

Funktionelles und nicht-funktionelles Recycling am Beispiel Edelstahl

Barbara K. Reck

1.	Einleitung.....	309
1.1.	Recyclingindikatoren – Definitionen und Ergebnisse	310
1.2.	Funktionelles und nicht-funktionelles Recycling.....	312
2.	Edelstahl und sein Lebenskreislauf.....	313
3.	Edelstahlrecycling	316
4.	Literaturverzeichnis	318

In einer nachhaltigen Materialwirtschaft spielt Recycling eine zentrale Rolle. Dieser Artikel fasst die wichtigsten Recyclingindikatoren zusammen und diskutiert funktionelles und nicht-funktionelles Recycling am Beispiel von Edelstahl. Für beide Recyclingszenarien werden Beispiele für verschiedene Edelstahlsorten und verschiedene Legierungselemente genannt und es werden die die Recyclingeffizienz beeinflussenden Rahmenbedingungen erläutert.

1. Einleitung

Konzepte wie Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz beruhen auf der Wiederverwendung von Produkten und dem Recycling von Materialien. Das Besondere an Metallen ist, dass sie ohne Qualitätsunterschiede sowohl aus primären als auch aus sekundären Rohstoffen gewonnen werden können. Dabei ist die Metallherstellung aus sekundären Quellen mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden als die Primärproduktion, da vor allem der Energiebedarf oft deutlich geringer ausfällt [3, 12, 20].

Es gibt jedoch eine Reihe von Gründen, die das Recycling in der Praxis erschweren. Hierzu gehören nicht optimierte Logistiksysteme beim Sammeln und Sortieren, noch unausgereifte Recyclingtechnologien im Falle vieler Spezialmetalle, thermodynamische Limitierungen im Recyclingprozess sowie mit dem Produktdesign zusammenhängende Einschränkungen. Diese Faktoren sind ausführlich in [22] beschrieben. Eine detaillierte Analyse der technologischen Faktoren bietet zudem der UNEP-Bericht von Reuter et al. [27].

1.1. Recyclingindikatoren – Definitionen und Ergebnisse

Um zu verstehen, wie effizient Metalle recycelt werden, sind Recyclingindikatoren hilfreich. Dies war in der Vergangenheit schwierig, da das Berechnen der gängigen Recyclingindikatoren nicht klar definiert war. Indikatoren wie Recyclingeffizienz und Recyclinggehalt wurden je nach Metall oder durchführender Organisation unterschiedlich gehandhabt, was teilweise zu Verzerrungen bei der Interpretation der Ergebnisse führte.

Eine Initiative des UNEP Resource Panels [28] änderte dies indem Spezialisten aus Industrie und Wissenschaft zusammengebracht wurden, um a) Recyclingindikatoren von Metallen eindeutig zu definieren und b) diese, basierend auf dem derzeitigen Wissensstand, für die sechzig Metalle des Periodensystems zu quantifizieren. Die Ergebnisse dieser Initiative wurden 2011 veröffentlicht [7, 26].

Das in Bild 1 dargestellte Flussbild eines Metalllebenskreislaufs erlaubt die eindeutige Identifizierung der zu messenden Flüsse und ist die Basis für die nachfolgenden Definitionen. Der Lebenskreislauf eines Metalls kann grob in die Prozesse Produktion, Halbzeug- und Endproduktfertigung (fabrication & manufacturing), Nutzungsphase (use) und Abfallwirtschaft (waste management & recycling) unterteilt werden. Verluste in den verschiedenen Lebensphasen sind als das System verlassende Flüsse dargestellt (z.B. Waschverluste (tailings), Schlacken (slag), Deponie). Die verschiedenen Prozesse sind durch den Schrottmittel miteinander verknüpft, der Inputs aus der Fertigung (Neuschrott) und Abfallwirtschaft (Altschrott) erhält, die dann in der Produktion und Fertigung verwendet werden.

Die bekanntesten Indikatoren sind:

End-of-Life-Recycling-Rate $EOL-RR = g/d$

Recycled Content $RC = (j+m)/(a+j+m)$.

Weitere Indikatoren sind:

Nicht-funktionelle EOL-RR $=f/d$,

Old Scrap Collection Rate $CR = e/d$,

Recycling Process Efficiency Rate $=g/e$

Old Scrap Ratio $OSR = g/(g+h)$.

