

Die Bedeutung von Eisen und Stahl für die Circular Economy

Rüdiger Deike

Im Rahmen der nationalen Strategie zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland [1] wurden die 17 Nachhaltigkeitsziele (SDG: Sustainable Development Goals) der UN von der Bundesregierung übernommen, zu denen unter anderem ein verantwortungsvoller Verbrauch von Rohstoffen und entsprechend verantwortungsvolle sowie nachhaltige Produktionsmodelle (Ziel Nr. 12) gehören, die es ermöglichen die natürlichen Ressourcen heute und für die Zukunft zu schützen. Mit dem Circular Economy Action Plan [2] der EU kommt die Bedeutung der Nachhaltigkeit und die Entwicklung nachhaltiger Prozesse in den Fokus der europäischen Politik.

Mit der Circular Economy soll ein globales Wirtschaftswachstum und damit ein zunehmender Wohlstand mit einer so weit wie möglichen Entkopplung von weiter steigenden Rohstoffverbräuchen erreicht werden. Eine Entmaterialisierung des Wirtschaftswachstums, die nach einer ersten Einschätzung, aufgrund bisheriger Erfahrungen als nicht möglich erscheint, hat es aber bei einem genauen Hinschauen in der Welt, in den letzten Jahrzehnten durchaus schon temporär im Bereich der globalen Stahlherstellung gegeben, wird es in der Zukunft wieder geben und wird sich noch weiter entwickeln lassen, da es je nach Art der Stahlherstellung und der Qualität des hergestellten Stahls heute schon möglich ist, metallische Rohstoffe zu einem hohen Anteil in sehr weitgehend geschlossenen Kreisläufen zu nutzen.

Die Herstellung von Eisen und Stahl zeichnet sich durch jahrzehntelange und kontinuierlich stattfindende Entwicklungen aus, in deren Verläufen steigende Anteile an Sekundärrohstoffen (recycled content), in der Regel in Form von Schrott aber auch Abfallstoffe anderer Art (Legierungsbriketts, Späne usw.), in den Herstellungsprozessen wiedereingesetzt und damit dem Wertstoffkreislauf erneut zugeführt werden. Ein zunehmender Anteil der Sekundärstahlerzeugung über den Elektrolichtbogenofen (EAF, Electric Arc Furnace) hat in Kombination mit zahlreichen anderen Prozessoptimierungen in den letzten Jahrzehnten in Deutschland dazu geführt, dass z.B im Mittel der spezifische Rohstoffeinsatz von 1980 bis 2011 für die Produktion von einer Tonne Rohstahl um 11% [3] gesenkt werden konnte.

Weltrohstahlproduktion und durchschnittliche Wachstumsraten in 5 Jahreszyklen

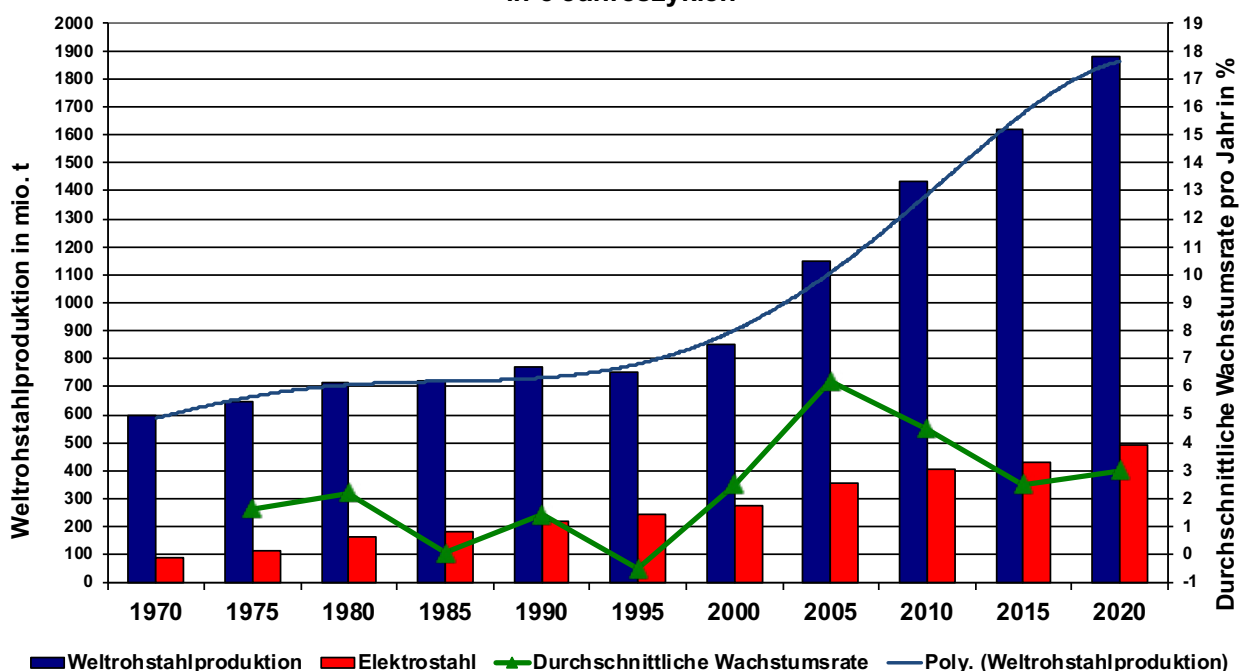


Bild 1: Die Entwicklung der globalen Weltrohstahlerzeugung in der Zeit von 1950 – 2020 [7]

