

72/2016

Buchner, H.; Laner, D.; Rechberger, H.; Fellner, J. (2016)  
„Dynamische Modellierung nationaler Aluminiumflüsse zur  
Abschätzung zukünftiger Sekundärrohstoffpotenziale“,  
*ÖIAZ, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*,  
Vol. 161, 1–12, p. 83-87.

---



# Dynamische Modellierung nationaler Aluminiumflüsse zur Abschätzung zukünftiger Sekundärrohstoffpotenziale

## Dynamic modelling of national aluminium flows in order to evaluate future secondary resource potentials

Von H. Buchner, D. Laner, H. Rechberger und J. Fellner, Wien

Mit 6 Abbildungen und 1 Tabelle



Dipl.-Ing.  
Hanno Buchner



Dipl.-Ing.  
Dr.techn. David Laner



Univ.-Prof.  
Dipl.-Ing. Dr.techn.  
Helmut Rechberger



Ass.-Prof. Dipl.-Ing.  
Dr.techn. Johann Fellner

### Kurzfassung

Der stetig steigende Einsatz von Metallen in den vergangenen Jahrzehnten führte zu einem beträchtlichen Aufbau anthropogener Lager. Das Wissen über die Art und Größe dieser Lager, sowie über die zukünftige Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen aus diesen Lagern, ist jedoch nach wie vor sehr beschränkt. In der vorliegenden Studie werden anhand eines nationalen dynamischen Stoffflussmodells die anthropogenen Lager in Österreich sowie die Schrottflüsse für den Werkstoff Aluminium berechnet. Die derzeit in Nutzung befindliche Menge an Aluminium beträgt ca. 360 kg/Person, die anfallende Altschrottmenge ca. 12 kg/Person und Jahr. Durch die Kombination des bestehenden Lagermodells mit Prognosen über den zukünftigen Aluminiumverbrauch wird die zukünftige Altschrottmenge berechnet, sowie der zukünftige Selbstversorgungsgrad aus Sekundärrohstoffen abgeschätzt.

### Abstract

The continuous increasing consumption of metals during the last decades caused a considerable growth of anthropogenic stocks. But, knowledge regarding quantity, quality and availability of material from these stocks is still quite limited. This study aims at analysing anthropogenic aluminium (Al) stocks and flows in Austria utilising a dynamic material flow model. The amount of Al currently store in in-use stocks is about 360 kg/cap, total annual old scrap generation amounts to approx. 12 kg/cap and year. Through the combination of the existing dynamic material flows model with forecasts on future Al consumption the prospective trend of old scrap as well as the degree of self-supply from secondary resources is calculated.

### 1. Einleitung

Der Verbrauch, die Verarbeitung und Nutzung von metallischen Ressourcen ist schon seit jeher ein bedeutender Faktor für wirtschaftliches Wachstum und Wohlstand. Während in der ersten

Hälfte des 20. Jahrhunderts die Entwicklung (vor allem in Europa) von der starken Expansion der Stahlindustrie und der Nachfrage nach deren Produkten getrieben wurde, ist die technische und wirtschaftliche Bedeutung von Nichteisenmetallen erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts deutlich gestiegen. Seit 1950 stieg die globale Produktion von Rohstahl auf das Achtfache, für Aluminium erhöhte sich die globale Produktion um den Faktor 34 (Abb. 1). Vor allem Aluminium (Al) entwickelte sich unter kontinuierlicher Prozess- und Werkstoffentwicklung [1] und der steigenden Nachfrage nach Leichtbauwerkstoffen im Automobil- und Luftfahrtsektor [2] zu einem Massenwerkstoff unter den Nichteisenmetallen. Auf Grund der günstigen Materialeigenschaften in Bezug auf Korrosionsbeständigkeit, Flexibilität und Leitfähigkeit [3] wurde Al jedoch auch im Bausektor,

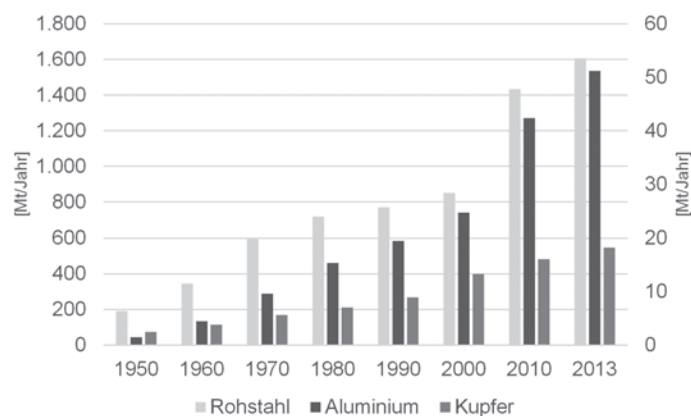


Abb. 1. Globale Produktion (1950–2013) von Stahl (linke Achse), Aluminium und Kupfer (beide rechte Achse) (basierend auf Daten von [5–10])