Das Ergebnis der UNEP-Studie zeichnet ein ernüchterndes Bild. Während Eisen, Kupfer oder Aluminium End-of-Life-Recyclingraten von zum Teil weit über fünfzig Prozent aufweisen, werden viele der oft nur in geringen Konzentrationen verwendeten Spezialmetalle am Ende ihres Lebenszyklus gar nicht recycelt. Nur achtzehn Metalle weisen eine EOL-RR von über fünfzig Prozent auf, während 34 eine EOL-RR von kleiner als einem Prozent haben (Bild 2). Die letztere Gruppe umfasst viele Spezialmetalle, die oft nur in geringen Konzentrationen verwendet werden, beispielsweise als Legierungselement in Stählen oder Spezialanwendungen in Elektronikprodukten. Spezialmetalle weisen oft nicht die nötigen Mindestkonzentrationen in den Altprodukten auf,

die den mit funktionellem Recycling verbundenen Prozess- und Energieaufwand rechtfertigen würden. Je nach ihren thermodynamischen Eigenschaften bleiben sie entweder in der Metallphase ihrer Legierungselemente enthalten oder werden über die Schlacke oder Abluft als Verlust abgeschieden [17].

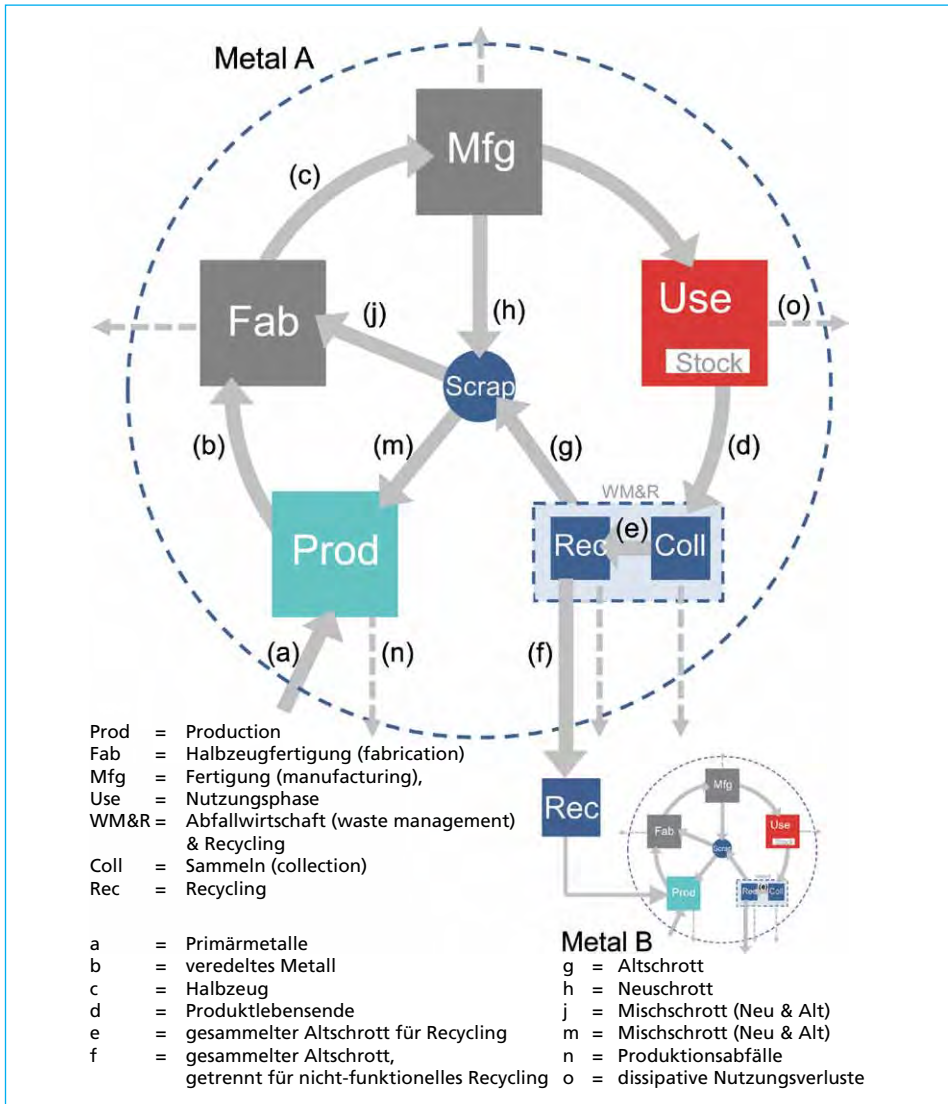


Bild 1: Vereinfachter Lebenskreislauf eines Metalls und die mit dem Recycling von Produktionsabfällen und Altprodukten verbundenen Flüsse; Verluste in allen Lebensstadien sind durch gestrichelte Flüsse angezeigt.

