

Technisch-wissenschaftliches Organ der Montanuniversität Leoben, der Eisenhütte Österreich und des Bergmännischen Verbandes Österreichs

Herausgeber: Prof. Dr. mont. Heribert Hiebler, Prof. Dr. mont. Peter Paschen und Prof. Dr. mont. Horst Wagner

Schriftleiter: Prof. Dr. mont. Peter Paschen

Mitarbeiter der Schriftleitung: Dipl.-Ing. Christian Reichl, Dipl.-Ing. Horst Lackner, Frauke Paschen und Prof. Dr. mont. Dr. phil. Gerhard Sperl (Montanhistorische Mitteilungen)

Inhaltsverzeichnis 146. Jahrgang (2001)

I. Originalarbeiten

- Aigner, H., siehe Haase, S. 17
- Altena, H., P. Stolař, P. Jurci, F. Klima und J. Pavlu: Der Einfluss von Gas- und Ölabschreckparametern auf das Verzugverhalten von Zahnrädern. 105
- Antrekowitsch, H.: NE-Metall-Recycling in der Kfz-Industrie. 188
- Antrekowitsch, J.: Hydrometallurgische Aufarbeitung von zinkhaltigen Stahlwerksflugstäuben aus dem Konverterbereich. 210
- Auzinger, D., siehe Buchmayr, B. 385
- Barbl, R.: Rekultivierung von Haldenflächen am Beispiel der Halde Leoben-Donawitz der VASD GmbH. 336
- Bauer, J. K.: Aktuelle Rohstoffprojekte in Tirol und praktische Erfahrungen mit dem MinroG durch Wirtschaft und Landesbehörde. 422
- Bernhard, C., siehe Höfer, W. 169
- Bernhard, C., B. G. Thomas, G. Xia und C. Chimani: Simulation of Solidification and Micro-Structure in Continuous Casting of Steel. 376
- Bouwman, J. W., siehe Gräfen, W. 68
- Brandmaier, P., F. Hartlieb und R. Ladinger: Sicherheitstechnische Vorkehrungen im Gasteiner Heilstollen (Stand Frühjahr 2001). 331
- Buchmayr, B., D. Auzinger, A. Samoilov und C. Sommitsch: Mikrostrukturelle Modellierung der Warmumformung. 385
- Caliskanoglu, D., siehe Fisher, K. 86
- Cerjak, H., siehe Kulmburg, A. 96
- Chimani, C., siehe Bernhard, C. 376
- Chlosta, B., siehe Pickert, H. 142
- Consemüller, K., siehe Kincel, G. 265
- Consemüller, K., und B. Hribernik: Die Erweiterung der Produkt- und Servicepalette einer Edelstahlgruppe am Beispiel Böhler-Uddeholm. 445
- Dahmann, D.: Sprengschwaden im untertägigen Bergbau. 44
- Daul, J.: Zur Frage der Anordnungskompetenz der Montanbehörden im Falle einer Bergwerkskatastrophe. 134
- Deutshl, E., siehe Niel, A. 23
- Dietrich, A., siehe Scheele, J. 310
- Ebner, F., siehe Hajizadeh, F. 424
- Eibner, C., siehe Preßlinger, H. 222
- Fisher, K., H. Schweiger, G. Lichtenegger und D. Caliskanoglu: Vergleich der Eigenschaften unterschiedlicher Warmarbeitsstähle im hochvergüteten Zustand – neue Vakuum-umgeschmolzene Produktgüten. 86
- Fladischer, J., siehe Tockner, J. 392
- Friedrich, B., und G. Rombach: Aluminiumrecycling – Anspruch und technische Realisierbarkeit. 177
- Friedrich, B., und J. Hammerschmidt: Elektroschlackeschmelzen von aluminothermisch hergestellten Titan-Aluminium-Legierungen – eine Alternative zum Kroll-Prozess? 203
- Gebeshuber, A., und R. Nöbauer: Kombination von Wärmebehandlungs- und Beschichtungs-Verfahren am Beispiel plasmaunterstützter Prozesse. 101
- Gräf, W.: Von der Naturraumpotenzialkarte zur Rohstoff-sicherungskarte – 25 Jahre planungsrelevante Rohstoffforschung in der Steiermark. 415
- Gräfen, W., und J. W. Bouwman: Anwendungen von thermochemischen Hochtemperaturprozessen in Vakuumanlagen. 68
- Haar, E., und A. F. Oberhofer: Das System Ökologie – Ökonomie. 161
- Haase, S., P. O'Leary und H. Aigner: Schwingungsanalyse zur Überwachung von Walzgerüsten. 17
- Hajizadeh, F., W. Prochaska und F. Ebner: Fluidcharakteristika bei der Dolomitisierung von Wettersteinkalken. 424
- Hammerschmidt, J., siehe Friedrich, B. 203
- Hanmyo, M.: Development and Trends in the Asian Steel Industry. 461
- Harmuth, H., siehe Preßlinger, H. 222
- Harrer, O., siehe Kvačak, T. 281
- Hartlieb, F., siehe Brandmaier, P. 331
- Hatzenbichler, T., G. Pascuttini und W. Schwenzfeier: Forschungsmöglichkeiten und Lehre am Institut für Verformungskunde und Hüttenmaschinen. 271
- Herk, P., und T. Pollak: Beurteilung der Richtigkeit und Präzision eines Verfahrens zur Ermittlung der Korngrößenverteilung unterschiedlicher mineralischer Pulver – Ringversuch Lasergranulometrie. 237
- Hiebler, H., siehe Reiter, G. 91
- Hofenauer, A., siehe Kremer, J. 418
- Höfer, W., H. Preßlinger und C. Bernhard: Verfolgung des Stickstoffgehaltes im LD-Stahlwerk bei der Erzeugung einzelner Stahlsorten. 169
- Holzheim, M., siehe Preuß, A. 471

Exzellente Bildung und Ausbildung der Studierenden unter Einschluss von Sprachen und Kultur, Wecken des Verantwortungsbewusstseins gegenüber den Menschen am Arbeitsplatz und gegenüber der Umwelt, Mut zum Widerspruch in der Öffentlichkeit bei gesellschaftlichen Fehlentwicklungen.

Das Institut für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben wird sich wie schon in der Vergangen-

heit auch in Zukunft allen diesen Herausforderungen stellen.