Struktur des BIP in China nach Sektoren

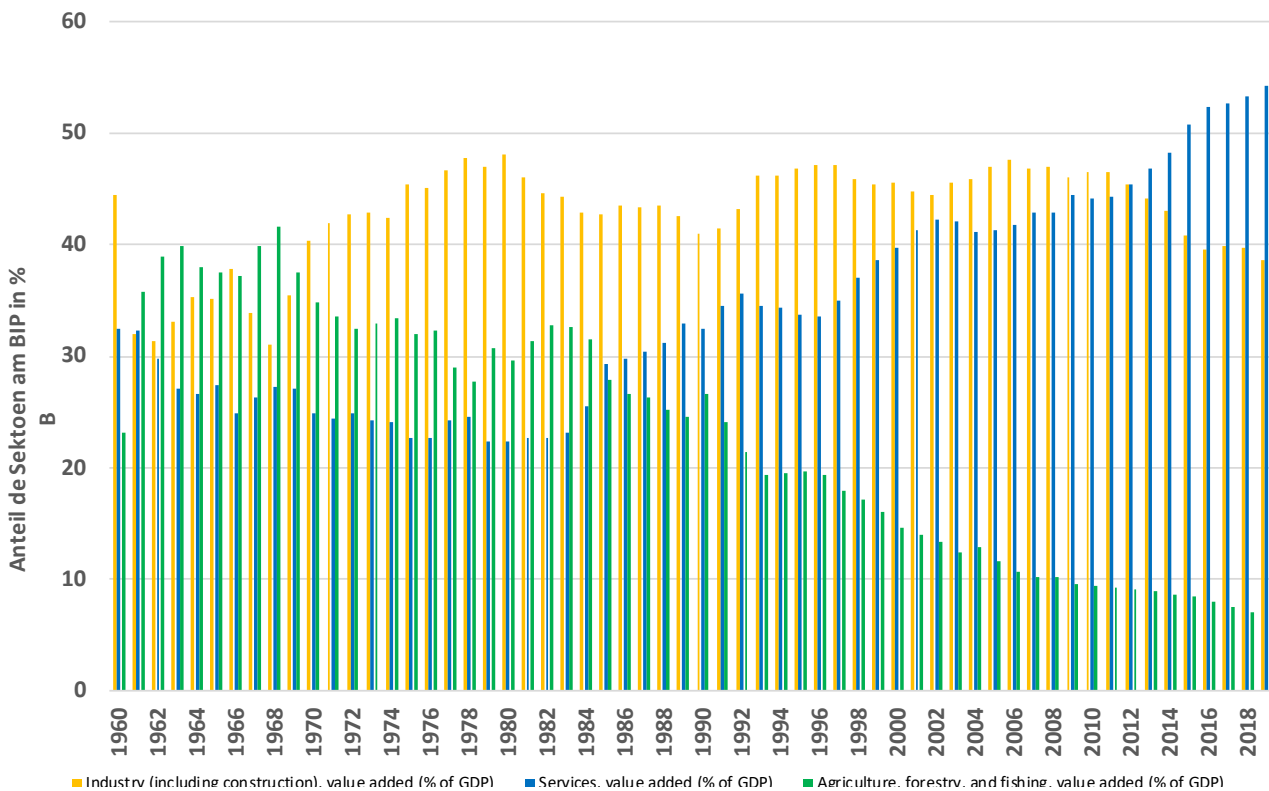


Bild 2: Die Entwicklung des BIP in China unterteilt nach Sektoren [7]

Betrag im Jahr 1980 der spezifische Energieverbrauch pro Tonne flüssigem Stahl in einem integrierten Hüttenwerk noch 23 GJ/t, so sank er auf ca. 18 GJ/t im Jahr 2004 [4]. Der spezifische Energieverbrauch in einem Elektrostahlwerk [5] bestehend aus elektrischer (57,7%) und fossiler Energie (35,1%) sowie den Reaktionsenthalpien der Oxidationsreaktionen (6%) liegt in Europa in Abhängigkeit von der Ofenkonstruktion und -fahrweise im Mittel bei 1,8 -2,5 GJ/t [4] flüssigen Stahls.

In der Phase in der ein Produkt, z.B. ein Auto genutzt wird, werden parallel Werkstoffe kontinuierlich in Unternehmen, Forschungsinstituten und Hochschulen im Rahmen der Werkstoffforschung weiterentwickelt, so dass es bei Produkten aus Stahl am Ende eines Produktlebenszyklus (End of Life) möglich ist, aus etwas Altem, nämlich Schrott, etwas Neues, wie einen modernen Hochleistungsstahl mit besseren Eigenschaften fertigen zu können, was die höchste Form eines nachhaltigen Recyclings darstellt. Unabhängig von politischen Forderungen sind im Bereich des Stahls die Wertschöpfungsketten seit Beginn der Stahlherstellung über weit mehr als ein Jahrhundert kontinuierlich dahingehend optimiert worden, durch effizientere Prozesse und verbesserte Produkte den Verbrauch an Rohstoffen und Energie unter Kostengesichtspunkten zu reduzieren. In den letzten 50 Jahren sind dann in zunehmenden Maße Prozessoptimierungen unter Umweltschutzaspekten hinzugekommen, deren Effekte durch ein Monitoring relevanter Umweltkenndaten über die letzten Jahrzehnte an den Industriestandorten deutlich zu erkennen sind.

Die Entwicklung der Stahlindustrie in den letzten Jahrzehnten und in der Zukunft

Im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung einer Volkswirtschaft - aber auch der gesamten Welt - zeigen Analysen der letzten Jahrzehnte welchen enormen Einfluss strukturelle Veränderungen diesbezüglich haben und bei etwaigen Prognosen mitberücksichtigt werden müssen, was sich sehr gut am Beispiel der globalen Entwicklung der Stahlindustrie in den letzten Jahrzehnten zeigen lässt. Die wirtschaftlichen Entwicklungen der traditionellen Industrienationen in Europa und Japan sind seit Beginn der 70er Jahre durch den strukturellen Wandel von Industrie- zu Dienstleistungsgesellschaften gekennzeichnet, der in den betreffenden Volkswirtschaften dazu geführt hat, dass Wachstumsraten bei bestimmten Rohstoffverbräuchen [6] geringer wurden. So ist aus **Bild 1** zu entnehmen, dass sich in der Zeit von 1970-1995, d.h. über 25 Jahre lang die globale Stahlproduktion - infolge geringerer Wachstumsraten - einem Sättigungszustand angenähert hat und letztendlich dann zwischen 1990 -1995 [7] sogar eine absolute Abnahme der Weltrohstahlproduktion stattgefunden hat, obwohl in dieser Zeit die Weltwirtschaft und die Weltbevölkerung weitergewachsen sind. Hier hat in dieser Zeit global ein Wirtschaftswachstum stattgefunden, ohne das mehr Stahl verbraucht worden ist, da die Wertschöpfung in den damals wichtigen Volkswirtschaften der Welt in zunehmenden Maßen über Dienstleistungsprozesse erfolgte.