Kreisförmige Darstellung nach Reck 2008: Reck, B. K.; Müller, D. B.; Rostkowski, K.; Graedel, T. E.: Anthropogenic nickel cycle: Insights into use, trade, and recycling. At: Environmental Science & Technology 42(9), 2008, pp. 3.394-3.400

basierend auf: UNEP. Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to UNEP’s International Resource Panel. Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J. P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.: UNEP DTIE, Sustainable Consumption and Production Branch, Paris, 2011

I	II	Hauptgruppen										III	IV	V	VI	VII	VIII	
1 H																		2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg	Nebengruppen										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
		III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a			I a	II a							
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh												
* Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
** Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

< 1 %
 1 bis 10 %
 > 10 bis 25 %
 > 25 bis 50 %
 > 50 %

Bild 2: Das Periodensystem der Elemente mit den End-of-Life-Recyclingraten (EOL-RR) für sechzig Metalle, angezeigt in fünf Wertebereichen; für nicht markierte Elemente standen entweder keine Daten zur Verfügung oder die Elemente wurden nicht in der Studie untersucht

basierend auf: UNEP. Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to UNEP’s International Resource Panel. Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J. P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.: UNEP DTIE, Sustainable Consumption and Production Branch, Paris, 2011

1.2. Funktionelles und nicht-funktionelles Recycling

Die das funktionelle Recycling beschreibende EOL-RR ist in Hinblick auf Ressourceneffizienz der wichtigste Recyclingindikator, da er bestimmt, ob der Lebenskreislauf eines Metalls geschlossen ist oder nicht. Er beschreibt die Effizienz, mit der Altprodukte wiederverwendet werden, und dabei die Verwendung des Sekundärmetalls direkt den Bedarf an Primärmetallen verringert. Im Gegensatz hierzu steht das nicht-funktionelle Recycling (gelegentlich auch *downcycling* genannt), welches beschreibt, wie viel Metall getrennt gesammelt wird, dann jedoch als Verunreinigung (tramp element) in anderen Metallströmen weiterverwertet wird (z.B. als Folge unzureichender Sortierung).

Um die Rolle des nicht-funktionellen Recyclings besser einordnen zu können, sind zwei Aspekte genauer zu betrachten. Zum einen wird beim nicht-funktionellen Recycling das Altmetall im anthropogenen Materialkreislauf weitergenutzt und das Deponieren von Metallschrott mit den damit verbundenen potentiellen Umweltauswirkungen vermieden (letzteres wird jedoch auch in einer gut kontrollierten Deponie erreicht).

Andererseits wird im nicht-funktionellen Recycling die spezifische Funktion des Metalls nicht benötigt (z.B. Kupfer oder Nickel in Stahl) und das wiederverwertete Metall ersetzt damit nicht Metalle aus der Primärproduktion. Die positiven Umweltauswirkungen des Recyclings (z.B. Energieeinsparung) werden somit nicht genutzt. Hinzu kommt die Tatsache, dass ein Element, das als Verunreinigung in einer Legierung enthalten ist, als zukünftige Ressource praktisch verloren ist (z.B. der Stahlträger einer Brücke, der mit Nickel verunreinigt ist, wird nie so recycelt werden, dass das enthaltene Nickel wieder benötigt wird und damit Nickel aus der Primärproduktion ersetzt). Aus ressourcenpolitischen Gesichtspunkten interessant ist, dass im Gegensatz hierzu deponiertes Altmetall die Chance hat, durch Deponierückbau wiedergewonnen zu werden [13, 14], was besonders für die in Elektronik enthaltenen Spezialmetalle von Bedeutung sein kann.

Diese ressourcenpolitischen Betrachtungen spielen in der andauernden Diskussion um die Kritikalität von Metallen eine wichtige Rolle [5, 19]. Wie Bild 2 zeigt, zeigen viele der gängigen Legierungselemente von Stahl eine geringe EOL-RR, was oft durch den hohen Anteil an nicht-funktionellem Recycling erklärt werden kann (Vanadium hat zum Beispiel eine EOL-RR von kleiner als einem Prozent). Nicht-funktionelles Recycling spielt auch eine wichtige Rolle innerhalb der verschiedenen Legierungsfamilien. Eine japanische Studie demonstriert die Qualitätsverluste, die Kupfer durch Recycling in Kupferlegierungen und Stahl erfahren kann [2]. Die hohen Qualitätsansprüche beim Recycling von Aluminium und die hohe Rate von Aluminium-downcycling in der Form von Aluminium-Gusserzeugnissen (castings) ist ebenfalls ausführlich belegt [6, 16, 18].

Die vorliegende Studie untersucht, unter welchen Umständen die in Edelstahl enthaltenen Legierungselemente funktionell oder nicht-funktionell recycelt werden. Während Eisen praktisch immer funktionell recycelt wird, hängt die Entscheidung für Nickel oder Molybdän oft von der Edelstahlsorte und der Art des Endproduktes ab. Hier gibt es große regionale Unterschiede, die Auswirkungen auf die heutige und zukünftige Recyclingeffizienz und das damit verbundene Schrottaufkommen haben.