Kontaktadresse/Informationen:

Institut für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben/Österreich

Telefon +43/38 42/40 23 20

Telefax +43/38 42/40 26 27

E-Mail: nemetall@unileoben.ac.at

Internet: www.unileoben.ac.at

Aluminiumrecycling – Anspruch und technische Realisierbarkeit

B. Friedrich und G. Rombach

Nachhaltige Entwicklung der Metallindustrie – Recycling von Metallen als wichtige Rohstoffquelle – Ökonomische und ökologische Vorteile der Metallerzeugung aus sekundären Rohstoffen – Begrenzung der Verfügbarkeit von Sekundärmaterial durch Zeit- und Qualitätsaspekte – Bewertung der technologischen Entwicklung erst im Gesamtkonzept von Erfassung, Aufbereitung und Schmelzen

Aluminium Recycling – Requirements and Technical Feasibility. Sustainable development of metal production – Recycling of metals as important source of raw material – Economic and ecological advantages of the metal production from secondary raw materials – Limitation of scrap availability by aspects of time and quality – Assessment of technological development only in the total concept of collection, processing and remelting

1. Einleitung

Das Recycling von Metallen ist seit Beginn ihrer Nutzung eine wichtige Rohstoffquelle zur Versorgung der wachsenden Anwendungsbereiche. Dabei hat es der wirtschaftliche Wert metallhaltiger Abfälle aus der Verarbeitung und aus gebrauchten Produkten seit jeher lohnend gemacht, diese im Kreislauf zu führen. Heute stehen neben dem wirtschaftlichen Interesse verstärkt ökologische Aspekte im Vordergrund, nämlich die

- Schonung primärer Rohstoff-Ressourcen
- Verminderung von Emissionen und Abfällen
- Entlastung von Deponien und
- Einsparung an Energie

Zunehmend wird das Recycling auch in die Diskussion um eine Nachhaltige Entwicklung der Metallindustrie einbezogen. Hier ist bei Recyclingaluminium sogar von erneuerbaren Rohstoffen und von einem Generationenvertrag im Hinblick auf die zur Primäraluminiumerzeugung eingesetzte Energie die Rede. Letztlich führt jegliche Nutzung von Produkten zu einer räumlichen und stofflichen Verteilung der genutzten Metalle und sollte als Herausforderung zur Weiterentwicklung der Erfassungs-, Aufbereitungs- und Schmelztechniken angesehen werden.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich, Institutsleiter, und Dr.-Ing. Georg Rombach, wissenschaftlicher Angestellter, IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, Institut und Lehrstuhl der RWTH Aachen, Intzestraße 3, D-52056 Aachen/Deutschland.

Vortrag, gehalten am 25. und 26. Januar 2001 im Rahmen des Institutskolloquiums des Instituts für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben.

Trotz der unbestrittenen ökonomischen und ökologischen Vorteile der Metallerzeugung aus sekundären Rohstoffen gibt es eine Reihe von Faktoren, die Aufwand und Nutzen des Recyclings begrenzen. Dies sind unter anderem Mindestmetallgehalte der sekundären Vorstoffe, die Entstehung von Sekundärabfällen, die Vielzahl der verschiedenen Legierungstypen und Verunreinigungen, eine steigende Anzahl von Verbundwerkstoffen und die Auswirkungen anwendungsspezifischer Werkstoffbehandlungen auf die erreichbare Metallqualität. Allein die unterschiedliche Qualität und Verfügbarkeit der Vorstoffe zur Herstellung der verschiedenen Produktlegierungen zeigt, dass für eine Beurteilung von Recyclingsystemen die technischen Betriebsparameter allein nicht als Kriterium zur Auswahl bestimmter Verfahrensvarianten oder -alternativen ausreichen.

2. Die Verfügbarkeit sekundärer Rohstoffe

Die Versorgung der Metallproduktion mit sekundären Rohstoffen unterliegt vielfältigen Einflüssen. Dies sind insbesondere Zeit- und Qualitätsaspekte, die die Verfügbarkeit von Sekundärmaterial begrenzen. Bei einer genauen Analyse der Metallströme und der eingesetzten Technologien wird deutlich, dass ein weiteres Problem des Recyclings in der Definition von Recyclingquoten und -anteilen und somit in der Beschreibung und Beurteilung von Recyclingaktivitäten liegt.

Die Differenz zwischen der in Deutschland eingesetzten und produzierten Aluminiummenge, wie sie in der Metallstatistik ausgewiesen wird, ist erheblich. Es stellt sich die Frage, wie der hohe Metallbedarf der verarbeitenden Industrie gedeckt wird und welche Rolle dabei das Recycling spielt. Laut Abb. 1 würde der Re-

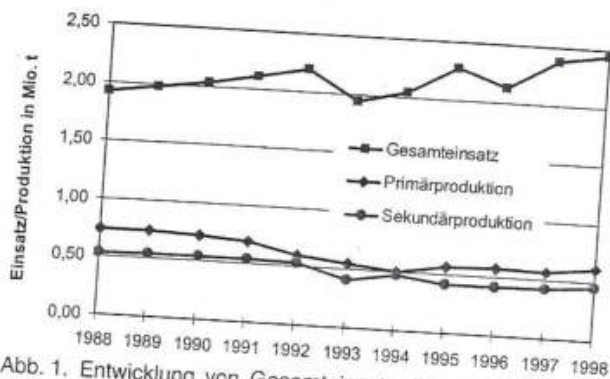


Abb. 1. Entwicklung von Gesamteinsatz, Primär- und Sekundärproduktion von Aluminium in Deutschland¹

cyclinganteil an der Produktion nur 18 % betragen, wobei der gesamten im Halbzeug- und Gussbereich eingesetzten Metallmenge aber nur die Sekundäraluminiumproduktion auf Gusslegierungsbasis gegenübergestellt wird¹. Dies führt unbestritten zu falschen Schlussfolgerungen.

Zur korrekten Definition der Recyclingbegriffe ist zunächst eine qualitative und quantitative Beschreibung der Schrottströme aus den Anwendungsgebieten wichtig sowie deren Verbindung zu bestehenden Recyclingpfaden. Zu beachten ist dabei die Aufteilung der Aluminiumwerkstoffe in zwei Legierungsgruppen. Bei den Gusslegierungen ist der Gehalt an Legierungselementen, vor allem Silizium und Kupfer, hoch, Knetlegierungen sind dagegen niedriger legiert, meist mit Magnesium und Mangan, und sollten deshalb getrennt und möglichst sortenrein in den Recyclingkreislauf gelangen. Abbildung 2 zeigt einige grundsätzliche Unterschiede.

Der stofflichen Trennung sind aber durch Anwendung und Erfassung inkl. Handel Grenzen gesetzt. Abbildung 3 zeigt den deutschen Einsatz von Aluminium unterteilt nach Guss- und Knetlegierungen, der eindeutig vom Verkehrssektor dominiert wird². In jedem dieser Anwendungsbereiche, mit Ausnahme des Verpackungsbereichs, fallen nach der Nutzung Guss- und Knetlegierungen an, die oftmals vermischt sind.

Neben dieser groben Unterteilung in Guss- und Knetlegierungen gibt es eine weitere Einteilung in Legierungsgruppen, die sich aus Art und Menge der hauptsächlich eingesetzten Legierungselemente ergibt. Abbildung 4 zeigt eine in Statistiken gebräuchliche Aufteilung der Aluminiumlegierungen. Diese lassen sich beim Recycling nur in engen Grenzen untereinander mischen und werden deshalb möglichst sortenrein erfasst.