Fig. 1. Global production (1950–2013) of steel (left axis), aluminium and copper (both right axis) (based on reported data [5–10])

im (elektrischen) Anlagenbau sowie als Verpackungsmaterial zu einem gefragten Material. Der jährliche Konsum von Al liegt im europäischen Durchschnitt derzeit bei 22 kg/Pers, dominiert vom Transportsektor (39%), gefolgt vom Bausektor (24%), Verpackungen (17%), Maschinenbau (10%) und Konsumgütern (7%) [4].

Durch den vorwiegenden Einsatz von Al in langlebigen Produkten und Gütern, führte der stetig steigende Konsum zu einem Aufbau beträchtlicher Nutzlager (= anthropogenes Lager). Darunter ist die in Form verschiedenster Güter befindliche Al-Menge zu verstehen, die sich in Nutzung befinden (z.B. angemeldete Personenkraftwagen) oder die aus der Nutzung ausgeschieden sind, aber noch nicht zu Abfall wurden (z.B. verlassenes Alt-Gebäude). Globalen Modellen zu Folge befinden sich 75% der gesamten bisher produzierten Al-Menge nach wie vor in diesem Lager [11]. Eine spezifische Analyse des anthropogenen Aluminiumlagers scheint daher sinnvoll, um das zukünftige Ressourcenpotenzial dieser Lagerstätten beurteilen zu können.

Verglichen mit den sehr energieintensiven und umweltbelastenden Prozessschritten bei der Herstellung von Primär-Al (Bayer-Verfahren mit anschließendem Hall-Héroult-Prozess), ist das Wiedereinschmelzen von Al mit wesentlich geringeren Umweltauswirkungen verbunden. Der spezifische Energiebedarf verringert sich auf 5–10% verglichen zur Primärproduktion, außerdem kommt es zu einem deutlich geringeren Anfall von Reststoffen sowie einer geringeren Emissionsbelastung [1]. Nicht zuletzt auf Grund hoher Energiekosten sowie strenger Umweltschutzgesetze hat in Europa (vor allem in Österreich) in den letzten Jahrzehnten ein Übergang von der Primär- zur Sekundärproduktion stattgefunden. Während sich europaweit der Anteil an Sekundär-Al am Gesamtbedarf in den letzten 30 Jahren von 28% auf 35% erhöht hat, ist der Anteil an in Europa produziertem Primär-Al auf 14% gesunken (Abb. 2a). Vergleichsweise noch ausgeprägter stellt sich die Situation für Österreich dar. Nach der Schließung der Schmelzflusselektrolyseanlagen in Ranshofen im Jahr 1992, gibt es in Österreich derzeit nur mehr Sekundärproduktionsanlagen (Abb. 2b).

Obwohl die Verfügbarkeit von Primär-Al auf Basis der heutigen Verbrauchsmengen für zumindest die nächsten 200 Jahre global gesichert scheint [15], stellt sich aus europäischer und speziell österreichischer Sicht die Frage, in welchem Ausmaß das Al aus anthropogenen Lagerstätten zukünftig den Bedarf aus Primärquellen bzw. Importen verringern kann. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird im Christian Doppler Labor für Anthropogene Ressourcen ein dynamisches Stoffflussmodell zur Berechnung

des aktuellen Nutzlagers sowie der derzeit und zukünftig anfallenden Altschrottmengen entwickelt. In einem weiteren Schritt werden die modellierten Nutzlager mit Prognosen über den zukünftigen Al-Bedarf kombiniert, um daraus Aussagen über den zukünftigen Selbstversorgungsgrad (= Unabhängigkeit von Rohstoffimporten) ableiten zu können.

