Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

# Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze

## Studie im Auftrag der KfW Bankengruppe

Henning Wilts, Rainer Lucas,
Nadja von Gries, Marthe Zirngiebl

November 2014

## Kontakt zu den Autoren

**Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH**

Forschungsgruppe Stoffströme und Ressourcenmanagement

Henning Wilts

Döppersberg 19

42103 Wuppertal

Tel. +49-202-2492-139

E-mail: henning.wilts@wupperinst.org

# Kurzfassung

Um die Rohstoffversorgung in Deutschland auch langfristig sichern zu können, kommt der Versorgung mit Sekundärrohstoffen eine besondere Bedeutung zu. Recycling verlängert die Reichweite der Primär-Ressourcen und verbreitert die Versorgungsbasis der deutschen Volkswirtschaft. Die geopolitische Abhängigkeit von wenigen Förderländern/-Firmen wird verringert. Die Versorgung durch Recyclingmaterialien trägt vor allem in den Metallmärkten dazu bei, das Versorgungsrisiko aus primärer Produktion zu reduzieren und die Metallpreis-Volatilität zu dämpfen. Gleichzeitig trägt das Recycling in erheblichem Maße zum Klima- und Umweltschutz bei. Ziel dieser Studie ist es, einen aktuellen Überblick über den Stand der Recyclingwirtschaft in Deutschland zu geben. Der Fokus liegt dabei vor allem auf den Marktprozessen, die bereits heute ökonomische Anreize zur Schließung von Stoffkreisläufen geben, bzw. auf spezifischen Hemmnissen, die genau solchen Entwicklungen im Wege stehen.

Lange stand die sichere und umweltfreundliche Entsorgung im Fokus der deutschen Abfallwirtschaft. Stoffliche und thermische Verwertung dienten zu Beginn vor allem der Reduktion der Restabfallmengen angesichts befürchteter Entsorgungsnotstände. Die Regulierung durch die Abfallgesetzgebung ist auch immer noch an den Hauptmassesträmen orientiert, sie vernachlässigt insgesamt die Problematik der dissipativen Verluste im Bereich der Edel- und Sondermetalle. Mittlerweile hat sich die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen durch Recycling von Abfällen jedoch zu einem extrem dynamischen Wirtschaftsbereich entwickelt: Nach Untersuchungen des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln ist die Sekundärrohstoffbranche der wachstumsstärkste Wirtschaftssektor in Deutschland[1]. Der Umsatz konnte zwischen 1995 und 2009 um 520 % gesteigert werden, der Produktionswert der Sekundärrohstoffe lag 2010 bei ca. 10 Mrd. Euro.

Für einige Rohstoffe wie Glas oder Papier existieren mittlerweile nahezu geschlossene Stoffkreisläufe, die deutlich zur Senkung des Primärrohstoffbedarfs der deutschen Industrie beitragen. In vielen Fällen, wie etwa für Elektro- und Elektronikschrott, fehlen jedoch geeignete Systeme zur Sammlung und hochwertigen Verwertung der enthaltenen Metalle und Kunststoffe; Prozesse eines Downcyclings – einer ineffizienten Nutzung der stofflichen Eigenschaften von Abfällen – sind eher die Regel als die Ausnahme. Speziell für kritische Rohstoffe sind die Rückgewinnungsquoten sehr niedrig. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Recyclingraten bei Produkt- und Produktionsabfällen sowie die Substitutionsraten von Primärrohstoffen durch Recycling für ausgewählte Technologiemetalle im Überblick. Die Übersicht verdeutlicht die enorme Bandbreite in den Recyclingraten, die sich bei den verschiedenen Metallen ergeben.

[1] Hüther 2010

**Recyclingraten ausgewählter Technologiemetalle, Angaben in Prozent**

| Metall | Recyclingrate der Post Consumer Abfälle | Materialverluste bei der Produktherstellung | Zusammensetzung der Sekundärrohstoffe | | Substitution von Primärrohstoffen |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Produktionsabfall | Post Consumer Abfall | |
| **Gold** | 30 | 2 – 5 | < 20 | > 80 | 29 – 31 |
| | | | | | 56 |
| **Silber** | 30 – 50 | 0[2] | < 20 | > 80 | 20 – 32 |
| **Palladium** | 30 | 0 | < 20 | > 80 | 50 |
| **Platin** | 30 | Keine Angaben | < 20 | > 80 | 50 |
| **Indium** | 0 | 15[3] | 99 | 1 | 25 – 50 |
| **Tantal** | < 1 | Keine Angaben | 90 – 99 | 1 - 10 | 10 – 25 |
| **Yttrium** | 0 | Keine Angaben | 0 | | 0 |
| **Neodym** | < 1 | 50 | Keine Angaben | | 1 – 10 |

Quelle: siehe Metallbeschreibungen in Kapitel 2.3.3. Bezug: graue Hinterlegung = global, keine Hinterlegung = Deutschland

Hemmnisse

Angesichts steigender Preise für Primärrohstoffe sollten Unternehmen eigentlich über ausreichende ökonomische Anreize verfügen, soweit wie möglich auf billigere Sekundärrohstoffe auszuweichen. Allerdings weisen Recyclingmärkte eine Reihe von Besonderheiten auf, die das Erreichen eines solchen effizienten Marktgleichgewichts unwahrscheinlich erscheinen lassen; die OECD spricht von systematischem Marktversagen[4]. Die spezifischen Abfallströme zeichnen sich dabei durch jeweils spezifische Hemmnisse aus, für die spezifische Instrumente entwickelt werden müssen, um die Kreislaufführung der jeweils enthaltenen Wertstoffe zu optimieren. Die Erfahrungen für die verschiedenen Abfallströme zeigen zudem, dass technische Innovationen wie im Bereich der Sortiertechnologie wichtige Impulse für das Recycling liefern können, ohne die entsprechenden institutionellen Rahmenbedingungen jedoch auch zu gegenläufigen Effekten führen können, wenn beispielsweise nur noch die rentabelsten Fraktionen aussortiert und die verbleibenden Reste ausschließlich thermisch verwertet werden. Folgende Hemmnisse wurden im Rahmen der Studie detailliert betrachtet:

**Marktmacht:** Ein im Abfallbereich immer wieder anzutreffendes Problem ist die Existenz oligopol- bis monopolartiger Strukturen, die sich negativ auf die Entwicklung von Recyclingmärkten auswirken. Angesichts der hohen Kapitalintensität und hoher Anteile an „sunk costs“ abfallwirtschaftlicher Infrastrukturen entstehen vor allem in der Abfallbehandlung häufig na-

[2] Ohne den Anwendungsbereich Fotografie
[3] Indium in Form von ITO bei der Flachbildschirmherstellung
[4] OECD 2006, S. 166

türliche Monopole, die zu überhöhten Preisniveaus in Verbindung mit segmentierten Märkten und Preisdiskriminierung führen[5].

**Informatorische Defizite und Transaktionskosten**: Im Gegensatz zu Primärrohstoffen ist die Qualität von Sekundärrohstoffen deutlich schwieriger zu beurteilen. Bereits geringfügige Veränderungen im Reinheitsgrad können aus Abfällen mit einem positiven Preis Sonderabfälle werden lassen, die mit sehr hohen Kosten entsorgt werden müssen (dies ist vor allem bei Kontaminierungen mit gefährlichen Abfällen der Fall). Diese Art von Informationen ist in der Regel asymmetrisch zwischen den Akteuren verteilt. Für die informierte Anbieterseite bestehen massive ökonomische Anreize, gegenüber dem Abnehmer die tatsächliche Qualität der Abfälle zu positiv darzustellen. Der Käufer kann diese Angaben entweder gar nicht oder oft nur zu prohibitiv hohen Kosten überprüfen.

**Rechtliche und institutionelle Hemmnisse**: Betrachtet man die deutsche Abfallwirtschaft, so hat sich in vergangenen Jahrzehnten die stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen zu einem lukrativen Geschäftsfeld entwickelt. In der Folge ist ein regelrechter „Kampf um den Müll“ entstanden, die Folgen zeigen sich in Deutschland u.a. im Problem der Überkapazitäten in der Abfallverbrennung. Die Gesamtkapazität der Müllverbrennung liegt nach allgemeiner Einschätzung zur Zeit deutlich über dem tatsächlichen Bedarf, was auch auf unkoordinierte Investitionen nach Ende der Übergangsfrist der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) und parallele Entwicklungen im Bereich der privat betriebenen Ersatzbrennstoff-Anlagen zurückzuführen ist: „Überkapazitäten bei den thermischen Abfallbehandlungsanlagen haben dazu beigetragen (...), dass den Recyclingunternehmen spätestens mit Ausbruch der Wirtschaftskrise der notwendige Abfall für eine stoffliche Verwertung fehlt“[6]. Hinzu kommt für einzelne Abfallströme wie Elektroaltgeräte, Altautos oder Kunststoffabfälle ein signifikanter Abfluss von Stoffströmen ins Ausland. Auch Unsicherheiten über die weitere Entwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen wie die angekündigte Einführung eines Wertstoffgesetzes führen dazu, dass die Kreislaufwirtschaft von den Leitmärkten der Umwelttechnik in Deutschland den mit Abstand niedrigsten Anteil in Forschung und Entwicklung investiert. Insgesamt wird nach wie vor stark auf etablierte Techniken der thermischen Verwertung gesetzt, das stoffliche Recycling ist in vielen Bereichen ökonomisch nicht wettbewerbsfähig (sehr deutlich beispielsweise im Bereich der Kunststoffe).

Optionen

Basierend auf den identifizierten Hemmnissen leitet die Studie verschiedene Instrumente und handlungsorientierte Ansätze ab, die zu einer Verbesserung der Kreislaufführung in Deutschland beitragen könnten; dabei kann Deutschland auch von bestehenden Best Practice Ansätzen im Ausland profitieren.

[5] OECD 2006, S. 178
[6] Henkes 2010, S. 24

**Verstärkter Einsatz ökonomischer Instrumente**: Während die Abfallwirtschaft bisher stark durch ordnungsrechtliche Instrumente geprägt ist, geraten vor allem marktbasierte Ansätze in den Fokus, wenn durch die Schließung von Stoffkreisläufen die Effizienz der Ressourcennutzung und damit auch die Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften erhöht werden soll. Mögliche Ansatzpunkte wären u.a. verursachergerechte Abfallgebühren („pay as you throw"), Steuern auf Primärmaterialien oder der verstärkte Einsatz von Pfandsystemen.

**Maßnahmen zur verstärkten Integration von Abfallwirtschaft und Produktionssektor:** Die Abstimmung zwischen Abfallwirtschaft als Lieferant von Sekundärrohstoffen und Industrie bezüglich Stoffspezifikationen und -qualitäten findet bisher nur sehr unsystematisch statt, was im Endeffekt häufig zu einer mangelhaften Ausnutzung von Materialeigenschaften in Form des „Downcyclings" führt. Speziell für Technologiemetalle ist ein zunehmender dissipativer Einsatz zu beobachten, der in der Tendenz dazu führt, dass ein Recycling weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll ist (z.B. Gallium in LEDs). Hier bedarf es für die Zukunft klarerer Vorgaben an die Hersteller, ressourcenrelevante Rohstoffe für eine gezielte Demontage zugänglich einzusetzen, um Abfallfraktionen mit ausreichenden Gehalten dieser Stoffe gewinnen zu können.

**Urban Mining:** Unter dem Stichwort des „urban mining" werden auch Rohstoffe in Infrastrukturen wie Gebäuden oder Straßen zunehmend zu ausbeutungswürdigen Lagerstätten. Der Bereich der Abbruchabfälle – mengenmäßig der mit Abstand relevanteste Abfallstrom in Deutschland – weist zwar seit langem sehr hohe Verwertungsquoten auf, diese resultieren jedoch häufig aus Verwendungen als Bergversatz oder in Schallschutzwällen. Eine gezielte Nutzung der enthaltenen Rohstoffe weist noch erhebliche Potenziale auf, sowohl in der gezielten Erfassung von Stoffen wie Kupfer in Leitungen als auch bei der Kreislaufführung von Baustoffen, z.B. als Recyclingbeton[7]. Eine gezielte Nutzung dieser Rohstoffe setzt jedoch eine systematische Erfassung voraus, die angesichts der langen Nutzungszeiträume mit wiederholten Wechseln der Besitzer und/oder Nutzer und den damit verbundenen Informationsverlusten die Einrichtung öffentlicher Rohstoffkataster sinnvoll erscheinen lässt.

**Internationale Vereinbarungen zum Rohstoffrecycling:** Angesichts der nach wie vor hohen Relevanz von exportierten Gebrauchtgütern und dem damit verbundenen Abfluss von Rohstoffen, die damit einerseits nicht mehr direkt für die Versorgung der deutschen Industrie zur Verfügung stehen und andererseits auch insgesamt wegen fehlender Recyclinginfrastrukturen in den Abnehmerländern verloren zu gehen drohen, sollte die zukünftige Planung von Sammlungs- und Verwertungsstrukturen über den nationalen Rahmen hinaus erweitert werden. Die aktuelle Rohstoffstrategie der Bundesregierung begrenzt „bilaterale Rohstoffpartnerschaften"[8] bisher auf rohstoffproduzierende Länder, um darüber den Zugriff auf Rohstoffe zu sichern und gleichzeitig einen Beitrag zur Entwicklungsarbeit zu leisten. Dieser Ansatz sollte zum einen auch auf solche Länder ausgeweitet werden, in denen die Nutzungsphase von rohstoffhaltigen Produkten endet, um damit den Input hochwertiger Verwertungs-

[7] Vgl. Knappe 2009, S. 35f.
[8] BMWi 2010

anlagen zu sichern. Zum anderen sollten dabei auch im wesentlich stärkeren Maße als bisher sowohl die produzierende Industrie als auch die Recyclingwirtschaft einbezogen werden. Einen möglichen Umsetzungsansatz bietet das Instrument des Metall-Covenants, bei dem sich Export- und Importland sowie Hersteller- und Recyclingindustrie untereinander auf langfristige Zielvorgaben für die Rückgewinnung von Rohstoffen einigen[9].

**Green Tech Funds:** Als ein wesentliches Hemmnis für innovative Recyclingtechnologien und Business-Modelle erweisen sich häufig Finanzierungs-Schwierigkeiten bei der Entwicklung zur Marktreife und der frühen Markteinführungsphase. Ein speziell für Förderbanken interessanter Ansatz könnte daher sein, einen technologieoffenen Fonds zu etablieren, in dem spezifische Kriterien zur Rohstoff- oder Ressourceneffizienz festgelegt werden. Für einen solchen Fonds könnte auf sehr gute Erfahrungen im Rahmen des österreichischen Förderprojekts „Fabrik der Zukunft“ zurückgegriffen werden, in dem eine ganze Reihe erfolgversprechender Innovationen im Bereich der Rohstoffeffizienz angestoßen wurden. Speziell mit Blick auf die Recyclingwirtschaft ist vor allem das „Waste & Resources Action Programme“ (WRAP) in Großbritannien zu nennen. WRAP versteht sich als Entwicklungsagentur für Partnerschaften im Bereich der Recyclingwirtschaft und Ressourceneffizienz. In Kooperation mit der Industrie soll die öffentliche Förderung möglichst effizient in innovative Ansätze investiert werden und so private Investitionen nach sich ziehen. Mit einer jährlichen öffentlichen Unterstützung von unter 100 Mio. Euro ist es WRAP gelungen, durch private Kofinanzierung und eine sehr sorgfältige Projektauswahl allein zwischen 2008 und 2011 ca. 2,5 Mrd. Euro an Investitionen mit entsprechenden volkswirtschaftlichen Benefits zu initiieren.

[9] Vgl. Lucas/ Wilts 2011

# Executive summary

In order to ensure supply of raw materials in the long-term, a particular focus has to be set on the supply of raw secondary materials. Recycling extends the reach of primary resources and widens the supply base of the German economy. Also the geopolitical dependence on few producing countries/companies decreases. Especially in metal markets, supply by recycled materials contributes to reducing the risk of shortages from primary production, just as reducing the volatility of metal prices. At the same time, recycling makes a significant contribution to climate and environmental protection. The objective of this study is to provide an overview on the current state of the recycling economy in Germany. It focuses on market processes which today already provide economic incentives to closing material cycles, respectively on specific obstacles which prevent such developments.

For a long time, safe and environmentally friendly disposal was paramount in German waste management. Initially, material and thermal recovery mainly served for the reduction of residual waste in the face of feared disposal crises. Regulation through waste legislation still focuses on main material flows, whereas it widely neglects the difficulty of dissipative losses in the area of precious and special metals. By now, the provision of secondary raw materials through waste recycling has grown into an extremely dynamic economic sector: According to surveys by the Cologne Institute for Economic Research, the secondary raw material sector is currently the fastest growing economic sector in Germany[10]. Its sales have increased by 520 % between 1995 and 2009, while the production value of secondary materials reached approximately Euro 10 billion in 2010.

Meanwhile, material cycles for several raw materials like glass and paper are nearly closed, making an important contribution to the decrease in primary raw material needs of the German industry. But in most cases, such as waste electric and electronic devices, suitable systems of collection and high-quality processing of contained metals and plastics are missing; processes of downcycling – an inefficient use of the material properties of waste – are the norm rather than the exception. Especially for critical raw materials, rates of recovery are appallingly low. The table below gives an overview of the recycling rates of post consumer und production wastes, as well as the substitution rates of primary raw materials by recycling for selected technology metals. The summary illustrates the enormous range in recycling rates resulting for the different metals.

[10] Hüther 2010

**Recycling rates of selected technology metals, figures in percentage**

| Metal | Recycling rate of post consumer wastes | Material losses in product manufacturing | Composition of secondary raw materials | | Substitution of primary raw materials |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Production waste | Post consumer waste | |
| **Gold** | 30 | 2 – 5 | < 20 | > 80 | 29 – 31 |
| | | | | | 56 |
| **Silver** | 30 – 50 | 0[11] | < 20 | > 80 | 20 – 32 |
| **Palladium** | 30 | 0 | < 20 | > 80 | 50 |
| **Platinum** | 30 | no data | < 20 | > 80 | 50 |
| **Indium** | 0 | 15[12] | 99 | 1 | 25 – 50 |
| **Tantalum** | < 1 | no data | 90 – 99 | 1 - 10 | 10 – 25 |
| **Yttrium** | 0 | no data | 0 | | 0 |
| **Neodymium** | < 1 | 50 | no data | | 1 – 10 |

Source: see metal descriptions in chapter 2.3.3. Reference: grey background = global, no background = Germany

Obstacles

In view of rising prices for primary raw materials, businesses should virtually be faced with sufficient economic incentives to switch to more affordable secondary materials as far as possible. However, recycling markets include a number of characteristics which make it appear unlikely to attain such an efficient market balance; the OECD speaks of systematic market failure[13]. Specific waste streams hereby feature specific obstacles, which require the development of specific instruments in order to optimize recirculation of the respectively contained recyclable material. Experiences with the various waste streams show moreover that technical innovations, as in the area of sorting technology, can provide important impulses, without the according institutional framework conditions it can also cause opposite effects, if, for example, only the most profitable fractions are separated out while remaining residues are recycled thermically only. The following obstacles have been analysed in detail throughout the study:

**Market power:** A repeatedly occurring problem in the waste area is the existence of oligopoly to monopoly-type structures which affect the development of recycling markets negatively. In the face of a high level of capital intensity and high units of “sunk costs“ in waste economic infrastructures, especially in waste treatment natural monopolies emerge frequently, which lead to exorbitant price levels in conjunction with segmented markets and price discrimination[14].

[11] Without photography as field of application.
[12] Indium in the form of ITO in flat screen production
[13] OECD 2006, p. 166
[14] OECD 2006, p. 178

**Informational deficits and transaction costs**: Unlike primary raw materials, the quality of secondary raw materials is much harder to determine. Even slight alterations concerning the degree of purity can turn waste with a positive price into special waste, which has to be disposed extremely costly (especially in the case of contamination of the waste with hazardous substances). The kind of information required is usually distributed asymmetrically between the actors. In terms of the informed provider, there are massive economic incentives to put a positive spin on the actual quality of the waste towards the customer. Often purchasers have no possibility to examine these statements, except at prohibitively high costs.

**Legal and institutional obstacles**: Having a closer look at the German waste management sector, in the past decades the material and thermal utilisation of waste has developed into a lucrative business area. As a result, a veritable ”battle for waste” has risen. Its consequences become visible, among other things, in the problem of overcapacity in waste incineration. The overall capacity of waste incineration is generally agreed to be in obvious excess of actual demand at present, which can also be traced back to uncoordinated investments after the end of the TASi (Technical Guidelines for the Disposal of Municipal Solid Waste) transition period just as parallel developments in the area of substitute fuels: “Overcapacities at thermal waste treatment plants have contributed (...), to the fact that recycling companies, at least since the outbreak of the economic crisis, are lacking the necessary waste for material recovery“[15]. Furthermore, there is a significant outflow of individual waste streams, such as used electrical and electronic equipment, scrap cars or plastic waste, to foreign countries. Uncertainties concerning the further development of legal framework conditions, such as the announced introduction of a law on recyclable materials, also result in a situation in which the circle economy, out of the lead markets for environmental technology, invests by far the lowest share in research and development. Altogether, established techniques of thermal recovery are still relied upon heavily, whereas material recycling is economically uncompetitive in many areas (very clearly e.g. in the area of plastics).

Options for action

The obstacles identified by this study provide the basis for the derivation of various instruments and action-oriented approaches which potentially contribute to an improvement of recirculation. In the course of this, Germany can also benefit from existing best-practice approaches in other countries.

**Greater use of economic instruments**: While up to now waste management has been primarily shaped by regulatory instruments, sights are set especially on market-based approaches if the intention is to increase the efficiency of resource use and thus the competitiveness of economies through the closing of material cycles. Possible entry points could be, among others, **causer-oriented waste fees (“pay as you throw“), taxes on primary materials** or the expanded use of **deposit systems.**

[15] Henkes 2010, p. 24

**Measures to strengthen the integration of waste management and production sector:** Coordination between waste management as supplier of secondary raw materials and industry concerning material specifications and qualities takes place very unsystematically up to now, what in the end often leads to a deficient utilisation of material properties in the form of "downcycling". An increasingly dissipative structure of use can be observed particularly for technology metals, tending to make recycling neither economically nor environmentally sound (e.g. Gallium in LED's). Clearer guidance for producers is needed here in the future, to employ resource-relevant raw materials with access for selective dismantling in order to attain waste fractions with sufficient contents of these particular materials.

