentan eher fallenden Metallpreisen, weiter Recyclingprozesse zu entwickeln, mit denen die Metalle unter wirtschaftlichen Bedingungen noch effizienter in die jeweiligen Wertstoffkreisläufe zurückgeführt werden können.

Auf dem Weg zu möglichen zukünftigen Gleichgewichtszuständen beim Verbrauch von Rohstoffen müssen ähnlich wie in der Natur Abfälle aus Produktionsprozessen oder nach dem Ende der Nutzung von Produkten zu Ausgangsstoffen in denselben oder anderen Prozessen werden.

Erscheinen Gleichgewichtszustände beim Rohstoffverbrauch unter heutigen Bedingungen, global gesehen, als absolut unrealistisch, so gibt es doch Branchen, wie z. B. die Eisengussindustrie, die Elektrostahlindustrie, die Sekundäraluminium- und Sekundärkupferindustrie, die zumindest in den traditionellen Industrienationen, diesem Ideal schon nahekommen. Eisenerzpreise, die sich in der Zeit von 1980 – 2000 über ca. 20 Jahre auf einem Niveau von 25 – 35 US-Dollar/t Fe [20] bewegten, sind ein Beleg – noch nicht für einen Gleichgewichtszustand – aber für geringere Wachstumsraten als Folge eines logistischen Wachstums in der globalen Stahlindustrie (Bild 3 u. 6) und somit auch in den nationalen Stahl-

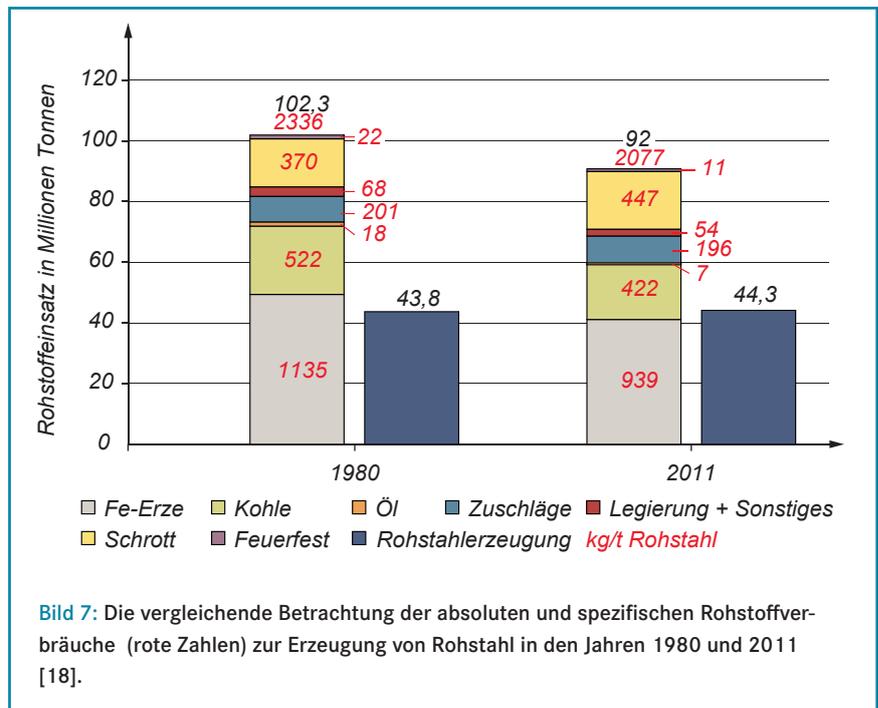


Bild 7: Die vergleichende Betrachtung der absoluten und spezifischen Rohstoffverbräuche (rote Zahlen) zur Erzeugung von Rohstahl in den Jahren 1980 und 2011 [18].