2. Edelstahl und sein Lebenskreislauf

Edelstahl umfasst eine Gruppe von Eisenlegierungen, die mindestens 10,5 Prozent Chrom und maximal 1,2 Prozent Kohlenstoff enthalten [9, 15]. Es gibt eine Vielzahl von Edelstahlsorten, die durch genau definierte Legierungszusammensetzungen gekennzeichnet sind, wobei die wichtigsten Untergruppen austenitische, ferritische und martensitische Sorten sowie Duplex-Stähle sind. Edelstähle zeichnen sich durch ihre besondere Korrosionsbeständigkeit aus (daher auch die Bezeichnung rostfreie Stähle) sowie durch ihre Hitzebeständigkeit, hohe Festigkeit und gute Verarbeitbarkeit. Maßgeschneiderte Eigenschaften werden durch das Zulegieren anderer Elemente erreicht, um beispielsweise die Korrosionsbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit, Schweißlegierungs- und mechanischen Eigenschaften zu optimieren. Das wichtigste Legierungselement ist Nickel, welches dem Edelstahl seine austenitische Struktur gibt, mit mehr als sechzig Prozent Marktanteil die wichtigste Edelstahlsorte. Andere wichtige Legierungselemente sind Molybdän, Niobium und Titan.

Der Lebenskreislauf von Edelstahl wurde in einer früheren Veröffentlichung beschrieben [24] und ist in vereinfachter Form in Bild 3 dargestellt. Die Edelstahlproduktion ist in die Prozesse Schmelzen (Produktion) und Warm- und Kaltwalzen unterteilt, weitere Prozesse sind Fertigung, Nutzungsphase und Abfallwirtschaft. Die Prozesse sind durch Märkte verbunden, die den Handel der jeweiligen Zwischenprodukte mit anderen Regionen ermöglichen. Beim Schmelzen (meist in einem Elektrobogenofen) wird Sekundärmaterial in der Form von Edelstahlschrott und Stahlschrott zugeführt. In der Abfallwirtschaft wird das aus der Nutzungsphase kommende Altmaterial (Produktlebensende, End-of-Life) entweder wieder dem Edelstahlrecycling zugefügt (in den zentralen Schrottmarkt fließend) oder mit regulärem Stahlschrott weiterverarbeitet oder deponiert.