2. Methode – Dynamische Modellierung nationaler Stoffströme

2.1. Ermittlung des anthropogenen Aluminiumlagers

Die Ermittlung des derzeitigen nationalen Al-Lagers erfolgt mittels eines Rechenmodells, das relevante Al-Flüsse im Zeitraum zwischen 1964 und 2012 abbildet. Beginnend mit Daten zur Halbzeug-Produktion werden, unter Berücksichtigung von Außenhandelsflüssen, sämtliche Prozesse der nachfolgenden Lebenszyklusstufen betrachtet. Eine skizzenhafte Darstellung des Rechenmodells ist in Abb. 3 dargestellt, wobei sich der graue Bereich auf den historischen Teil des Modells zur Berechnung der aktuellen Lager bezieht und der schwarze Bereich den Prognosezeitraum zur Berechnung der zukünftigen Lager- und Altschrottmengen umfasst. Ausgehend von der national produzierten Menge an Halbzeugen wird zunächst der Außenhandel mit selbigen berücksichtigt. Im nächsten Berechnungsschritt wird sektor-spezifisch der (Neu-)Schrottanfall im Zuge der Bearbeitung von Halbzeugen zu fertigen Produkten ermittelt. Um die tatsächliche national konsumierte Menge an Al ermitteln zu können, werden im letzten Schritt die indirekten Al-Flüsse berechnet und zur Menge an national produzierten Al-Gütern hinzugezählt. Unter indirekten Al-Flüssen sind alle Flüsse in Form von Al beinhaltenden Fertiggütern zu verstehen (z.B. Fahrzeuge, Maschinenbauteile, Elektrogeräte etc.). Die Berechnung dieser indirekten Flüsse erfolgt dabei analog zur Berechnung der Außenhandelsflüsse auf Halbzeugebene unter Berücksichtigung der in der Außenhandelsstatistik [16] nach HS-Codes gegliederten Gesamtmengen, multipliziert mit produktspezifischen Al-Anteilen. Durch die Verknüpfung der für jedes Modelljahr berechneten Inputmengen mit sektor-spezifischen Lebensdauerfunktionen, kann der Altschrottanfall in den Folgejahren und Jahrzehnten berechnet werden [17]. Dabei erfolgt eine Differenzierung nach sechs Nutzungs-Sektoren mit unterschiedlichen mittleren Lebensdauern: Transport (15 Jahre), Gebäude und Infrastruktur (40 Jahre), Maschinenbau (17 Jahre), Elektrischer Anlagenbau (25 Jahre), Konsumgüter (10 Jahre) und Verpackungen (0–5 Jahre). Die mathematische Abbildung der Lebensdauern im Lager erfolgt dabei über Weibull-Verteilungen. Das Nutzlager berechnet sich am Ende aus dem kumulierten

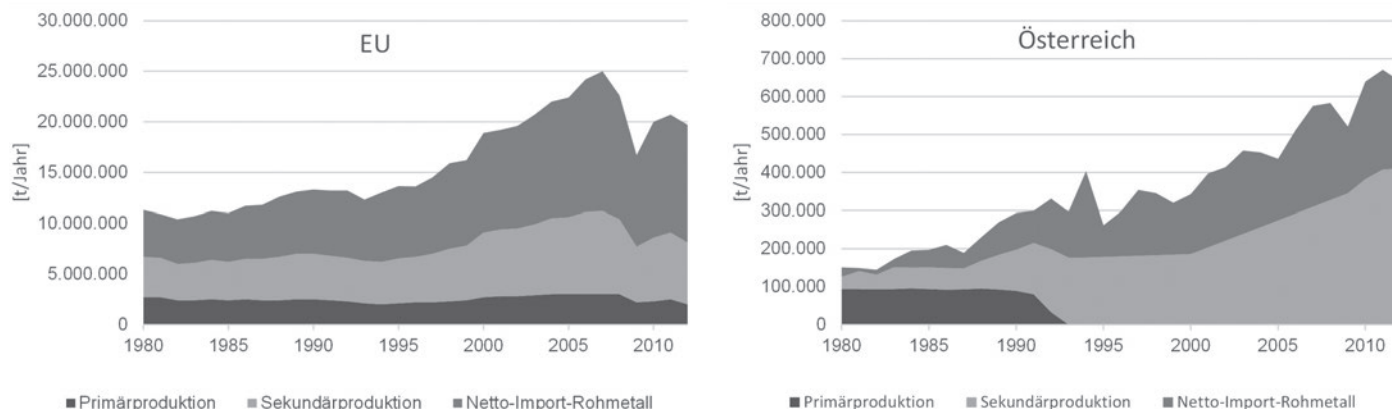


Abb. 2. Importabhängigkeit der Roh-Aluminiumversorgung (a) für die EU und (b) für Österreich (Daten basieren auf [12-14])  
 Fig. 2. Aluminium import dependency (a) for the EU and (b) for Austria (Data based on [12-14])