Gusslegierungen:

- relativ hohe Legierungsgehalte (Si, Cu, Mg, Zn)
- AlSi7Mg, AlSi12, AlSi6Cu, AlZn5Mg
- Motorgussteile, Felgen, Türklinken, Pfannen
- nur als Gusslegierung, nicht zu Knetlegierungen rezyklierbar, da Si/Cu-Anteil kaum zu entfernen ist

Knetlegierungen:

- relativ niedrig legiert (Mn, Mg, Cu, Ni, Zn, Si, Fe)
- AlMn1Mg1, AlSi1Mg, AlCuMg, AlZnMgCu,
- Dosen, Folien Strangpressprofile, Leitmaterial
- Recycling zu Walzbarren oder Pressbolzen; auch zu Gusslegierungen rezyklierbar

Abb. 2. Vergleich von Guss- und Knetlegierungen

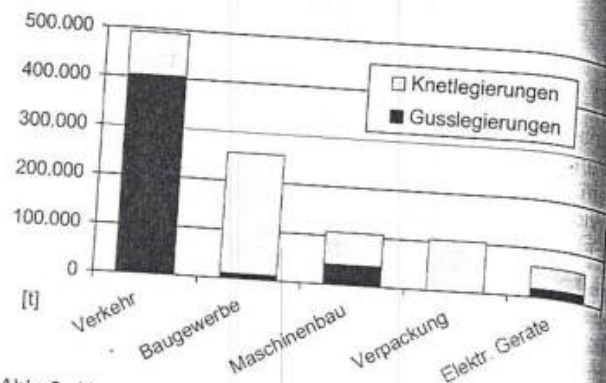


Abb. 3. Verwendung von Aluminiumguss- und -knetlegierungen 1997²

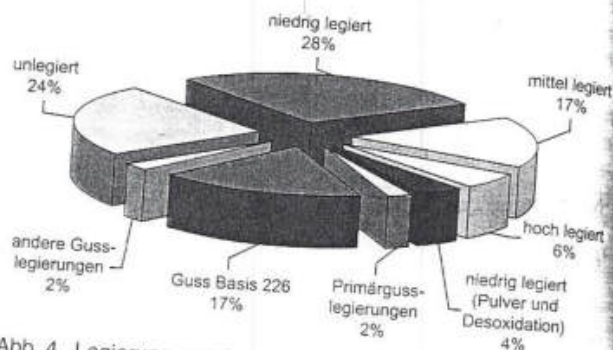


Abb. 4. Legierungsanteile des Aluminiumeinsatzes in Deutschland

Bei der Betrachtung einzelner Anwendungsbereiche muss weiterhin folgende Unterscheidung vorgenommen werden: Zum einen existieren geschlossene Recyclingkreisläufe, d. h. closed-loop-recycling, wenn Schrotte einem legierungsgleichen Wiedereinsatz zugeführt werden, z. B. bei Getränkedosen und Fensterrahmen. Offene Recyclingkreisläufe, d. h. open-loop-recycling, liegen vor, wenn sekundäre Rohstoffe nach der Verhüttung einer anderen Nutzung, meist auch in Form anderer Legierungen, zugeführt werden. Hierbei sind insbesondere die Schmelzhütten zu nennen, die beispielsweise aus einem Gemisch unterschiedlicher Alt- und Neuschrotte Gusslegierungen für die Automobilindustrie herstellen.

Neben diesen „idealisierten“ Zuständen existiert ein Übergangsbereich in stofflicher und räumlicher Hinsicht. Stofflich, da auch Knetlegierungen zu Gusslegierungen verarbeitet werden und damit eine werkstofftechnische Veränderung erfahren. Räumlich, da Produktionschrotte nicht nur firmenintern, sondern auch extern aufgearbeitet werden und somit nicht in einem geschlossenen Kreislauf verbleiben. Sortenreine Knetlegierungschrotte werden dabei gezielt von den Umschmelzhütten zu Walzbarren und Pressbarren aufgearbeitet, die dann in geschlossene und offene Recyclingkreisläufe gelangen. Vermischte und verunreinigte Schrotte werden ausschließlich durch die Schmelzwerke zu Gusslegierungen aufgearbeitet und gelangen so meist in offene Recyclingkreisläufe³.

Während der Produktnutzung ist das Metall in sog. Materialspeichern („Depots“) gebunden. Die gesamte Depotmenge für Aluminium wird weltweit auf 600–700 Mio. t geschätzt. Die Verteilung der Metalle und der Rückfluss in den Produktionskreislauf ist dabei räumlich, stofflich und zeitlich verschieden. Die Depoteigenschaften des Aluminiums können anhand ausgewählter Produktgruppen, Produkte, Produktteile oder Nutzungsarten beschrieben werden (Tabelle 1). Für Verpa-

Tabelle 1. Depoteigenschaften von Aluminium in ausgewählten Nutzungsbereichen

Depoteigenschaften		Verpackung	Verkehr Zug/Flugzeug	Auto	Bau	Maschinenbau	Elektrotechnik
räumlich	Größe Verteilung	gering	hoch	mittel	hoch	mittel	mittel
stofflich	Reinheit	hoch	gering	hoch	mittel	mittel	hoch
zeitlich	Verweilzeit	variiert	hoch	gering	hoch	mittel	hoch
		gering	hoch	mittel	hoch	hoch	variiert

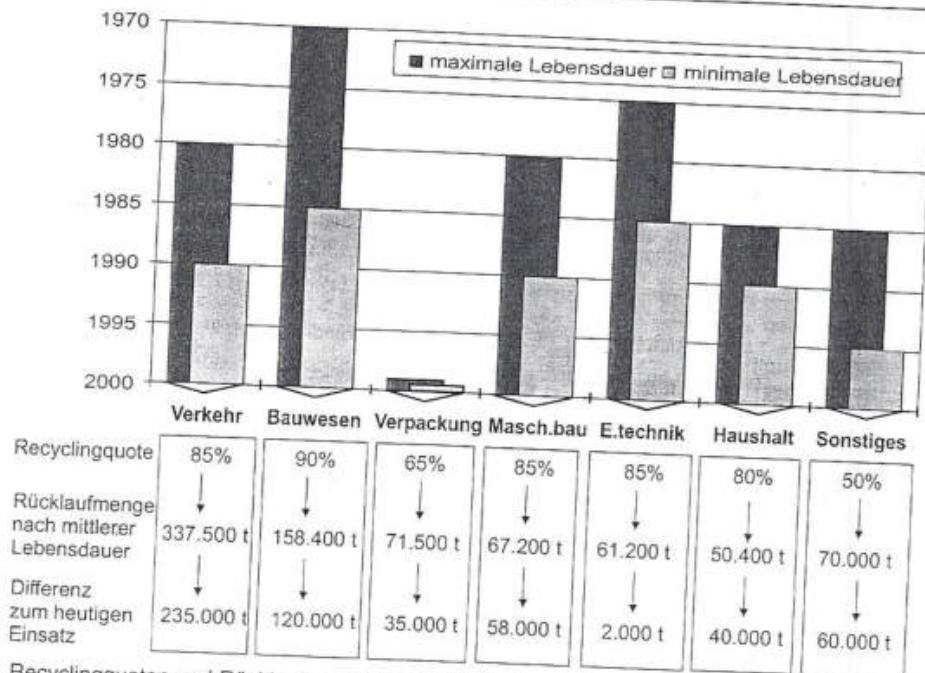


Abb. 5. Recyclingquoten und Rücklaufmengen aus verschiedenen Anwendungen bei vollständiger Erfassung

kungen aus Aluminium liegt beispielsweise eine hohe räumliche Verteilung bei geringer Produktgröße vor. Die stoffliche Reinheit kann dabei hoch (Menüschale, Getränkedose), mittel (Verschlusskappen, lackierte Folien) oder gering (bedampfte Chipstüten, Tetrapack) sein. Die Verweilzeit ist mit einer mittleren Lebensdauer von einem halben Jahr gering⁴.

Den zeitlichen Aspekt verdeutlicht die Darstellung von Produktionszeiträumen, Lebensdauer, Recyclingquoten, Rückflussmengen anfallender Aluminiumschrotte und der daraus resultierenden Differenz zum derzeitigen Bedarf in den verschiedenen Anwendungen in Abb. 5.