Diese Entwicklung ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass bis zum Zusammenbruch des kommunistischen Blocks, ein Weltmarkt im eigentlichen Sinne nicht existierte [8] sondern bis zum Jahr 1989 zwei Wirtschaftssysteme existierten, das

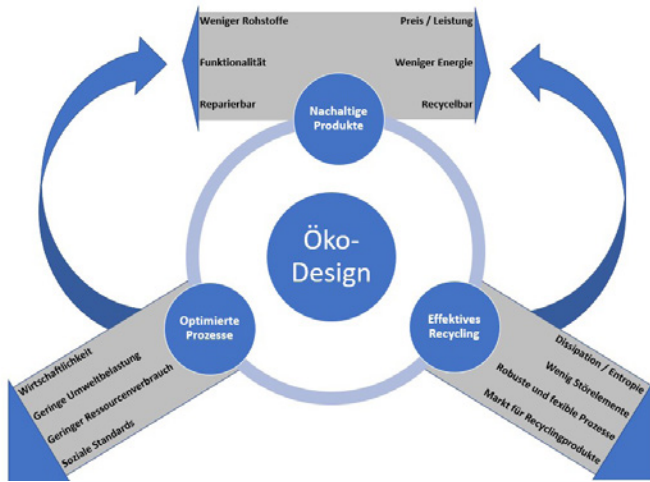


Bild 3: Grundlegende Elemente und Beziehungen in einer Circular Economy [7].

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 1 als Folge eines logistischen Wachstums temporär Sättigungserscheinungen aufwies, da sich ca. 20-25 Jahre nach Ende des zweiten Weltkrieges der Wiederaufbau der zerstörten Infrastrukturen der Fertigstellung näherte.

Mit der Industrialisierung in China endete diese Entwicklung und es hat wieder ein exponentielles Wachstum mit extremen Rohstoffverbräuchen und Preissteigerungen in der ersten Dekade dieses Jahrhunderts stattgefunden. Diese Entwicklung ist aber vorüber und sehr wahrscheinlich wird in den nächsten zwei Jahrzehnten auch in China der bereits begonnene Strukturwandel [7] von einer Industrie- zu einer Dienstleistungsgesellschaft (**Bild 2**) vollzogen sein, wodurch sich dann in China ebenfalls eine logistische Wachstumsfunktion der Stahlproduktion abzeichnen wird. In China hat im Jahr 2012 der tertiäre Sektor [6] erstmals mehr zum BIP beigetragen als der sekundäre Sektor. In den letzten zwei Jahrzehnten hat der Immobiliensektor eine sehr wesentliche Rolle bei der Entwicklung des BIP und der Vermögensbildung in China gespielt. Unter dem Aspekt Wohlstand für alle zu schaffen, sollen im Rahmen der neuen chinesischen Politik Häuser gebaut werden, damit darin Menschen wohnen und nicht als Investitionsobjekte leer stehen, so dass von daher im Immobilienbereich im Vergleich zu den letzten zwanzig Jahren zukünftig veränderte Prioritäten [9] zu erwarten sind.

Die exponentielle Entwicklung in der Zeit ab 2003 hat aber dazu geführt, dass China, wie auch in den vergangenen Jahren, im Jahr 2021 mit 1.032,8 Mio. t/a und einem Anteil von 53% an der globalen Stahlproduktion von 1.951,2 Mio. t/a [10] die mit Abstand größte und wichtigste stahlproduzierende Nation war. Allerdings ist hier die Tatsache interessant, dass die Weltrohstahlproduktion im Jahr 2021 im Vergleich zum Jahr 2020 um 71,8 Mio t/a auf 1951, 2 Mio. t/a gestiegen, aber die Produktion in China in diesem Zeitraum um 31,9 Mio. t/a gefallen ist. Somit wird es wichtig sein, die Entwicklung in den nächsten Jahren zu verfolgen, um feststellen zu können, ob sich hier möglicherweise ein Trend entwickelt.

Im Jahr 2021 waren 309.000 Mitarbeiter in der europäischen Stahlindustrie [11] beschäftigt und es wurden in Europa 152,6 Mio. t Rohstahl (449 t/Mitarbeiter) mit einem Wert von 134,5 Mrd.€ (435 T€/Mitarbeiter) produziert. Die Rohstahlproduktion in Deutschland hatte einen Anteil von 26,2 % an der gesamten europäischen Produktion. Die Stahlproduktion in Europa erfolgte zu 56,4% (68 % in Deutschland) als Primärerzeugung über die integrierte Route (Hochofen/Stahlwerk) und zu 43,6 % (32 % in Deutschland) als Sekundärerzeugung über den Elektrolichtbogenofen (EAF-Prozess). Im Jahr 2021 wurden in Europa 87,8 Mio. t Schrott eingesetzt, so dass im Mittel eine in Europa produzierte Tonne Stahl mit 575 kg Schrott produziert worden ist. Für die weltweite Stahlproduktion von 1.869 Mio. Tonnen im Jahr 2019 wurden etwa 630 Mio. Tonnen Schrott eingesetzt.

Bei den Schrottqualitäten wird zwischen den folgenden Qualitäten unterschieden:

Altschrott

Auf den Altschrott entfallen ca. 40-45% des gesamten Schrottaufkommens [12] und je nach Einsatz der Stähle, ob z.B. in Automobilen, Haushaltwaren oder der Bauindustrie kommen diese Schrotte erst nach sehr unterschiedlich langen Zeiten der Nutzung in den Wertstoffkreislauf zurück und das in der Regel in einer sehr heterogenen Zusammensetzung.