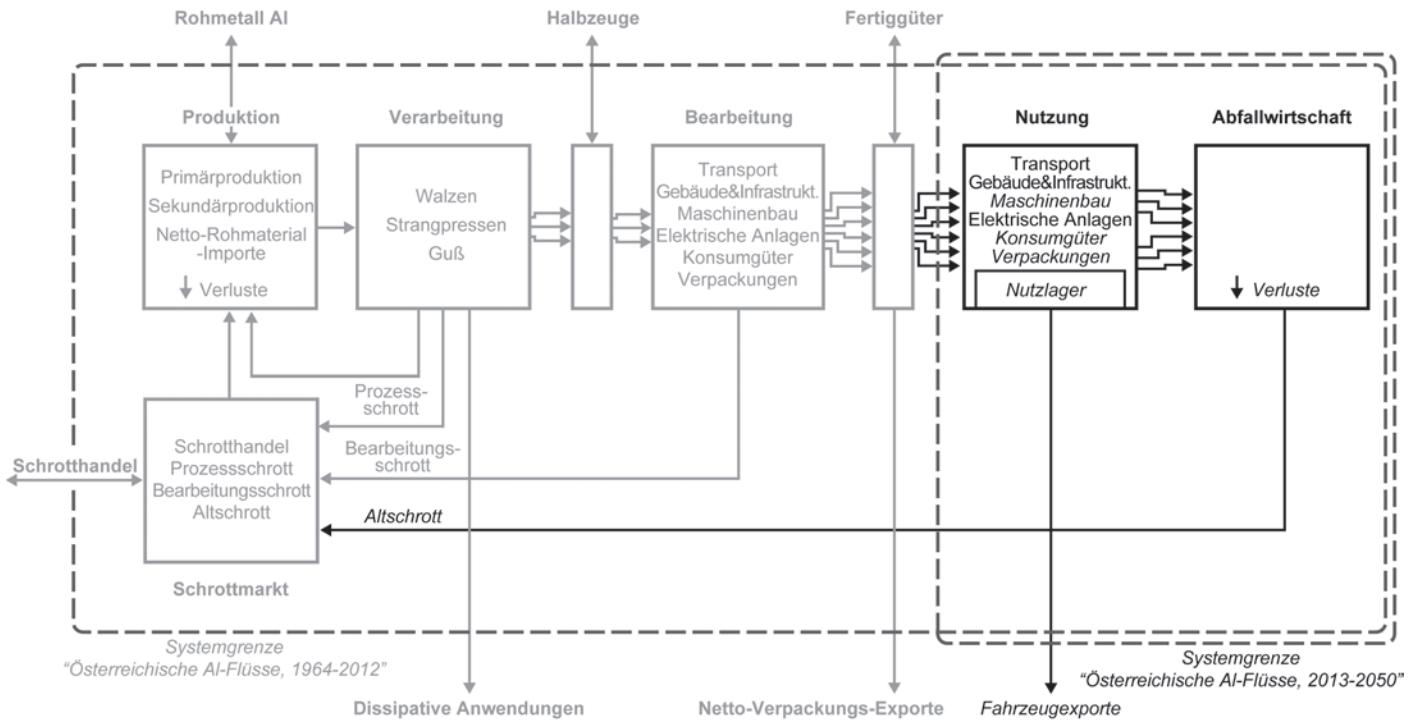


Abb. 3. Systemdefinition nationales Al-Stoffflussmodell nach [19]

Fig. 3. System definition of the national aluminium material flow model based on [19]

Delta zwischen Input und Output. Um die Konsistenz und Plausibilität der berechneten Ergebnisse zu überprüfen, wurde das Modell intensiv mit unabhängig erhobenen Daten überprüft und verglichen. Die Plausibilitätsprüfung bezieht sich dabei sowohl auf die Überprüfung der national konsumierten Al-Menge, wie auch auf die national anfallende Altschrottmenge. Weiters werden im Prozess Produktion die dokumentierten Produktionsmengen mit den im Modell berechneten Schrottmengen (nationaler Alt-/Neuschrottanfall + Netto-Schrott-Importe) verglichen. Ein zusätzlicher Vergleich erfolgt zwischen der konsumierten Menge an Rohmetall (Nationale Produktion + Netto-Importe) und der nationalen Produktionsmenge an Halbzeugen [18].