**Urban Mining:** Under the heading of "urban mining", materials from infrastructures increasingly become deposits worthy of explotation as well. While the area of demolition waste - by far the most relevant waste stream in Germany quantitatively – has shown high utilization rates for a long time, these often result from its utilisation as backfilling material or in noise control walls. High potentials remain in a targeted use of the contained raw materials both in the targeted recording of materials such as copper in transmission lines and in the recirculation of construction materials, e.g. as recycled concrete[16]. Still, a targeted use of these materials requires systematic recording. Regarding long periods of use with multiple changes of owner and/or user and the information loss involved, the installation of public material cadasters seems to be a useful idea.

**International agreements on raw-material recycling:** Used exported goods are still of major relevance. They are associated with an outflow of raw materials which, on the one hand are no longer available for the supply of the German industry afterwards, and, on the other hand generally are at risk of being lost due to non-existent recycling infrastructures in customer countries. Considering this, future planning of collection and recovery structures should to be extended beyond the national scope. The current Federal Government's Resources Strategy has limited „bilateral resource partnerships[17] to countries producing raw materials so far, in order to ensure access to raw materials and make a contribution to development work at the same time. This approach should be extended to countries, in which the utilisation phase of material-containing products comes to an end, so that input streams of high-grade treatment facilities are secured. Moreover, both the producing industry and the recycling economy should be included to a greater extent. A possible implementation approach is offered by the Metal-Covenant, in which exporting and importing countries just as producing and recycling industry agree on long-term objectives concerning the recovery of raw materials[18].

**Green Tech Funds:** Financing difficulties during the development to market maturity and the early adoption phase often turn out to be essential obstacles to innovative recycling technologies and business models. An approach of particular interest for promotional banks could

[16] Knappe 2009, p. 35f.
[17] BMWi 2010
[18] Vgl. Lucas/ Wilts 2011

therefore be the establishment of a fund open to all kinds of technologies, in which specific raw material or resource efficiency criteria are determined. In the process of developing such it is possible to refer to very good experiences within the framework of the Austrian promotion project “Fabrik der Zukunft“ (“Factory of the Future”), in which a number of promising innovations in the area of resource efficiency have been initiated. Especially with a view to the recycling economy, the “Waste & Resources Action Programme“ (WRAP) in Great Britain has to be mentioned. WRAP considers itself as a development agency for partnerships in the area of recycling economy and resource efficiency. In collaboration with the industry, public support is aimed to be invested in innovative approaches as efficiently as possible in order to entail private investments. With an annual public support of less than Euro 100 million, WRAP managed to initiate Euro 2.5 billion of investments with corresponding economic benefits between 2008 and 2011 by means of private co-financing and careful project selection.

# Inhalt

I. Abbildungsverzeichnis ..... XV

II. Tabellenverzeichnis ..... XVI

1 Einleitung ..... 1

2 Überblick über den Status quo der Abfallwirtschaft und des Recyclings in Deutschland . 3

2.1 Abfallaufkommen ..... 3

2.2 Abfallbehandlung ..... 8

2.3 Recyclingquoten für einzelne Rohstoffe ..... 11

2.3.1 Recycling von Kunststoffen ..... 12

2.3.2 Recycling von Massemetallen ..... 13

2.3.3 Recycling von Edel- und Sondermetallen (Technologiemetallen) ..... 15

2.4 Im- und Exporte von Abfällen ..... 21

3 Märkte für Sekundärrohstoffe ..... 25

3.1 Marktentwicklung ..... 25

3.2 Preisentwicklungen ..... 27

3.3 Marktakteure ..... 31

4 Identifizierung weiterer Recyclingpotenziale in Deutschland ..... 38

5 Beschreibung wesentlicher Hemmnisse für die Erschließung dieser Recyclingpotenziale ..... 44

5.1 Marktmacht ..... 45

5.2 Informatorische Defizite und entstehende Transaktionskosten ..... 47

5.2.1 Angebotsseite: Abfallqualität ..... 47

5.2.2 Nachfrageseite ..... 48

5.3 Rechtliche und institutionelle Hemmnisse ..... 49

5.4 Spezifische Hemmnisse in der Kreislaufführung von Technologiemetallen ..... 51

6 Optionen ..... 57

6.1 Optimierung der Kreislaufführung im Inland ..... 57

6.1.1 Stärkung des Wettbewerbs durch ökonomische Instrumente ..... 57

6.1.2 Entsorgung vs. Verwertung ..... 60

6.1.3 Integration von Abfallwirtschaft und Produktionssektor stärken ..... 60

6.1.4 Urban Mining: Verbesserung der informatorischen Grundlagen für die Erfassung sekundärer Lagerstätten ..... 61

6.1.5 Konkrete Optionen mit Blick auf den Export von Gebrauchtgütern ..... 62

6.2 Innovative Ansätze im Ausland ..... 64

6.2.1 Rückgewinnung von Massenmetallen und Technologiemetallen aus Altfahrzeugen in den Niederlanden ..... 64

6.2.2 Rückgewinnung von Technologiemetallen aus Elektrokleingeräten in Schweden ..... 65

6.2.3 Kreislaufführung von Baustoffen in Zürich ..... 66

6.3 Green Tech Funds ..... 67

7 Literatur ..... 71

# I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abfallaufkommen in Deutschland 1999 bis 2011, in Mio. t ..... 5

Abbildung 2: Entwicklung der Abfallintensität in Deutschland, 2000-2011 ..... 7

Abbildung 3: Beseitigung und Verwertung von Abfällen im Jahr 2011 ..... 9

Abbildung 4: Kunststoffabfälle zur Verwertung und Beseitigung nach Herkunft ..... 12

Abbildung 5: Metallrecycling in Deutschland - eine wichtige Rohstoffquelle ..... 14

Abbildung 6: Grenzüberschreitende Abfallverbringung (in Mio. t) ..... 23

Abbildung 7: Kunststoffabfall-Exporte aus der EU 27 nach Exportland, 2000-2009 ..... 24

Abbildung 8: Anteile des Sekundärrohstoffeinsatzes in der deutschen Industrie an den Rohstoffen insgesamt (ohne Mineralöl, Uran, Kohle und Gas), in % ..... 25

Abbildung 9: Marktprognosen Kreislaufwirtschaft 2011 bis 2025, in Mrd. Euro ..... 26

Abbildung 10: McKinsey Global Institute Rohstoffpreisindex (Jahre 1999-2001 = 100) ..... 28

Abbildung 11: Metallpreisentwicklungen ..... 29

Abbildung 12: Kaufpreisentwicklung für Kunststoffe (HD-PE und PET), Primär und Sekundär ..... 30

Abbildung 13: Preisbildungsprozesse auf Primär- und Sekundärmärkten für Kunststoffe ..... 31

Abbildung 14: Durchschnittliche FuE-Quoten nach Leitmärkten in Deutschland ..... 51

Abbildung 15: Verbleib der gelöschten Pkw in Deutschland 2008 ..... 54

Abbildung 16: Recyclingeffizienz entlang der Gesamtkette: Beispiel Mobiltelefone ..... 55

Abbildung 17: Venture Capital im Cleantech-Sektor ..... 68

# II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland, 2010 ..... 10

Tabelle 2: Herausforderungen an eine integrierte Kupfer-Metallurgie..... 15

Tabelle 3: Recyclingraten ausgewählter Technologiemetalle, Angaben in Prozent..... 21

Tabelle 4: Übersicht über Exportbeschränkungen von Abfällen ..... 22

Tabelle 5: Übersicht zur Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Wertschöpfungs-
stufen der Kreislaufwirtschaft ..... 27

Tabelle 6: Marktversagenstatbestände im Recyclingmarkt..... 45

Tabelle 7: Kosten im Bereich Verpackungsabfälle vor und nach Marktliberalisierung..... 47

Tabelle 8: Erfassung von Elektroaltgeräten in Deutschland 2008..... 52

Tabelle 9: Bestand metallischer Rohstoffe in Infrastruktursystemen in Deutschland..... 62

Tabelle 10: Durch ARN-zertifizierte Betriebe demontierte Altautos ..... 65

# 1 Einleitung

Der in Europa und Deutschland erarbeitete wirtschaftliche Wohlstand und unsere Lebensqualität hängen maßgeblich von der Versorgung mit Rohstoffen ab. Im Zuge der rohstoffpolitischen Diskussion wurde in Deutschland im Jahr 2010 die Deutsche Rohstoffstrategie entwickelt und 2012 mit dem Beschluss des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms der Rahmen für einen nachhaltigen Rohstoffumgang geschaffen. Auf europäischer Ebene wurde die Bedeutung der Rohstoffversorgung ebenfalls erkannt: „Ressourcenschonendes Europa“ ist eine der sieben Leitinitiativen für nachhaltiges Wachstum im Rahmen der Strategie 2020. Angesichts der weltweit steigenden Rohstoffnachfrage wird eine effizientere Ressourcennutzung ein entscheidender Faktor der Wachstums- und Beschäftigungspolitik in Europa sein. „Sie wird wirtschaftliche Perspektiven eröffnen, die Produktivität steigern, die Kosten drosseln und die Wettbewerbsfähigkeit stärken helfen.[19]“

Um die Rohstoffversorgung in Deutschland auch langfristig sichern zu können, kommt der Versorgung mit Sekundärrohstoffen eine besondere Bedeutung zu. Recycling verlängert die Reichweite der Primär-Ressourcen und verbreitert die Versorgungsbasis der deutschen Volkswirtschaft. Die geopolitische Abhängigkeit von wenigen Förderländern/-Firmen wird verringert. Die Versorgung durch Recyclingmaterialien trägt vor allem in den Metallmärkten dazu bei, das Versorgungsrisiko aus primärer Produktion zu reduzieren und die Metallpreis-Volatilität zu dämpfen. Gleichzeitig trägt das Recycling in erheblichem Maße zum Klima- und Umweltschutz bei.

Lange stand die sichere und umweltfreundliche Entsorgung im Fokus der deutschen Abfallwirtschaft, stoffliche und thermische Verwertung dienten zu Beginn vor allem der Reduktion der Restabfallmengen angesichts befürchteter Entsorgungsnotstände. Die Regulierung durch die Abfallgesetzgebung ist auch immer noch an den Hauptmassesträmen orientiert, sie vernachlässigt insgesamt die Problematik der dissipativen Verluste im Bereich der Edel- und Sondermetalle. Mittlerweile hat sich die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen durch Recycling von Abfällen jedoch zu einem extrem dynamischen Wirtschaftsbereich entwickelt: Nach Untersuchungen des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln ist die Sekundärrohstoffbranche der wachstumsstärkste Wirtschaftssektor in Deutschland[20]. Der Umsatz konnte zwischen 1995 und 2009 um 520,3 % gesteigert werden, der Produktionswert der Sekundärrohstoffe lag 2010 bei ca. 10 Mrd. Euro. Für einige Rohstoffe wie Glas oder Papier existieren mittlerweile nahezu geschlossene Stoffkreisläufe, die deutlich zur Senkung des Primärrohstoffbedarfs der deutschen Industrie beitragen. In vielen Fällen wie etwa für Elektro- und Elektronikschrott fehlen jedoch geeignete Systeme zur Sammlung und hochwertigen Verwertung der enthaltenen Metalle und Kunststoffe; Prozesse eines Downcyclings – einer ineffizienten Nutzung der stofflichen Eigenschaften von Abfällen – sind eher die Regel als die Ausnahme.

---

[19] Europäische Kommission 2011, S. 2
[20] Hüther 2010

Speziell für kritische Rohstoffe sind die Rückgewinnungsquoten sehr niedrig. Eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Europäischen Union hat im Rahmen der EU-Rohstoffinitiative den Zugang zu Rohstoffen untersucht. Demnach sind bei 14 Metallen Versorgungsengpässe zu erwarten, weshalb diese als kritische Metalle einzuordnen sind. Insbesondere der wachsende Markt von Umwelttechnologien und der Elektro- und Elektroniksektor sind auf eine Vielzahl dieser Technologiemetalle angewiesen, so dass eine Rohstoffverknappung ein potenzielles Hemmnis für den technologischen Fortschritt darstellt. Bisher wird das Recyclingpotenzial bei weitem nicht ausgeschöpft und durch den dissipativen Einsatz solcher Technologiemetalle erschwert[21]. Darüber hinaus hängt die Recyclingfähigkeit solcher Metalle nicht nur von technischen Lösungen und Rentabilitätsfaktoren ab, sondern von der Realisierung einer insgesamt effizienten Recyclingkette, die von dem schwächsten Glied entlang der Entsorgungskette bestimmt wird[22]. Aktuelle Studien schätzen Sammelmengen von beispielsweisen Computerbildschirmen auf 50 %; Erfassungsraten von Mobiltelefonen bewegen sich nur um etwa 5 %[23].

Ziel dieser Studie ist es, einen aktuellen Überblick über den Stand der Recyclingwirtschaft (stoffliche Verwertung) in Deutschland zu geben. Der Fokus liegt dabei vor allem auf den Marktprozessen, die bereits heute ökonomische Anreize zur Schließung von Stoffkreisläufen geben, bzw. auf spezifischen Hemmnissen, die genau solchen Entwicklungen im Wege stehen.

[21] European Commission 2010
[22] Hagelüken et al. 2011
[23] Buchert et al. 2012

# 2 Überblick über den Status quo der Abfallwirtschaft und des Recyclings in Deutschland

Kapitel 2 beschreibt die Entwicklung des Gesamtabfallaufkommens in Deutschland sowie der wichtigsten Abfallströme und deren Entsorgungswege im In- und Ausland. Mit Blick auf die einzelnen Stoffströme werden Aufkommen und Recyclingquoten für wichtige Massenrohstoffe, die durch große Förder- bzw. Produktionsmengen gekennzeichnet sind, und ausgewählte, von der EU als kritisch[24] klassifizierte, Technologiemetalle dargestellt.

## 2.1 Abfallaufkommen

Grundlage für die Einordnung der Abfälle ist in Deutschland die Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV). Die AVV stellt ein einheitliches Verzeichnis für gefährliche und nicht gefährliche Abfälle dar und dient der Bezeichnung sowie Einstufung von Abfällen nach ihrer Gefährlichkeit. Die verschiedenen Abfallarten werden in dem Verzeichnis vollständig definiert und sind größtenteils herkunftsbezogen gegliedert. Folgende Darstellung gibt einen aggregierten Überblick über die Hauptgruppen und Charakteristiken der Abfälle.

- **Siedlungsabfälle**: Vielzahl von stark unterschiedlichen Abfallarten, komplexe Zusammensetzung der Abfallarten selbst, hohe Werthaltigkeit

- **Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen** (bis 2009: Bergmaterial aus dem Bergbau)

- **Bau- und Abbruchabfälle**: Mengenmäßige Relevanz

- **Übrige Abfälle, insbesondere aus Produktion und Gewerbe** (bis 2009: Abfälle aus Produktion und Gewerbe): Hohe Werthaltigkeit

Mit der Übersicht wird deutlich, dass die ökologische Relevanz je nach Abfallstrom nicht nur mengenmäßig, sondern auch von der Abfallzusammensetzung bestimmt wird. Während Bau- und Abbruchabfälle mehr als 50 % des Gesamtabfallaufkommens ausmachen, sind die Siedlungsabfälle durch die Vielzahl von Abfallarten und die Inhomogenität in ihrer Zusammensetzung gekennzeichnet. Das Siedlungsabfallaufkommen unterteilt sich im Wesentlichen in folgende Abfallströme[25]:

- Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle
- Sperrmüll

[24] Die Beurteilung der Kritikalität der untersuchten Rohstoffgruppen erfolgt anhand folgender Kriterien: Wirtschaftliche Bedeutung, Versorgungsrisiko und ökologische Einschränkungen (European Commission 2010).

[25] Kranert 2010

- Abfälle aus der Biotonne
- Garten- und Parkabfälle biologisch abbaubar
- Glas, Papier, Pappe, Kartonagen
- Leichtverpackungen / Kunststoffe
- Elektronische Geräte
- Sonstiges (Verbunde, Textilien, etc.)

Insbesondere der Einfluss siedlungsspezifischer Faktoren[26] auf die Hausmüllzusammensetzung und die damit verbundene Unwissenheit über das darin enthaltende Schadstoff- als auch Wertstoffpotenzial stellen für den Umgang mit gemischten Siedlungsabfällen eine Herausforderung dar. Daneben erweisen sich Materialzusammensetzungen einzelner Fraktionen selbst, wie etwa der elektronischen Geräte, als äußerst komplex und enthalten eine Vielzahl wertstoffhaltiger Rohstoffe. Das Abfallaufkommen ist daher stets vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Charakteristiken der Abfälle zu bewerten und im Rahmen dieser Studie bei der Schwerpunktsetzung zu berücksichtigen.

Global betrachtet drohen in vielen Ländern der Erde die Müllberge in den Himmel zu wachsen. Weltweit hat die Menge der Siedlungsabfälle im Zeitraum 2004 bis 2008 um ein Drittel zugenommen. Überall gibt es einen klaren Zusammenhang zwischen dem Wohlstand einer Volkswirtschaft und dem Abfallaufkommen: Während in den Entwicklungsländern das Aufkommen an Siedlungsabfällen 200 Kilogramm pro Kopf und Jahr beträgt, liegt dieser Wert im Durchschnitt der EU-27-Länder bei mehr als dem 2,5-fachen. Angesichts des globalen Bevölkerungswachstums und des steigenden Einkommensniveaus in den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern zeichnet sich ab, dass die Müllmenge rund um den Globus weiter zunehmen wird[27].

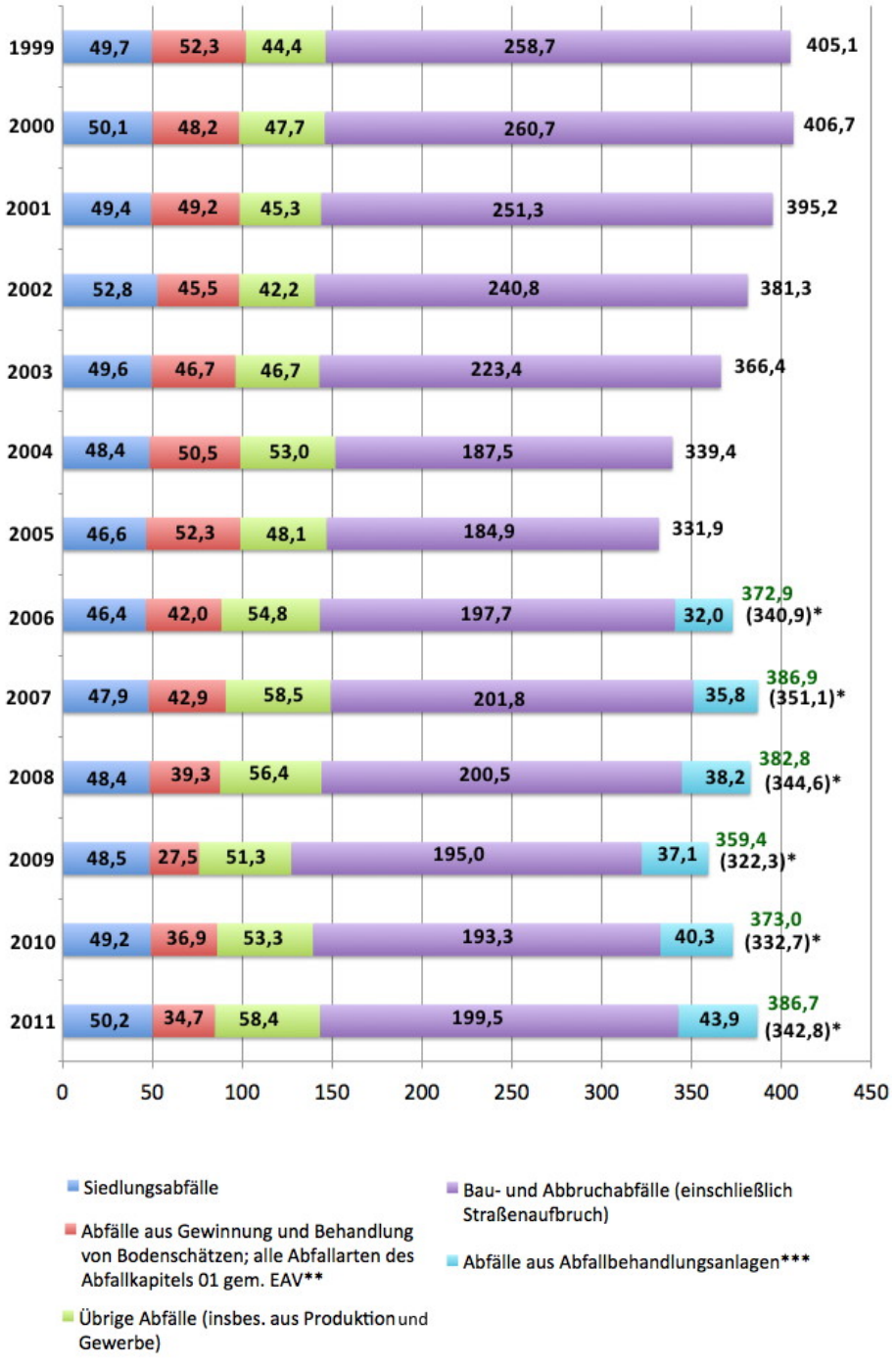
In Deutschland zeigt sich ein etwas differenzierteres Bild: Obwohl Abfälle nach Vorgabe der europäische Abfallhierarchie in erster Linie zu vermeiden sind, fielen im Jahr 2011 insgesamt noch immer 342,8 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle, Abfälle aus der Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen, Siedlungsabfälle und übrige Abfälle (insbesondere aus Produktion und Gewerbe) an, das entspricht rund 4 t pro Kopf und Jahr. Abbildung 1 verdeutlicht die Entwicklung der Abfallmenge und deren Zusammensetzung im Zeitablauf. Das Gesamtabfallaufkommen ist demnach von 406,7 Mio. t im Jahr 2000 deutlich gesunken. Dies ist jedoch nahezu ausschließlich auf einen deutlichen Rückgang im Bereich der Bau- und Abbruchabfälle zurückzuführen, bedingt durch den ökonomisch verursachten Rückgang der Bautätigkeit in Deutschland. Trotzdem stellt dieser Bereich auch 2011 mit 199,5 Mio. t den mengenmäßig

[26] Nach Fripan 2002 nehmen folgende Faktoren Einfluss auf die Hausmüllzusammensetzung: „Fläche und Einwohnerzahl der Gebietskörperschaft, Jahreszeiten, Heizungsart, Behältergröße, Art der Wertstofferfassung (Hol- und Bringsystem), Frequenz und Organisation der Abfuhr, Bemessung und Höhe der Gebühren, Öffentlichkeitsarbeit der Entsorgungsträger, örtliche und regionale Unterschiede in Wirtschaftskraft, Sozialstruktur und Gebietsstruktur (Siedlungsstruktur)“

[27] BMU 2012, S. 112

wichtigsten Abfallstrom in Deutschland dar. Ebenfalls deutlich zurückgegangen sind Abfälle aus dem Bereich Bergbau, von denen 2011 noch immer 34,7 Mio. t angefallen sind.