Eigenschrott

Bei dem Eigenschrott handelt es sich um Schrott der bei der Stahlproduktion direkt anfällt und auf den ca. 20-30% des gesamten Schrottaufkommens [12] entfallen. Dieser Schrott verlässt in der Regel das Stahlwerk nicht und wird direkt wieder eingesetzt.

Neuschrott

Der Neuschrott auf den ca. 20-30% des gesamten Schrottaufkommens [12] entfallen, fällt als Abfall (z.B. Blechreste beim Umformen von Stahlblechen usw.) bei der Herstellung von neuen Produkten aus Stahl an. Diese Art von Schrott kommt in der Regel innerhalb von Wochen und Monaten zurück in den Wertstoffkreislauf. Schrotte dieser Art können aktuell in gewissen Grenzen klassifiziert dem Markt zur Verfügung gestellt werden.

Im Hinblick auf Prognosen möglicher zukünftiger Entwicklungen in der Stahlproduktion ist es wichtig zu wissen, in welchen Bereichen Stähle im Wesentlichen verwendet werden. Aus der **Tabelle 1** ist zu entnehmen, dass Stahl überwiegend in der Bauwirtschaft und für Infrastrukturmaßnahmen inklusive des Pipelinebaus eingesetzt wird. Im Weiteren spielen insbesondere der Automobilbau gefolgt vom Maschinenbau und den Metallwaren (Kessel, Behälter, Zieh- und Stanzteile usw.) eine wichtige Rolle.

Die Tabelle 1 zeigt, dass Stähle in Bereichen eingesetzt werden, in den die Produkte zwar unterschiedliche, aber dennoch überwiegend lange Lebenszyklen aufweisen und es sich damit um Produkte handelt, die in einem hohen Maße den Vorgaben des Circular Economy Action Plan der EU [2] entsprechen.

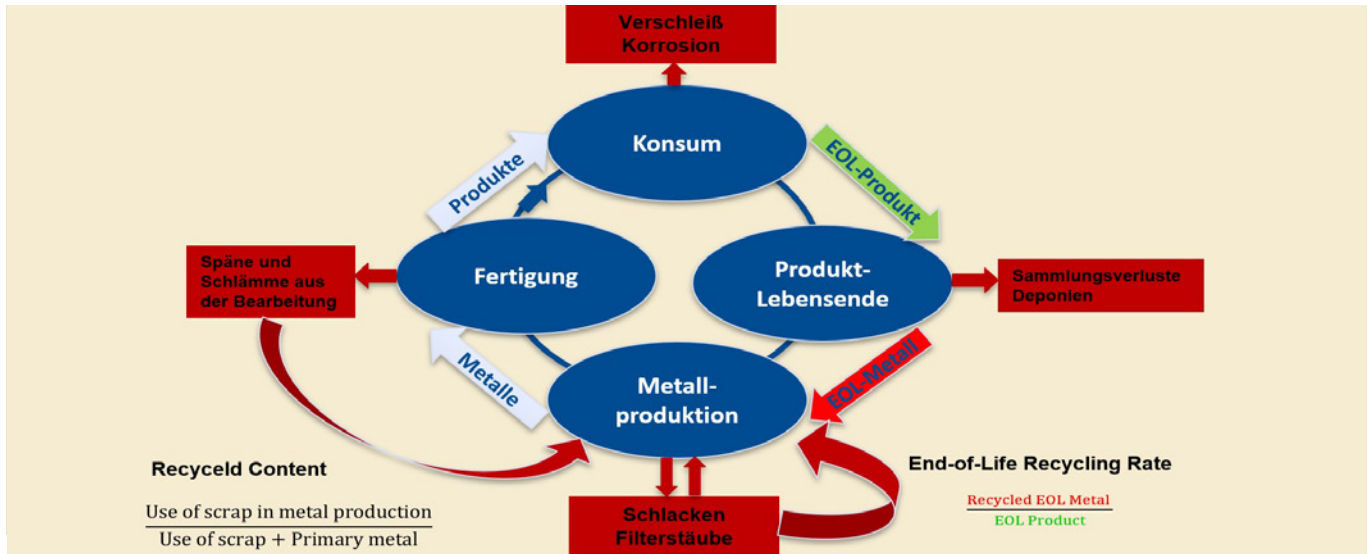


Bild 4: Was ist der Unterschied zwischen Recycled Content und End-of-Life Recycling Rate.

Welche Ziele sollen mit der Circular Economy verfolgt und wie erreicht werden?

Über allem steht das Ziel, globalen Wohlstand durch Wirtschaftswachstum zu generieren und dabei möglichst weniger energetische und nicht-energetische Rohstoffe dadurch zu verbrauchen, dass nachhaltige Produkte (**Bild 3**) designed werden, die länger genutzt und auch wieder repariert werden können, wie das zur Jugendzeit des Autors bereits vor Jahrzehnten der Regelfall war. Im Zentrum des zukünftigen Denkens und Handels muss wieder das Öko-Design [13] stehen, welches in der Vergangenheit - zur Jugendzeit des Autors - schon praktiziert wurde, ohne dass es so genannt wurde.

Ein typischer Lebenszyklus eines erfolgreichen Produktes ist dadurch gekennzeichnet, dass es zu Beginn nur einen Anbieter gibt, wie es z.B. beim VW-Käfer oder auch beim I-Phone der Fall war, dass es aber demgegenüber eine gigantische Nachfrage gibt. In diesen Phasen erwirtschaften die Unternehmen die größten Gewinne, die dann im Weiteren durch einen zunehmenden Wettbewerb und damit schwindenden Marktanteilen geringer werden. Um weiterhin die gewohnten Marktanteile und Gewinne realisieren zu können, müssen die

Kosten reduziert und die produzierten Mengen erhöht werden, was dann durch eine schnellere Folge von neuen Produkten erreicht werden soll. Unter solchen Bedingungen steht die Langlebigkeit und die Reparierbarkeit eines Produktes nicht unbedingt im Fokus einer Unternehmensstrategie. Trotzdem wurde nach der Einführung des Begriffes über das Öko-Design in den letzten Jahrzehnten intensiv diskutiert und geforscht, nur wirklich umgesetzt wurde wenig und wenn überhaupt neben Glas und Papier im Bereich der Metalle, wo bereits seit Jahrzehnten die in Bild 2 dargestellten charakteristischen Elemente eines Ökodesigns umgesetzt werden.