Demnach fallen heute beispielsweise Schrotte aus dem Maschinenbau an, die zwischen 1978 und 1995 produziert wurden, also eine Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren hatten. Nur Verpackungsmaterialien gelangen innerhalb eines halben Jahres in den Sekundärkreislauf zurück. Durch die zeitliche Verschiebung des Schrottfalls gegenüber der Produktion vergrößert sich die vorhandene Differenz zwischen anfallender Schrottmenge und benötigtem Metall. Dies wird durch die hohen Zuwachsraten im Aluminiumeinsatz noch verstärkt.

Die Ermittlung des Schrottaufkommens basiert auf den Depotmengen für einzelne Anwendungen und deren Recyclingquoten. Der aus dieser Abschätzung resultierende Recyclinganteil würde für eine vollständige Erfassung der Schrotte 60 % betragen. Ursache für den Unterschied zu dem zuvor genannten Wert von 18 % ist allein die Bestimmung der Recyclingquote. Hierzu einige Definitionen^{5, 6}. Für das Metallrecycling setzt sich die Recyclingquote aus der Erfassungsquote und der technischen Recyclingquote zusammen. Diese Trennung verdeutlichen auch die unterschiedlichen Ebenen des Recyclings in

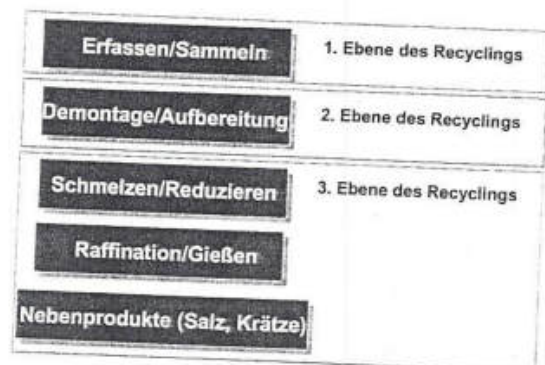


Abb. 6. Die Ebenen des Recyclings

Abb. 6, deren Kenntnis die Grundlage für eine ressourcenorientierte Betrachtung darstellt.

Zu unterscheiden sind die

- Erfassungsquote EQ: Sie bestimmt die Menge an verfügbarem Sekundärmaterial, das über Sammelsysteme erfasst wird, bezogen auf die im Produkt eingesetzte Menge.

$$EQ = \frac{\text{gesammelte Menge}}{\text{eingesetzte Menge}} \cdot 100 (\%)$$

- Technische Recyclingquote RQ: Hierbei wird die Menge an Material bestimmt, welches nach der Erfassung und Zuführung zur Verwertung am Ende tatsächlich als Sekundärmetall zur Verfügung steht, d. h. es handelt sich um das Ausbringen des technischen Prozesses.

$$RQ = \frac{\text{produzierte Menge an Sekundärmaterial}}{\text{der Verwertung zugeführte Menge}} \cdot 100 (\%)$$

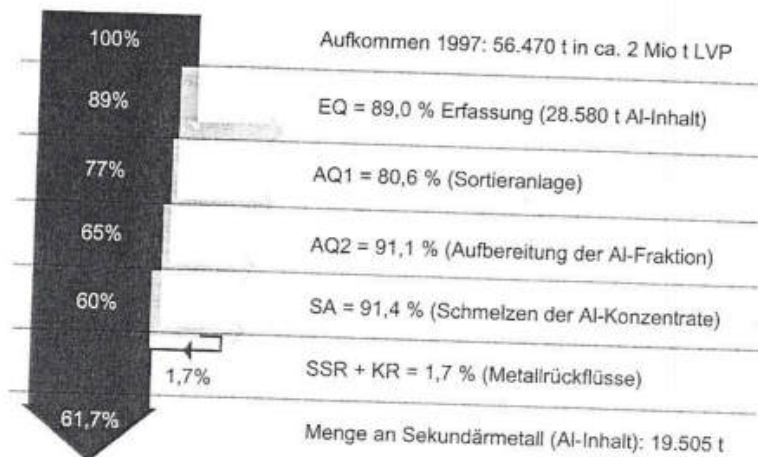


Abb. 7. Ermittlung der Recyclingquoten für Al-Leichtverpackungen⁶

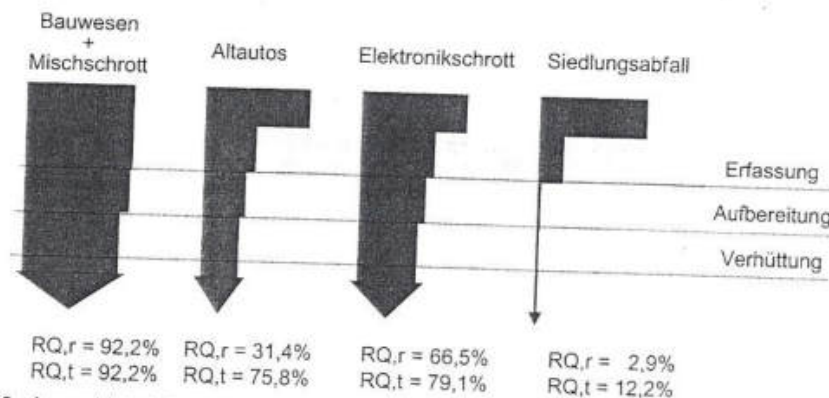


Abb. 8. Auswahl technischer und ressourcenorientierter Recyclingquoten für Aluminiumprodukte⁶

Die technische Recyclingquote setzt sich wiederum aus zwei Teilen zusammen, und zwar der Aufbereitungsquote AQ, die angibt, wie viel metallisches Aluminium aus der Erfassung für das Schmelzen bereitgestellt wird, und der Schmelzausbeute SA, die angibt, wie viel Aluminium als Flüssigmetall gewonnen wird, das heißt, hierin sind die Rückflüsse aus Salzsacken- und Krätzeaufbereitung (SSR, KR) berücksichtigt.

$RQ_t = AQ \cdot SA + SSR + KR = \text{technische Recyclingquote}$

$RQ_r = EQ \cdot RQ_t = \text{ressourcenorientierte Recyclingquote}$

Am Beispiel des deutschen Verpackungsrecyclings lassen sich die verschiedenen Ebenen des Recyclings veranschaulichen.

Im Jahr 1997 betrug der Verbrauch an Leichtverpackungen (LVP), zu welchen Kunststoffe, Weißblech, Verbunde und Aluminium zählen, 1 778 198 t⁶. Von den gebrauchten Verpackungen wurden 1 582 596 t erfasst, was einer Erfassungsquote von 89 % entspricht. Gleichzeitig gelangten 389 525 t Nichtverpackungen durch Fehlwürfe in das LVP-Gemisch. In den Sortieranlagen werden Kunststoffe, Weißblech und Verbunde aussortiert und eine aluminiumhaltige Fraktion (LVP Al40) zur weiteren Verwertung in mechanischer Aufbereitung, Verbundstoffaufbereitung und Pyrolyse bereitgestellt. Diese betrug 1997 etwa 55 000 t.

Die zugehörigen Recyclingquoten errechnen sich nach Abb. 7. Die technische Recyclingquote liegt bei 68,4 % und die ressourcenorientierte Recyclingquote bei 61,7 %.