**Abbildung 1: Abfallaufkommen in Deutschland 1999 bis 2011, in Mio. t**




*Nettoaufkommen; ohne Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen; 2006 erstmals als Bestandteil des Abfallaufkommens erhoben.
**Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen
***Ohne Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (EAV 1908), Abfälle aus der Zubereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch oder industriellem Brauchwasser (EAV 1909), Abfälle aus der Sanierung von Böden und Grundwasser (EAV 1913) und Sekundärabfälle, die als Rohstoffe/ Produkte aus dem Entsorgungsprozess herausgehen.

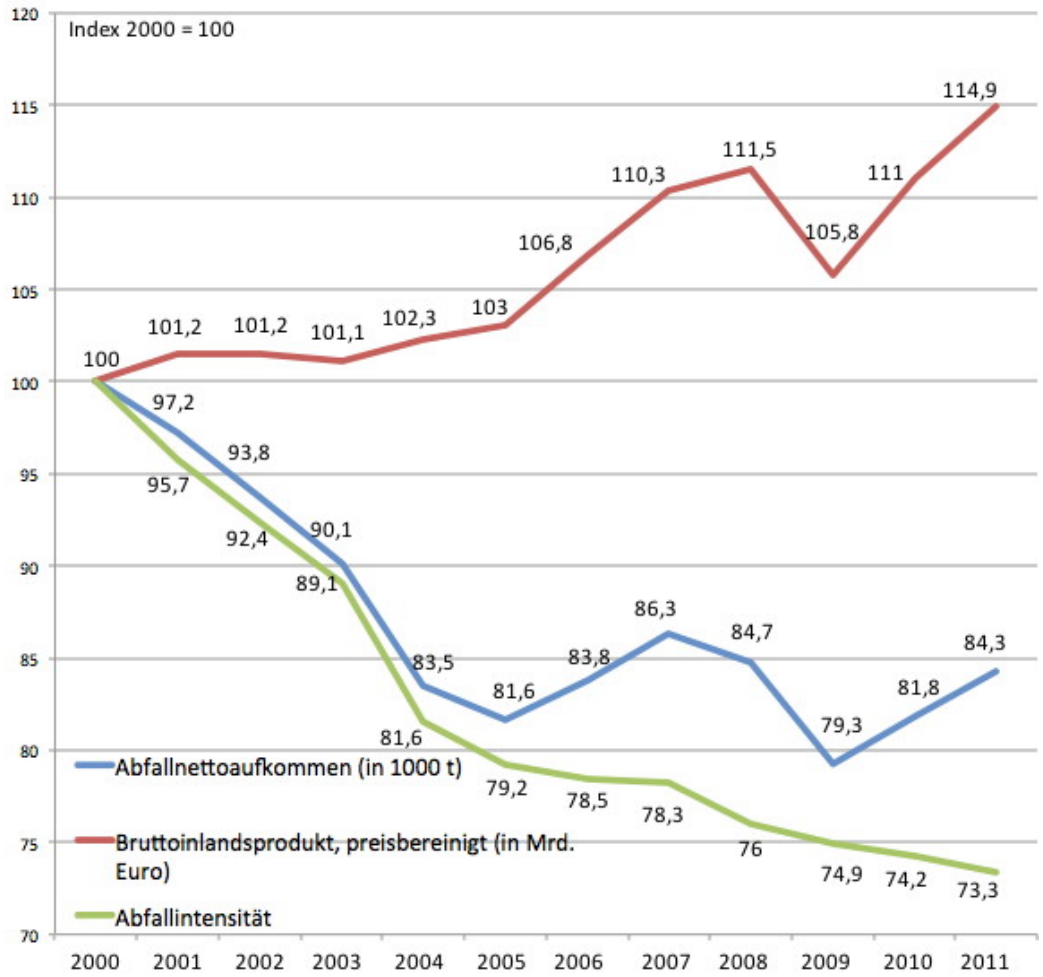
Quelle: eigene Darstellung nach UBA 2011, destatis

Im Fokus der weiteren Betrachtungen dieser Studie stehen Abfälle aus Produktion und Gewerbe sowie der Bereich der Siedlungsabfälle. Im Vergleich zu den zuvor genannten Abfällen zeichnen sie sich durch eine deutlich höhere Werthaltigkeit aus und stehen daher auch im Fokus der Recyclingwirtschaft. Während es sich jedoch bei Produktionsabfällen häufig um sehr homogene Abfälle handelt, sind vor allem Siedlungsabfälle mit dem Problem einer hohen Heterogenität und häufigen Verunreinigungen konfrontiert, wodurch sich hier besondere Herausforderungen für eine hochwertige Verwertung stellen.

Beide Abfallströme sind mit 50,2 Mio. t (Siedlungsabfall) bzw. 58,4 Mio. t (Produktionsabfälle) in 2011 auf einem vergleichbaren Niveau wie 2000, von einer absoluten Vermeidung dieser Abfälle kann daher nach wie vor nicht die Rede sein. Allerdings ist es Deutschland gelungen, die Entstehung von Abfällen von der wirtschaftlichen Entwicklung zu entkoppeln. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Abfallintensität in Deutschland seit 2000, ausgedrückt als Verhältnis von Netto-Abfallaufkommen[28] und inflationsbereinigter Entwicklung des BIP (Basisjahr 2000 = Index 100).

[28] Das Netto-Abfallaufkommen ergibt sich aus der Summe folgender Abfallarten: Bau- und Abbruchabfälle, Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen, Siedlungsabfälle und übrige Abfälle aus Produktion und Gewerbe, Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen zählen nicht dazu. So wird bei der Berechnung des Netto-Abfallaufkommens vom gesamten Input an Abfallentsorgungsanlagen der Output zur Abfallverwertung und Abfallbeseitigung im Inland abgezogen (Nettoprinzip), um Doppelzählungen zu vermeiden.

**Abbildung 2: Entwicklung der Abfallintensität in Deutschland, 2000-2011**




Quelle: Destatis 2013a, eigene Berechnungen

Es wird deutlich, dass die Abfallintensität in der Vergangenheit signifikant gesunken ist, pro Einheit BIP wird heute deutlich weniger Abfall produziert als in der Vergangenheit. Dies kann im Wesentlichen auf drei unterschiedliche Faktoren zurückgeführt werden:

- Zum einen haben gestiegene Material- und Abfallkosten in den vergangenen Jahren tatsächlich zu einer Steigerung der Materialeffizienz in Deutschland geführt. Angesichts eines Materialkostenanteils von durchschnittlich 40 % haben viele Unternehmen die Fokussierung auf die Personalkosten aufgegeben und realisieren zunehmend systematischer die enormen Kostensenkungspotenziale durch den effizienteren Einsatz von Materialien – was auch mit einem Rückgang des Abfallaufkommens verbunden ist.

- Ein weiterer Treiber ist die Entwicklung im Bausektor, die zu einem deutlichen Rückgang der Bau- und Abbruchabfälle geführt hat. Diese Entwicklung muss jedoch auch in einem umfassenderen Kontext des Strukturwandels gesehen werden, der dazu führt, dass der Anteil des tertiären Dienstleistungssektors (mit deutlich niedrigerer Abfallintensität als Industriebetriebe) in Deutschland immer weiter ansteigt.

- In den letzten Jahrzehnten ist eine massive Verlagerung von abfallintensiven Produktionsprozessen ins Ausland zu beobachten gewesen[29]. Im Endeffekt verlagern die Industrieländer also nicht nur nach wie vor umweltgefährdende Produkte in Länder, denen sowohl die technische Infrastruktur als auch entsprechende Regulierungen für deren gefahrlose Entsorgung fehlen, sondern auch die Entstehung eines Großteils der Abfälle.

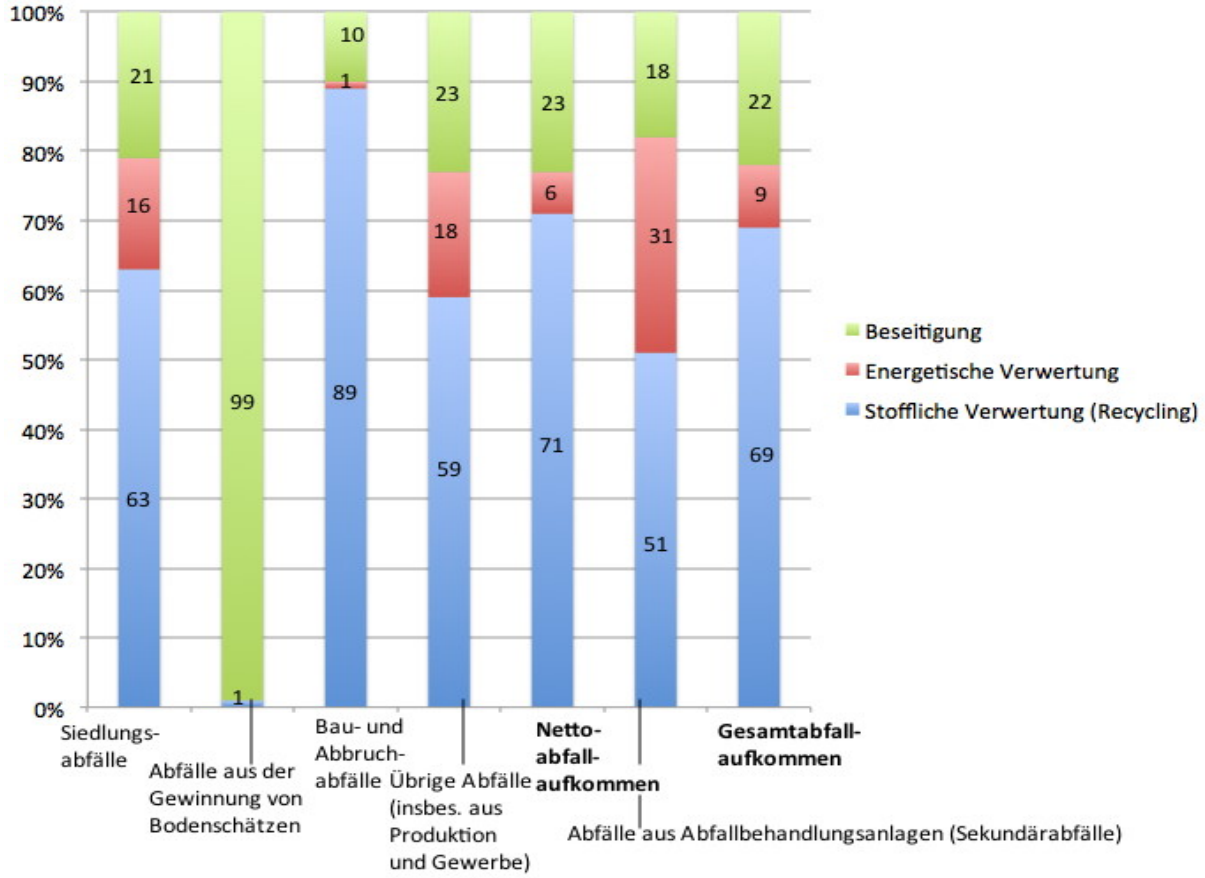
## 2.2 Abfallbehandlung

Die Regulierung der Abfallwirtschaft ist in Deutschland traditionell stark auf die technischen Anlagen zur Abfallbehandlung ausgerichtet. So werden zum Beispiel für die Abfallwirtschaftsstatistik keine Gesamtmengen erhoben, sondern die an den verschiedenen Behandlungsanlagen anfallenden Abfallmengen erfasst. Auch die Steuerung der Abfallströme erfolgt häufig durch technische Vorgaben für Behandlungsanlagen, wie etwa die Technische Anleitung Siedlungsabfälle, die dazu führte, dass seit 2005 praktisch nur noch vorbehandelte Abfälle deponiert werden können.

Die Entsorgungswege der Hauptabfallströme können einerseits nach Art der Behandlungsanlage und andererseits aggregiert nach Behandlungsverfahren dargestellt werden. In der folgenden Abbildung wird zunächst eine Gesamtübersicht über die prozentuale Verteilung der in Deutschland anfallenden Abfälle auf die drei Behandlungsverfahren – Abfallbeseitigung, stoffliche Verwertung (als Recycling bezeichnet) und energetische Verwertung – gegeben. Die Abfallbeseitigung umfasst grundsätzlich jedes Verfahren, das keine Verwertung ist. Wobei sich thermische Behandlungsanlagen durch die Klassifikation der Energieeffizienz in energetische Verwertung und Abfallbeseitigung unterscheiden lassen.

[29] Bringezu et al. 2009, S. 59

**Abbildung 3: Beseitigung und Verwertung von Abfällen in Deutschland im Jahr 2011**




Quelle: eigene Darstellung nach UBA 2013

2011 wurden in Deutschland insgesamt 76,9 % des Nettoabfallaufkommens verwertet. Dabei dominiert die stoffliche Verwertung der Abfälle, wie in Abbildung 3 gezeigt. Die gesetzlich priorisierte stoffliche Verwertung bei Siedlungsabfällen liegt weit über 50 %. So wird etwa Glas mittlerweile zu hundert Prozent stofflich recycelt. Trotz der hohen Recyclingquote ist das Bild differenziert zu betrachten: Beispielsweise wurde im Jahr 2010 für Elektro- und Elektroaltgeräte zwar eine Verwertungsquote von 77,5 % erzielt, allerdings werden einige Wertstoffe, wie etwa kritische Metalle gar nicht oder nur im geringem Maße recycelt und die Quoten ergeben sich im Wesentlichen durch das Recycling der Massenwerkstoffe. Vor dem Hintergrund drohender Ressourcenknappheit ist der wertstoffspezifische ökologische Nutzen des Recyclings jedoch entscheidend. Unter Berücksichtigung derartiger qualitativer Aspekte müssen die erzielten Recyclingerfolge kritisch betrachtet werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Gesamtüberblick über die verschiedenen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland und ihre Kapazitäten im Jahr 2010. Betrachtet man die reine Anzahl der Anlagen, so sind hier an erster Stelle die 2.036 biologischen Abfallbehandlungsanlagen zu nennen, vor den 1.344 Demontagebetrieben für Altfahrzeuge und den insgesamt

1.040 Sortieranlagen. Schaut man jedoch auf die Gesamtkapazität der verschiedenen Anlagentypen, so zeigt sich, dass die Abfallverbrennung diesbezüglich mit einem Anteil von etwa 30 % den größten Input hat. Insgesamt werden jährlich über 40 Mio. t Abfälle verbrannt, entweder in speziellen Abfallbehandlungsanlagen oder als ein Teilinput in Kraft- und Heizwerken.

**Tabelle 1: Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland, 2010**

| Art der Behandlungsanlage | Anzahl der Anlagen insgesamt | Input insgesamt, in 1.000 t |
|---|---|---|
| Abfallverbrennungsanlagen | 94 | 20.558,4 |
| Klärschlammverbrennungsanlagen | 21 | 1.963,4 |
| Sonderabfallverbrennungsanlagen | 35 | 1.399,2 |
| Sonstige Anlagen zur thermischen Behandlung | 14 | 420,5 |
| **Thermische Abfallbehandlungsanlagen insgesamt** | **164** | **24.341,6** |
| Kraftwerke, Heizwerke | 338 | 12.649,6 |
| Sonstige Feuerungsanlagen | 317 | 4.748,6 |
| **Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung von Abfällen insgesamt** | **655** | **17.398,2** |
| **Chemisch-physikalische Behandlungsanlagen insgesamt** | **542** | **8.966,0** |
| **Bodenbehandlungsanlagen** | **122** | **3.496,6** |
| Bioabfallkompostierungsanlagen | 252 | 4.105,8 |
| Grünabfallkompostierungsanlagen | 672 | 3.317,0 |
| Biogas/Vergärungsanlagen | 992 | 4.307,8 |
| Klärschlammkompostierungsanlagen | 98 | 975,7 |
| Sonstige biologische Behandlungsanlagen | 22 | 301 |
| **Biologische Behandlungsanlagen insgesamt** | **2.036** | **13.007,2** |
| **Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen** | **56** | **4.153,8** |
| **Schredderanlagen und verwandte Anlagen** | **646** | **14.255,9** |
| **Demontagebetriebe für Altfahrzeuge** | **1.344** | **527,6** |
| **Sortieranlagen** | **1.040** | **24.058,6** |
| **Zerlegeeinrichtungen für Elektro- und Elektronikaltgeräte** | **322** | **816,7** |
| **Sonstige Behandlungsanlagen** | **615** | **21.323,2** |
| **Insgesamt** | **7.542** | **132.345,4** |

Quelle: Destatis 2012

Betrachtet man die Entwicklung im Zeitablauf, so hat sich die Anzahl der thermischen Behandlungsanlagen seit 2000 mehr als vierfacht. Auch bei den biologischen Behandlungsanlagen ist ein deutlicher Anstieg von 1.268 auf 2.036 im Jahr 2010 zu verzeichnen. Hinter-

grund ist hier vor allem das Ende der Deponierung unbehandelter Abfälle seit 2005. Dementsprechend ist auch die Zahl der Deponien in Deutschland stark rückläufig[30].

## 2.3 Recyclingquoten für einzelne Rohstoffe

Der Fokus der Abfallwirtschaft lag in der Vergangenheit im Bereich der Gewerbeabfälle stark auf der Rückgewinnung von Massenmetallen und im Bereich der öffentlichen Entsorgung (Hausmüll) stark auf der Entsorgungssicherheit und der Reduzierung des Restmüllaufkommens durch energetische Verwertung. Regelungen zur Produktverantwortung wie etwa die Verpackungsverordnung oder das Elektro- und Elektronikgerätegesetz sind erste zentrale ordnungsrechtliche Stellschrauben auf dem Weg von einer Abfall- zur Kreislaufwirtschaft. Abfall als Quelle für sekundäre Rohstoffe zu betrachten, gerät zwar zunehmend in den Fokus der abfallwirtschaftlichen Unternehmen, sie sind aber kaum in der Lage, die gesamte Verwertungskette zu steuern. Auch die Abfallstatistik ist nicht geeignet, die verschiedenen Verwertungsstufen eines Recyclingprozesses abzubilden: „Die Abfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland liefert zwar Angaben über das Abfallaufkommen, doch gibt sie nicht wieder, auf welche Art und Weise die Verwertung von Abfällen letztendlich tatsächlich erfolgt.“[31]

Wird ein Abfall einem als Verwertung anerkannten Verfahren zugeführt, so gilt er in der Abfallstatistik als vollständig verwertet, unabhängig davon, welche Anteile davon tatsächlich für einen Einsatz als Sekundärrohstoff zurückgewonnen werden. Dementsprechend muss bei der Ermittlung der Recyclinganteile in der Produktion bzw. der Versorgung der Volkswirtschaft auf andere Quellen zurückgegriffen werden. Grundsätzlich kann zwischen einer produktionsbezogenen Recyclingquote, die den Recyclinganteil am Materialinput eines Produktionsprozesses angibt, und zwischen einer abfallbezogenen Recyclingquote, die sich auf den erfassten Input in das System der Abfallwirtschaft bezieht, unterschieden werden. Eine hohe abfallwirtschaftliche Recyclingquote führt nicht zwangsläufig zu einem hohen Anteil des Einsatzes von Recyclingmaterialien in den nationalen Industrien, da durch Im- und Exporte von Abfällen auch eine Verwendung des Sekundärmaterials in anderen Volkswirtschaften möglich ist. Die Organisation der Wertschöpfungsketten und die Stärke einzelner Konzerne im Beschaffungsmarkt sind daher weitere wichtige Schlüsselgrößen für die Erreichung eines hohen Recyclinganteils in der Produktion.

In der nachfolgenden Betrachtung werden die Hauptanwendungsgebiete und Recyclingquoten ausgewählter Massen- und Technologiemetalle (Kupfer, Blei, Aluminium, Eisen und Stahl, Gold, Silber, Palladium, Platin, Indium, Tantal, Yttrium, Neodym) sowie Kunststoffe dargestellt. Bei den Recyclingquoten zum Einsatz von Sekundärrohstoffen wird zwischen dem Recycling von Post Consumer Abfällen und dem Recycling von Produktionsabfällen differenziert. Wegen der internationalen Produktionsstrukturen erweist sich hierbei auch die

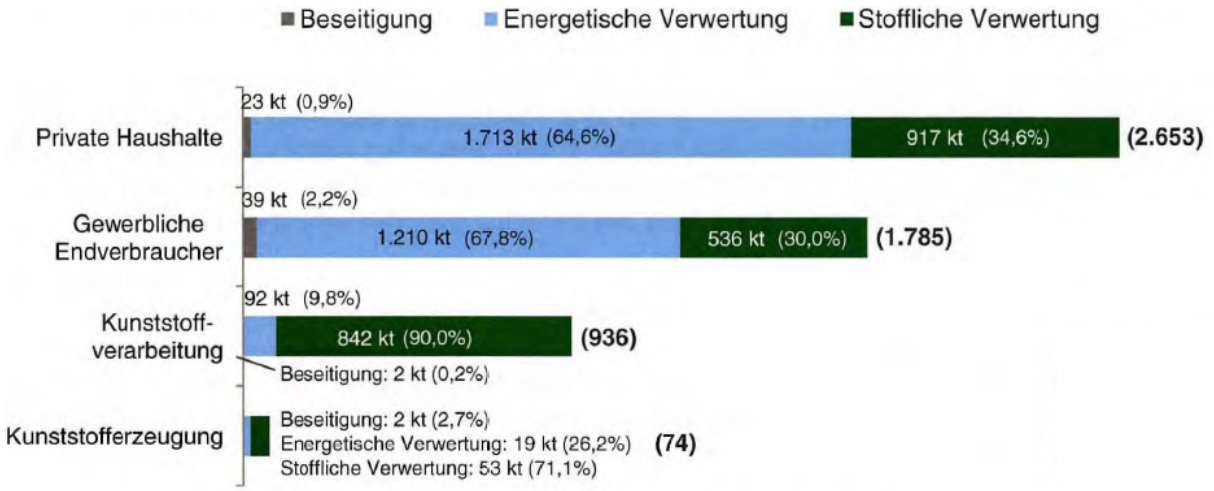
[30] Destatis 2012
[31] Wagner et al. 2012, S. 1

Betrachtung von globalen Recyclingquoten als sinnvoll. Eine Abschätzung der Recyclingquoten aus Post Consumer Abfällen erfolgt dagegen weitestgehend auf nationaler Ebene[32].