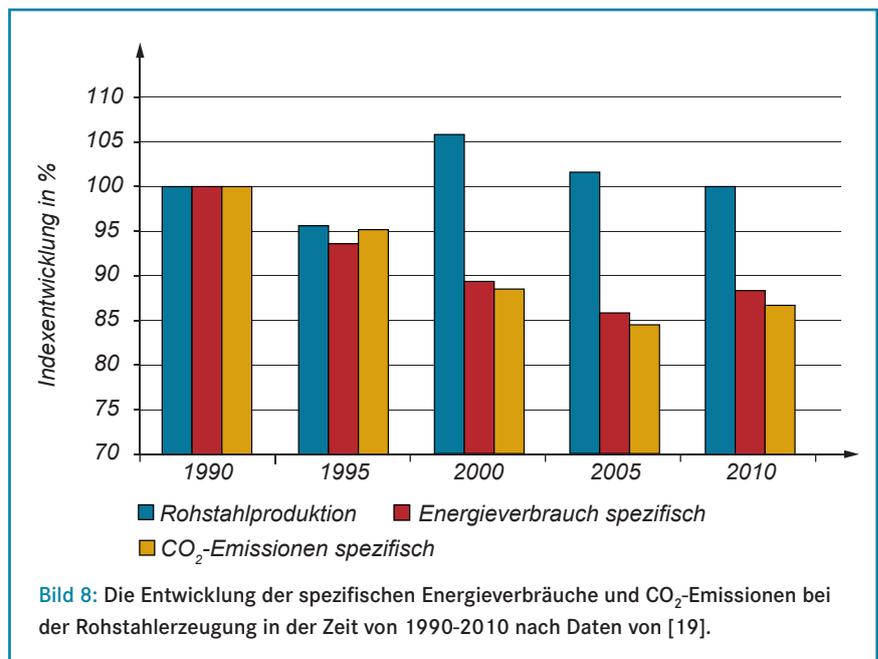


Bild 8: Die Entwicklung der spezifischen Energieverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Rohstahlerzeugung in der Zeit von 1990-2010 nach Daten von [19].

industrien. In gleicher Weise sind Stahlschrottpreise (Sorte 2) in Deutschland in der Zeit von 1991 – 2001 in der Größenordnung von 70 – 110 Euro/t [19] ein weiteres Indiz für geringere globale und nationale Wachstumsraten in der Stahlindustrie. Wenn es im Weiteren nach derzeitigem Kenntnisstand zutreffend sein sollte, dass die Weltbevölkerung in der Zeit zwischen 2070 bis 2110 – je nach Geburtenraten – nach Maximalwerten von 9,5 bis 11,6 Milliarden Menschen [10] zu schrumpfen beginnen wird, dann sind für zukünftige Generationen Gleichgewichtszustände vielleicht doch nicht absolut unrealistisch, wenn die Menschheit in noch stärkerem Maße lernt, Rohstoffe in Kreisläufen zu nutzen.

Vor diesem Hintergrund kommt den Metallen eine besondere Stellung zu, da die Metallerzeugung heute schon unter der Nutzung von relativ hohen Anteilen an sekundären Rohstoffen erfolgt. In diesen Prozessen, in denen überwiegend Schrotte (Bulk Material) aus Konstruktionswerkstoffen genutzt werden, können die Kreisläufe unendlich oft durchlaufen werden, da die Qualitäten der Metalle nicht abnehmen, sondern durch Werkstoffforschungsaktivitäten von Recyclingzyklus zu Recyclingzyklus noch weiter gesteigert werden können. Metalle in noch stärkerem Maße in Kreisläufen zu nutzen, bedeutet, sich zukünftig darauf zu konzentrieren, die Verluste im Verlauf des Lebenszyklus eines Metalls zu reduzieren. Der Lebenszyklus

eines Metalls lässt sich dabei in die folgenden Phasen [21] unterteilen:

### 1. Metallproduktion (Production)

Diese Phase umfasst die Aktivitäten von der Erzgewinnung über die Verhüttung bis zur Raffination der Metalle. Im Verlauf dieser Prozesse treten Metallverluste im Wesentlichen über Prozessabfälle wie Schlacken und Filterstäube auf. Je nach Metallen gibt es heute schon unterschiedliche Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus diesen Abfällen. Da die Metalle in diesen Abfällen in dissipativen Verteilungen und sehr häufig in Form von Oxiden vorliegen, müssen diese Recyclingprozesse besondere technische und wirtschaftliche Anforderungen erfüllen. Trotz bestehender Prozesse [1] sind hier zukünftig weitere Entwicklungen notwendig.

### 2. Halbzeugherstellung (Fabrication)

Bei der Halbzeugherstellung werden je nach Metall auf unterschiedliche Weise definierte Metalllegierungen erzeugt und in die unterschiedlichsten Formen gebracht. Je nach Prozess können hier ebenfalls Schlacken und Filterstäube anfallen. Des Weiteren entstehen durch die Verarbeitung bei höheren Temperaturen Metalloxide durch Oxidationsvorgänge auf den Metalloberflächen. Für bestehende und zukünftig zu entwickelnde Recyclingprozesse gelten die gleichen Anforderungen wie unter Punkt 1.

### 3. Verarbeitung (Manufacturing)

Bei der Verarbeitung werden aus den Halbzeugen Produkte gefertigt. Zur Herstellung der Produkte kommen z. B. Verfahren wie Sägen, Zerspanen, Honen und Läppen usw. zur Anwendung, bei denen in der Regel Kühlschmierstoffe eingesetzt werden. Bei diesen Metallverarbeitungsprozessen fallen somit ölhaltige Metallschlämme und -späne in größeren Mengen an, die aufgrund ihres Ölgehaltes derzeit nur eingeschränkt wiederverwertet werden können. Unter dem Aspekt eines zukünftigen intensiveren Recyclings sind hier z.B. Prozesse zu entwickeln, mit denen die Schlämme und Späne entölt werden können, um sie dann als hochwertige Wertstofffraktionen wieder den Rohstoffkreisläufen zuführen zu können.