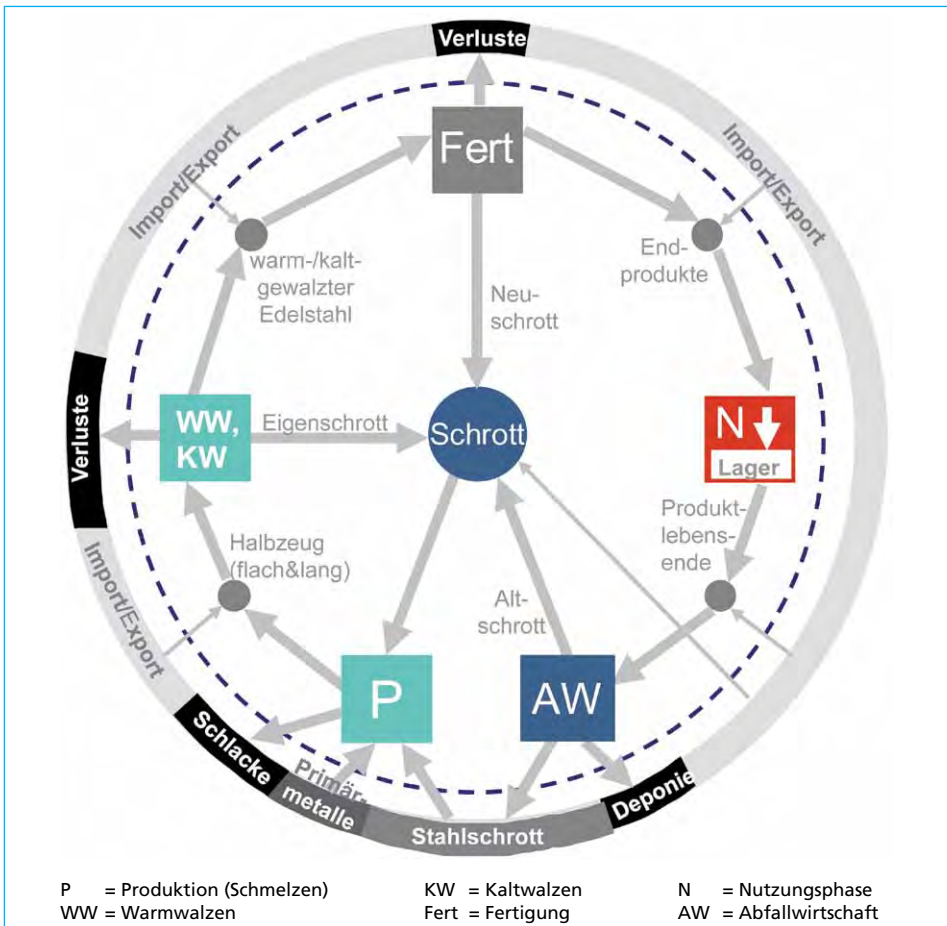


Bild 3: Der Lebenskreislauf von Edelstahl mit den wesentlichen Prozessen; der Fluss von der Abfallwirtschaft zu Stahlschrott stellt das nicht-funktionelle Recycling von Edelstahl dar (entspricht Fluss f in Bild 1)

basierend auf: Reck, B. K.; Chambon, M.; Hashimoto, S.; Graedel, T. E.: Global Stainless Steel Cycle Exemplifies China's Rise to Metal Dominance. At: Environmental Science & Technology 44(10), 2010, pp. 3.940-3.946

Bild 4 zeigt den Edelstahlkreislauf für Deutschland in den Jahren 2000, 2005 und 2010.

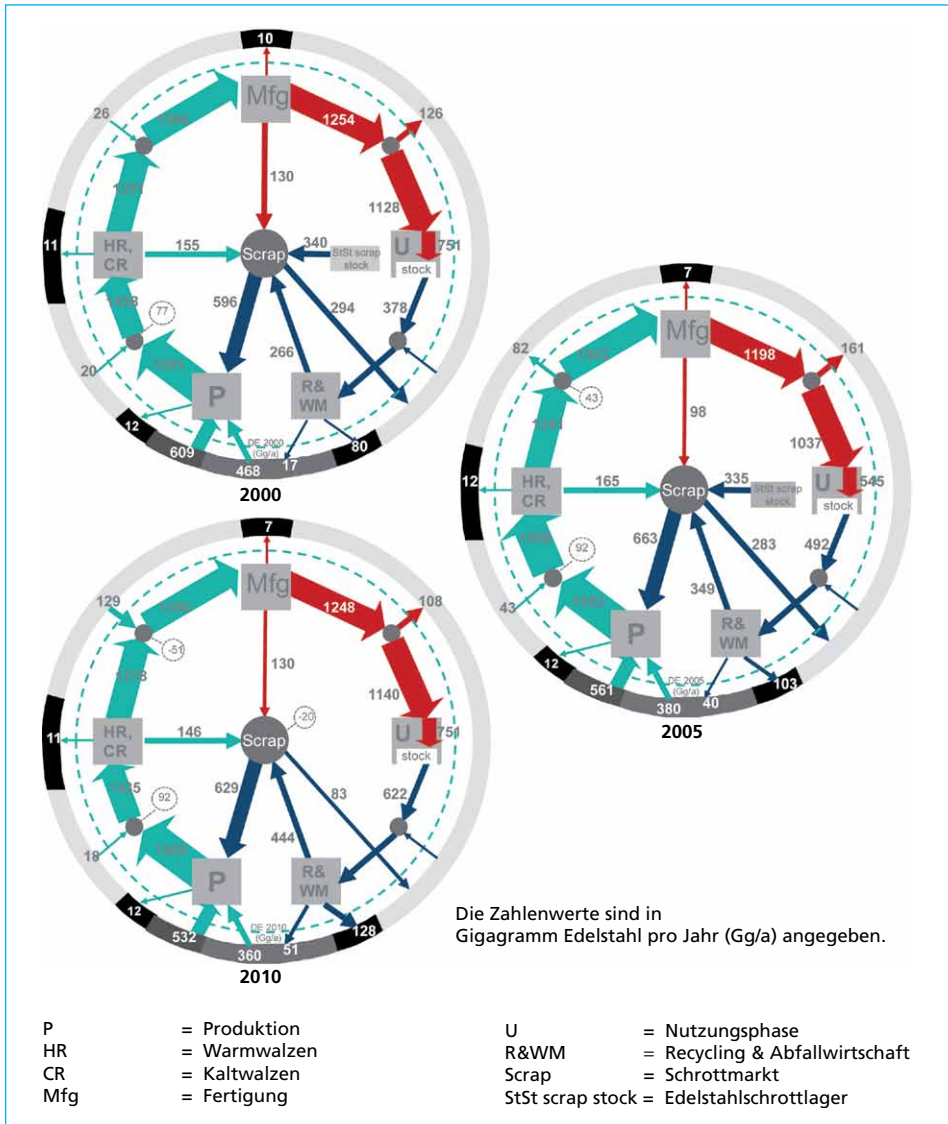


Bild 4: Der Edelstahlkreislauf für Deutschland in den Jahren 2000 (oben), 2005 (rechts) und 2010 (unten)