### 2.2. Prognose der zukünftigen Lager und Altschrottlüsse

Die Berechnung der zukünftigen Nutzlager und Schrottlüsse erfolgt auf Basis von zwei Komponenten: zum einen müssen zukünftige Altschrottlüsse aus dem bestehenden Nutzlager berücksichtigt werden (Produkte sich derzeit im Lager befinden, aber in Zukunft das Ende ihrer Lebensdauer erreichen werden und zu Abfall werden), zum anderen müssen der zukünftige Al-Konsum prognostiziert und die daraus resultierenden Schrottmengen berechnet werden. Aus der Kombination dieser beiden Komponenten ergibt sich am Ende die zukünftig zu erwartende Gesamtschrottmenge. In der Abschätzung des zukünftigen Al-Konsums kann dabei methodisch auf zwei unterschiedliche Weisen vorgegangen werden. Die erste Möglichkeit stellt die Abschätzung der zukünftigen Mengen auf Basis aktuell konsumierter Mengen (z.B. Anwendung einer jährlichen Steigerungsrate auf die aktuelle Konsummenge) dar. Die zweite Möglichkeit besteht darin, die zukünftige Entwicklung des Lagers zu ermitteln (z.B. Anzahl der Fahrzeuge im Bestand multipliziert mit den spezifischen Al-Anteilen) und daraus in einem nächsten Schritt unter Berücksichtigung des jährlichen Schrottanfalls den „notwendigen“ Al-Konsum zu berechnen [19].

### 2.3. Berechnung der Importabhängigkeit

Die zukünftige Importabhängigkeit (Delta zwischen nationalem Verbrauch und zur Verfügung stehenden Sekundärrohstoffmengen) wird im bestehenden Modell aus zwei unterschiedlichen Perspektiven betrachtet. Zum einen aus einer industriellen Perspektive und zum anderen aus der Perspektive des nationalen Konsums. Bei der ersteren handelt es sich um jene Differenzmenge, die abzüglich nationale verfügbarer Schrottmengen notwendig ist, um eine ausreichende Versorgung der Industrie mit Rohstoffen sicherzustellen. Bei letzterer wird jener Grad untersucht, zu dem die Deckung des nationalen Konsums (theoretisch) aus nationalen Sekundärrohstoffquellen erfolgen kann.

## 3. Ergebnisse

### 3.1. Nutzlager und Schrottlüsse

Die historische sowie die prognostizierte Entwicklung des anthropogenen Lagers ist in Abbildung 4 dargestellt. Auf Grund der langen Verweildauer von Al-Bauteilen in Gebäuden und der Infrastruktur, ist für diesen Sektor historisch der stärkste Lagerzuwachs erkennbar. Im Transportsektor ist, auf Grund des verstärkten Einsatzes von Leichtbaukonzepten, vor allem in den letzten 15 Jahren ein ansteigender Trend für den Lagerzuwachs erkennbar. In den verbleibenden Sektoren (Maschinenbau, Elektrische Anlagen und Konsumgüter) ist aktuell kaum ein bzw. nur ein gedämpftes Wachstum der Lager festzustellen. Vorwiegend getrieben durch die starke Al-Nachfrage aus dem Transportsektor, wächst das derzeitige Gesamtlager mit einer jährlichen Rate von ca. 2%. Das aktuelle Nutzlager pro Kopf beträgt 360 kg, wobei bis 2030 ein Anstieg auf 440 kg und bis 2050 ein weiterer Anstieg auf 530kg zu erwarten ist (Tab. 1). Nach einer starken Zunahme in den letzten Jahrzehnten liegt der derzeitige pro Kopf Al-Konsum in Österreich bei ca. 25 kg/Jahr. Unter Berücksichtigung des zukünftigen Al-Konsums und der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung ist hier von einer Steigerung um etwa 40% in den kommenden Jahrzehnten auszugehen.

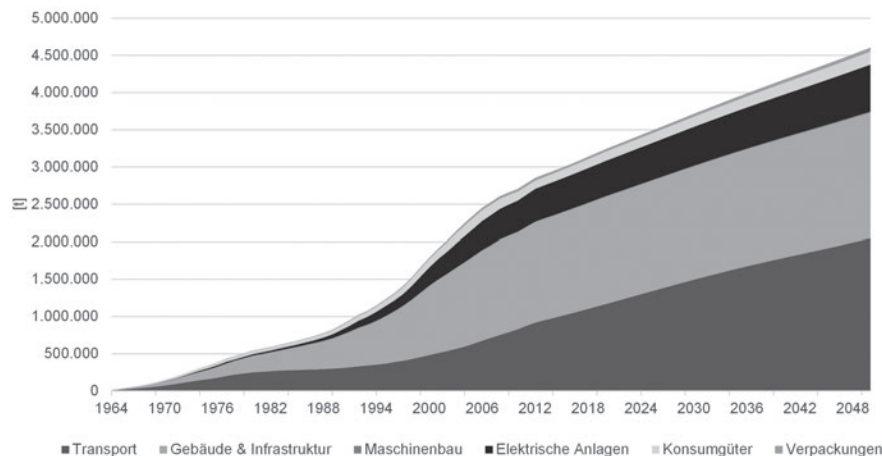


Abb. 4. Entwicklung des Österreichischen Al-Nutzlager gegliedert nach Nutzungs-sektoren  
 Fig. 4. Development of the Austrian in-use stocks divided by end-use sectors