Für die Nutzungsbereiche von Aluminium sind die ermittelten Quoten sehr unterschiedlich⁴. Dabei reicht die

Spanne der Erfassung von ca. 25 % für den Aluminiuminhalt des Siedlungsabfalls bis nahezu 100 % der Menge aus dem Bausektor und wird so zu einer entscheidenden Größe für den Erfolg eines Recyclingkonzeptes im Hinblick auf eine möglichst effiziente Ausnutzung sekundärer Rohstoffe (Abb. 8).

Die Recyclingquote definiert also den wiedergewinnbaren Metallanteil der eingesetzten Werkstoffe bzw. Bauteile.

Im Unterschied dazu ist der Recyclinganteil der zur Verarbeitung eingesetzte Anteil an Sekundärmetall. Wird die Erfassungsquote sekundärer Rohstoffe zur Ermittlung des theoretischen Recyclinganteils berücksichtigt, sinkt dieser von 60 auf 46 % (vgl. Abb. 5). Der Recyclinganteil liegt meist unter der Recyclingquote, da bei steigendem Metalleinsatz immer mehr Primärmetall erzeugt werden muss, als es den Verlusten während der Nutzung entspricht.

Der Recyclinganteil ist jedoch als Bewertungsmaßstab für den Recyclingerfolg ungeeignet, da er eine regionale Größe darstellt, die vom existierenden offenen Schrottmarkt und dem steigenden Metallbedarf in der Anwendung oft stark verfälscht wird.

3. Qualitätseinfluss sekundärer Rohstoffe auf das Aluminiumrecycling

Neben der Verfügbarkeit ist auch die Qualität der Vorstoffe, d. h. ihre Beschaffenheit und vor allem ihr Legierungszustand für das Recycling von entscheidender Bedeutung.

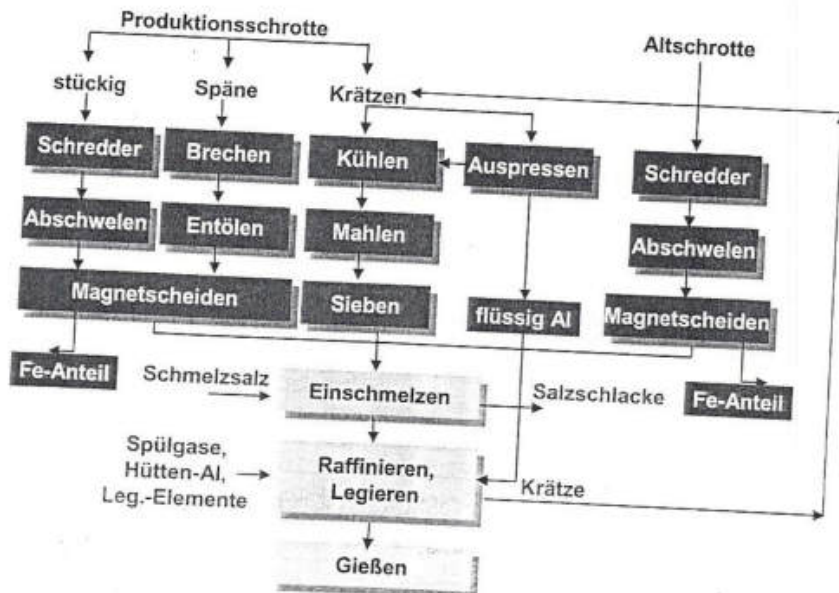


Abb. 9. Fließbild des Aluminiumrecyclings (2. und 3. Ebene)

Eine Refinement des sehr unedlen Aluminiums ist nur eingeschränkt möglich (Tabelle 2) und Begleitmetalle wie Eisen, Mangan, Silizium, Magnesium, Kupfer und Zink bleiben überwiegend in der Metallphase gelöst. Aus diesem Grund wird bei der Primäraluminiumherzeugung die Refinement vor der Reduktion durchgeführt; für das Recycling bedeutet dies eine genaue Trennung der Schrotte nach Legierungsart und Reinheit bereits vor dem Schmelzen. Gelingt dies nicht, bleibt z. Z. nur das Verdünnen mit Hüttenmetall oder das Verschneiden unterschiedlicher Schmelzen als Möglichkeit der Legierungseinstellung.

Tabelle 2. Refinementmöglichkeiten für Umschmelzaluminium

Art der Refinement	Wirkung
Schmelzen unter Salz	Entfernung der Oxide
Chlorierung	Entfernung von Alkalien und Erdalkalien
Spülgasbehandlung	Entfernung von H, Li, Na, Mg, Ca, Sr, Oxiden, Karbiden und Nitriden
Salzrefinement	Entfernung von Li, Na, Ca, Sr, Oxiden
Intermetallische Fällung	Entfernung von Fe, Mn
Vakuumdestillation	Entfernung von Li, Zn, Mg, Na
Zusatz von Primäraluminium	Verdünnen aller Begleitelemente
Zusatz von Legierungen	Verschneiden, Verdünnen einzelner Begleitelemente

Als Konsequenz aus der Legierungstrennung haben sich in der Praxis zwei Ofentypen durchgesetzt. Sortenreine Schrotte und Neuschrotte werden meist in großvolumigen Herdöfen geschmolzen, vermischte Neu- und Altschrotte, Krätzen und Späne in kleineren, flexiblen Salzbadtrommelöfen. Diese Trennung ist auch in den unterschiedlichen Verfahrensrouten der zweiten und dritten Recyclingebene zu finden (Abb. 9).

Trotz steigender Rücklaufmengen aus Produktion und Nutzung hat das verstärkte sortenreine Recycling von Knetlegierungsschrotten in den Umschmelzbetrieben einen Mangel an Verschnittmaterial bei den Schmelzwerken zur Folge. Durch den dann notwendigen vermehrten Einsatz von Primärmetall wird deren Kostensituation weiter verschärft.

Der Schrotteinsatz der deutschen Aluminiumschmelzwerke (Abb. 10) lässt in den Jahren 1975–1999

dementsprechend abnehmende Anteile an Neuschrott erkennen, deren Anteil sich auf 30 % verringerte, während der Anteil an Altschrott sich gegenläufig entwickelte⁷.

Für das Beispiel Aluminium verdeutlicht die Schrottbilanz 1997 in Abb. 11 die Aspekte der Schrottverfügbarkeit und der Qualität. Zunächst ist ein geringer Exportüberschuss zu erkennen, der sich aus Altschrotten, Bearbeitungsabfällen und Spänen zusammensetzt.

Für die Sekundäraluminiumproduktion wurden ca. 400 000 t Schrott (Al-Gehalt) eingesetzt, wovon etwa 70 000 t Knetlegierungen sortenrein umgeschmolzen wurden. Weitere Knetlegierungen wurden in den Gießereien der Primärhütten (174 900 t) und der Halbzeugwerke (190 000 t) umgeschmolzen^{8,9}. Der Produktionsschrottanfall von ca. 920 000 t wird in der Halbzeugfertigung als Kreislaufmaterial direkt wieder eingesetzt und somit statistisch nicht erfasst.

Der gezeigte Schrotteinsatz zuzüglich einer importierten Menge von 168 000 t Sekundäraluminium und dem Schrottanteil des ausländischen Primärmetalls ergibt einen realen Recyclinganteil an der deutschen Gesamtproduktion von 37 %. Dieser ist ein mengenbezogener Mittelwert der einzelnen Anwendungsgebiete.