## 2.3.1 Recycling von Kunststoffen

Kunststoffe finden wegen einer Reihe von günstigen Eigenschaften, wie etwa deren geringe Dichte, in einer Vielzahl von Branchen Anwendung. Zentrale Einsatzgebiete sind das Bauen und Wohnen, Mobilität, Elektronik, Medizin und Gesundheit, Sport und Freizeit sowie die Landwirtschaft[33]. 2011 wurden in Deutschland 11,86 Mio. t Kunststoffe verarbeitet, wobei der Anteil des Kunststoffs PET 3,8 % ausmacht. PET wird zu 95 % in Verpackungen eingesetzt.[34] Die Verwendung von PET im Verpackungsbereich konzentriert sich auf die Herstellung von Kunststofflaschen und wird bevorzugt für kohlensäurehaltige Getränke verwendet, aufgrund der guten Gasbarriereeigenschaften[35]. Die Kosmetikbranche zählt mittlerweile auch zu einem bedeutenden Einsatzbereich von PET. Die nachfolgende Abbildung gibt eine Übersicht zur energetischen und stofflichen Verwertung als auch zur Beseitigung von Kunststoffabfällen in Deutschland.

**Abbildung 4: Kunststoffabfälle zur Verwertung und Beseitigung nach Herkunft, Deutschland, 2011**




Quelle: Consultic 2012

Die Recyclingquote von Post-Consumer-Abfällen liegt mit rund 35 % deutlich niedriger als bei dem Recycling von Produktions- und Verarbeitungsabfällen, deren stoffliche Verwertung sich auf 71 % bzw. 90 % beläuft. Diese Unterschiede lassen sich vor allem auf die höhere

[32] Vereinzelnd wird mangels Datenverfügbarkeit auf globale Werte zurückgegriffen und der Einfluss nationaler Entsorgungsstrukturen als Unsicherheit hingenommen.
[33] PlasticsEurope 2010
[34] Consultic 2012
[35] Wagner et. al. 2012

Homogenität (Sauberkeit und Sortenreinheit) der Abfälle bei den Erzeugern und Verarbeitern zurückführen.[36]

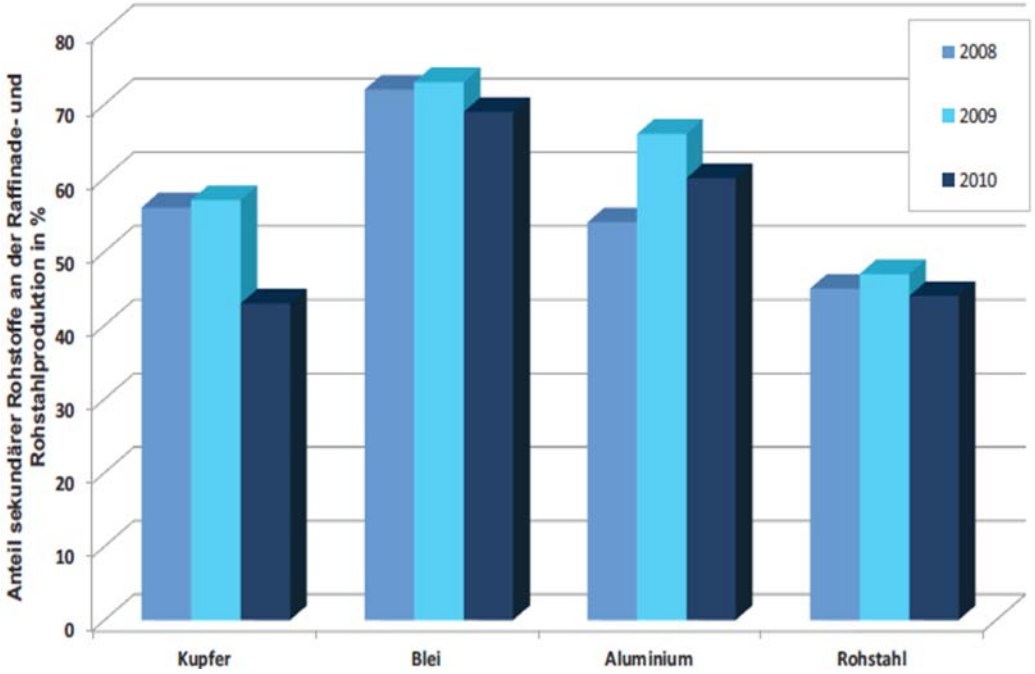
Die Kunststoffabfallmenge von PET in Deutschland betrug im Jahr 2011 486.000 t im Post-Consumer Bereich und 38.000 t entfallen auf Produktions- und Verarbeitungsabfälle.[37] Basierend auf einer Materialstrombilanz für PET im Jahr 2007 lassen sich folgende Recyclingquoten ermitteln: 36 % des PET aus Post-Consumer-Abfällen und 88 % des PETs aus Abfällen aus Produktion und Verarbeitung werden recycelt. Der Sekundärrohstoff wird zu 23 % aus Produktionsabfällen und zu 77 % aus Post Consumer Abfällen gewonnen.[38] Insbesondere der PET-Bereich zeigt, dass auch im Kunststoffbereich Sekundärstoffe gewonnen werden können, die qualitativ Primärmaterialien vollwertig ersetzen können. Mittlerweile sind am Markt auch hochwertige Produkte erhältlich, die zu 100% aus Sekundärkunststoffen bestehen[39].

### 2.3.2 Recycling von Massemetallen

Der Anteil an Sekundärrohstoffen, der in der Metallproduktion eingesetzt wird, ist u. a. abhängig von der allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung. So stammten im Jahr 2010 in Deutschland 43 % des Kupfers, 69 % des Bleis, 60 % des Aluminiums und 44 % des Rohstahls aus sekundären Rohstoffen. Aufgrund der steigenden Industrieproduktion im Jahr 2010 verringerte sich der relative Anteil des Schrotteinsatzes an der Metallproduktion gegenüber 2009 geringfügig. Die nachstehende Abbildung zeigt den Anteil sekundärer Rohstoffe an der Raffinade- und Rohstahlproduktion für Kupfer, Blei, Aluminium und Rohstahl in Deutschland für den Zeitraum von 2008 bis 2010. Roheisen wird mit einem Anteil von über 97 %[40] im Jahr 2009 überwiegend in Rohstahl eingesetzt, so dass der Sekundärrohstoffeinsatz von Rohstahl gleichzeitig repräsentativ für das Recycling von Eisen ist.

[36] Consultic 2012
[37] Consultic 2012
[38] Wagner 2012
[39] PlasticsEurope 2010
[40] Destatis 2013

**Abbildung 5: Metallrecycling in Deutschland - eine wichtige Rohstoffquelle**




Quelle: DERA 2012

Betrachtet man die Recyclingquoten, so ist für Post Consumer Abfälle vor allem die Sammelquote entscheidend (welcher Anteil der Metalle gelangt in Recyclingprozesse und wird nicht z.B. deponiert). Hierzu werden international sehr unterschiedliche Werte angegeben, Deutschland dürfte u.a. für Kupfer und Eisen jedoch am obersten Rand bei ca. 80 % liegen[41]. Für Produktionsabfälle aus Massenmetallen können praktisch geschlossene Kreisläufe angenommen werden, da hier ausreichend ökonomische Anreize zur Verwertung dieser Abfallströme bestehen (Ausnahmen bestehen nur z.B. bei starken Verunreinigungen mit Störstoffen). Die Effizienz der eigentlichen Rückgewinnungsprozesse schwankt zwischen den verschiedenen Anwendungen, grundsätzlich können in der metallurgischen Verwertung von Massenmetallen Werte über 90 % erreicht werden.

Die metallurgische Verwertung der Metalle umfasst sämtliche Verfahren zur Rückgewinnung bzw. Herstellung metallischer Sekundärprodukte. Für das Materialrecycling werden mehrere Prozesse, von der Zerlegung und der mechanischen Behandlung als auch der Sortierung, über die Homogenisierung (i.d.R. Schmelzprozess oder je nach Metalleigenschaften Einsatz chemischer Verfahren) bis hin zur Abtrennung von Verunreinigungen und der Herstellung von Recyclingprodukten (z.B. Metallblöcke, Metallpulver etc.), durchlaufen.[42] Am metallurgischen Verwertungspfad des Kupferrecyclings, der Rückgewinnung reinen Kupfers in der Schmelze, kann verdeutlicht werden, wie eng das Kupferrecycling mit der Wiedergewinnung von Edel- und Sondermetallen verbunden ist. Aus dem Recyclingmaterial wird nicht nur Kupfer zurückgewonnen, sondern auch Blei, Nickel, Zinn, Zink, Gold, Silber, Tellur, Selen und weitere Edelmetalle. Dieser Weg zu einem Multi-Metall-Recycling stellt neue Herausforde-

[41] UNEP 2011
[42] Martens 2011

rungen an die Recyclingtechnologie und das Stoffstrommanagement, da dass Eingangsmaterial immer vielfältiger wird, mit anderen Materialien vermischt ist und abnehmende Metallgehalte aufweist (siehe nachfolgende Tabelle).

**Tabelle 2: Herausforderungen an eine integrierte Kupfer-Metallurgie**

| | **Bisher** | **Zukünftig** |
|---|---|---|
| **Fokus** | Kupferversorgung | alle Begleitmetalle |
| | Kupferausbringen | Materialverbunde |
| | einige Begleitmetalle | |
| | | |
| **Rohstoffquellen** | Sammelschrotte | EOL-Materialien |
| | Kupfer-Wertschöpfungskette | |
| | | |
| **Charakteristik** | hohe Metallgehalte | geringe Metallgehalte |
| | einfache Sammlung | Sammellogistik |
| | einfache Sortierung | Demontage |
| | einfache Technologie | Hochtechnologie |

Quelle: Angerer et al. 2009, Folie 7, Legende EOL = End of Life

Die veränderte Zusammensetzung der Eingangsmaterialien vor allem im Bereich der Konsumgüterelektronik bedeutet, dass auch die klassischen mechanischen Trennverfahren (Schredder) an Bedeutung verlieren werden. Ein Teil der Defizite kann sicher durch optimierte Schredder-Technologien aufgefangen werden, hinsichtlich der Rückgewinnungsquoten im Bereich der Edel- und Sondermetalle ist jedoch das metallurgische Recycling den mechanischen Verfahren überlegen[43].

## 2.3.3 Recycling von Edel- und Sondermetallen (Technologiemetallen)

**Gold**

Gold hat seine Hauptanwendungsgebiete in dem Bereich der Schmuckfertigung, als Wertanlage und in der Technologie. Im Jahr 2011 wurden rund 12 % der weltweiten Goldnachfrage durch den Technologiesektor nachgefragt, wobei der Einsatz des Technologiemetalls innerhalb dieses Bereiches von dem Elektro- und Elektroniksektor dominiert wird (Elektro- und Elektronikindustrie 71 %, Zahnmedizin 10 % und sonstige Industrie 19 %)[44]. In der Elektro- und Elektronikindustrie wird das Gold hauptsächlich auf Leiterplatten verarbeitet und ist in Form von Kontakten, als Korrosionsschutzbeschichtung und einer Vielzahl von weiteren Anwendungen mit anderen Materialen verbunden[45].

[43] Vgl. Lucas 2011
[44] World Gold Council 2012, S. 22
[45] Chancerel 2010, S. 30f

Recycling:

Mehr als die Hälfte des gesamt eingesetzten Goldes in Deutschland stammen aus dem Recycling (2010: 56 %)[46]. Die Angabe von konkreten Recyclingraten ist jedoch wegen nicht quantifizierbarer Goldmengen in im- und exportierten Abfällen wesentlich komplexer[47]. Während Altschmuck wegen seines hohen Wertes entweder in anthropogenen Lagern verbleibt oder verwertet wird, kommt es beim Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten selbst bei deren Zuführung in die Behandlungsanlagen zu erheblichen Goldverlusten. Eine Untersuchung von Chancerel 2010 analysiert diese Thematik und zeigt für das Jahr 2007 nur eine Goldrückgewinnungsrate von 24 % der in Deutschland anfallenden Elektro- und Elektronikaltgeräte[48].

Insgesamt lässt sich die Recyclingquote[49] von Gold als Technologiemetall aus Post Consumer Abfällen in Deutschland auf etwa 30 % abschätzen[50]. Weltweit deckt das Gold als Sekundärrohstoff etwa 29 bis 31 % des Goldbedarfs und stammt zu über 80 % aus Post Consumer Abfällen[51]. Bei der Produktherstellung in Deutschland wird mit Goldverlusten zwischen nur 2 und 5 % gerechnet, d.h. dass zumindest in der Produktion praktisch geschlossene Stoffkreisläufe zu beobachten sind[52].

**Silber**

Die Anwendungsbereiche von Silber erstrecken sich in der Fabrikation von der Industrie, über die Fotografie, der Schmuckherstellung, bis hin zu dessen Einsatz in Silberwaren sowie Münzen und Medaillons. Daneben werden etwa 16 % des Silbers durch den Investmentsektor nachgefragt. Den größten Anteil an der weltweiten Gesamtnachfrage macht 2011 mit rund 47 % der industrielle Bereich aus[53]. Aufgrund seiner außerordentlich guten elektrischen und thermischen Leitereigenschaften wird Silber industriell in einer Vielzahl von elektronischen und elektrischen Komponenten (Kontakte, Schalter, Sicherungen etc.) verarbeitet und adressiert damit eine breite Produktpalette[54].

Recycling:

Das Post-Consumer-Recycling von Silber differiert je nach Produktsektor enorm. Aus Schmuck, Silberwaren, Münzen und Medaillons wird das Silber mit Recyclingquoten von über 90 % zurückgewonnen, wohingegen das Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten

[46] Deutsche Rohstoffagentur 2011, S. 42
[47] Wagner, et al. 2012, S. 62
[48] Chancerel 2010, S. 95
[49] Ohne Gold aus den Bereichen der Schmuckfertigung und Wertanlagen.
[50] Extrapolation der Recyclingquote aus den geschätzten Recyclingquoten für die Elektro- und Elektronikindustrie sowie der Zahnmedizin, da für die sonstige Industrie keine Recyclingquote bekannt ist.
[51] UNEP 2011, S. 33
[52] Wagner, et al. 2012, S. 63
[53] Reuters 2012, S. 4
[54] Reuters 2012, S. 9

mit enormen Verlusten verbunden ist. Obwohl der technische Recyclingprozess grundsätzlich mit Metallausbeuten von etwa 95 % sehr effizient ist, mindern informelle Entsorgungswege (geringe Erfassungsraten, ungeeignete Behandlungsverfahren etc.) die Recyclingrate erheblich auf nur etwa 10-15 %[55].

Insgesamt bewegt sich die Gesamtrecyclingrate von Silber auf globaler Ebene für Post-Consumer-Abfälle[56] zwischen 30 und 50 %[57] und gilt als Orientierungswert für die deutsche Recyclingsituation. Der Sekundärrohstoff wird zu etwa 20 % aus Produktionsabfällen und zu 80 % aus Post Consumer Abfällen gewonnen und ersetzt weltweit insgesamt 20-32 % des Primärrohstoffeinsatzes[58]. Während des Produktionsprozesses sind keine nennenswerten Materialverluste bekannt, nur im Bereich der Fotografie sind mögliche Materialverluste nicht quantifizierbar[59].

**Palladium**

Ein Großteil des Palladiums wird auf dem europäischen Markt in Autokatalysatoren eingesetzt und macht im Jahr 2011 knapp 78 % der Gesamtnachfrage aus. Die restlichen 22 % teilen sich auf Anwendungen in der chemischen Industrie (4 %), Zahnmedizin (4 %), Elektro- und Elektronikindustrie (10 %), Schmuckherstellung, im Investmentbereich und in sonstigen Verwendungen auf[60]. In Autokatalysatoren wird das Palladium als katalytisch aktive Schicht auf ein Trägermaterial aufgebracht und wird häufig in Kombination mit Platin und Rhodium eingesetzt. Dabei können Platin und Palladium untereinander substituiert werden, weshalb deren Einsatz in der Regel von den Marktpreisen bestimmt wird[61].

Recycling:

Während die globale Recyclingrate von Palladium aus Autokatalysatoren 50 bis 60 % beträgt, ist die Recyclingrate in Deutschland und anderen europäischen Ländern wegen der verstärkten Altautoexporte geringer[62]. Nur etwa 29 % der Platingruppenmetalle aus alten Autokatalysatoren, 23 % des Palladiums aus Elektro- und Elektronikaltgeräten[63], 92 % des Palladiums aus der chemischen Industrie und 50 % des Palladiumeinsatzes aus dem zahnmedizinischen Bereich werden in Deutschland recycelt[64]. Auf Grundlage dieser Werte lässt sich die Gesamtrecyclingquote von Palladium in Deutschland zusammen mit den jeweiligen Anteilen der Nachfragebereiche auf 30 % abschätzen.[65]

---

[55] European Commission 2010, S. 180 f.
[56] Ohne Silber aus den Bereichen der Schmuckherstellung und Wertanlagen
[57] UNEP 2011, S. 33
[58] UNEP 2011, S. 33
[59] Wittmer, et al. 2011, VII.13
[60] Johnson Mattheys o.J.a
[61] Oakdene Hollins Ltd 2011, S. 46
[62] European Commission 2010, S. 156
[63] Chancerel 2010, S. 95
[64] Wittmer, et al. 2011, VI.2 f
[65] Ohne Palladium aus den Bereichen der Schmuckfertigung und Investment

Palladiumverluste während des Herstellungsprozesses sind nicht bekannt und werden wegen des hohen Palladiumpreises als gering eingeschätzt[66]. Das Palladium aus dem Recycling deckt weltweit etwa 50 % des Palladiumbedarfs und stammt zu über 80 % aus Post Consumer Abfällen[67].

**Platin**

Platin wird größtenteils in den gleichen Anwendungsgebieten wie Palladium eingesetzt. Darüber hinaus wird es in Bereichen der Glas- und Mineralölindustrie verwendet. Auch bei Platin ist der größte Nachfragesektor die Autokatalysatorbranche, wobei die Anteilsstrukturen an der Gesamtnachfrage im Vergleich zu denen von Palladium differieren. Nur rund 67 % des in Europa nachgefragten Platins wird in Automobilkatalysatoren eingesetzt[68].

Recycling:

Wegen derselben Recyclingrate des größten Nachfragebereichs der Platingruppenmetalle (29 %) und der vergleichbaren sonstigen Einsatzbereiche und relevanten Charakteristiken von Platin und Palladium ist die Recyclingrate von Palladium aus Post Consumer Abfällen in Deutschland von 30 % auf die Recyclingsituation von Platin übertragbar.[69] Die Verhältnisse des Einsatzes von Primär- und Sekundärrohstoff stimmen ebenfalls mit denen der anderen untersuchten Edelmetallen überein: Der Sekundärrohstoff wird zu etwa 20 % aus Produktionsabfällen und zu 80 % aus Post Consumer Abfällen gewonnen[70]. Insgesamt substituiert der Sekundärrohstoff weltweit 50 % des primären Platins[71].

**Indium**

Indium wird hauptsächlich in Form von Indium-Zinn-Oxid (ITO) in Flachbildschirmen eingesetzt und ist mit einem Anteil von 74 % an der Gesamtindiumnachfrage, mit steigernder Tendenz, dominierendes Anwendungsfeld. Ein kleiner Teil der ITO-Anwendungen wird für Beschichtungen bei Architektur- und Windschutzgläsern verwendet. Weitere Anwendungen von Indium sind Legierungen und Lote sowie Indiumverbindungen. Insbesondere Verbindungen wie InGaN (Indiumgalliumnitrid), verwendet in weißen LEDs sowie Blue-ray-discs und CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid), eingesetzt in Solarzellen, weisen wegen der enormen Wachstumstendenzen der Produktbereiche eine hohe Zukunftsrelevanz auf[72].

---

[66] Wittmer, et al. 2011, VI.9
[67] UNEP 2011, S. 33
[68] Johnson Mattheys o.J.b
[69] Dieses Vorgehen wird durch die Betrachtung globaler Recyclingraten beider Metalle, die ebenfalls identisch sind, bestätigt (UNEP 2011, 33).
[70] UNEP 2011, S. 33
[71] UNEP 2011, S. 33
[72] Oakdene Hollins Ltd 2011, S. 31 f

Recycling:

Weniger als 1 % des Indiums in Post Consumer Abfällen werden weltweit recycelt. Da Indium überwiegend aus Flachbildschirmschrotten zurückgewonnen wird[73] und derartige Recyclingtätigkeiten sich auf den japanischen Raum konzentrieren[74], kann die Gesamtrecyclingrate von Indium aus Post Consumer Abfällen in Deutschland mit 0 % angenommen werden.

Das Recycling von Produktionsabfällen spielt bei dem Einsatz von Indium eine zentrale Rolle. Erhebliche Ineffizienzen während der Herstellung von ITO-Beschichtungen mit etwa 70 % Produktionsabfall und die gleichzeitig beherrschende Stellung der Indiumanwendung für ITO-Beschichtungen erklären die Brisanz. Vor diesem Hintergrund haben sich in den Herstellerländern (China, Japan und Korea) bereits entsprechende Rückgewinnungsverfahren etabliert, so dass etwa 85 % des Indiums in Form von ITO beim Herstellungsprozess von Flachbildschirmen recycelt werden[75]. Insgesamt werden 25-50 % des weltweit eingesetzten Primärmetalls Indiums durch sekundäres Indium substituiert und stammen zu 99 % aus dem Recycling von Produktionsabfällen[76].

**Tantal**

Ein großer Teil des Tantals wird mit 60 % in Kondensatoren eingesetzt. Die Kondensatoren zeichnen sich vor allem durch ihre hohe Kapazität bei geringer Größe aus und sind im Zuge der zunehmenden Miniaturisierung von Geräten besonders bedeutend. Mobiltelefone, Laptops, Digitalkameras und eine Vielzahl von weiteren IT-Geräten sind zentrale Einsatzgebiete solcher Kondensatoren. Weiterhin wird Tantal in Legierungen und Metallverbindungen in Anwendungen im Bereich der Schneidewerkzeugherstellung, Luft- und Raumfahrt sowie als Beschichtung in Turbinen eingesetzt[77].