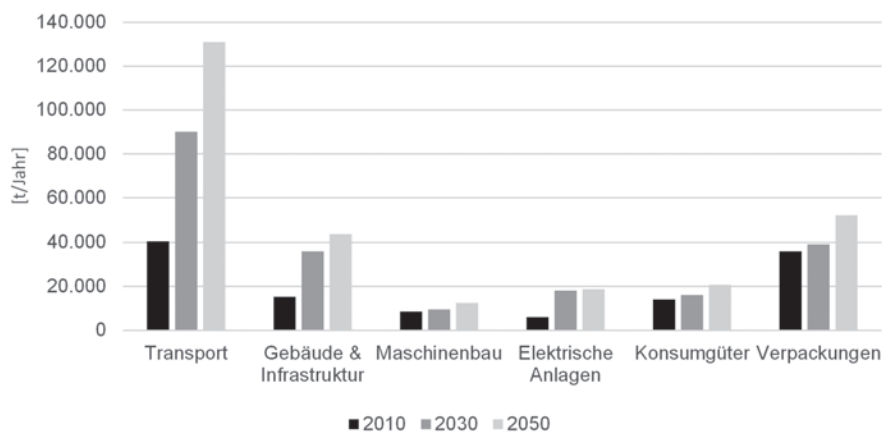


Abb. 5: Aktuelle und zukünftige Altschrottmengen gegliedert nach Nutzungssektoren  
 Abb. 5: Current and future old scrap generation divided by end-use sectors

Tab. 1: Historische und prognostizierte Entwicklung der wichtigsten Modellgrößen (Nutzlager, Al-Konsum und Altschrottmenge)  
 Tab. 1: Historical and forecasted trends of the most important model parameters (in-use stocks, final Al demand and old scrap generation)

|                            | 1982 | 1992 | 2002 | 2012 | 2030 | 2050 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Nutzlager [kg/Pers.]       | 94   | 150  | 280  | 360  | 440  | 530  |
| Al-Konsum [kg/Pers.]       | 6.9  | 17   | 25   | 25   | 28   | 35   |
| Altschrottmenge [kg/Pers.] | 3.5  | 6.1  | 8.8  | 12   | 24   | 31   |

Abb. 5 zeigt eine Gliederung der derzeitigen und zukünftigen Altschrottmenge nach Nutzungssektoren. Dabei handelt es sich um das rechnerische Altschrottpotenzial, d.h. jene Menge, die theoretisch an Altschrott generiert wird. Auf Grund von Verlusten (z.B. Fahrzeugexporte, Sammel- und Aufbereitungsverluste) liegt die tatsächlich zum Wiedereinschmelzen zur Verfügung stehende Menge unter dem berechneten Potenzial. Die drei größten Sektoren (Transport, Gebäude und Infrastruktur und Verpackungen) liefern derzeit ca. 2/3 der gesamten Altschrottmenge. Deutliche Steigerungen sind zukünftig im Transport und im Gebäude und Infrastruktur Sektor zu erwarten. Im Transportsektor führt der verstärkte Einsatz von Al zu einer Verdoppelung der Altschrottmenge bis 2030 und zu einer Verdreifung bis 2050. Im Gebäudebereich ist durch die zukünftig Mobilisierung von Material aus dem bestehenden Nutzlager von einer ähnlichen Entwicklung auszugehen.

### 3.2. Zukünftiger Selbstversorgungsgrad

Die Berechnung des Selbstversorgungsgrades in Bezug auf die nationale Sekundärproduktion zeigt, dass ausgehend von den derzeitigen Produktionsvolumina unter Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme von 2% keine wesentliche Änderung des

Selbstversorgungsgrades zu erwarten ist. Verbesserte Sammlung führt auch im Optimalfall nur zu einer moderaten Erhöhung (+4%) der Selbstversorgung. Bezogen auf den Al-Konsum (in Form von Fertiggütern) ist bis 2030 ein Selbstversorgungsgrad von 40% möglich. Auf Grund des zur Produktion vergleichsweise geringeren Wachstums des Al-Konsums zeigt eine verbesserte Sammlung hier einen größeren Effekt (+9%). Für beide Szenarien gilt, dass sich der Selbstversorgungsgrad nur auf die Altschrottmenge im System bezieht und keine Produktions- oder Verarbeitungsschrotte berücksichtigt sind. Diese entstehen prozessbedingt und sind jedenfalls zu minimieren und können aus Ressourcensichtweise nicht als Substitut für Primärmaterial verstanden werden.