### 4. Nutzung (Use)

Im Vergleich zur Vergangenheit ist die moderne Welt der Werkstoffe dadurch gekennzeichnet, dass häufig teure Werkstoffe nicht zum Bau von Gehäusen oder sonstigen konstruktiven Elementen verwendet werden, sondern um bestimmte Funktio-

nen (z. B. Halbleiterfunktionen, Magnetismus usw.) in Bauteilen zu erfüllen. Dadurch entstehen in modernen Produkten, insbesondere in elektronischen Bauteilen (electrical and electronic equipment, EEE) komplexe Materialgemische oder Legierungen, in denen die werthaltigen Metalle nur in sehr geringen Massenanteilen enthalten sind. Aufgrund dieser Tatsache sind nach der Sammlung und Separation der Abfälle extrem anspruchsvolle metallurgische Prozesse notwendig, die bereits heute schon in der NE-Metallindustrie existieren, aber zukünftig noch weiter entwickelt werden müssen, da sich die Anforderungsprofile weiter verändern werden.

### 5. Sammlung (Collection)

Da sich werthaltige Wertstoffe in Funktionswerkstoffen sehr häufig in einer Vielzahl von Geräten und zum Teil in kleinen Bauteilen befinden, in denen sie zusätzlich noch sehr komplex verbaut sind, müssen unter Umständen extrem aufwendige Sammel- und Separationsverfahren betrieben bzw. entwickelt werden, wobei diese Verfahren ebenfalls besondere technische und wirtschaftliche Anforderungen zu erfüllen haben.

In diesem Zusammenhang kommt auch der Rückgewinnung von Metallen aus Müllverbrennungsschlacken eine besondere Bedeutung zu, da diese im Verlauf des Verbrennungsprozesses als Sammler für werthaltige Metalle (Cu, Ag usw.) [22] fungieren, mit der Folge, dass in den Feinfraktionen der Müllverbrennungsschlacken Gehalte an werthaltigen Metallen vorliegen, die denen in natürlichen Erzen entsprechen. Nach einer mechanischen Separation werden die in Form von sehr kleinen Partikeln vorliegenden Metalle, über bestehende metallurgische Prozesse der NE-Metallindustrie, den Wertstoffkreisläufen wieder zugeführt.

### 6. Aufbereitung zum Recycling (Recycling)

Wie bereits im Zusammenhang mit der Sammlung beschrieben, müssen zu recycelnde Metalle entsprechend aufbereitet werden, um in metallurgischen Prozessen letztendlich zurückgewonnen werden zu können. Sehr häufig wird die Aufbereitung zum Recycling in Unternehmen der Sekundärrohstoffindustrie durchgeführt. Wobei hier die werthaltigen Metalle in den Funktionswerkstoffen ganz besondere Anforderungen an die technische und wirtschaftliche Machbarkeit stellen.

Zur weiteren Steigerung der Ressourceneffizienz müssen sich zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten insbesondere mit der Rückgewinnung von

Metallen aus dissipativen Verteilungen befassen, da hier in einem hohen Maße technisch und wirtschaftlich komplexe Problemstellungen zu lösen sind.

## Zusammenfassung

Die Herstellung von Eisen, Stahl, NE-Metallen und Gussprodukten ist durch einen hohen Anteil an wieder eingesetzten Sekundärrohstoffen (recycled content) gekennzeichnet, die dem Wertstoffkreislauf wieder zugeführt werden. Somit handelt es sich bei diesen Prozessen um absolute Zukunftstechnologien. Denn in den nächsten 50 Jahren wird es die große Aufgabe auf der Welt sein, vor dem Hintergrund eines globalen Strukturwandels, mit wieder zunehmenden Rohstoffverbräuchen, hervorgerufen durch die Industrialisierungen in den Schwellenländern, industrielle Prozesse zu entwickeln, in denen möglichst in weitgehend geschlossenen Rohstoffkreisläufen gearbeitet werden kann. Dass sich wirtschaftliches Wachstum und damit einhergehend auch der Rohstoffverbrauch langfristig eher nach logistischen als nach exponentiellen Funktionen vollzieht, ist sehr deutlich an der globalen Rohstahlproduktion in der Zeit von 1970 – 1995 zu sehen.