Wie bereits oben erwähnt, ist es für die Stahlherstellung typisch, dass Prozesse in der Vergangenheit vornehmlich unter dem Aspekt der Kostenreduzierung, heute zunehmend unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit bei gleichzeitigem Erhalt der Wirtschaftlichkeit optimiert werden, mit der Folge, dass Energie- und Ressourcenverbräuche verringert werden. Wurden z.B. im Jahr 1960 noch ca. 1000 kg Reduktionsmittel [14] - damals fast ausschließlich Koks - für die Produktion einer Tonne Roheisen über den Hochofen benötigt, so liegt heute der Verbrauch an Reduktionsmitteln - im wesentlichen Koks,

Tabelle 1: Die wichtigsten Anwendungsgebiete für Stahl.

Anwendungsgebiete	Deutschland (2021)	EU (2021)	Welt (2019)
Bau, inkl. Rohre Building and Infrastructure	44%	49%	52%
Automobil Automotive	26%	16%	12%
Maschinenbau Mechanical equipment	11%	15%	16%
Metallwaren Metal products	12%	14%	10%
Haushaltswaren Domestic appliances	2%	2%	2%
Übrige Miscellaneous	5%	4%	8%



Bild 5: Die Bedeutung der Entropie für ein effektives Recycling [7]

Kohle und intern verwertete Prozessgase - bei ca. 450-500 kg pro Tonne Roheisen.

Die Entwicklung nachhaltiger Produkte mit einer verbesserten Funktionalität, einer längeren Haltbarkeit, die dann zusätzlich noch reparierbar sind und am Ende des Produktlebenszyklus auch wieder recycelt werden können, wird die Kernaufgabe eines Öko-Designs werden. Dadurch werden bezogen auf das Produkt weniger Rohstoffe und weniger Energie benötigt, so dass sich über den Lebenszyklus des Produktes damit ein besseres Preis-/Leistungsverhältnis ergibt.

Mit der globalen Entwicklung der Circular Economy werden sich neue Geschäftsfelder entwickeln, die bereits zu beobachten sind, in denen Produkte mit entsprechenden gesicherten Qualitätsgarantien instandgesetzt und als Refurbish-Produkte wieder erneut auf den Markt kommen werden. Im Smartphone-Business ist dieses Geschäftsmodell bereits etabliert und gebrauchte Autos sind für uns seit Jahrzehnten selbstverständlich. Die aktuelle Situation zeigt, dass bei langen Wartezeiten für Neuwagen das Geschäft mit Gebrauchtwagen wächst, die dann auch dementsprechend repariert werden müssen, um sie mit Qualitätsgarantien verkaufen zu können. Zunehmende Entwicklungen dieser Art werden dazu führen, dass wieder mehr nachhaltige Arbeitsplätze im Bereich der Instandhaltung und Reparatur entstehen werden.

Auch im Maschinen- und Anlagenbau werden zukünftig durch moderne Methoden der Digitalisierung Lieferanten gemeinsam mit den Kunden, verstärkt in der Lage sein, die Produktionsanlagen zu überwachen, instand zu halten und den Zustand der Anlagen im Verlauf der Produktion sogar kontinuierlich zu verbessern, in dem im Rahmen der Instandhaltung neue Komponenten mit einer besseren Funktionalität eingesetzt werden können. Damit findet auch weiterhin eine Wertschöpfung statt, allerdings mit deutlich geringeren Ressourcen- und Energieverbräuchen. Das alles wird aber nur möglich sein und darauf muss in diesem Zusammenhang sehr deutlich und ausdrücklich hingewiesen werden, wenn in einer Circular Economy auch weiterhin neue innovative Produkte mit verbesserten Funktionalitäten und verbesserten

Preis-/Leistungsverhältnissen entwickelt werden, da diese Entwicklungen entscheidend zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit beitragen.

Sehr gute Beispiele dafür sind in der Vergangenheit die Entwicklungen im Bereich der Stähle, die mit einer eigenen modernen Stahlindustrie auch in der Zukunft weiter fortgeführt werden können. Die europäische Stahlindustrie [15] konzentriert sich bereits seit Jahrzehnten mit der Plattform ESTEP auf eine ganzheitliche Forschung und Entwicklung, mit dem Ziel kontinuierlich Energie- und Ressourcenverbräuche bei der Herstellung und der Anwendung von Stahl reduzieren zu können:

- Mit der Beschichtung von Stahlblechen durch Zink oder andere passivierende Elemente wird die Korrosionsneigung der Stähle verringert und damit deren Produktlebenszykluszeit verlängert.
- Mit der Möglichkeit der gezielten Entstehung von Hartphasenbeschichtungen und definierten Wärmebehandlungen werden der Abrieb in der Phase der Produktnutzung verringert und die Produktlebenszykluszeit verlängert.
- Durch das erneute Auftragen abgenutzter Beschichtungen können die Produktlebenszyklen durch Reparaturen zusätzlich extrem verlängert und damit der Ressourcenverbrauch entsprechend verringert werden, ohne dass darunter die Funktionalität des Produktes leidet.
- Durch gezieltes Legieren werden leichtere Stähle mit bessern mechanischen Eigenschaften hergestellt, die damit einen geringeren Ressourceneinsatz in den erzeugten Produkten, oft auch mit einem zusätzlich geringeren Energieverbrauch in der Phase der Nutzung (ultraleichte Stahlkarosserien im Automobil), möglich machen.

Für die Zukunft ist es von daher von aller größter Relevanz, dass Forschung und das Entwickeln von Projekten unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit technologieoffen sind und dass Langlebigkeit und Reparierbarkeit nicht auf Kosten von Innovationen und neuen verbesserten Produkten gefördert werden.