### 4. Diskussion und Ausblick

Aufgrund der derzeitigen Prognosen ist zu erwarten, dass der Al-Konsum, wenn auch auf einem moderaten Niveau, weiter zunehmen wird. Vor allem im Transportbereich ist der prognostizierte Al-Einsatz durchaus vorsichtig zu betrachten, da hier eine deutliche Konkurrenz mit anderen Materialien (z.B. Verbundwerkstoffe, Hochleistungsstähle) besteht und eine klare Werkstofftendenz bisher nicht erkennbar ist. Die Importabhängigkeit

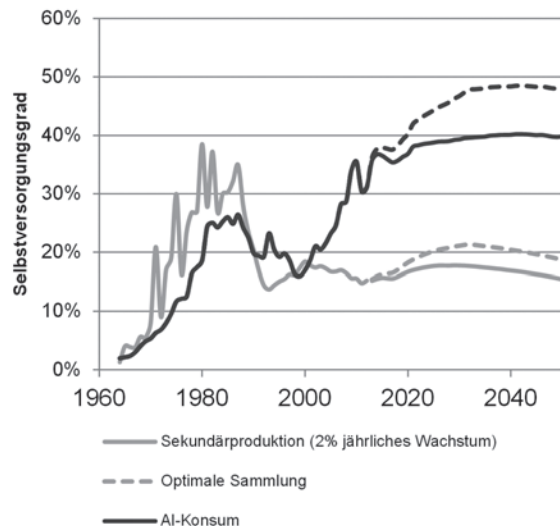


Abb. 6. Berechneter Selbstversorgungsgrad der österreichischen Al-Industrie, sowie theoretischer Selbstversorgungsgrad bezogen auf den nationalen Konsum

Fig. 6. Calculated self-supply with respect to industrial Al-demand as well as theoretical self-supply with respect to national final Al-demand

wird unter den getroffenen Wachstumsannahmen durch die zusätzlich generierten Schrottmengen wenig beeinflusst werden, wobei hier das jährliche Produktionswachstum eine kritische Größe ist. Betrachtet man die im Konsum verbrauchte Al-Menge, so ist ein leichter Anstieg der Selbstversorgung auf 40% zu erwarten. Verbesserte Recyclingmaßnahmen sind in Hinblick auf den jeweils notwendigen Aufwand jedenfalls in Bezug auf ihr (beschränktes) Potenzial zu betrachten.

#### 4.1. Qualitative Betrachtung von Al-Flüssen

Für zielgerichtete Prognosen über das zukünftige Potenzial von Sekundärrohstoffen ist es notwendig, qualitative Aspekte von Al-Legierungen in das dynamische Stoffflussmodell zu integrieren. Dies kann sich zum einen auf externe Kontamination beziehen (z.B. organische Verunreinigungen auf Schrotten) welche prozesstechnisch schwierig zu handhaben sind [20], oder auch auf die Legierungselemente in den verschiedenen Legierungsgruppen. Aus werkstofflicher Sicht ist Al grundsätzlich uneingeschränkt rezyklierbar, jedoch kann durch geringe Toleranzen gegenüber bestimmten, legierungsspezifischen Legierungselementen (speziell bei Knetlegierungen) der Einsatz von Schrotten potenziell limitiert sein bzw. eine Zugabe von Primäraluminium erfordern. Um den Einsatz von Primäraluminium auf ein Minimum zu beschränken, wären somit möglichst definierte, reine und homogene Schrottqualitäten wünschenswert. Ein Primäraluminiumanteil von lediglich 5% in Sekundäraluminium erhöht die enthaltene graue Energie um das nahezu Doppelte [21].