Die Wechselwirkung zwischen den Produktbereichen lässt sich durch die existierenden Schrottströme quantifizieren (Abb. 11). Es ergibt sich eine Legierungskaskade, wobei die Recyclingaktivitäten den Legierungsgehalt des

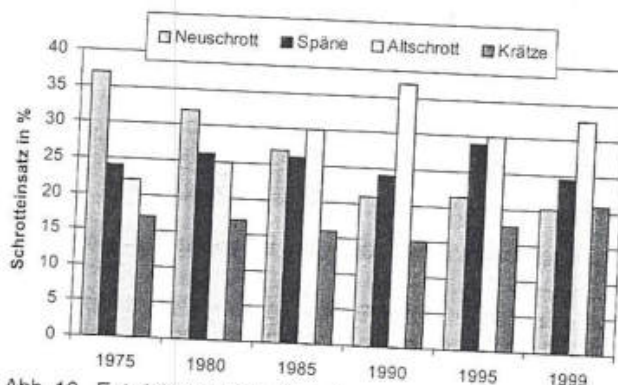


Abb. 10. Entwicklung der Schrottversorgung der deutschen Aluminiumschmelzwerke von 1975 bis 1999⁷

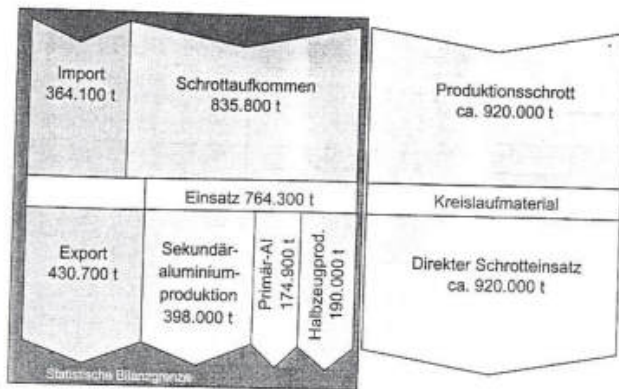


Abb. 11. Schrottbilanz 1997^{8,9}

Recyclinganteil eines hier dargestellten geschlossenen Produktkreislafs (Abb. 13). Eine Steigerung der Recyclingquote führt ab einem bestimmten Grenzwert jedoch zu stark steigenden Aufwendungen, da dann der spezifische Energieverbrauch überproportional mit dem hohen Aufwand für Erfassung und Aufbereitung ansteigt.

Darüber hinaus bestimmt die Beschaffenheit der Schrotte und insbesondere deren Aluminiumgehalt den Energiebedarf für das Umschmelzen. Abbildung 14 zeigt einen deutlichen Anstieg des Energieeinsatzes unterhalb von ca. 80 % Al-Inhalt. Darunter entscheiden die Begleitstoffe des Aluminiums über den Einsatz in die jeweiligen Schmelz- oder Aufbereitungsaggregate. In der Schmelzpraxis wird eine optimale Schmelzausbeute nur durch spezielle Vorstoffmischungen erreicht.

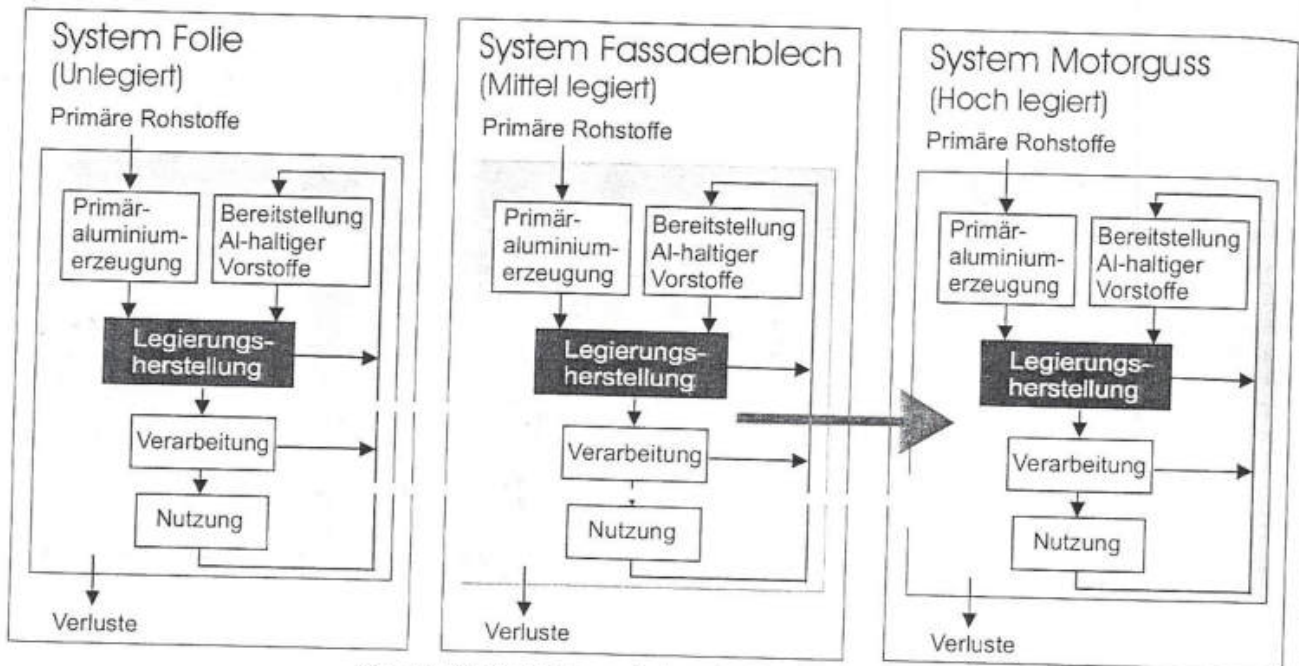


Abb. 12. Wechselwirkung zwischen den Recyclingsystemen

gesamten Depots erhöhen. Unlegiertes Aluminium bildet den Ausgangspunkt dieses Stoffstroms und hat demnach den geringsten Recyclinganteil. Ein Absenken des Legierungsstandes, d. h. eine Umkehr der üblichen Versorgungsrichtung in Abb. 12 ist nur mit einem der Primärerzeugung vergleichbaren Aufwand möglich.

Letztlich kann also der Erfolg von Recyclingaktivitäten nur an der wiedergewonnenen Metallmenge und somit an der Einsparung von Primärmetall im Gesamtsystem Aluminium gemessen werden, wobei nur etwa 10 % des Energieaufwands der Primärerzeugung benötigt werden. Darüber hinaus wirken die sortenreine Erfassung und Aufbereitung einer Anreicherung von Legierungselementen im Recyclingkreislauf entgegen und erhalten somit die größtmögliche Einsetzbarkeit der durch die Verknappung ohnehin teuren Sekundärrohstoffe.