Naturwissenschaftliche und technische Fakten zum Recycling

Aufgrund längerer Produktlebenszyklen werden Produkte zukünftig vermutlich deutlich später, aber sie werden dennoch das Ende des Lebens in ihrem Produktlebenszyklus, nämlich den Zustand „End of life“ (EoL) erreichen. Dann müssen sie recycelt werden, damit sie mit möglichst großen Anteilen in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden können. Bei metallhaltigen Produkten geht das aber nur mit Unternehmen der, Stahl-, Metall- und Gießereindustrie [3,16], die unter diesem Aspekt schon heute eine hervorgehobene Position haben, da in diesen Industrien zum Teil sehr weit geschlossene Rohstoffkreisläufe existieren, die nahezu unendlich oft durchlaufen werden können. Wobei aber auch hier zu berücksichtigen ist, dass es Materialverluste über Schlacken und Filterstäube (**Bild 4**) gibt, die zwar in der Relation zur Gesamtmasse gering, aber dennoch existieren und zu erwähnen sind, so dass es zu 100% geschlossene Rohstoffkreisläufe nie geben kann, auch wenn Teile der Gesellschaft es glauben, sich wünschen und fordern.



Bild 6: Anlage zur Entölung von Spänen der RHM Handelsgesellschaft mbH [20]

Im Folgenden soll beispielhaft ein Materialkreislauf wie in Bild 4 dargestellt, am Beispiel des Produktlebenszyklus eines Schnellarbeitsstahls betrachtet werden, der für Zerspanungswerkzeuge eingesetzt wird und über eine hohe Warmfestigkeit, eine gute Zähigkeit und einen hohen Verschleißwiderstand verfügt. In solchen Stählen sind teurere Legierungselemente in etwa in der folgenden Größenordnung enthalten: 6,5 % Wolfram, 5 % Cobalt, 5 % Molybdän, 4 % Chrom und 2 % Vanadium. Diese Legierungselemente machen im Wesentlichen den Wert des Stahls aus. Im Laufe des Produktlebenszyklus durchläuft ein solcher Stahl, die in Bild 4 dargestellten Lebenszyklusstufen, in denen Materialverluste auftreten, die bei der Entwicklung einer Circular Economy möglichst verringert werden sollten.

- Die Metallproduktion beginnt im Stahlwerk, wo Stähle dieser Art in Elektrolichtbögenöfen „grün“ erschmolzen werden. Zu diesem Zweck wird überwiegend eisenhaltiger und möglichst legierter Schrott oft neben primär erzeugten Legierungselementen erzeugt. Der Begriff „Recycled Content“ bezeichnet den prozentualen Anteil, mit dem Schrott für die Produktion des neuen Schnellarbeitsstahls eingesetzt wird. Ein Teil der teuren Legierungselemente geht im Verlauf des Schmelzprozesses in die Schlacke, wobei die Metalle dann zum Teil in oxidierter Form vorliegen und damit für die Weiterverarbeitung des Stahls zu diesem Zeitpunkt verloren sind. Kleinere Mengen werden als Verluste über die abgesaugten Ofenabgase in den Filteranlagen gesammelt.
- In der Fertigung werden aus den Stahlrohblöcken dann die Produkte hergestellt, wobei danach die Bearbeitungsrückstände in Form von Spänen und Schlämmen in der Regel mit Kühlschmierstoffen und Bearbeitungsölen in einer Größenordnung von 10-20 % Gewichtsanteilen belastet sind, aber dennoch die teureren Legierungselemente enthalten. Einem direkten Wiedereinsatz dieser Bearbeitungsrückstände ste-

hen die Gehalte an Öl und Kühlschmierstoffen entgegen, die sich auf den Partikeln befinden. Bei einem direkten Wiedereinsatz ist damit zu rechnen, dass durch das anhaftende Öl eine Aufkohlung des Stahls erfolgt. Somit sind vorgeschaltete Prozessstufen zu entwickeln und sinnvoll, in denen das anhaftende Öl oder der Kühlschmierstoff entfernt werden.

- In der Phase der Nutzung treten dann z.B. Materialverluste durch Abrieb und Korrosion auf, die nicht wiedergewonnen werden können.
- Erreicht das Produkt sein Lebensende, enthält es in der Regel noch die teuren Legierungselemente und hier beschreibt dann die End-of-Life Recycling Rate (EoL-Rate) zu welchem Prozentsatz dieser Stahl wieder in den Wertstoffkreislauf zurückkommt. Wird angenommen, dass das Produkt aus Stahl wieder direkt in einen Elektrolichtbogenofen zur Erzeugung von Schnellarbeitsstahl gegeben wird, dann wäre die EoL-Recycling Rate 100%. Geht das Stück Stahl im Gemisch mit anderen Schrottstücken in ein konventionelles Stahlwerk, wo normaler Stahl hergestellt wird, dann wird zwar das wirtschaftlich nicht so interessante Eisen zurückgewonnen, aber die teuren Legierungselemente gehen durch die nun dissipative Verteilung verloren und ihre EoL-Recycling Rate ist nahezu 0%. Zudem sind bei der konventionellen Stahlproduktion die teuren Legierungselemente in der Regel unerwünscht, da mit ihnen bei diesen Stählen negative Werkstoffeigenschaften verbunden sind.

Wird gesellschaftlich über Recycling diskutiert, ist oft festzustellen, dass der Glaube vorherrscht, in einer Circular Economy durch das Recycling Rohstoffe in zu 100 % geschlossenen Kreisläufen nutzen zu können, wenn die Prozesse nur entsprechend perfekt und optimal auslegt werden. Diese Forderung, die in einem ersten Ansatz logisch erscheint, trifft hier aber auf eine naturwissenschaftliche und technische Barriere, die

Entropie! So liegen z.B. die teuren Legierungselemente in der Schlacke und den Filterstäuben aus dem Elektrolichtbogenofen in geringen einstelligen Prozentgehalten < 4 %, oft < 2 % [17,18], d.h. in einer sehr extremen dissipativen Verteilung vor, in der letztendlich die Entropie entscheidet, ob ein Recycling dieser Elemente aus den Schlacken wirtschaftlich Sinn macht oder nicht.