Recycling:

Ein Recycling von Tantal aus Post Consumer Abfällen findet kaum statt und liegt weltweit bei unter 1 %[78]. Tantal wird dabei in Form von Superlegierungen oder als Hartmetall zurückgewonnen. Ein Recycling von Kondensatoren, dem Hauptanwendungsgebiet von Tantal, wird nicht praktiziert[79]. Das Recycling von Produktionsabfällen hingegen gehört zu den gängigen Verfahren, womit etwa 10 bis 25 % des Primärrohstoffes ersetzt werden können. Das recycelte Tantal aus Produktionsabfällen hat dabei einen Anteil von 90-99 % an der weltweiten

[73] European Commission 2010, S. 95
[74] Wittmer, et al. 2011, III.19
[75] Oakdene Hollins Ltd 2011, S. 32
[76] UNEP 2011, S. 36
[77] Buchert et al. 2009, S. 26
[78] UNEP 2011, S. 37
[79] Oakdene Hollins Ltd 2011, S. 56

Gesamtsekundärrohstoffproduktion[80]. Darüber hinaus wird Tantal, u.a. in Deutschland, aus Zinnschlacken gewonnen und dadurch Primärrohstoffe eingespart[81].

**Yttrium**

Die wichtigste Verwendung von Yttrium ist dessen Einsatz in der Keramikherstellung. Die charakteristische hohe Widerstandsfähigkeit dieser Keramiken wird in Anwendungsbereichen der Lambda-Sonden, speziellen Kacheln für die Raumfahrt, künstlicher Gelenke oder im Zahnersatz eingesetzt[82]. Unter den keramischen Materialien sind Yttrium-Barium-Kupfer-Oxide als Hochtemperatursupraleiter eine bedeutende Zukunftstechnologie und damit verbundene Nachfragesteigerungen zu erwarten[83]. Weitere wichtige Verwendungen von Yttrium ist dessen Einsatz als Leuchtstoff. Das Yttrium wird hierbei in Verbindung mit anderen Seltenen Erden in Leuchtstoffröhren und Lampen verarbeitet[84].

Recycling:

Eine Untersuchung von Metallrecyclingraten im Rahmen des UNEP 2011 ergab, dass weder aus Post Consumer noch aus Produktionsabfällen Yttrium als Sekundärrohstoff zurückgewonnen wird[85].

**Neodym**

Bedeutendster Anwendungsbereich von Neodym ist seine Verwendung zusammen mit Eisen und Bor in Permanentmagneten. Die großen Nachfragebereiche dieser Neodym-Eisen-Bor Magnete sind große und kleine Motoren. Kleine Motoren werden in Computerfestplatten, Fensterscheibenmotoren in Automobilien und einer Vielzahl von weiteren Anwendungen eingesetzt. Wichtige Anwendungsbereiche größerer Motoren sind solche in Elektroautos oder Windkraftanlagen. Der mengenmäßige Einsatz von Neodym in Windkraftanlagen ist dabei erheblich: Pro Megawatt Leistung wird etwa eine Tonne Neodym eingesetzt[86]. Ein gewichtsmäßig kleiner Teil der Magnete wird in Mikrophonen, Lautsprechern und in-ear Kopfhörern verarbeitet[87].

[80] UNEP 2011, S. 37
[81] Oakdene Hollins Ltd 2011, S. 56
[82] Deutsche Rohstoffagentur 2012, S. 2
[83] Angerer, et al. 2009, S. 312
[84] Deutsche Rohstoffagentur 2012, S. 2
[85] UNEP 2011, S. 36
[86] USGS 2011, S. 9 f
[87] Oakdene Hollins Ltd 2011

Recycling:

Neodym wird zu minimalen Anteilen (weniger als 1 %) aus Permanentmagneten in Post Consumer Abfällen zurückgewonnen[88]. Insgesamt wird 1-10 % der weltweit eingesetzten Primärrohstoffe durch recyceltes Neodym substituiert[89].

Zu dem Recycling aus Produktionsabfällen gibt es keine belastbare Daten, allerdings ist der Herstellungsprozess hochgradig ineffizient: Oakdene Hollins 2011 geben Materialverluste von 50 % an[90].

**Zusammenfassung**

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Recyclingraten bei Produktabfällen und der Produktion sowie die Substitutionsraten von Primärrohstoffen durch Recycling für die verschiedenen betrachteten Stoffe im Überblick. Die Übersicht verdeutlicht die enorme Bandbreite in den Recyclingraten, die sich bei den verschiedenen Metallen ergeben.

**Tabelle 3: Recyclingraten ausgewählter Technologiemetalle, Angaben in Prozent**

| Metall | Recyclingrate der Post Consumer Abfälle | Materialverluste bei der Produktherstellung | Zusammensetzung der Sekundärrohstoffe | | Substitution von Primärrohstoffen |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Produktionsabfall | Post Consumer Abfall | |
| Gold | 30 | 2 – 5 | < 20 | > 80 | 29 – 31<br>56 |
| Silber | 30 – 50 | 0[91] | < 20 | > 80 | 20 – 32 |
| Palladium | 30 | 0 | < 20 | > 80 | 50 |
| Platin | 30 | Keine Angaben | < 20 | > 80 | 50 |
| Indium | 0 | 15[92] | 99 | 1 | 25 – 50 |
| Tantal | < 1 | Keine Angaben | 90 – 99 | 1 - 10 | 10 – 25 |
| Yttrium | 0 | Keine Angaben | 0 | | 0 |
| Neodym | < 1 | 50 | Keine Angaben | | 1 – 10 |

Quelle: siehe Metallbeschreibungen. Bezug: graue Hinterlegung = global, keine Hinterlegung = Deutschland

## 2.4 Im- und Exporte von Abfällen

Insgesamt betrachtet ist die grenzüberschreitende Verbringung von Abfällen im Vergleich zum Abfallaufkommen in Deutschland von relativ geringer Bedeutung. Bei der Abfallverbrin-

[88] European Commission 2010, S. 163
[89] UNEP 2011, S. 36
[90] Oakdene Hollins Ltd 2011, S. 51
[91] Ohne den Anwendungsbereich *Fotografie*
[92] Indium in Form von ITO bei der Flachbildschirmherstellung

gung muss zwischen Abfällen zur Beseitigung und solchen zur Verwertung differenziert werden. Für "Abfälle zur Beseitigung" (gemäß § 3 Abs. 1 KrWG Abfälle, die nicht verwertet werden) gilt in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union grundsätzlich das Prinzip der Inlandsentsorgung. Ausnahmen sind nur dann möglich, wenn im Inland keine geeigneten Anlagen zur Beseitigung der speziellen Abfallart vorhanden sind oder wenn sich die Nutzung grenznaher ausländischer Anlagen anbietet. "Abfälle zur Verwertung" werden als Wirtschaftsgut betrachtet. Die Verwertung dazu geeigneter Abfälle kann grundsätzlich auch im Ausland erfolgen. Sie unterliegt jedoch Beschränkungen hinsichtlich der Inhaltsstoffe und der Zielländer entsprechend dem in Deutschland geltenden Recht, das im Kern auf dem Basler Übereinkommen und der EG-Verordnung über die Verbringung von Abfällen (VVA) basiert. Je nach Abfallart und Transportrichtung ergeben sich daraus folgende Beschränkungen:

**Tabelle 4: Übersicht über Exportbeschränkungen von Abfällen**

| | **Zwischen EU-Staaten** | **Import in die EU** | **Durchfuhr durch die EU** | **Export aus der EU** |
|---|---|---|---|---|
| **Abfälle zur Beseitigung** | Zustimmung erforderlich | Zustimmung erforderlich | Zustimmung erforderlich | Verboten[93] |
| **Abfälle zur Verwertung, die in Anhang III, IIIA oder IIIB der VVA aufgeführt sind und keine gefährlichen Bestandteile enthalten[94]** | Informationspflicht[95] | Informationspflicht | | Informationspflicht oder Sonderregelungen[96] |
| **Alle anderen Abfälle** | Zustimmung erforderlich | Zustimmung erforderlich | Zustimmung erforderlich | Verboten[97] |

Quelle: UBA 2012

Betrachtet man die langfristige Entwicklung der Im- und Exporte in Deutschland, so haben nach jahrelangem starkem Anstieg des Imports und leicht fallendem Export von zustimmungspflichtigen Abfällen zwei Ereignisse Mitte der 2000er Jahre für eine Stabilisierung der Abfallverbringung gesorgt[98]: Durch das Inkrafttreten des Ablagerungsverbotes nicht vorbehandelter Abfälle im Juni 2005 ist die Einfuhr von Restfraktionen der Abfallsortierung sehr stark zurückgegangen. Gleichzeitig hat der Beitritt osteuropäischer Nachbarstaaten zur EU im Mai 2004 die Möglichkeiten zur Verbringung von Abfällen in diese Region vergrößert.

[93] Die Ausfuhr nach Norwegen, Island, Liechtenstein und in die Schweiz ist mit Zustimmung erlaubt.

[94] Z.B. metallhaltige Abfälle, die beim Gießen, Schmelzen und Raffinieren von Metallen anfallen; Glas- und Keramikabfälle in nicht dispersibler Form; Kunststoffabfälle in fester Form etc.

[95] Für einige der neu der EU beigetretenen Staaten gelten noch Übergangsregelungen.

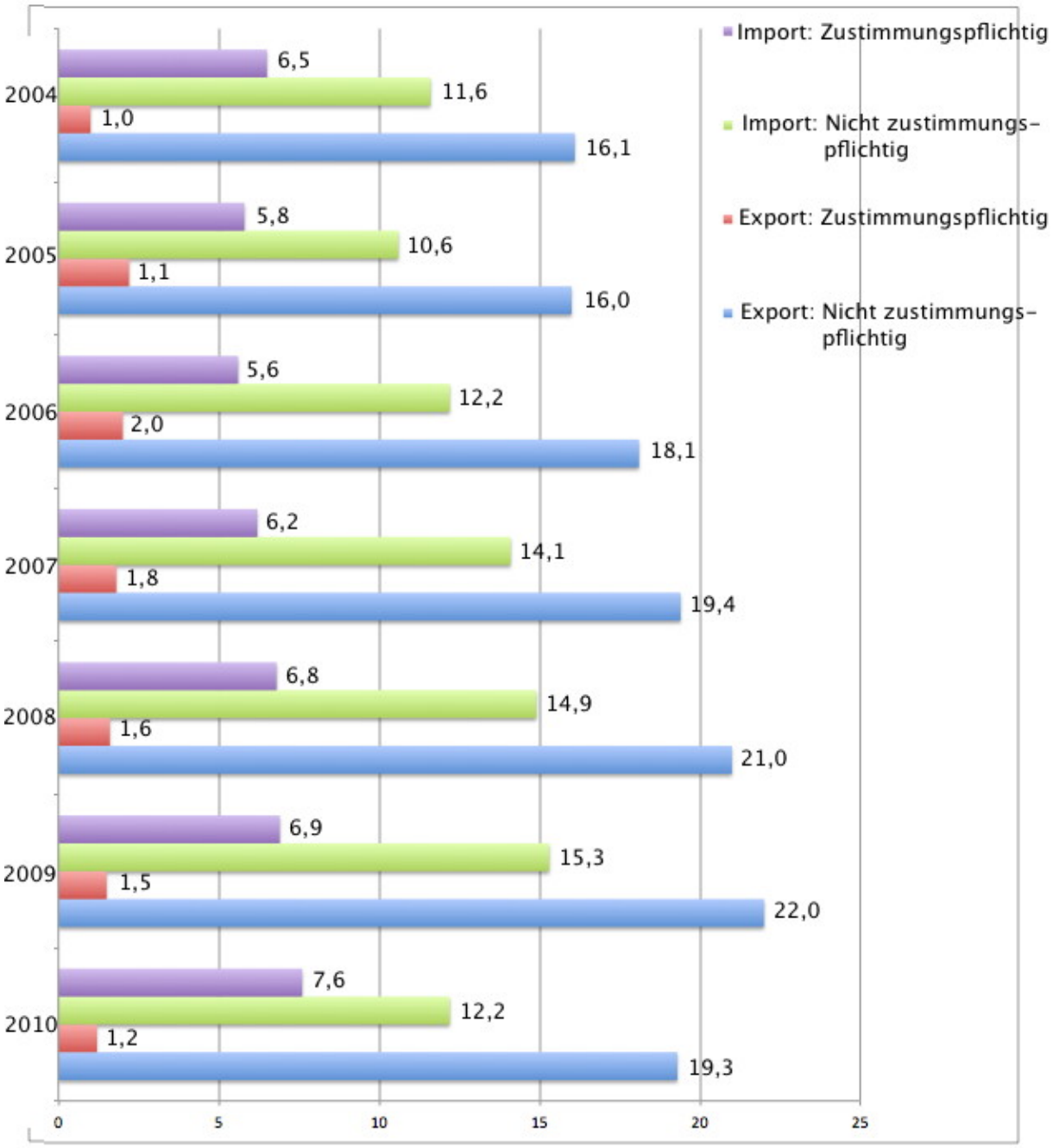
[96] Es bestehen teilweise Einschränkungen durch nationales Recht des jeweiligen Nicht-EU-Staates.

[97] Der Export gefährlicher Abfälle zur Verwertung in Staaten, für die der OECD Beschluss nicht gilt, ist verboten.

[98] UBA 2012

Abbildung 6 zeigt, dass im Jahr 2010 die Einfuhr von zustimmungspflichtigen Abfällen 7,6 Mio. t betrug. Der Export zustimmungspflichtiger Abfälle summierte sich im Jahr 2010 auf 1,2 Mio. t. Mit 19,3 Mio. t ist der Export nicht zustimmungspflichtiger Abfälle in der Statistik der größte Abfallstrom. Mit rund 10 Mio. t zählt dabei der Export von Metallschrott zu dem größten Mengenposten, gefolgt von den Papierabfällen mit etwa 3 Mio. t. Betrachtet man die Importe, zeigt sich auch hier, dass die Metallschotte mit 5,6 Mio. t. den größten Mengenstrom bilden. Netto werden damit rund 5. Mio. t. Metallschrott in 2010 exportiert.

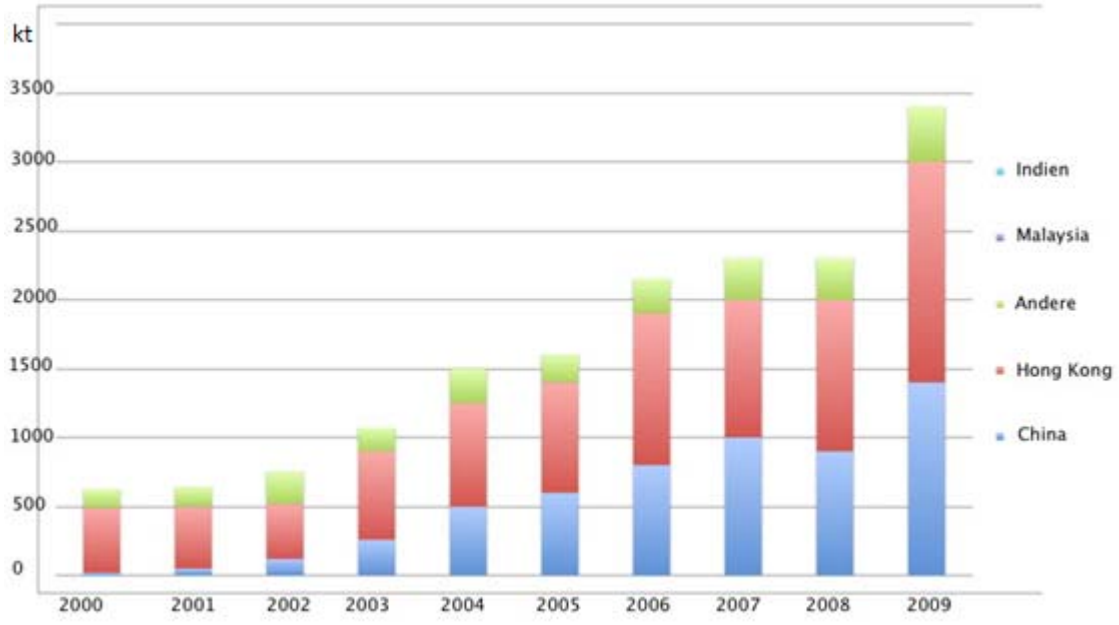
**Abbildung 6: Grenzüberschreitende Abfallverbringung in Deutschland (in Mio. t)**




Quelle: eigene Darstellung nach BMU 2012

Die Betrachtung der reinen Mengen verstellt jedoch den Blick darauf, dass es vor allem bei werthaltigen Abfällen wie Metallschrott, Altpapier oder Kunststoffabfällen relativ hohe Außenhandelsquoten gibt[99]. Speziell der Abfluss von Kunststoffabfällen ist ein häufig genanntes Hemmnis, weil durch den Export – vor allem in den asiatischen Raum – den deutschen und europäischen Recyclern notwendiger Input zur Auslastung ihrer Anlagen verloren geht. Die Ursache hierfür sind deutliche Preisunterschiede in den Behandlungskosten, so dass die höheren Transportkosten in der Regel deutlich überkompensiert werden. Die niedrigeren Kosten in den Zielländern der Exporte können vor allem auf niedrige Arbeitskosten sowie niedrige Umweltstandards zurückgeführt werden[100], in der Folge werden damit in Europa die Anreize gesenkt, in weitere oder hochwertigere Anlagenkapazitäten zu investieren. Die Plastikrecycling-Industrie beklagt in diesem Zusammenhang, dass europäische Steuergelder zur Finanzierung der getrennten Erfassung damit nicht europäischen, sondern vor allem in Asien beheimateten Unternehmen zugutekommt[101]. Betrachtet man die europäische Außenhandelsstatistik, so sind im Jahr 2007 ca. 273.000 t Plastikabfälle aus Deutschland exportiert worden. Berücksichtigt man gleichzeitig die importierten Mengen und setzt den Netto-Export ins Verhältnis zum Gesamtaufkommen von Plastikabfällen, so gehen Deutschland etwa 10 % der Kunststoffabfälle verloren[102]. Ziel dieser Exporte sind vor allem Hongkong und China, auf diese beiden Länder entfielen 2009 etwa 90 % der gesamten Exporte aus den EU-Mitgliedsstaaten. Abbildung 7 zeigt die Dynamik dieser Entwicklung seit 2000.

**Abbildung 7: Kunststoffabfall-Exporte aus der EU 27 nach Exportland, 2000-2009**




Quelle: eigene Darstellung nach EuPR 2010

[99] Vgl. Fischer et al. 2012.
[100] vgl. EuPR 2010
[101] Vgl. EuPR 2010
[102] Vgl. JRC IPTS 2012, S. 42

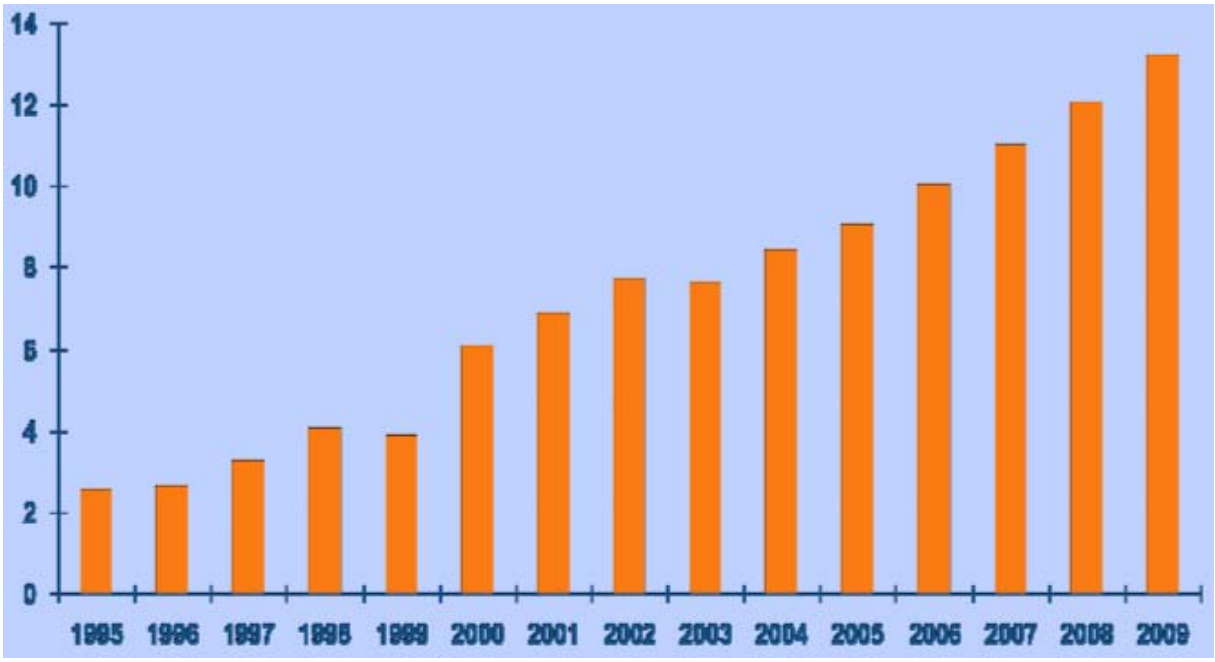
# 3 Märkte für Sekundärrohstoffe

Kapitel 3 gibt einen Überblick über die Angebots- und Nachfrageseite auf ausgewählten Märkten für Sekundärrohstoffe. Ein Schwerpunkt liegt auf den Preisbildungsprozessen für Sekundärrohstoffe.

## 3.1 Marktentwicklung

Das rasante Wachstum der Sekundärrohstoffbranche in Deutschland mit einer Umsatzsteigerung von 520,3 % im Zeitraum von 1995 bis 2009 kennzeichnet die Branche als bedeutender Rohstofflieferant für die deutsche Wirtschaft.[103] Der Gesamteinsatz von Sekundärrohstoffen in der deutschen Industrie betrug 2009 fast 14 % (Sekundärrohstoffeinsatz für ausgewählte Rohstoffe siehe Kapitel 2.3). Die Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Sekundärrohstoffeinsatzes in Abbildung 8 belegt den zunehmenden Trend, den Primärrohstoffeinsatz in der deutschen Wirtschaft weiter zu senken.