#### 4.2. Datenbedarf

Eine durchgängige Implementierung von Qualitätsaspekten erfordert jedoch eine Datengrundlage, wie sie derzeit auf nationaler Ebene nicht verfügbar ist. Charakteristika der Materialqualitäten werden derzeit weder in nationalen Produktionsstatistiken noch in Außenhandelsstatistiken bzw. von Fachverbänden und Interessenvertretungen dokumentiert. Während eine Sammlung von Qualitätsdaten im Rahmen der Produktionsstatistiken möglich erscheint, wird die Erfassung von Daten im Außenhandel auf Grund der großen Anzahl an Klassifizierungs-codes und der Vielfalt der darin enthaltenen Waren kurzfristig kaum reali-

sierbar sein. Alternativ dazu könnten in einem ersten Ansatz, basierend auf Expertenwissen aus den einzelnen Fachbereichen, modellhaft die eingesetzten Qualitäten für die jeweiligen Nutzungssektoren definiert werden. Hier sind vor allem der Gebäudesektor sowie der Maschinenbausektor und der Bereich der elektrischen Anlagen zu erwähnen, wo derzeit kaum Daten über die national eingesetzten Al-Qualitäten verfügbar sind. Anhand einer solch empirisch gewonnen Datengrundlage, ist es geplant anhand des bestehenden Modells auch Qualitätsaspekte abzubilden. Für zuverlässigere Berechnungen wäre aber jedenfalls eine Erhebung und Dokumentation von Materialqualitäten im Zuge der derzeit geführten Statistiken notwendig.

#### 5. Literatur

- [1] Schlesinger ME (2014) Aluminium recycling second edition. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL
- [2] Hirsch J (2011) Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design Materials Transactions 52:7
- [3] Recalde K, Wang J, Graedel TE (2008) Aluminium in-use stocks in the state of Connecticut Resources, Conservation and Recycling 52:1271-1282 doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.006
- [4] EAA (2013) Sustainable development indicators for the aluminium industry in Europe. European Aluminium Association, Brussels
- [5] Worldsteel (2015) Annual steel production 1980–2013. Worldsteel Association, Brussels
- [6] International Iron and Steel Institute (1978) A handbook of world steel statistics. International Iron and Steel Institute Brussels
- [7] World Aluminium (2015) Primary Aluminium Production. The International Aluminium Institute., London
- [8] USGS (2015) Aluminium statistics through 2013. U.S. Geological Survey,
- [9] USGS (2015) Copper statistics through 2013. U.S. Geological Survey,
- [10] Glöser S, Soulier M, Espinoza LT, Faulstich M (2013) Using Dynamic Stock & Flow Models for Global and Regional Material and Substance Flow Analysis in the Field of Industrial Ecology: The Example of a Global Copper Flow Model. Paper presented at the The 31<sup>st</sup> International Conference of the System Dynamics Society Cambridge, Massachusetts USA,
- [11] Bertram M, Martchek KJ, Rombach G (2009) Material Flow Analysis in the Aluminum Industry Journal of Industrial Ecology 13:650-654 doi:10.1111/j.1530-9290.2009.00158.x
- [12] European Aluminium Association (2015) EU Primary aluminium import dependency. <http://www.alueurope.eu/production-eu-primary-aluminium-supply/>. 27.04.2015
- [13] WBMS Metallstatistik – Metal Statistics vol 54-97. World Bureau of Metal Statistics,
- [14] Fachverband der NE-Metallindustrie (2014) Private Kommunikation zur Produktionsstatistik.
- [15] UNEP (2011) Manufacturing- Investing in energy and resource efficiency. United Nations Environment Programme.,
- [16] International Trade Statistics Database (2014) United Nations.
- [17] Melo MT (1999) Statistical analysis of metal scrap generation: the case of aluminium in Germany Resources, Conservation and Recycling 26:91-113 doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00077-9
- [18] Buchner H, Laner D, Rechberger H, Fellner J (2015) Dynamic material flow modelling: an effort to calibrate and validate Aluminium stocks and flows in Austria Environmental Science & Technology 49:8
- [19] Buchner H, Laner D, Rechberger H, Fellner J (2015) Future raw material supply, opportunities and limits of aluminium recycling in Austria (in submission)
- [20] Antrekowitsch H, Paulitsch H, Pirker A Reststoffe aus der Aluminium-Sekundärindustrie. In: Berliner Schlackenkonferenz, Berlin, 2013.
- [21] Cullen JM, Allwood JM (2013) Mapping the Global Flow of Aluminium: From Liquid Aluminium to End-Use Goods Environmental Science & Technology 47:3057-3064 doi:10.1021/es304256s

Dipl.-Ing. Hanno Buchner<sup>1</sup>  
e-mail: [hanno.buchner@tuwien.ac.at](mailto:hanno.buchner@tuwien.ac.at)

Dipl.-Ing. Dr.techn. David Laner<sup>1</sup>  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Rechberger<sup>2</sup>  
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Fellner<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Christian Doppler Labor für Anthropogene Ressourcen

<sup>2</sup>Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/226.2, 1040 Wien