Wieso die Entropie nicht selten ein extremes Hindernis für ein effektives Recycling ist, lässt sich vielleicht gut nachvollziehbar mit Hilfe des **Bildes 5** erklären. Hier sind zehn Euro in Form eines Geldscheines und in Form von zehn einzelnen Münzen zu sehen und die Frage ist, was ist jetzt der Unterschied?

Wird mit den zehn Münzen bezahlt, muss mehr Arbeit aufgewandt werden! Verständlicherweise stößt diese Feststellung jetzt auf Unverständnis, da die zusätzliche Arbeit bei dieser vorliegenden Art der Verteilung so gering ist, dass sie überhaupt keine Rolle spielt. Werden die zehn Münzen jetzt gedanklich mit aller Kraft aus dem Fenster geworfen, dann sind sie immer noch auf dem Werksgelände des Stahlwerks vorhanden, aber in einer dissipativen Verteilung, d.h. die Entropie, die ein Maß für die Unordnung ist, hat dadurch extrem zugenommen, so dass nicht der Versuch unternommen werden würde, die Münzen wieder aufzusammeln, da der Arbeitsaufwand viel zu groß wäre. In der dissipativen Verteilung verlieren die Münzen ihren Wert, obwohl sie immer noch vorhanden sind. Unter solchen Bedingungen ist dann sehr oft ein wirtschaftliches Recycling nicht mehr möglich, technisch wahrscheinlich ja, aber eben mit einem viel höheren Arbeits- und Energieaufwand, der dann die ganze Sache unwirtschaftlich machen würde.

In gleicher Weise haben die in der Schlacke dissipativ verteilten teuren Legierungselemente ihren Wert verloren, wenn es nicht durch metallurgische Maßnahmen gelingt sie wieder in einer gewissen Art und Weise aufzukonzentrieren. Der Versuch diese Elemente aus diesen dissipativen Verteilung wieder so zurückzugewinnen, dass sie wieder als reine Metalle dargestellt werden können, wird aufgrund der Entropie nie wirtschaftlich sein können. In einem innovativen vom BMBF geförderten Forschungsprojekt [17, 18] wurde ein Recyclingprozess für diese Elemente entwickelt, der darauf basiert, die Metalle aus ihren dissipativen Verteilungen nicht als Sekundärrohstoffe in hochreiner Form zu gewinnen, sondern als Legierungsbriketts, die im eigenen Betrieb oder ähnlich strukturierten Betrieben direkt wieder in Prozessen eingesetzt werden können, aus denen sie ursprünglich mit diesen Elementkombinationen stammten. Zu diesem Zweck wurden die Schlacken gemahlen, anschließend magnetisch getrennt und dann mit 20% Kohlenstoff zu selbstreduzierenden Briketts gepresst, die dann wieder in dem Elektrolichtbogenofen chargiert worden sind. Auf diese Weise konnten ca. 73 % des Wolframs, 47 % des Vanadiums und 48 % des Chroms, die in den hergestellten Briketts enthalten waren, zurückgewonnen werden.

Im Vergleich zu den Schlacken und Filterstäuben ist die Entropie in den Bearbeitungsspäne und Schlämmen deutlich geringer, da deren chemische Zusammensetzungen der des Schellarbeitsstahls entsprechen. Bei diesem Prozess stören nur die Anhaftungen der Bearbeitungsöle und der

Kühlschmierstoffe. In einem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt [19, 20] wurde ein Verfahren entwickelt wie die Öl- und Kühlschmierstoffe von den Spänen durch einen Waschprozess (**Bild 6**) entfernt werden können, so dass die Späne in einer hohen Reinheit wieder in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden können. Auf der Basis dieser Ergebnisse wird von der Rohstoffhandelsgesellschaft mbH eine industrielle Anlage zur Entölung von 3.000-5.000 t Spänen/a in Herne betrieben.

Wird im Vergleich zu den Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus Schlacken, in denen die werthaltigen Stoffe in einer extrem dissipativen Verteilung vorliegen und dabei die Entropie das größte Hindernis für einen wirtschaftlichen Verwertungsprozess darstellt, spielt bei dem konventionellen Recycling von kompakten Schrottstücken oder Paketen die Entropie keine Rolle, da hier Eisen zurückgewonnen werden soll, dass die Hauptkomponente im Schrott ist. Wie bereits oben erwähnt spielt beim Wiedereinsatz von Altschrott die Tatsache eine sehr wesentliche Rolle, dass die chemische Zusammensetzung der Begleitelemente sehr oft nicht gut genug bekannt ist, so dass durch Begleitelemente unter Umständen Problem bei der Stahlherstellung hervorgerufen werden können. Hier werden zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die zum Teil schon begonnen wurden, zum Ziel haben, dass der Schrott im Verlauf der Aufbereitung noch besser klassiert und in seiner chemischen Zusammensetzung beschrieben werden kann.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Strategie der Bundesregierung zur nachhaltigen Entwicklung wird unter anderem darauf hingewiesen, dass ein verantwortungsvoller Verbrauch von Rohstoffen und entsprechend verantwortungsvolle sowie nachhaltige Produktionsmodelle entwickelt werden müssen, die es ermöglichen die natürlichen Ressourcen heute und für die Zukunft zu schützen. In diesem Zusammenhang wird es als unerlässlich bezeichnet Produkte zu designen, die langlebig sind, die so ressourceneffizient wie möglich produziert werden und darüber hinaus auch repariert und dann in einem größtmöglichen Ausmaß nach ihrem Gebrauch wieder recycelt werden können. Mit der Circular Economy soll ein globales Wirtschaftswachstum und damit ein zunehmender Wohlstand mit einer so weit wie möglichen Entkopplung von weiter steigenden Rohstoffverbräuchen erreicht werden.