4. Energetische Bewertung

Bei der energetischen Bewertung des Recyclings ist zunächst die Frage nach einer optimalen Technik für die Verarbeitung der verschiedenen Vorstoffe zu beantworten. Dabei sinkt zunächst der Energieaufwand jedes dieser Vorstoffe mit steigender Recyclingquote bzw. steigendem

Ein Beispiel für aluminiumarme Vorstoffe ist die gewonnene Al-Fraktion aus Leichtverpackungen. Hier lassen sich auch die aus technologischer Entwicklung (Zusammenspiel von Aufbereitung und Schmelzpraxis) resultierenden Potenziale verdeutlichen. Abbildung 15

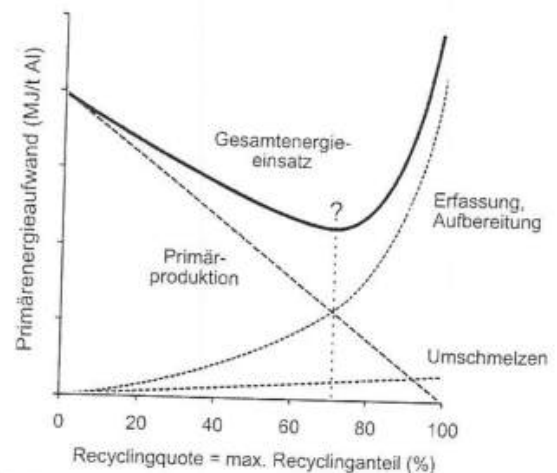


Abb. 13. Qualitative Bestimmung einer optimalen Recyclingquote in Bezug auf den Primärenergieaufwand

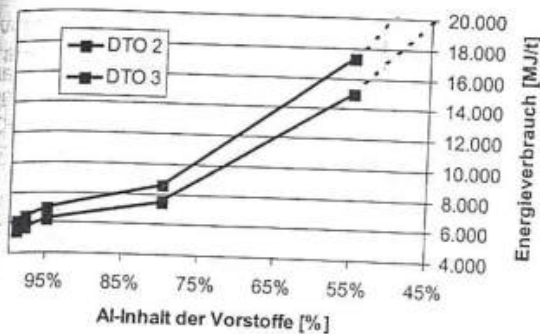


Abb. 14. Abhängigkeit der Umschmelzenergie vom Aluminiumgehalt der Vorstoffe

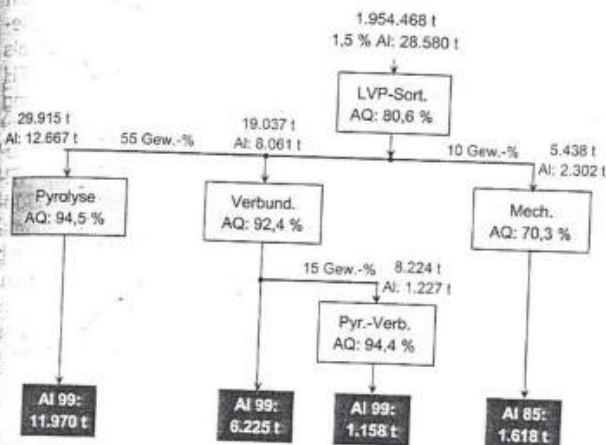
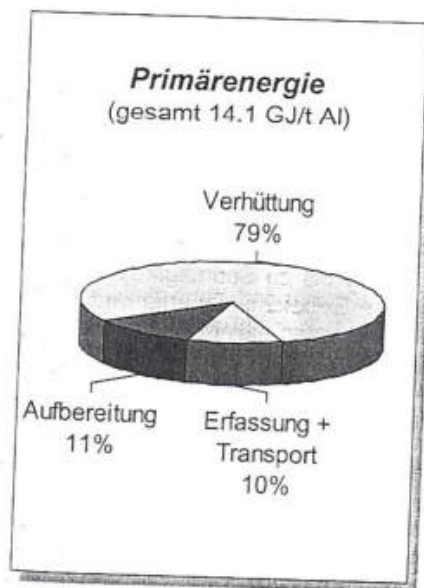


Abb. 15. Verwertungswege der Al-Leichtverpackungsfraction¹⁰

zeigt das existierende System des Verpackungsrecyclings. Die Al-Fraktion aus den Sortieranlagen, mit 40 % Aluminiumgehalt und überwiegend organischem Rest, ist schmelzmetallurgisch direkt nicht zu verarbeiten. Durch die Kombination mechanischer und thermischer Aufbereitungsverfahren gelingt es jedoch, eine hochwertige Fraktion mit ca. 99 % Al herzustellen, die mit einer Schmelzausbeute von über 90 % verarbeitet werden kann. Die mittlere Aufbereitungsquote liegt jedoch mit insgesamt 73,4 % relativ niedrig.



Endenergie: Beispiel Diesel
(gesamt 641,54 MJ/t Al-Fractionen der Sortierung)

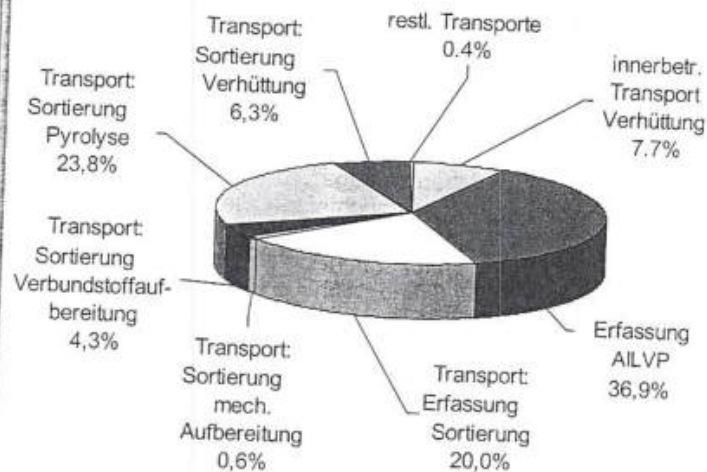
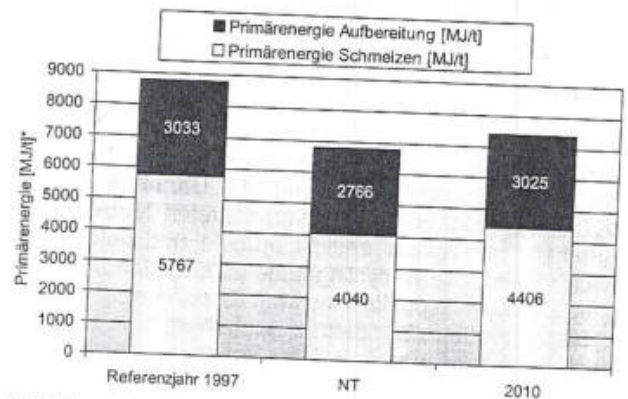


Abb. 17. Aufschlüsselung des Primär- und Endenergieeinsatzes zum Verpackungsrecycling am Beispiel des Dieselsverbrauchs¹⁰



¹⁰ohne Schlacken- und Krätzeaufbereitung

Abb. 16. Vergleich des Primärenergieaufwands heutiger und zukünftig möglicher Konzepte zum Verpackungsrecycling^{10, 11}

Durch den Einsatz einer vollautomatischen Sortierung könnte allein das Ausbringen dieser Stufe von 80,6 auf 94 % gesteigert werden. Prozessspezifisch steigt dann zwar der Energieverbrauch, bezogen auf die größere Produktmenge kehrt sich dies jedoch zu einem Vorteil um. Szenariorechnungen zeigen, dass sich bei entsprechender Schmelztechnik für die zukünftigen Recyclingkonzepte NT (ausschließlich neueste Technologie) und deren mögliche Umsetzung im Jahr 2010 Einsparpotenziale von 2000 bzw. 1370 MJ/t erzeugter Legierung ergeben, bei einer Erhöhung der Aluminiummenge um 20 bzw. 4 % (Abb. 16)^{10, 11}.