Quelle: Kreisläufe für 2000 und 2005 aus: Reck, B. K.; Chambon, M.; Hashimoto, S.; Graedel, T. E.: Global Stainless Steel Cycle Exemplifies China's Rise to Metal Dominance. At: Environmental Science & Technology 44(10), 2010, pp. 3.940-3.946

Während sich die Höhe der Stahlproduktion und -fertigung kaum geändert hat, stieg das End-of-Life-Aufkommen von Edelstahl in den zehn Jahren um mehr als sechzig Prozent. Dies kann damit erklärt werden, dass Edelstahl in Deutschland jahrzehntelang stark genutzt wurde und eine durchschnittliche Produktlebenszeit von zwanzig bis

dreißig Jahren besitzt. Berücksichtigt man zudem die durchschnittliche Wachstumsrate der Edelstahlherstellung und -nutzung für die vergangenen sechzig Jahre (fünf bis sechs Prozent) [11] wird deutlich, dass dieser End-of-Life-Fluss in den nächsten Jahren weiter ansteigen wird. Dies erklärt die Bedeutung eines nachhaltigen Edelstahlmanagements, welches das funktionelle Recycling von Edelstahl in den Vordergrund stellt.

3. Edelstahlrecycling

Recycling spielt eine wesentliche Rolle im Edelstahlkreislauf. In 2005 war 58 Prozent des globalen Inputmaterials von Stahlföhen Schrott – eine Kombination von Edelstahl (36 Prozent) und regulärem Stahl (carbon steel, 22 Prozent) [24]. Edelstahlschrott umfasst vor allem austenitische Sorten, mit denen die Hauptlegierungselemente Eisen, Chrom und Nickel zugeführt werden. Weitere sekundäre Eiseneinheiten werden in der Form von Stahl zugefügt.

Die Recyclingeffizienz am Produktlebensende hängt wesentlich vom Produkttyp ab, in der Edelstahl verwendet wurde. Die wesentlichen Produkttypen von Edelstahl sind Maschinenbau (industrial machinery), Transport, Bauwesen und Infrastruktur, Haushaltsgeräte und Elektronik und diverse Metallprodukte (z.B. Schrauben und andere Verbindungselemente, Küchenutensilien, Besteck, medizinische Anwendungen). Einen Überblick über typische Recyclingeffizienzen Anfang der 2000er Jahre gibt Tabelle 1. Sie zeigt Verluste zu Deponien und unterscheidet bei der für die Wiederverwertung

Tabelle 1: Notwendige Annahmen zur Berechnung von End-of-Life Flüssen und Ergebnisse für die Jahre 2000 und 2005 (weltweiter Durchschnitt); funktionelles Recycling ist als *EOL-RR specific* berichtet, nicht-funktionelles Recycling als *EOL-RR downcycled*

End use Sector	Results		Estimates					
	Flow into Use		average lifetime	coefficient of variation	to landfill	collected for recycling		
	2000	2005				total	as stain-less steel	as carbon steel
	%		years	%		%		
Building & Infrastructure	17	18	50	30	8	92	95	5
Transportation (total)	21	18			13	87	85	15
<i>Transp. (pass. cars)</i>	17	14	14	15				
<i>Transp. (others)</i>	4	4	30	20				
Industrial Machinery	29	26	25	20	8	92	95	5
Household Appliances & Electronics	10	10	15	20	30	70	95	5
Metal Goods	23	27	15	25	40	60	80	20
						EOL Recycling Rate		
						specific		downcycled
Results	2000			22	78	66		12
	2005			21	79	70		9

Quelle: Reck, B. K.; Chambon, M.; Hashimoto, S.; Graedel, T. E.: Global Stainless Steel Cycle Exemplifies China's Rise to Metal Dominance. At: Environmental Science & Technology 44(10), 2010, pp. 3.940-3.946

gesammelten Fraktion zwischen den funktionell *recycling as stainless steel* und nicht-funktionell *recycling as carbon steel* recycelten Anteilen. Die EOL-RR von Edelstahl betrug siebzig Prozent im Jahr 2005 (weltweiter Durchschnitt). Zusätzlich neun Prozent des generierten Altmaterials wurde nicht-funktionell mit Stahl wiederverwertet.