**Abbildung 8: Anteile des Sekundärrohstoffeinsatzes in der deutschen Industrie an den Rohstoffen insgesamt (ohne Mineralöl, Uran, Kohle und Gas), in %**




Quelle: Hüther 2010

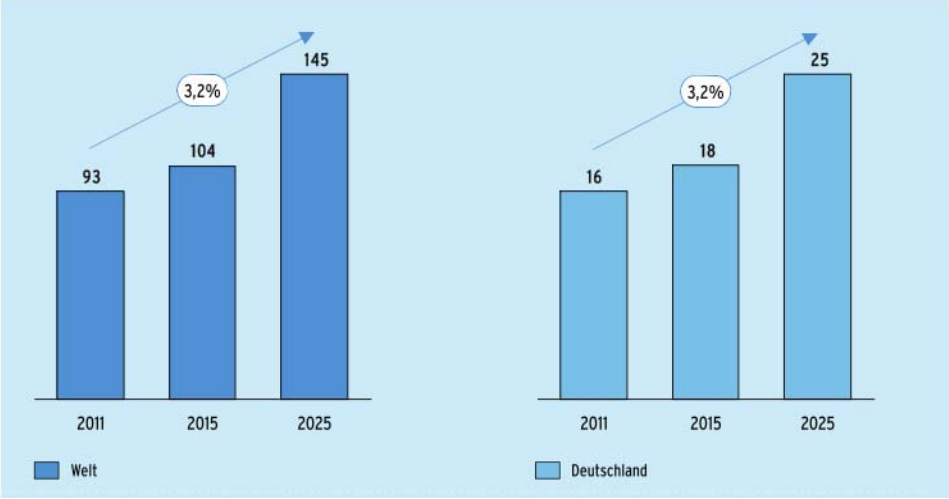
Der Recyclingmarkt gehört in Deutschland zu den am schnellsten wachsenden Marktsegmenten in Deutschland. Der Jahresumsatz der gesamten Abfallwirtschaft in Deutschland wird auf ca. 50 Mrd. Euro geschätzt und ist in den letzten Jahren stark gestiegen; über die Hälfte der auf dem Markt tätigen Unternehmen gehört dabei in die Kategorie Dienstleister,

[103] Hüther 2010

von denen die Mehrzahl wiederum Abfälle sammelt und transportiert[104]. Bei den Dienstleistungsangeboten werden jedoch auch Beratungsangebote im Bereich Materialeffizienz und Recycling zunehmend wichtiger. Insgesamt sind in der Branche etwa 6.000 Unternehmen tätig, die ca. 250.000 Mitarbeiter beschäftigen. Besonders beschäftigungsintensiv ist die Wertschöpfungsstufe Sammlung und Transport, in der 85 % der Beschäftigten tätig sind. An zweiter Stelle steht der Bereich Aufbereitung & Sortierung mit einem Anteil von 8,6 %, während auf die Wertschöpfungsstufe Verwertung/Beseitigung lediglich knapp 2 bzw. 5 % der Beschäftigten entfallen[105].

Nach Prognosen von Roland Berger Consulting wird sich das Marktvolumen in der Recyclingwirtschaft (Sammlung, Sortierung, Verwertung und Deponierung) in Deutschland von 16 Mrd. Euro in 2011 auf 25 Mrd. Euro in 2025 erhöhen[106]. Ähnliche Wachstumsraten sind global zu erwarten, so dass das weltweite Marktvolumen von aktuell 93 Mrd. Euro auf voraussichtlich 145 Mrd. Euro steigen wird (vgl. Abbildung 9). Betrachtet man speziell den Bereich der Anlageproduktion für die Abfall- und Kreislaufwirtschaft, so sind hier in Deutschland in den vergangen Jahren (2004-2009) sogar Umsatzsteigerungen von 24 % zu beobachten gewesen, insbesondere der Markt für automatische Sortieranlagen verspricht bis 2025 jährliche Wachstumsraten von bis zu 15 %[107].

**Abbildung 9: Marktprognosen Kreislaufwirtschaft 2011 bis 2025, in Mrd. Euro**




Quelle: BMU 2012

Deutsche Unternehmen wiesen 2011 im Anlagenmarkt für Abfallwirtschaft und Recycling einen Weltmarktanteil von etwa 24 % und damit den größten Anteil vor den USA und Japan auf[108]. Im besonders wachstumsstarken Marktsegment der Anlagen für die automatische Stofftrennung haben deutsche Unternehmen sogar eine absolut dominante Marktstellung mit

[104] BMU 2009, S. 142.
[105] GIB, ARGUS 2009, S. 89
[106] BMU 2012
[107] BMU 2009
[108] BMU 2012

ca. zwei Drittel Anteil am Weltmarkt. Es handelt sich dabei zunehmend um einen globalen und exportorientierten Markt.

Die Führungsposition Deutschlands auf dem Weltmarkt für Abfall- und Recyclingtechniken spiegelt sich auch bei den Patentanmeldungen wider, bei denen deutsche Unternehmen eine weltweit führende Stellung einnehmen. Rund 19 % der Patente aus der Abfall- und Kreislaufwirtschaft entfielen zwischen den Jahren 2000 und 2004 auf Deutschland, gefolgt von den USA mit 18 % und Japan mit 14 %. Deutschland ist dabei in der Breite der Wertschöpfungsstufen sehr gut aufgestellt und weist bei den meisten Techniken Patentanteile von um die 20 % aus (vom Sammeln, Trennen und Zerkleinern von Abfällen bis hin zu Recyclingverfahren und Verfahren zur energetischen Verwertung der Abfälle). Die folgende Übersicht stellt die Wettbewerbsposition Deutschlands auf den verschiedenen Stufen sowie die wichtigsten Konkurrenten dar. Seit 2008 ist zu beobachten, dass vor allem die asiatischen Länder wie Japan, China und Korea ihre Position deutlich verbessern konnten.

**Tabelle 5: Übersicht zur Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Wertschöpfungsstufen der Kreislaufwirtschaft**

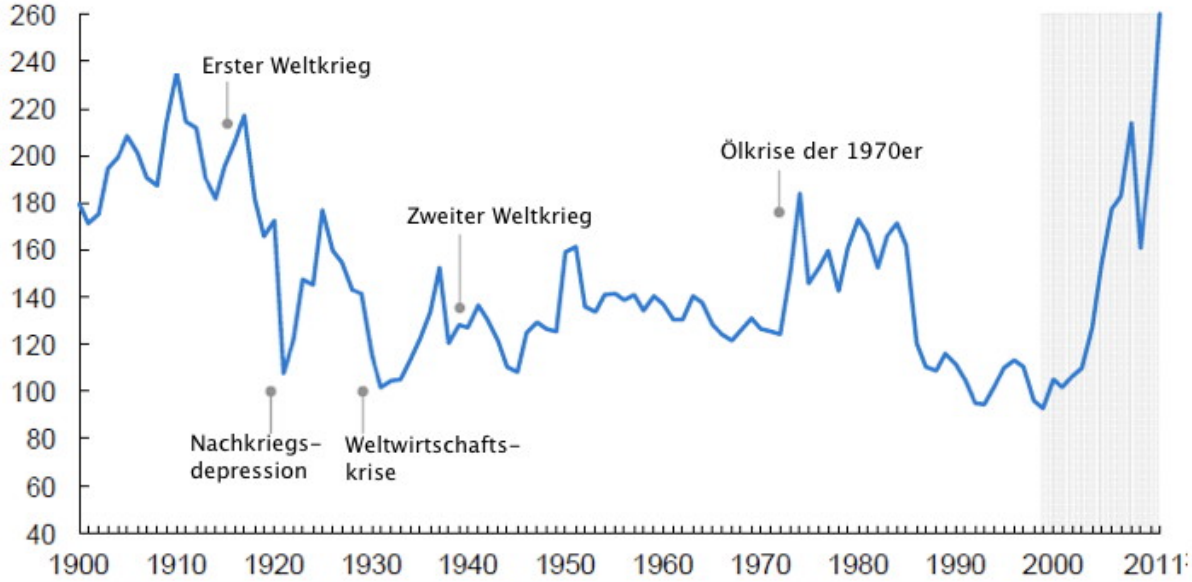
| **Produktgruppe** | **Patente** | | **Außenhandel** | |
|---|---|---|---|---|
| | relative Position | wichtigste Konkurrenten | relative Position | wichtigste Konkurrenten |
| **Abfall- und Kreislaufwirtschaft gesamt** | +++ | US, JP, IT | +++ | US, JP, IT |
| **Sammeln** | ++ | GB, US, ES | +++ | US, IT |
| **Zerkleinern** | ++ | US, JP | +++ | IT, JP |
| **Trennen** | ++ | US, GB | ++ | US, IT |
| **Recycling** | +++ | US, JP, IT | ++ | US, JP |
| **Abfallbehandlung** | ++ | US, JP | +++ | IT, US, JP |
| **Energetische Verwertung** | ++ | JP, US, IT | +++ | JP, US, IT |
| **Deponierung** | + | JP, US, KR | ++ | US, JP, GB |
| **Abfallarme Produktionsprozesse** | ++ | US, JP, KR | ++ | JP, US |
| +: mittel, ++: hoch/gut, +++: sehr hoch/sehr gut | | | | |

Quelle: Walz 2008

## 3.2 Preisentwicklungen

Ein eindeutiger Treiber der Marktentwicklung im Recycling sind die deutlichen Preissteigerungen für Primärrohstoffe gewesen, wie sie in der langfristigen Entwicklung des globalen Rohstoffpreisindex nach McKinsey in Abbildung 10 erkennbar sind.

**Abbildung 10: McKinsey Global Institute Rohstoffpreisindex (Jahre 1999-2001 = 100)**



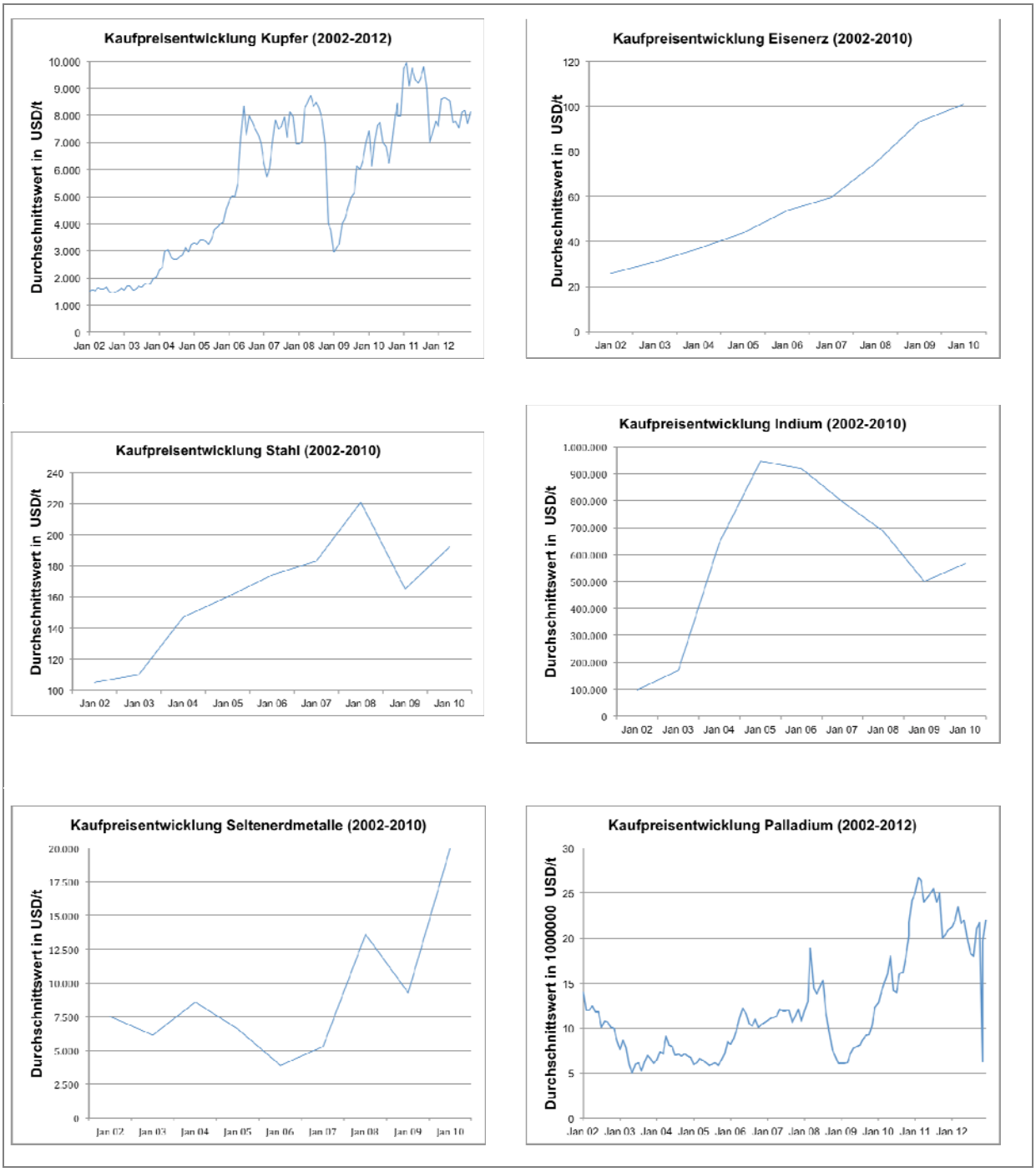

Quelle: modifiziert übernommen aus: McKinsey 2011, S. 30

Nachdem der Primärrohstoffpreis im vergangenen Jahrhundert fast stetig gesunken ist, hat die in den letzten zehn Jahren gestiegene Weltnachfrage nach Rohstoffen eine Umkehrung dieses Trends begünstigt. Zeitgleich sind die beobachteten Preisschwankungen so hoch wie nie zuvor (mit Ausnahme des Energiepreises in den 1970er Jahren)[109].Auch in Zukunft ist ein weiterer Anstieg der Rohstoffnachfrage zu erwarten. So wächst in Asien die Mittelschicht so rapide an, dass 2030 mit bis zu 3 Milliarden zusätzlichen Konsumenten dieser Klasse gerechnet werden kann. Auch wenn in den nächsten 20 Jahren in den meisten Sektoren noch nicht mit einer absoluten Ressourcenknappheit zu rechnen ist, kann der steigenden Nachfrage mitunter nicht sofort nachgekommen werden, wenn das Angebot relativ unflexibel reagiert. Neue Rohstoffquellen sind häufig kompliziert gelegen und unproduktiver. Eine weitere Entwicklung ist die zunehmende Vernetzung der Rohstoffe untereinander. Knappheit und Preisänderung einzelner Rohstoffe haben somit einen direkten Einfluss auf die Preisentwicklung anderer Rohstoffe, z.B. hat eine Wasserknappheit in China Anfang der 2010er Jahre zum Anstieg von Nahrungsmittelpreisen in Nordafrika geführt[110]. Zusätzlich wirken sich ökologische Prozesse wie steigende Bodenerosion oder die Folgen des Klimawandels möglicherweise hemmend auf die Ressourcenproduktion und wirtschaftliche Aktivitäten aus.

Bei den jeweiligen Preisverläufen der einzelnen Primärrohstoffe zeigen sich jedoch große Unterschiede. Die folgenden Preisdiagramme zeigen, dass zwar alle betrachteten Rohstoffe einen in der langfristigen Tendenz ansteigenden Verlauf haben, diese aber deutlichen individuellen Schwankungen unterworfen sind.

[109] McKinsey Global Institute 2011
[110] Andrews-Speed et al. 2012.

**Abbildung 11: Metallpreisentwicklungen**




Quelle: eigene Darstellung nach infomine.com (Kupfer, Palladium) und USGS 2012 (Eisenerz, Stahl, Indium, Seltene Erden)

Mit Blick auf Sekundärrohstoffe ist festzustellen, dass diese als Substitut für Primärrohstoffe gesehen werden und sich der kurzfristige Preisverlauf für diese Abfälle an den Primärmärkten orientiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt diese Entwicklung für Kunststoffabfälle exemplarisch auf. Die Preisabschläge richtigen sich dabei nach Qualitätsunterschieden und Aufbereitungskosten.

**Abbildung 12: Kaufpreisentwicklung für Kunststoffe (HD-PE und PET), Primär und Sekundär**

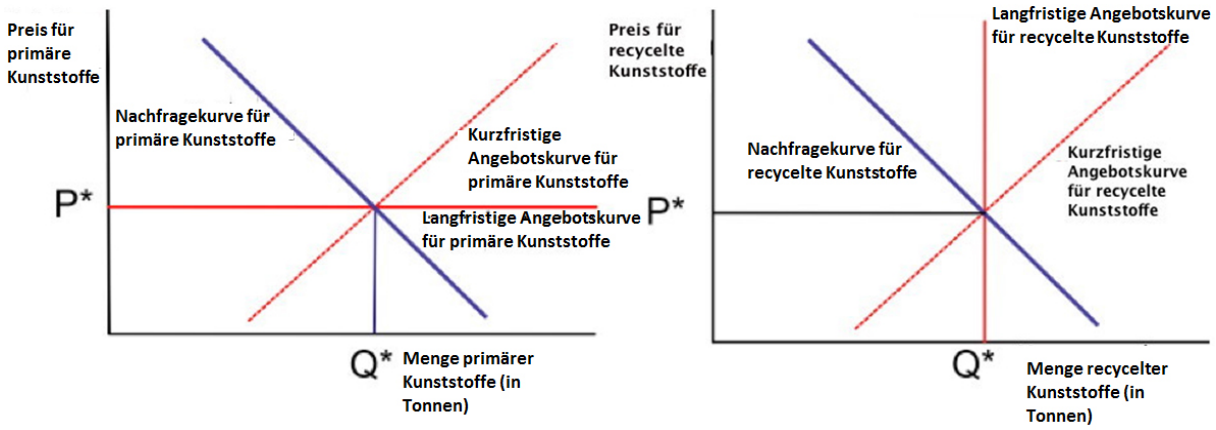
Quelle: modifiziert übernommen aus: www.pieweb.com

Dabei ist jedoch auf Recyclingmärkten in der Regel eine deutlich höhere Preisvolatilität für Sekundärrohstoffe im Vergleich zu Primärrohstoffen zu beobachten, was auf die hohe Relevanz von Transaktionskosten in diesen Märkten hinweist. Solche Kosten entstehen unter anderem, weil mit dem Austritt der Stoffe aus einem Unternehmen der Zugang zu Informationen über diesen Stoff verloren geht[111]. Das Wissen um die Umstände der Entstehung des Abfalls ist in der Regel tazit, also an die Personen im Unternehmen gebunden, oder betrifft formales Wissen, das Rückschlüsse auf die Produktionsprozesse ermöglichen würde und damit Betriebsgeheimnisse berührt.

Die folgende Abbildung verdeutlicht am Beispiel von primären und recycelten Kunststoffen die Unterschiede im Preisbildungsprozess: Während es sich bei nahezu allen primären Rohstoffen um global gehandelte Güter handelt, bei denen sich der Preis in der Tendenz nach den Gewinnungskosten richtet (linke Abbildung), folgt der Preis für recycelte Kunststoffe dem Preisverlauf der Primärkunststoffe – unabhängig von der Entwicklung der tatsächlichen Recyclingkosten. Da Sekundärkunststoffe überwiegend dann eingesetzt werden, wenn der Primärmarkt zu teuer wird oder Lieferknappheiten aufweist, ist die Nachfrage auf Recyclingmärkten damit insgesamt deutlich preisunelastischer als auf Primärmärkten (rechte Abbildung).

[111] Zu den Vereinbarungskosten zählen auch administrative Aufwendungen, die bei einer anlageninternen Kreislaufführung von Stoffen nicht anfallen, da hierbei juristisch überhaupt kein Abfall entsteht. Würde der identische Stoff aber in einer identischen Anlage eines anderen Unternehmens wieder eingesetzt, so würde es sich nach § 4 Abs. 2 des KrW/AbfG zunächst um Abfall handeln, womit eine Vielzahl von administrativ aufwendigen Auflagen (z.B. Nachweispflichten über den Abfallverbleib) verbunden wäre.

**Abbildung 13: Preisbildungsprozesse auf Primär- und Sekundärmärkten für Kunststoffe**




Quelle: modifiziert übernommen aus: WRAP 2008

## 3.3 Marktakteure

Die Marktstruktur in der deutschen Abfallwirtschaft ist vor allem durch kleine Unternehmen mit einem Umsatz von weniger als 10 Mio. Euro geprägt, die einen Marktanteil von 74 % ausmachen[112]. Die durchschnittliche Anzahl von Beschäftigten pro Unternehmen beträgt nur 26 Mitarbeiter, nur 2,5 % der in der Entsorgung tätigen Unternehmen haben einen Jahresumsatz von mehr als 25 Mio. Euro[113]. Eine zentrale Ursache für diese Fragmentierung ist die politische Zuständigkeit für die Abfallentsorgung auf kommunaler Ebene, die dazu führt, dass oft lokale oder regionale Anbieter herangezogen werden. Diese Marktstruktur bedingt auch, dass bisher nur knapp 30 % der Unternehmen im Recyclingmarkt international tätig sind[114].

Fokussiert man die Betrachtung auf den Bereich der Siedlungsabfälle, so kann der deutsche Abfallmarkt in drei Segmente untergliedert werden:

- National und international tätig sind im Wesentlichen die vier verbliebenen privaten Großkonzerne Remondis, Veolia, Alba und Suez, die zusammen einen Jahresumsatz von mehr als vier Milliarden Euro (damit ca. 50 % des Marktvolumens in der Siedlungsabfallentsorgung) aufweisen und vor allem den Bereich der Verpackungsabfallentsorgung sowie den Entsorgungsmarkt in ländlichen Gebieten dominieren.

- Daneben gibt es nach wie vor eine Reihe klein- und mittelständischer Abfallunternehmen mit einem Gesamtmarktanteil von ca. 15-20 %, die sich auf einzelne Regio-

[112] BMU 2009, S. 141.
[113] Commerzbank AG 2012, S. 4.
[114] Da der deutsche Markt aber als weitgehend gesättigt angesehen wird, gewinnen vor allem die Märkte in den neuen europäischen EU-Mitgliedsstaaten, Russland und Asien in Zukunft an Bedeutung, in denen die Umweltvorschriften zunehmend an die EU-Vorgaben angeglichen werden, vgl. BMU 2009, S. 144.

nen oder Abfallfraktionen spezialisiert haben. Diese klein- und mittelständischen Unternehmen haben vor allem im Bereich der Gewerbeabfälle noch relevante Marktanteile.

- Neben den privaten Abfallwirtschaftsunternehmen gibt es auch weiterhin rein kommunale oder kommunal dominierte Abfallwirtschaftsunternehmen zum einen in den Großstädten (z.B. Berlin, Hamburg, München), zum anderen in Regionen mit entsprechenden Zweckverbänden (z.B. Ekocity im Ruhrgebiet/ Bergischen Land, ZEW in der Region Aachen). Insgesamt wird ca. ein Drittel des Entsorgungsmarkts von öffentlichen Unternehmen abgedeckt[115].