Eine detaillierte Analyse der Recyclingprozesse mittels Prozesskettenmodellierung zeigt darüber hinaus weitere wichtige, oftmals nicht offensichtlich erkennbare Aspekte des Recyclings oder einzelner Verfahren auf. Abbildung 17 gibt neben der Verteilung der Primärenergie die Aufteilung der Endenergie für den Energieträger Dieseldieselkraftstoff an. Sie zeigt, welcher hohen Stellenwert der Transport bei der Erfassung und anschließend zu den Sortieranlagen besitzt. Ebenso ist die zentrale Verwertung der Aluminiumfraktion in den Pyrolysebetrieben in Süddeutschland mit hohen Transportaufwendungen verbunden.

Der Beitrag stellt Anspruch und Realisierbarkeit des Aluminiumrecyclings gegenüber. Dabei steht die Schrottverfügbarkeit im Mittelpunkt der Betrachtung, da sie einen für alle Metalle gleichermaßen wichtigen Einfluss auf die Recyclingaktivitäten ausübt. Daraus lässt sich der Recyclinganteil an der verarbeiteten Metallmenge ermitteln, der regional, zeitlich, produkt- und metallspezifisch variiert. Die Recyclingquote ist dagegen ein überwiegend technikspezifisches Maß für den Erfolg von Recyclingaktivitäten, bei dem je nach Wahl der Definition auch die Erfassung sekundärer Vorstoffe berücksichtigt werden muss. Für Recyclinganteil und -quote ist die Qualität der Vorstoffe, d. h. die Beschaffenheit, der Legierungszustand und der Metallgehalt von Bedeutung. Die Recyclingtechnik selbst kann über das Metallaufbringen und den Energieeinsatz beschrieben werden, wobei möglichst immer ein gesamtes Recyclingkonzept aus Aufbereitungs- und Schmelztechnik zu bewerten ist und nicht ein Einzelprozess.

Zukünftige Entwicklungen werden darauf abzielen müssen, die Effizienz von Erfassung und Verwertung sekundärer Rohstoffquellen auf ein Optimum zu steigern. Der Energieaufwand für das Recycling stellt jedoch nur eine Größe dar, die meist im Zusammenhang mit den anfallenden Emissionen zur ökologischen Bewertung herangezogen wird. Um eine Nachhaltige Entwicklung der Metallindustrie konkret zu gestalten, sind auch ökonomische und soziale Aspekte des Ressourcenmanagements in die Betrachtung einzubeziehen.

- ¹ Metallgesellschaft: Metallstatistik 1988–98, 86. Jahrgang, Frankfurt a. M. World Bureau of Metal Statistics, Ware, 1999.
- ² Aluminiumverbrauch: Aufschlüsselung nach EAA 900, 1997, Gesamtverband der Deutschen Aluminiumindustrie GDA, Düsseldorf, 1998.
- ³ Rombach, G.: Aluminium in offenen und geschlossenen Kreisläufen. Aluminium 74 (1998) 6, 421.
- ⁴ Bauer, C., G. Rombach, R. Teschers, S. Wolf und P. Zapp: Einbindung von Nutzungsaspekten in die Stoffstromanalyse metallischer Rohstoffe. Metall 54 (2000) 5, 205–209.
- ⁵ Wolf, S., J. Meier-Kortwig und H. Hoberg: Modelling the material flow of recycling processes for aluminium alloys by means of technical recycling quotas. In: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, REWAS 99, E. Gaballah, E., J. Hager und R. Solozabl (eds.), San Sebastian, Spain 1999, pp. 1023.
- ⁶ Wolf, S.: Untersuchungen zur Bereitstellung von Rohstoffen für die Erzeugung von Sekundäraluminium in Deutschland – Ein Informationssystem als Hilfsmittel für das Stoffstrommanagement. Dissertation, RWTH Aachen, 2000.
- ⁷ VDS-Schrotteingangstatistik, Vereinigung Deutscher Schmelzhütten, Düsseldorf, März 2000.
- ⁸ Aluminiumschrottbilanz 1997. Bundesamt für Wirtschaft, II 6 NE-Metallstatistik, Eschborn, 1998.
- ⁹ Erhebungsergebnisse der NE-Metallfachstatistik. Marktversorgung mit Aluminium, Bundesamt für Wirtschaft, Eschborn, 1999.
- ¹⁰ Sonderforschungsbereich SFB 525: Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe. RWTH-Aachen, 2000, <http://sfb525.rwth-aachen.de>.
- ¹¹ Rombach, G., P. Zapp, W. Kuckshinrichs und B. Friedrich: Technical progress in the aluminium industry – A scenario approach. In: Anjier, J. L. (ed.) Light metals 2001. TMS, Warrendale, USA, pp. 1131–1137.

Die wirtschaftliche Bedeutung des Leichtmetallrecyclings

P. Paschen

Gesetz der Erhaltung der Masse – Gründe für das Recycling von Metallen – Statistik zur Primär- und Sekundärproduktion von Leichtmetallen sowie zum Verbrauch – Energieeinsparungspotenziale in der Produktion – Kosteneinsparungen – Ökologische Betrachtungen – Ausblick

The Economic Significance of Light Metal Recycling. Law of mass conservation – Reasons for metal recycling – Statistical data on primary and secondary production of light metals and on consumption – Energy saving potentials in smelter production – Cost savings – Ecological considerations – Outlook

1. Einleitung

Wollte man am Beginn des 21. Jahrhunderts über den grundsätzlichen Sinn von Recycling philosophieren, so hieße das wohl, Eulen nach Athen zu tragen. Die Aufarbeitung und Wiederverwendung gebrauchter Metalle am Ende ihres Lebenszyklus als Wirtschaftsgut steht seit langer Zeit außer Diskussion. Dafür spricht nicht nur der ganz handfeste und praktische Grund „Wohin sollten wir sonst mit unseren Abfällen?“, sondern auch rationale wirtschaftliche Überlegung und – last but not least –

unser aller Verantwortung für die Zukunft. „Nachhaltige Entwicklung“ nennt man den ganzen Themenkomplex in seiner vielschichtigen Vernetzung.

Über dieses Thema hört und liest man viel vom Boulevardjournalisten bis zu Sonntagsreden hochkarätiger Wissenschaftler. Gebetsmühlenartig wird dann ein Wort immer wieder heruntergeleiert, das von der „Schonung immer knapper werdender Ressourcen“. Das ist bei den Metallen völliger Unsinn, und zwar ganz besonders bei den Leichtmetallen.

Die Erdkruste besteht zu 7,6 Masse-% aus Aluminium, zu 1,9 Masse-% aus Magnesium und zu 0,4 Masse-% aus Titan, und diese Mengen sind, auf die Erdkruste mit 16 km Dicke gerechnet, unerschöpflich. Und es gibt das Gesetz der Erhaltung der Masse. Metalle gehen auf dieser Welt niemals verloren; allenfalls wird bei einer noch eine gewisse Zeit wachsenden Welt-

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Peter Paschen, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben/Österreich.

Vortrag, gehalten auf dem Institutskolloquium des Instituts für Nichteisenmetallurgie am 25. Jänner 2001 in Leoben.