Das funktionelle Recyceln austenitischer Stähle ist deutlich effizienter als das Recyceln ferritischer Sorten [8], wofür vor allem zwei Gründe verantwortlich sind. Zum einen bieten austenitische Sorten durch ihren Nickelgehalt dem Schrotthändler einen finanziellen Anreiz zum Getrenntsammeln. Zum anderen ist die technische Separierung durch Magnetabscheider relativ einfach, da Austenite im Gegensatz zu Ferriten und anderen Stählen nicht magnetisch sind. Die Separierung der magnetischen Ferrite vom ebenfalls magnetischen Stahl ist dagegen schwieriger und findet bisher vor allem durch manuelles Sortieren statt und ist meist auf klar definierte Produktgruppen beschränkt (z.B. Auspuffsysteme, Waschmaschinentrommeln). Es gibt jedoch zunehmend Initiativen, auch technische Separierungsmethoden wie Röntgenfluoreszenz oder moderne Sensortechnologie auf Ferrite anzuwenden, und so das nicht-funktionelle Recyceln von Chrom und Molybdän in Stahl zu minimieren [25].

Einen besonderen Stellenwert beim Edelstahlrecycling nehmen die sogenannten Chrom-Mangan (CrMn)-Edelstähle ein. Hier handelt es sich um austenitische Stähle, in denen Nickel teilweise durch Mangan, Stickstoff und Kupfer ersetzt wird und der Nickelgehalt von den typischen acht bis zehn Prozent (auch Chrom-Nickel-Stahl genannt, CrNi) auf eins bis vier Prozent (CrMn-Stahl) reduziert ist. CrMn-Stähle waren bis Anfang der 2000er Jahre weitgehend auf Indien und definierte Märkte in den USA begrenzt, sind jedoch als Reaktion auf den steigenden Nickelpreis seit 2000 zunehmend in China zu finden [10, 21, 23].

Für die gängigen austenitischen CrNi-Stähle sind Mangan und Kupfer Verunreinigungen, was sich in den Produktspezifikationen widerspiegelt, wo sie nur in geringen Konzentrationen erlaubt sind (etwa < 1 Prozent Mangan und < 0,5 Prozent Kupfer). Für das Recycling bedeutet dies, dass CrMn- und CrNi-Stähle getrennt verarbeitet werden sollten, um die Kontamination des zu produzierenden Edelstahls mit Mangan und Kupfer zu vermeiden. Dies ist jedoch äußerst schwierig, da beide Sorten nicht magnetisch sind und somit auf manuelle Sortierung oder aufwendige Separierungstechnik zurückgegriffen werden muss. Werden die CrMn-Stähle nicht rechtzeitig als solche identifiziert, müssen die Mangan- und Kupferkonzentrationen in der Schmelze durch Zugabe primären Nickels in tolerierbare Bereiche verdünnt werden [1, 10].

Die zunehmende Nutzung von CrMn-Stählen in China hat damit das Potential die zukünftige Edelstahlproduktion in China und anderen Ländern (durch den Import von in China hergestellten Produkten) qualitätsmäßig zu beeinträchtigen. Um dies zu vermeiden, ist es wichtig besonders in China ein getrenntes Recyclingsystem für CrNi- und CrMn-Stähle aufzubauen. Dies ist umso einfacher, je deutlicher die Anwendungsbereiche dieser beiden Edelstahlsorten getrennt und bekannt sind. Ein gutes Beispiel hierfür ist Indien, wo aus CrMn-Stahl hergestellte Produktgruppen (z.B. Geschirr) funktionell recycelt und erneut der CrMn-Produktion zugeführt werden [4].