Im Folgenden werden die zentralen Anbieter von Sekundärrohstoffen im Bereich der Kunststoffe, der Massenmetalle und Technologiemetalle dargestellt. Es wurden die wichtigsten Anbieter für den deutschen Raum identifiziert. Dabei ist festzustellen, dass die allermeisten Akteure sich nicht auf einzelne Rohstoffe konzentrieren, sondern sich eher auf bestimmte Inputmaterialien konzentrieren, in denen verschiedene Rohstoffe enthalten sein können. Je nach Komplexität der Inputstoffe versuchen die Unternehmen Zugriff auf unterschiedlich komplexe Abfallströme zu bekommen. So rechnet sich beispielsweise der Betrieb einer solch komplexen Anlage wie von Umicore in Hoboken, die über 20 verschiedene Technologiemetalle zurückgewinnen kann, auch nur bei Stoffströmen wie Elektronikschrott, bei denen auch tatsächlich die meisten dieser Metalle enthalten sind.

Die nachfolgende Unternehmens- und Kennzahlenbeschreibung fokussiert die Unternehmenssektoren, die für Kunststoffe und die ausgewählten Metalle im Rahmen der Studie relevant sind. Zudem werden als Größenordnungsmaß der Unternehmen die Gesamtumsatzzahlen für alle Geschäftsbereiche der jeweiligen Akteure angegeben.

**mtm plastics GmbH** (*Kunststoffe)*

Die mtm plastics GmbH aus Niedergebra in Deutschland (Gesellschafter der Vermarktungsgesellschaft für Sekundärrohstoffe mbH & Co. KG) recycelt Altkunststoffe und bereitet sie zu Regranulat auf. Mit dem Stammwerk in Deutschland und einer Reihe von europaweit verteilten Vertriebsmitarbeitern gehört mtm plastics zu den Technologieführern in Europa. Hauptsächlich werden Polyethylen- und Polypropylen-Verpackungen zu Sekundärrohstoffen aufgearbeitet und dabei kurzlebige Verpackungsabfälle (Gelbe Sack) zu Regranulat verarbeitet, welches von den Abnehmern für die Herstellung hochwertiger Gebrauchsgegenständen eingesetzt wird.[116] Gegenwärtig plant die mtm plastics neue Investitionen für Maschinen und Anlagen, mit denen die Altkunststoffe differenziert nach Farbe und Kunststoffart verarbeitet werden können und eine Produktionssteigerung um 20 % erzielt werden soll.[117]

[115] GIB, ARGUS 2009, S. 88
[116] mtm plastics o.J.
[117] Nordhausen.thueringer-allgemeine.de.2013

Kennzahlen:

| | |
|---|---|
| **Gesamtumsatz 2012**[118] | **17 Mio. Euro** |
| **Input**[119] | 75.000 t pro Jahr (Stand 2010) |
| **Produktion Sekundärrohstoffe** | Regranulat: 40.000 t pro Jahr |

**Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH** *(Kunststoffe)*

Die DKR, gehörend zu der Duales System Holding GmbH & Co.KG, wurde zunächst gegründet, um im Rahmen des Dualen Systems Deutschlands die gebrauchten Kunststoffverpackungen zu verwerten. Mittlerweile befasst sie sich sowohl mit dem Handel von Sekundärrohstoffen aus Glas, Papier und Metallen als auch mit Logistik- und Entsorgungsdienstleistungen.[120] Im Bereich der Kunststoffe verwertet die DKR Kunststoffe aus den gelben Säcken und Tonnen, Gewerbekunststoffabfälle und vermarktet die aufbereiteten Kunststoffabfälle in Form von Rezyklaten (Mahlgut, Agglomerate, Granulate) und Halbzeugen (z.B. Profile, Platten). Zudem bieten sie weltweit Dienstleistungen im Stoffstrommanagement, wie etwa für das PET-Recycling an.[121]

Kennzahlen:

| | |
|---|---|
| **Stoffstromvermarktung** | Gesamt[122]: 2,3 Mio. t pro Jahr<br>Kunststoffe aus haushaltsnaher Sammlung dualer Systeme[123]: 600.000 bis 700.000 t pro Jahr<br>Gewerbekunststoffe[124]: 600.000 bis 700.000 t pro Jahr |

**Remondis AG & Co. KG**

*Relevante Metalle: Stahl, Aluminium, Kupfer, Gold, Silber, Palladium, Platin*

Als deutsches Unternehmen der Kreislaufwirtschaft werden bei Remondis jährlich mehrere Millionen Tonnen Rohstoffe zurückgewonnen. Das Metallrecycling liegt überwiegend in den Zuständigkeiten der Spezialgesellschaften Remondis Argentia und der TSR.

Die TSR gehört zu den führenden Metallrecyclern in Europa und recycelt Stahlschrott und NE-Metalle. Remondis Argentina recycelt Silber aus Film- und Fotochemikalien und verarbei-

[118] Nordhausen.thueringer-allgemeine.de.2013
[119] Mtm plastics o.J.
[120] DKR 2012
[121] DKR 2013c
[122] DKR 2012
[123] DKR 2013a
[124] DKR 2013b

tet eine Vielzahl von edelmetallhaltigen Abfällen (z.B. Dentalabfälle, elektronische Bauteile etc.) zu den Sekundärrohstoffen Gold, Silber, Palladium und Platin[125].

Kennzahlen[126]:

| | |
|---|---|
| **Gesamtumsatz Remondis Gruppe** | **6.000 Mio. Euro pro Jahr** |
| **Stoffstrom Remondis Gruppe** | Metalle/Schrott: 7.500.000 t pro Jahr |
| **Stoffströme Remondis Argentia[127]** | Aluminium: 300 t pro Jahr<br>Silber: 150 t pro Jahr<br>Sonstige Edelmetalle: 500 t pro Jahr |

**Interseroh SE**

*Relevante Metalle: Stahl, Kupfer, Aluminium*

Die Interseroh SE, mit Sitz in Deutschland und unter dem Dach der ALBA Group, ist Umweltdienstleister, Rohstoffhändler und agiert im Stahl- und Metallrecycling. Mit jährlichen Handelsmengen von etwa 2,5 Mio. t Stahlschrott aus Industriebetrieben, Gewerbe, Abbrüchen und Haushalten gehört Interseroh weltweit zu den größten Stahlrecyclingunternehmen. Unter den NE-Metallen werden Sekundärrohstoffe wie Kupfer und Aluminium zurückgewonnen[128].

Kennzahlen[129]:

| | |
|---|---|
| **Gesamtumsatz 2011** | **2.210,7 Mio. Euro** |
| **Umsatz Stahl- und Metallrecycling 2011** | 1.744,5 Mio. Euro |
| **Produktion Sekundärrohstoffe 2011** | Stahlschrott: 2.584.000 t<br>NE-Metalle: 427.000 t |

[125] Remondis Argentia 2006
[126] Remondis 2012b
[127] Remondis Argentia 2012
[128] Interseroh 2010
[129] Interseroh 2011

**Aurubis AG**

*Relevante Metalle: Kupfer, Gold, Silber, Palladium, Platin*

Aurubis – mit Hauptsitz in Deutschland – gehört weltweit zu den führenden Unternehmen in der Kupferherstellung und dem Kupferrecycling. Das erzeugte Kupfer wird zu zwei Drittel aus Primärrohstoffen (Erzkonzentrate) und zu einem Drittel aus Recyclingmaterialen aus dem europäischen Raum gewonnen. Anschließend werden aus dem Kupfer Kupferkathoden produziert, die Basisprodukt für eine breite Produktpalette des Unternehmens sind. Neben der Kupferherstellung werden in dem Unternehmen Blei, Edelmetalle und weitere NE-Metalle produziert. Rohstoffquellen sind sowohl die Erzkonzentrate als auch komplexe Recyclingrohstoffe wie Industrieabfälle und Elektronikschrotte[130].

Kennzahlen[131]:

| | |
|---|---|
| **Gesamtumsatz 2011/12** | **8.778 Mio. Euro**<br>**davon 40 % in Deutschland (3.511 Mio. Euro)** |
| **Umsatz nach Produkten 2011/12** | Kupferkathoden 1.608 Mio. Euro, weitere Kupferprodukte 3.611 Mio. Euro, Edelmetalle 3.161 Mio. Euro, Sonstiges 398 Mio. Euro |
| **Eingesetzte Rohstoffe** | Kupfer-Konzentrate > 2.000.000 t pro Jahr<br>Recyclingmaterialien > 600.000 t pro Jahr |
| **Standorte der Recyclinganlagen und Verarbeitungsmengen** | Hamburg 165.000 t (Altkupfer, Zwischenprodukte, E-Schrott, Sonstige), Fehrbellin 24.000 t (Kabelschrott), Lünen 350.000 t (Altkupfer, Kupferlegierungsschrott, Shreddermaterial, Rückstände, E-Schrott, Kupfer-Eisen-Material, Sonstige), Olen 65.000 t (Altkupfer), Pirdop 60.000 t (Altkupfer) |

**Scholz AG**

*Relevante Metalle: Stahl, Kupfer, Aluminium*

Die Scholz AG – mit Hauptsitz in Deutschland – ist Recycler von Metall- und Stahlschrott und verwertet sämtliche metallische Abfälle. Jährlich werden in dem Unternehmen über zehn Mio. t an Recyclingmaterial umgesetzt und mit einer Wiederverwertungsquote von nahezu 100 Prozent zu Sekundärrohstoffen aufbereitet[132]. Die Scholz AG beschäftigt weltweit an etwa 500 Standorten mehr als 7.100 Mitarbeiter, dazu gehören ca. 25 Großschredderanlagen, 40 Großscheren, 35 Pressen sowie 10 spezielle Schienenbrecher.

[130] Aurubis AG 2012a
[131] Umsatzzahlen nach Aurubis AG 2012b, Mengenströme nach Kawohl 2011
[132] Scholz AG 2010

Kennzahlen:

| | |
|---|---|
| **Gesamtumsatz 2010** | **4.500 Mio. Euro** |
| **Metall- und Schrottstoffstrom** | 10,5 Mio. t pro Jahr |

**Schrott Wetzel GmbH**

*Relevante Metalle: Stahl, Kupfer, Aluminium*

Die Schrott Wetzel Gruppe zählt ebenfalls zu den bedeutenden Schrottunternehmen in Deutschland. Kerngeschäft des Unternehmens ist die Verarbeitung von Metallresten aus der metallverarbeitenden Industrie (z.B. Automobilindustrie, Bauindustrie etc.).[133]

Kennzahlen:

| | |
|---|---|
| **Gesamtumsatz 2010** | **Ca. 300 Mio. Euro** |
| **Metall- und Schrottstoffstrom[134]** | 1 Mio. t pro Jahr |

**Umicore**

*Relevante Metalle: Gold, Silber, Palladium, Platin, Indium*

Umicore ist ein belgisches Unternehmen und weltweit führend im Recycling von Edelmetallen und einem breiten Spektrum von NE-Metallen. Insgesamt werden 20 verschiedene Metalle aus Produktionsabfällen und komplexen Post Consumer Abfällen als Sekundärrohstoffe zurückgewonnen[135].

Kennzahlen:

| | |
|---|---|
| **Gesamtumsatz 2011** | **14.480,9 Mio. Euro**<br>**davon im Bereich Precious Metal Recycling ca. 700 Mio. Euro** |
| **Sekundärrohstoffe** | Die Anlage in Hoboken, Belgien, verarbeitet jährlich ca. 360.000 t edelmetallhaltige Inputstoffe. Davon sind ca. 10 %<br>E-Schrott, hinzu kommen u.a. gebrauchte Auto-Katalysatoren. |

[133] Schrott Wetzel o.J.
[134] Schrott Wetzel o.J.
[135] Umicore 2012

**Boliden**

*Relevante Metalle: Kupfer, Gold, Silber, Palladium*

Das schwedische Unternehmen Boliden betreibt fünf Metallhütten und produziert aus Metallkonzentraten sowie aus Recyclingmaterialen Metalle und Legierungen. Die Zusammensetzung der erzeugten Metalle besteht je nach Metall zu 10 bis 90 % aus Sekundärrohstoffen[136]. 2012 hat das Unternehmen die Aufbereitungskapazität einer seiner Metallhütten (*Rönnskär*) um mehr als das Doppelte erhöht. Die Inputmengen von Recyclingmaterialien sollen von 24 % auf 31 % (14 % Elektro- und Elektronikaltgeräten) gesteigert werden[137].

Kennzahlen:

| **Gesamtumsatz 2011[138]** | **4.615 Mio. Euro (40.323 Mio. SEK)** |
|---|---|
| **Substitution von Primärrohstoffen[139]** | Kupfer: 20 %<br>Gold: 35 %<br>Silber: 30 %<br>Palladium: 90 % |
| ***Rönnskär* Produkte[140]** | Kupfer: 230.000 t pro Jahr<br>Silber: 500 t pro Jahr<br>Gold: 15 t pro Jahr |

Bereits diese exemplarische Marktübersicht verdeutlicht, dass die Recyclingwirtschaft in Deutschland neben einigen Global Playern vor allem durch mittelständische Unternehmen dominiert wird. Damit verbunden sind ein sehr hohes Potenzial an unternehmerischer Kreativität, möglicherweise jedoch auch Probleme, notwendige Investitionen (inkl. Forschungs- und Entwicklung) für einen substanziellen Ausbau der Recyclingwirtschaft zu stemmen (vgl. hierzu Kapitel 5 zu Hemmnissen).

[136] Boliden o.J.
[137] Boliden 2010
[138] Boliden 2011
[139] Boliden o. J.
[140] Boliden 2010

# 4 Identifizierung weiterer Recyclingpotenziale in Deutschland

Wie in Kapitel 2 und 3 dargestellt, befindet sich Deutschland in vielen Bereichen auf dem Weg zu einer Kreislaufgesellschaft, trotzdem sind für verschiedene Stoffströme noch deutliche Potenziale zur Optimierung der Kreislaufführung erkennbar.

Während sich für Massenmetalle im Laufe der vergangenen Jahrzehnte Technologiepfade zur Rückgewinnung entwickelt haben (hier liegen die Probleme vor allem in der Sammlung und Erfassung, vgl. das nachfolgende Kapitel zu Hemmnissen), steht vor allem das Recycling von Technologiemetallen noch vor relevanten technischen Herausforderungen. Im Folgenden werden daher zunächst die technischen Recyclingpotenziale der Technologiemetalle untersucht. Die Darstellung fokussiert dabei das Recycling der Abfälle, die kennzeichnend für die Hauptanwendungsbereiche der ausgewählten Rohstoffe sind, und stellt einen Ausschnitt des jeweiligen Stands der Technik sowie aktueller Technikentwicklungen dar.

Wie in Kapitel 2 gezeigt, ist der Elektro- und Elektroniksektor wichtiger Einsatzbereich vieler Technologiemetalle. Insbesondere der dissipative Einsatz dieser Metalle - und häufig im Verbund - stellt hohe Anforderungen an die Verwertungsverfahren der Metalle. In der folgenden Betrachtung wird deutlich, dass grundsätzlich nahezu alle Technologiemetalle technisch zurückgewonnen werden können, wobei für viele Edelmetalle bereits ausgereiftere Recyclingverfahren existieren, während sich das Recycling von Indium, Tantal, Yttrium und Neodym noch im Anfangsstadium befindet. Da viele der Rückgewinnungsverfahren auf die Bauteilebene der komplexen Elektro- und Elektronikprodukten ausgerichtet sind, nehmen entsprechende Vorbehandlungsverfahren wie etwa die Demontage eine zentrale Rolle ein, um die geeigneten Ausgangsmaterialien für die Metallrückgewinnung bereitzustellen.

Neben den Technologiemetallen können für Deutschland insbesondere drei weitere Handlungsfelder mit zusätzlichen Recyclingpotenzialen identifiziert werden:

- Die (im Rahmen dieser nicht weiter betrachteten) Bioabfälle, bei denen aber auch mit der im KrWG vorgesehenen verpflichtenden getrennten Erfassung eine deutliche Steigerung der Verwertung zu erwarten ist[141],
- Bauabbruchabfälle, die bisher überwiegend einem Downcycling zugeführt werden, sowie
- Kunststoffabfälle im Gewerbeabfall.

[141] Vgl. hierzu z.B. BIFA 2013 oder Kern/Sprick 2011.

**Gold und Silber**

Die technische Rückgewinnung von Edelmetallen wird bereits länger aus unterschiedlichen Materialkomplexen praktiziert. Das Recycling von Leiterplatten, als eines der wichtigsten Anwendungsbereiche von Gold und Silber innerhalb der Elektro- und Elektronikbranche, gehört dabei ebenfalls zu den etablierten Verfahren. In der Regel werden die Edelmetalle dabei mit einer Kombination aus pyrometallurgischen, hydrometallurgischen und elektrochemischen Verfahren zurückgewonnen[142].

Die Recyclingeffizienz bei der Edelmetall-Rückgewinnung aus Leiterplatten in Elektro- und Elektronikprodukten differiert dabei enorm in Abhängigkeit des Produktes und des Vorbehandlungsverfahrens. Eine Untersuchung von Chancerel 2010 stellt diesen Zusammenhang dar. Es zeigt sich, dass insbesondere manuelle Vorbehandlungsverfahren gegenüber der mechanischen Vorbehandlung einen positiven Einfluss auf die Recyclingeffizienz haben. In diesem Fall können bis zu 90 % der Edelmetalle aus den Leiterplatten zurückgewonnen werden[143].

Am Institut für Umwelt- und Energiewirtschaft der Technischen Universität Hamburg-Harburg wird nach Verfahren geforscht, mit denen die Metalle effektiver als bisher aus dem Elektroschrott separiert werden sollen. Im Labormaßstab gibt es ein „kaltes“ und „heißes“ Verfahren, die in Hinblick auf ihre großtechnische Umsetzung untersucht werden. Das „kalte“ Verfahren beruht auf einer mechanischen Abtrennung der Metalle vom Kunststoff aus dem geschredderten Elektroschrott, während das „heiße“ Verfahren auf einer Verbrennung des Kunststoffs, bei dem die Metalle zurückbleiben, basiert[144].

Ein innovatives Konzept zum Recycling von Edelmetallen wurde bei der Aurubis AG in Hamburg initiiert. Der Recyclingprozess fokussiert die Rückgewinnung von Kupfer (u.a. aus Elektroschrott), wobei die Edelmetalle als Nebenprodukte aus dem anfallendem Anodenschlamm recycelt werden. Kern des Verfahrens ist eine Membranfilterpresse, die den bisher sehr energieaufwendigen, dreistufigen Prozess ersetzt und damit den Energiebedarf erheblich mindert[145].

**Palladium und Platin**

Autokatalysatoren sind das Hauptanwendungsgebiet für Palladium und Platin. Demensprechend kann mit dem Recycling der Metalle aus Autokatalysatoren ein Großteil dieser Stoffkreisläufe geschlossen werden.

Die technische Rückgewinnung der Platinmetallgruppe erfolgt in mehreren Stufen. Prinzipiell wird zunächst die platinmetallgruppenhaltige Katalysatorkeramik von dem Stahlgehäuse getrennt und anschließend die Metalle mittels hydrometallurgischen oder pyrometallurgischen

[142] Chancerel 2010, S. 43
[143] Chancerel 2010, S. 81
[144] Recycling Magazin 2011
[145] BMU 2012, S. 120

Verfahren extrahiert. Beim Raffinieren der Platingruppenmetalle kann eine Recyclingeffizienz von 98 % erzielt werden[146].

In einem aktuellem Artikel im Journal Platinum Metals Review schreibt Hagelüken von einer Recyclingeffizienz von über 95 % jeglicher platinmetallgruppenhaltiger Schrotte, insofern die Anlagen nach dem aktuellen Stand der Technik verfahren[147]. In technischer Hinsicht kann daher über den gesamten Anwendungsbereich von Palladium und Platin ein hohes Recyclingniveau erreicht werden.

**Indium**

Ein Großteil des Indium-Einsatzes konzentriert sich in Form von ITO auf Flachbildschirme. Besonders in den Herstellerländern im Raum Asiens wurden bereits Entwicklungen im Bereich des Recycling solcher Altgeräte hervorgebracht.

So wurde etwa von Sharp ein Verfahren entwickelt, bei dem die LC-Displays zerkleinert und anschließend die ITO-Schicht mittels einer sauren Lösung gelöst wird. Am Ende des Prozesses liegt das Indium als Sekundärrohstoff in der Verbindung Indium-Hydroxid vor[148].

In Deutschland haben das Institut für Energie- und Umwelttechnik und das Forschungsinstitut Edelmetalle und Metallchemie Aufbereitungsmethoden für Displayschrott untersucht, mit dem Ziel, ein geeignetes Ausgangsmaterial für die Indium-Rückgewinnung herzustellen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer Kombination aus thermischer und mechanischer Behandlung das Indium mit einer Effizienz von 80 - 99 % gegenüber dem ursprünglichen Indium-Gehalt angereichert werden kann[149].

**Tantal**

Die Rückgewinnung von Tantal aus Tantal-Kondensatoren ist technisch prinzipiell möglich und als zentrales Einsatzgebiet von Tantal in diesem Kontext wesentlich. Beispielsweise recycelt die Firma H.C. Starck Tantal-Kondensator-Schrotte mit einem chemischen Verfahren, bei dem die Kondensatoren in Säuren und Laugen gelöst werden und eine Aufkonzentrierung des Metalls erfolgt. Die Qualität des Sekundärrohstoffes entspricht dabei jener des Primärmetalls[150].

Das hohe technische Recyclingpotenzial der Kondensatoren kann allerdings erheblich geschmälert werden, da diese überwiegend in Leiterplatten in komplexen Elektro- und Elektronikprodukte verbaut sind. Das Potenzial greift daher weniger bei Post Consumer Abfällen, insofern keine adäquate Vorbehandlung erfolgt, sondern vielmehr bei Produktions- bzw. Monoabfällen.

---

[146] Lucas und Wilts 2011
[147] Hagelüken 2012
[148] Sharp 2012
[149] IUTA und FEM 2011, S. 3 f
[150] H.C. Starck 2012

**Yttrium**

Seit 2007 arbeitet das Chemieunternehmen Solvay an der Entwicklung eines Verfahrens zum Recycling Seltener Erden aus Energiesparlampen. Die Recyclinganlagen sind seit Ende 2012 in Frankreich in Betrieb und gewinnen sechs Seltene Erden (Yttrium, Lanthan, Cer, Terbium, Europium und Gadolinium) zurück[151].