Die Stahl- und Gießerei-Industrie in Deutschland hat in den letzten Jahrzehnten durch die Erhöhung der Ressourceneffizienz und Energieeffizienz in beeindruckender Weise gezeigt, dass eine im Rahmen der gesellschaftlichen Diskussion geforderte Entmaterialisierung, dass nämlich mit weniger Material das gleiche Ergebnis erzielt werden kann, in großindustriellen Prozessen tatsächlich möglich ist. Dabei gehen die Erfolge der Stahl- und Gießerei-Industrie in diesem Sinne noch darüber hinaus, da mit weniger Material bessere Ergebnisse, d. h. höherwertige Stähle und Gussprodukte mit besseren Werkstoffeigenschaften produziert werden, die somit in geringeren Massenanteilen in die Endprodukte (z. B. in der Automobilindustrie) eingehen. Metalle spielen im Hinblick auf das Ziel, industrielle Prozesse zu entwickeln, in denen ähnlich wie in der Natur, Abfälle aus Produktionsprozessen oder nach dem Ende der Nutzung von Produkten zu Ausgangsstoffen in denselben oder anderen Prozessen werden, eine ganz besondere Rolle, da die Metallerzeugung heute schon unter der Nutzung von relativ hohen Anteilen an sekundären Rohstoffen erfolgt. Diese Kreisläufe können unendlich oft durchlaufen werden, da die Qualitäten der Metalle nicht abnehmen, sondern durch Werkstoffforschungsaktivitäten von Recyclingzyklus zu Recyclingzyklus noch

weiter zunehmen. Metalle müssen zukünftig in noch stärkerem Maße in Kreisläufen genutzt werden, in dem Verluste im Verlauf des Lebenszyklus eines Metalls reduziert werden. Verluste dieser Art können z. B. durch den Aufbau eines effektiven Sammel-systems für Handys reduziert werden, was aber gesellschaftlich in Deutschland nur dann wirklich Sinn macht, wenn die darin enthaltenen wertvollen Metalle auch in Deutschland in metallurgischen Betrieben, die aber naturgemäß energieintensiv sind, recycelt werden können.

#### Literatur:

- [1] Deike, R.: *Chemie Ingenieur Technik* 84 (2012), Nr. 10, 1685-1693
- [2] Fourastié, J.: *Die große Hoffnung des 20. Jahrhunderts*, Bund-Verlag, Köln, 1969
- [3] [www.destatis.de](http://www.destatis.de)
- [4] Meadows, D.; Meadows, D.; Zahn, E.; Millig, P.: *Die Grenzen des Wachstums*, Rowohlt, Taschenbuch Verlag GmbH, Hamburg, 1973
- [5] *Global 2000*, Ed. G.O. Bearney, U.S. Government Printing Office, Washington, 1980
- [6] Jonas, H.: *Das Prinzip Verantwortung*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 1979
- [7] Samuelson, P.A.: in *Die Grenzen des Wachstums, Pro und Contra*, Ed. W.L. Oltmans, Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Hamburg, 1974
- [8] Kahn, H.: in *Die Grenzen des Wachstums, Pro und Contra*, Ed. W.L. Oltmans, Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Hamburg, 1974
- [9] *London Metals Exchange*, [www.LME.com](http://www.LME.com), 2015
- [10] Birg, H.: <http://www.bpb.de/iz-pb/55882/entwicklung-der-weltbevölkerung>, 2011
- [11] *World Steel Association*, [www.world-steel.org](http://www.world-steel.org), 2017
- [12] [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov), 2017
- [13] Taube, M.: *Duisburger Arbeitspapiere Ostasienwissenschaften Nr. 51*, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2003
- [14] Meadows, D.; Randers, J.; Meadows, D.: *Die Grenzen des Wachstums, Das 30-Jahre-Update*, 2. Aufl. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 2007
- [15] *Deutschland Rohstoffsituation 2014*, [www.bgr.bund.de](http://www.bgr.bund.de), 2014
- [16] Schirmaier, A.: *Die Entwicklungen der Stahlindustrien in Deutschland, Japan, Südkorea und China in der Zeit von 1950 bis 2014*, Masterarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2015
- [17] [www.un.org/.../millennium/MDG%20Report%202015%20German.pdf](http://www.un.org/.../millennium/MDG%20Report%202015%20German.pdf), 2015
- [18] Heußen, M.; Markus, H.P.: *Ressourcenmanagement eines Elektrostahlwerks, in Aschen-Schlacken-Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie*, (Hrsg. K.J. Thomé-Kozmiensky), TK-Verlag Neuruppin, 2013
- [19] [www.stahl-online.de](http://www.stahl-online.de), 2000
- [20] [www.econstats.com](http://www.econstats.com), 2007
- [21] Reuter, M.; Hudson, M.A. van Schaik, A. et al.: *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure*, UNEP, [www.unep.org/resourcepanel](http://www.unep.org/resourcepanel)
- [22] Morf, L.S.; Gloor, R. et al.: *Waste Management* 33, 634-644, 2013
- Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike, Universität Duisburg-Essen, Institut für Technologien der Metalle (Erstveröffentlichung auf der Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 2016)