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt den Team Stainless Mitgliedern International Stainless Steel Forum, Nickel Institute, International Chrome Development Association und International Molybdenum Association für finanzielle Förderung der diesem Artikel zugrundeliegenden Studien.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Charles, J. 2005: The new 200-series: An alternative answer to Ni surcharge? Dream or nightmare? At: Fifth Stainless Steel Science and Market Congress, edited by Odriozola and Paül. Sevilla
- [2] Daigo, I.; Hashimoto, S.; Matsuno, Y.; Adachi, Y.: Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan. At: Resources, Conservation and Recycling 53(4): 2009, pp. 208-217
- [3] Eckelman, M. J.: Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of the global nickel industry. At: Resources Conservation and Recycling 54(4): 2010 pp. 256-266
- [4] Euro Inox: Austenitic chromium-manganese stainless steels – a European approach. At: Euro Inox (The European Stainless Steel Development Association), Brussels, 2010
- [5] European Commission: Critical raw materials for the EU. At: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Brussels, Belgium: DG Enterprise and Industry, 2010
- [6] Gaustad, G.; Olivetti, E.; Kirchain, R.: Design for Recycling. At: Journal of Industrial Ecology 14(2), 2010, pp. 286-308
- [7] Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J. P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.: What Do We Know About Metal Recycling Rates? At: Journal of Industrial Ecology 15(3): 2011, pp. 355-366
- [8] Igarashi, Y.; Daigo, I.; Matsuno, Y.; Adachi, Y.: Dynamic material flow analysis for stainless steels in Japan reductions potential of CO₂ emissions by promoting closed loop recycling of stainless steels. At: Isij International 47(5), 2007, pp. 758-763
- [9] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei. Merkblatt 803: Was ist nichtrostender Stahl? In: Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER), Düsseldorf, 2008
- [10] ISSF: *New 200-series* steels: An opportunity or a threat to the image of stainless steel? At: International Stainless Steel Forum (ISSF), Brussels, 2005
- [11] ISSF: Stainless steel in figures. At: International Stainless Steel Forum, Brussels, 2012
- [12] Johnson, J.; Reck, B. K.; Wang, T.; Graedel, T. E.: The energy benefit of stainless steel recycling. At: Energy Policy 36(1), 2008, pp. 181-192
- [13] Jones, P. T.; Geysen, D.; Tielemans, Y.; Van Passel, S.; Pontikes, Y.; Blanpain, B.; Quaghebeur, M.; Hoekstra, N.: Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. At: Journal of Cleaner Production 55(0), 2013, pp. 45-55
- [14] Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M.: Landfill mining: A critical review of two decades of research. In: Waste Management 32(3), 2012, pp. 513-520
- [15] Lo, K. H.; Shek, C. H.; Lai, J. K. L.: Recent developments in stainless steels. At: Materials Science & Engineering R-Reports 65(4-6): 2009, pp. 39-104
- [16] Modaresi, R.; Müller, D. B.: The Role of Automobiles for the Future of Aluminum Recycling. At: Environmental Science & Technology 46(16), 2012, pp. 8.587-8.594
- [17] Nakajima, K.; Takeda, O.; Miki, T.; Matsubae, K.; Nagasaka, T.: Thermodynamic Analysis for the Controllability of Elements in the Recycling Process of Metals. At: Environmental Science & Technology 45(11), 2011, pp. 4.929-4.936

- [18] Nakajima, K.; Takeda, O.; Miki, T.; Matsubae, K.; Nakamura, S.; Nagasaka, T.: Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling. At: *Environmental Science & Technology* 44(14), 2010, pp. 5.594-5.600
- [19] National Research Council. Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. Washington, D.C.: The National Academies, 2008
- [20] Norgate, T. E.; Jahanshahi, S.; Rankin, W. J.: Assessing the environmental impact of metal production processes. At: *Journal of Cleaner Production* 15(8-9), 2007, pp. 838-848
- [21] Oshima, T.; Habara, Y.; Kuroda, K.: Efforts to save nickel in austenitic stainless steels. At: *Isij International* 47(3), 2007, pp. 359-364
- [22] Reck, B. K.; Graedel, T. E.: Challenges in Metal Recycling. *Science* 337(6095), 2012, pp. 690-695
- [23] Reck, B. K.; Rotter, V. S.: Comparing growth rates of nickel and stainless steel use in the early 2000s. *Journal of Industrial Ecology* 16(4), 2012, pp. 518-528
- [24] Reck, B. K.; Chambon, M.; Hashimoto, S.; Graedel, T. E.: Global Stainless Steel Cycle Exemplifies China's Rise to Metal Dominance. At: *Environmental Science & Technology* 44(10), 2010, pp. 3.940-3.946
- [25] Team Stainless. Recycling ferritic stainless steel. Euro inox, International Molybdenum Association, International Stainless Steel Forum, Nickel Institute, International Chromium Development Association, International Manganese Institute, 2013
- [26] UNEP. Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to UNEP's International Resource Panel. Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J. P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.: UNEP DTIE, Sustainable Consumption and Production Branch, Paris, 2011
- [27] UNEP. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.: UNEP DTIE, Sustainable Consumption and Production Branch, Paris, 2013
- [28] UNEP, 2007: International Resource Panel. <http://www.unep.org/resourcepanel/>. Accessed February 2014
- [29] Reck, B. K.; Müller, D. B.; Rostkowski, K.; Graedel, T. E.: Anthropogenic nickel cycle: Insights into use, trade, and recycling. At: *Environmental Science & Technology* 42(9), 2008, pp. 3.394-3.400



Deutschlands neues
Recyclingportal

Mehr als nur News!

- Marktberichte
- Technikberichte
- Interviews & Reportagen
- Maschinenbörse
- Jobbörse
- Recyclingbörse

... und vieles mehr!

++ Immer online ++ Immer verfügbar ++ Immer aktuell ++



Jetzt zwei Wochen kostenlos testen!

www.320grad.de

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling und Rohstoffe – Band 7

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014

ISBN 978-3-944310-09-1

ISBN 978-3-944310-09-1 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Fabian Thiel, Janin Burbott, Cordula Müller,

Katrin Krüger

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.