Wie hier gezeigt, ist all das mit Stahl, dem vom Mengenaufkommen her wichtigsten metallischen Werkstoff möglich und damit ist Stahl definitiv ein Zukunftswerkstoff. Deshalb werden Eisen und Stahl in einer global zu entwickelnden Circular Economy auch eine zentrale Rolle spielen. Eine Entmaterialisierung des Wirtschaftswachstums hat es in den letzten Jahrzehnten durchaus schon temporär im Bereich der globalen Stahlherstellung gegeben, wird es in der Zukunft wieder geben und wird sich mit einer eigenen modernen Stahlindustrie noch sehr viel weiter entwickeln lassen. Denn je nach Art der Stahlherstellung und der Qualität des hergestellten Stahls ist es heute schon möglich, Stähle, insbesondere in Elektrolichtbogenöfen, zu einem hohen Anteil in sehr weitgehend geschlossenen Kreisläufen zu produzieren, was noch verbessert werden kann.

Die Herstellung von Eisen und Stahl ist naturgemäß mit einem hohen Energieaufwand verbunden, da existierende chemische Bindungskräfte bei Temperaturen deutlich > 1.000°C überwunden werden müssen, um das Eisen aus den Erzen gewinnen oder in Form von Schrott wieder aufschmelzen zu können. Somit gibt es hier einen Zielkonflikt um den auch nicht, im Hinblick auf eine positive wirtschaftliche Entwicklung für die zukünftigen Generationen herumgeredet werden darf. Bei allen Möglichkeiten zu Verlängerung von Produktlebenszykluszeiten in einer zu entwickelnden Circular Economy, müssen am Ende die End-of-Life Produkte doch recycelt werden und dazu ist Energie notwendig, so dass auch bei einer „grünen“ Stahlherstellung wettbewerbsfähige Strom- und Gaspreise mit einer entsprechend sicheren Verfügbarkeit für den Industriestandort Deutschland zukünftig von existentieller Bedeutung sind.

Literatur

- [1] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/die-deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-318846>
- [2] https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
- [3] Deike, R.: Bedeutung der Gießerei-Industrie in einer Circular Economy, GIESSEREI 107, Nr.1, S.26-31, 2020, <https://doi.org/10.17185/duublico/71307>
- [4] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/367/doku-mente/bvt-merkblatt_eisen-_und_stahl-erzeugung_endfassung.pdf
- [5] Elsabagh, S.: Analyse und Optimierung der Schaumslaggenfahrweise eines Gleichstrom-Elektrolichtbogenofens mittels Machine Learning Verfahren, Dissertation, RWT Aachen, 21.07.2022
- [6] Deike, R.: Befinden sich die Rohstoffmärkte in einem erneuten Wandel?, Chemie-Ingenieur Technik 92, Nr.4, S.331-340, 2020, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.201900136>
- [7] Deike, R.: Die Bedeutung der Metalle in einer Circular Economy, Gießerei Rundschau 69, Nr.4, S.6-11, 2022
- [8] Taube, M.: Duisburger Arbeitspapiere Ostasienwissenschaften Nr.51, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2003
- [9] Frankfurter Allgemeine Zeitung: Die goldenen Zeiten sind vorbei, S.3, 17.06.2022
- [10] <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>
- [11] <https://www.eurofer.eu/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2022/>
- [12] World Steel Recycling in Figures 2008 – 2012, <https://www.bir.org/>
- [13] Deike, R.; Winstermann, P.: The special importance of metals in an circular economy, 62nd IFC Portoroz 2022, 15.09.2022, <https://www.uni-due.de/mus/>
- [14] Kerkhoff, H.J.; Dahlmann, P.: Beitrag der Stahlindustrie zur Nachhaltigkeit, Ressourcen- und Energieeffizienz, www.stahl-online.de
- [15] Lemken, T.; Liedtke, C.; Bienge, K.; Salzer, C.: Stahl – ein Werkstoff mit Innovationspotenzial, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal, 2008, <https://epub.wupperinst.org>
- [16] Deike, R.: Die Bedeutung energieintensiver metallurgischer Betriebe: Unter dem Aspekt des Recyclings von Eisen, Stahl und NE-Metallen. GIESSEREI 104, Nr.6, S.64-73, 2017, <https://doi.org/10.17185/duublico/74510>
- [17] Deike, R.; Rabelo de Lima, A.R.; Ebert, D. et al.: Verbundvorhaben: DIBRAS - direkter Einsatz von selbstreduzierenden Briketts in den Aggregaten der Stahl- und Gießereiindustrie zur Verbesserung der Ressourcenbilanz, Abschlussbericht, Förderkennzeichen BMBF 033R167A-E, Universität Duisburg-Essen, 2020, DOI: <https://doi.org/10.2314/KXP:1786487497>
- [18] Santa Rosa Coradini, D.; Rabelo de Lima, A.R.; Deike, R.; Bridi Telles, V.; de Oliveira, J.R.: Comparative study of Cr, V and W recovery from a self-reduction briquette and a steel-briquette, Journal of Materials Research and Technology, Nr. 9, p. 7508-17517, 2020
- [19] Biedermann, H.; Reschke, C.; Schubert, D. et al.: Kontinuierliche Öl und Metallrückgewinnungs-Prozessanlage für Schlämme und Späne (KOMPASS), Abschlussbericht, Förderkennzeichen BMBF 033R159A-B + D-E, RHM Rohstoffhandels-gesellschaft mbh, Mülheim an der Ruhr, 2019, DOI: <https://doi.org/10.2314/KXP:1789741440>
- [20] Pähler, N.; Biedermann, H.; Meynerts, U. et al.: Rückführung kostbarer Wertstoffe durch Entölen von Spänen, 42 GIESSEREI 108, Nr. 4, S. 42-45, 2021

Autor

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike

Universität Duisburg-Essen
Institut für Metallurgie und Umformtechnik
Lehrstuhl für
Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung
0203 379-3455
ruediger.deike@uni-due.de



Möchten Sie mit uns werben?

Einfach QR-Code scannen!