Das Recycling erfolgt in drei Schritten. Zunächst werden die Altlampen von Spezialfirmen behandelt, um die unterschiedlichen Fraktionen recyceln zu können. Anschließend gelangt das yttriumhaltige Leuchtpulver in die Recyclinganlage von Solvay, in der die Seltenen-Erden-Konzentrate hergestellt werden. Im letzten Schritt werden die Seltenen Erden aus diesen Konzentraten in der Solvay-Anlage in La Rochelle als Sekundärrohstoffe zurückgewonnen. Die Eigenschaften der Seltenen Erden bleiben während des Recyclingprozesses zu 100 % erhalten und können zur Herstellung neuer Lampen genutzt werden[152].

Insgesamt wird mit dem Verfahren eine Recyclingeffizienz von rund 90 % erzielt[153]. Das hohe technische Potenzial des Recyclings von Yttrium aus Energiesparlampen ist für die gesamte technische Recyclingfähigkeit des Metalls besonders bedeutend, da dessen Einsatz in Leuchtstoffen eines der wichtigsten Anwendungsfelder von Yttrium darstellt.

**Neodym**

Für das Recycling von Neodym aus Neodym-Eisen-Bor-Magneten, als eines der bedeutendsten Einsatzbereiche, gibt es eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten sowohl im Bereich von Produktionsabfällen als auch Post Consumer Abfällen. Eine Studie des Öko-Instituts hat eine umfassende Sichtung aktueller Forschungsvorhaben durchgeführt und die Ergebnisse zusammengetragen[154].

So zeigen etwa Untersuchungsergebnisse von Tang et al. 2009, dass eine Fällung mit Natriumsulfat von gesintertem Schrott aus Neodym-Eisen-Bor-Magneten eine Rückgewinnung von Neodym(III)-oxid ermöglicht. Dabei wird eine Recyclingeffizienz von über 82 % erzielt.

Hitachi hat eine Maschine entwickelt, mit der 100 Neodym-Eisen-Bor-Magnete pro Stunde von Festplatten automatisiert demontiert werden können. Das Verfahren ist achtmal schneller als eine manuelle Demontage der Magnete und stellt damit ökonomisch effizient ein recyclingfähiges Ausgangsmaterial her. Bereits im Jahr 2013 soll die Maschine in Betrieb genommen werden[155].

Darüber hinaus wird am Institut für Umwelt- und Energiewirtschaft der Technischen Universität Hamburg-Harburg das Recycling von Neodym aus Elektro- und Elektronikschrott er-

[151] Recycling Magazin 2012
[152] Solvay 2012
[153] GTAI 2012
[154] Schüler, et al. 2011, S.105 f
[155] Clenfield und Shiraki 2010

forscht. In laufenden Produktanalysen wurden bereits verschiedene Produkte hinsichtlich ihres Neodym-Gehalts untersucht. Derzeit werden chemische, biotechnologische und mechanische Ansätze entwickelt, die eine Trennung dieser Metalle ermöglichen sollen, um die Ressourcenpotenziale zu erschließen[156].

**Beton in Bauabbruchabfällen**

Die Bauschuttaufbereitung in Deutschland weist zwar hohe Verwertungsquoten auf, im Kern handelt es sich jedoch um ein systematisches Downcycling, bei dem erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale in der Kreislaufführung speziell von Beton ungenutzt bleiben[157]. Dieser Baustoff gelangt nahezu ausschließlich in den Straßen- und Wegebau, in der Regel als Frostschutz- oder Schottertragschicht. Die aufbereiteten Materialien als Zuschlagstoff in die Baustoffindustrie zurückzuführen, gelingt bislang nicht in relevanten Mengen. Vor allem fehlende Kenntnisse und zum Teil Akzeptanzprobleme bei Planern und Bauherren, die Konkurrenz durch kostengünstigere Entsorgungsmöglichkeiten sowie teils auch die Preise für Primärware stellen die größten Hemmnisse für den Einsatz von Sekundärbaustoffen dar[158]. Modellrechnungen zeigen, dass unter Berücksichtigung der Gebäudebestandsentwicklung im Jahr 2020 ein Volumen von 4,1 Mio m³/a an natürlichen Gesteinskörnungen durch Recyclingbeton substituiert werden könnte[159].

**Kunststoffe im Gewerbeabfall**

In Deutschland fallen jährlich rund 6,4 Mio. t gemischte Gewerbeabfälle an (davon rund 2,1 Mio. t als Verpackungsgemische) – diese Mengen werden größtenteils (ca. 60 Ma.-%[160]) ohne eine Vorbehandlung direkt in thermischen Abfallbehandlungsanlagen entsorgt, in Sortieranlangen gelangen nur ca. 30 Ma.-% (nur bei den Verpackungsgemischen werden rund 70 Ma.-% in Sortieranlagen aufbereitet)[161]. Aber auch in diesen Vorbehandlungsanlagen werden aus den zugeführten Gemischen nur rund 16,5 Ma.-% Sekundärrohstoffe aussortiert, die verbleibenden Sortierreste werden energetisch verwertet. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere im Bereich der Kunststoffe das Recyclingpotenzial noch bei weitem nicht ausgeschöpft wird: Bisher werden aus diesen Abfallströmen 72.000 t Sekundärkunststoffe zurückgewonnen, das Potenzial wird auf bis zu 1 Mio. t pro Jahr geschätzt[162].

Die Recyclingtechnik im Bereich der Kunststoffe hat in den letzten Jahren deutliche Fortschritte gemacht und ist mittlerweile in der Lage, Sekundärkunststoffe herzustellen, die bei einem deutlich geringeren Energie- und Ressourcenaufwand primäre Kunststoffe gleichwertig ersetzen. Die prinzipiell erreichbare Qualität verdeutlicht vor allem der Einsatz von Se-

[156] Kuchta 2012
[157] Mettke 2009
[158] Vgl. Knappe et al. 2012.
[159] Schiller/ Deilmann 2010, S. 126ff.
[160] Ma.-%: Massenprozent = Gewichtsprozent
[161] Dehne et al. 2011, S. 8
[162] Dehne et al. 2011, S. 86.

kundärkunststoffen in Bereichen mit unmittelbarem Kontakt zu Lebensmitteln („food grade secondary plastics“[163]), hier ist vor allem der Bereich PET führend.

**Fazit**

Die Betrachtung technischer Potenziale beim Recycling von Technologiemetallen verdeutlicht, dass für viele als kritisch eingestufte Rohstoffe tatsächlich noch erhebliche Defizite für Recyclingprozesse bestehen. Speziell die Beispiele Indium oder Tantal verdeutlichen, dass für die sehr geringen Mengen dieser Metalle in Post Consumer Abfällen bisher noch keine marktfähigen Lösungen für ihre Rückgewinnung bestehen.

Ein deutlich anderes Bild ergibt sich für den Bereich der Massenmetalle wie Eisen, Stahl oder Kupfer. Hier existieren solche Recyclingpfade seit langem, trotzdem zeigen die in Kapitel 2 beschriebenen Recyclingquoten, dass man auch hier noch weit von geschlossenen Kreisläufen entfernt ist. Ähnliches gilt für den Bereich der Kunststoffabfälle oder des Betonrecyclings, wo technisch nahezu gleichwertige Sekundärrohstoffe hergestellt werden können, bisher aber noch in nur unbefriedigendem Ausmaß angeboten werden. Die Gründe hierfür liegen jedoch hauptsächlich in einer Reihe von rechtlichen, institutionellen oder ökonomischen Hemmnissen, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

[163] CocaCola 2013, S. 2.

# 5 Beschreibung wesentlicher Hemmnisse für die Erschließung dieser Recyclingpotenziale

Aufbauend auf die identifizierten Recyclingpotenziale sollen in diesem Kapitel die wichtigsten Hemmnisse dargestellt werden, die ihrer Umsetzung im Wege stehen.

Angesichts der beschriebenen Preisentwicklungen für Primärrohstoffe sollten Unternehmen eigentlich über ausreichende ökonomische Anreize verfügen, soweit wie möglich auf billigere Sekundärrohstoffe auszuweichen. Prinzipiell sollten Marktprozesse daher zu einem effizienten Recyclingniveau führen, bei dem sich Grenzkosten des Recyclings und Grenznutzen für die Unternehmen entsprechen. Allerdings weisen Recyclingmärkte eine Reihe von Besonderheiten auf, die das Erreichen eines solchen effizienten Marktgleichgewichts unwahrscheinlich erscheinen lassen; die OECD spricht von systematischem Marktversagen[164] und unterscheidet dabei vier grundsätzliche Ursachen, deren Relevanz sich jedoch erheblich zwischen den verschiedenen Abfallströmen unterscheidet (vgl. Tabelle 6). Hinzu kommen spezifische Hemmnisse, die sich aus dem deutschen institutionellen Kontext ergeben. Abschließend werden Faktoren betrachtet, die speziell die Kreislaufführung von Technologiemetallen erschweren.

Angesichts der Heterogenität der Hemmnisse wird deutlich, dass es nicht die eine Lösung geben kann und wird, um das Recycling in Deutschland signifikant auszubauen. Die spezifischen Abfallströme zeichnen sich durch jeweils spezifische Hemmnisse aus, für die spezifische Instrumente entwickelt werden müssen, um die Kreislaufführung der jeweils enthaltenen Wertstoffe zu optimieren. Die Erfahrungen für die verschiedenen Abfallströme zeigen zudem, dass technische Innovationen wie im Bereich der Sortiertechnologie wichtige Impulse für das Recycling liefern können, ohne die entsprechenden institutionellen Rahmenbedingungen jedoch auch zu gegenläufigen Effekten führen können, wenn beispielsweise nur noch die rentabelsten Fraktionen aussortiert und die verbleibenden Reste ausschließlich thermisch verwertet werden. Es bedarf daher einer genauen Betrachtung der jeweiligen Hemmnisse, für die darauf aufbauend in Kapitel 6 geeignete Instrumente vorgestellt werden.

Ein weitgehender Ausbau der Kreislaufwirtschaft ist letztendlich nur dann erreichbar, wenn hochwertiges Recycling sich auch wirtschaftlich gegenüber alternativen Entsorgungsmöglichkeiten (z.B. Müllverbrennung, Downcycling) behaupten kann und das Recyclingprodukt sowohl qualitativ als auch preislich mit dem Primärprodukt konkurrieren kann. Hierzu bedarf es zum Teil weiterer politischer Rahmensetzungen. Grenzen des Recyclings sind sicherlich dann erreicht, wenn die damit einhergehenden Umweltbelastungen diejenigen der Primärrohstoffgewinnung überschreiten.

[164] OECD 2006, S. 166

**Tabelle 6: Marktversagenstatbestände im Recyclingmarkt**

| Kategorie der Marktschwäche | Potenziell betroffene Abfallströme | Grund der Marktschwäche |
|---|---|---|
| **Marktmacht** | Bau- und Abbruchabfälle | Lokalisierte, von einzelnen Käufern beherrschte Märkte, die den Vertrieb erschweren und die Preise reduzieren |
| | Gebrauchtes Glas | Lokalisierte, von einzelnen Käufern beherrschte Märkte, die den Vertrieb erschweren und die Preise reduzieren |
| | Altmetall | Vertikale Integrations- und Eintrittshemmnisse , die den Eintritt recycelbarer Materialien beschränken |
| | Gummireifen | Marktsegmentierung und Preisdiskriminierung zwischen runderneuerten und neuen Reifen |
| **Informationsversagen** | Gebrauchte Schmieröle | Wasser belastende Stoffe, die den Wert des Öls reduzieren |
| | Bau- und Abbruchabfälle | Zweifelhafte Qualität von Materialien, die die potenzielle Nutzung einschränkt |
| | Gebrauchtes Plastik | Schadstoffe, die die Kosten der Rückgewinnung erhöhen |
| | Altmetall | Präsenz von Schadstoffen und anderen Materialien, die zu unvorhergesehenen Kosten für Vertrieb oder Wiederaufarbeitung von Schäden führen kann |
| | Textilien | Große Mengen (einfach zu verbergender) Textilien minderer Qualität |
| | Gebrauchtes Papier und Pappe | Gemischte Papierströme, die zu hohen Sortierkosten oder niedrigeren Ertragswerten führen |
| **Technologische externe Effekte** | Plastikverpackungen | Gebrauch von Faserverbundkunststoffen, die Rückgewinnungskosten erhöhen und Wiederverwendungsmöglichkeiten einschränken |
| | Gebrauchte Schmieröle | Zusatzstoffe und Schadstoffe, die das Erneuerungspotenzial mindern |
| | Altmetalllegierungen | Gebrauch von Verbundmaterialien, die das Wiederverwertungspotenzial einschränken oder zerstören |
| | Elektrische Geräte | Schwierigkeiten in der Sortierung aufgrund verschiedenartiger Abfälle (jedoch hohes technologisches Innovationstempo) |
| | Gummireifen | Neue Reifentypen oft weniger geeignet für Runderneuerung |
| **Such- und Transaktionskosten** | Bau- und Abbruchabfälle | Heterogene Natur und undurchsichtige Erzeugung der Materialien |
| | Gebrauchte Schmieröle | Heterogene Natur und undurchsichtige Erzeugung der Materialien |

Quelle: OECD 2006

## 5.1 Marktmacht

Ein im Abfallbereich immer wieder anzutreffendes Problem ist die Existenz oligopol- bis monopolartiger Strukturen, die sich negativ auf die Entwicklung von Recyclingmärkten auswirken. Angesichts der hohen Kapitalintensität und hoher Anteile an „sunk costs“ abfallwirtschaftlicher Infrastrukturen entstehen vor allem in der Abfallbehandlung häufig natürliche

Monopole, die zu überhöhten Preisniveaus in Verbindung mit segmentierten Märkten und Preisdiskriminierung führen[165]. Eine wichtige Rolle spielen dabei an der Schnittstelle zur kommunalen Abfallwirtschaft auch Geschäftsbeziehungen mit teilweise sehr langfristig abgeschlossenen Vertragsstrukturen. Diese erlauben einerseits Planungssicherheiten, ohne die Investitionen in hochwertige Technologien und Anlagen häufig nicht möglich wären. Auf der anderen Seite verhindern sie die Entwicklung marktgerechter Preise, wodurch die Sammlung von Abfällen oder die Abnahme als Sekundärrohstoff unter einem Niveau bleiben, das aus volkswirtschaftlicher Sicht als effizient angesehen werden könnte.

Ein in diesem Zusammenhang sehr illustratives Beispiel ist der deutsche Markt für Verpackungsabfälle. In den 1980er Jahren wurden steigende Hausmüllmengen und die Erschöpfung von Deponiekapazitäten als ein sich zuspitzendes abfallwirtschaftliches Problem erkannt, ein wesentlicher Treiber dieses Problems waren steigende Verpackungsabfallmengen. Daher sollte zum einen der Verpackungsverbrauch durch Internalisierung der Entsorgungskosten gesenkt werden, zum anderen sollten die Verpackungsabfälle nicht mehr deponiert, sondern verwertet werden. Nachdem sich Selbstverpflichtungen von Industrie und Handel als wenig wirksam erwiesen hatten, sollte auf Grundlage der 1991 eingeführten Verpackungsverordnung ein bundesweit flächendeckendes „duales“ System zur Entsorgung von Verpackungsabfällen aufgebaut werden. Nach dem Willen von Industrie und Handel, der Entsorgungswirtschaft und der Politik wurde das duale System als Monopol ausgestaltet. Die Verwertung vergab die Duale System Deutschland (DSD) GmbH getrennt von Erfassung/Sortierung. Mit der Verwertung wurden sog. „Garantiegeber“ – zum Teil exklusiv – betraut, die ihrerseits zum Teil Kartelle von Nachfragern nach diesen Sekundärrohstoffen waren. Die Entsorgungskosten im Bereich der Verpackungsabfälle lagen in den Jahren bis zur Marktöffnung 2003 bei jährlich ca. 1,8 Mrd. Euro.

Die Wettbewerbsbedingungen wurden ab dem Jahr 2000 durch zahlreiche kartellbehördliche und auch gesetzgeberische Maßnahmen schrittweise verbessert. Dies hat zum Markteintritt von neuen Wettbewerbern zu DSD geführt, deren Marktanteil bis zum Jahr 2011 auf 44 % gesunken ist. Stützpfeiler des Wettbewerbs dualer Systeme sind die Entkopplung der Verpackungssammlung von der Sortierung und Verwertung sowie die gebietsweise Ausschreibung der Erfassungsleistung durch das jeweilige duale System, das die lokale Hauptkostenverantwortung trägt. Die Wettbewerbsöffnung hat zu massiven Senkungen der Entsorgungskosten geführt. Die Kosten der haushaltsnahen Verpackungserfassung und -verwertung, die letztlich vom Verbraucher über die Produktpreise getragen werden, sind von ehemals rund 1,8 Mrd. Euro auf unter 1 Mrd. Euro gesunken (vgl. Tabelle 7). Die Kostensenkung entspricht einer Ersparnis von mindestens 50 Euro pro Jahr für eine Familie. Dagegen sind die vor der Wettbewerbsöffnung befürchteten negativen Folgen nicht eingetreten. Die Sammlung in gelben Tonnen und Glascontainern funktioniert weiterhin zuverlässig, ein „ruinöser“ Wettbewerb ist nicht eingetreten. Die Recyclingquoten sind nicht gesunken, vielmehr hat die Wettbewerbsöffnung auch zu einem Innovationsschub bei der Sortiertechnik für das Sammelgemisch der Gelben Tonne geführt. Mit der modernen Trenntechnik geht nicht nur eine Kostensenkung einher, sie schafft durch eine höhere Trenntiefe auch die Voraussetzungen für eine weitere Zunahme des hochwertigen Recyclings.

[165] OECD 2006, S. 178

**Tabelle 7: Kosten im Bereich Verpackungsabfälle vor und nach Marktliberalisierung**

| | 2003 (in Mio. Euro) | 2011 (in Mio. Euro) | Veränderung |
|---|---|---|---|
| Sammlung | ca. 918 | 517 | ca. -44% |
| Sortierung + Verwertung | ca. 715 | 173 | ca. -76% |
| Nebenentgelte | ca. 144 | 133 | ca. -8% |
| **Summe Entsorgungskosten** | **1.777** | **824** | **-54%** |

Quelle: Bundeskartellamt 2012

Das Beispiel der Marktstrukturen im Bereich Verpackungsabfälle verdeutlicht exemplarisch, dass der Recyclingmarkt in einzelnen Wertschöpfungsstufen immanent oft durch natürliche bzw. durch öffentliche Regulierung begünstigte Monopolstrukturen gekennzeichnet ist. Allerdings wurden hieraus teilweise auch entsprechende Lehren gezogen, u.a. durch die Zulassung weiterer duale Systeme bzw. in der Behandlung von Elektronikschrott, wo von Anfang an auf einen intensiven Wettbewerb der verschiedenen Erstbehandler gesetzt wurde. Trotzdem besteht z.B. im Bereich des Recyclings von Technologiemetallen praktisch ein Oligopol, da nur wenige Unternehmen über sogenannte „integrierte Smelter“ verfügen (weltweit ca. 15-20 Anlagen), in denen die Vielzahl unterschiedlicher Metalle z.B. in Elektroaltgeräten zurückgewonnen werden können. Dies ist jedoch eindeutig bedingt durch die hohen notwendigen Investitionen. Die Anlage von Umicore in Hoboken benötigte beispielsweise Investitionen von über 1 Mrd. Euro[166].

## 5.2 Informatorische Defizite und entstehende Transaktionskosten

### 5.2.1 Angebotsseite: Abfallqualität

Unsicherheiten bezüglich der Qualität von angebotenen Stoffen können diese aus Sicht der verarbeitenden Akteure zu Abfall werden lassen: Aus der Betrachtung internationaler Recyclingmärkte leiten Johnstone und de Tilly[167] verschiedene Markt-Ineffizienzen ab, die sich negativ auf das Recyclingniveau insgesamt auswirken. Dabei spielt vor allem die Verfügbarkeit von Informationen eine entscheidende Rolle. Im Gegensatz zu Primärrohstoffen ist die Qualität von Sekundärrohstoffen deutlich schwieriger zu beurteilen. Als Qualitätsmerkmale kommen hierbei beispielsweise Kontaminierungen mit Störstoffen in Frage, aber auch die Vermischung mit anderen prinzipiell wertvollen Stoffen (so hat z.B. bereits ein geringer Kupferanteil im Stahlschrott erhebliche Konsequenzen für seine weitere Verwendungsfähigkeit). Bereits geringfügige Veränderungen im Reinheitsgrad können aus Abfällen mit einem positiven Preis Sonderabfälle werden lassen, die mit sehr hohen Kosten entsorgt werden müssen (dies ist vor allem bei Kontaminierungen mit gefährlichen Abfällen der Fall). In vielen Bereichen existiert diese Art von Informationen über Abfälle überhaupt nicht oder gehen im Laufe

[166] Hagelüken 2007
[167] OECD 2006, S. 19ff.

des Produktlebenszyklus verloren. Wenn diese Art von Informationen doch vorhanden ist, sind sie in der Regel asymmetrisch zwischen den Akteuren verteilt. Für die informierte Anbieterseite bestehen massive ökonomische Anreize, gegenüber dem Abnehmer die tatsächliche Qualität der Abfälle zu positiv darzustellen. Der Käufer kann diese Angaben entweder gar nicht oder nur zu prohibitiv hohen Kosten überprüfen. Auf solchen Märkten besteht die Gefahr, dass der von Akerlof[168] am Beispiel von Altautos beschriebene Prozess der adversen Selektion in Gang kommt. Da der mögliche Gewinn für den Verkäufer natürlich höher ist, wenn er Abfälle schlechter Qualität (die sonst eventuell als Sondermüll entsorgt werden müssten) verkauft, werden die Anbieter guter Qualität langfristig vom Markt vertrieben, was im Endeffekt zum Zusammenbruch des Gesamtmarkts für höherwertige Abfälle führen kann. Die Unsicherheiten über die Qualität der Sekundärrohstoffe und den eingesetzten Abfall sind dabei um so gravierender, je höher die Kosten der Entdeckung dieser Mängel sind und je höher die Kosten ausfallen, wenn die Mängel entweder ex ante (kann der Mangel noch behoben werden?) oder ex post (ist das resultierende Produkt überhaupt noch zu verkaufen?) entdeckt werden[169]. Das Problem ist gerade für Siedlungsabfall relevant, da hier kaum nachvollziehbare Stoffströme von einer Vielzahl von Verursachern zusammenkommen, ein Nachvollziehen der einzelnen Quellen ist daher praktisch unmöglich. Speziell für Technologiemetalle, die im Abfall selber nur durch aufwändige Analytikverfahren nachgewiesen werden können, gewinnt das Informationsmanagement zu Stoffflüssen, Stofflagern und ihre Verteilungen besondere Bedeutung, um ihr Recycling effizient gestalten zu können.

### 5.2.2 Nachfrageseite

Auf den Märkten für Sekundärrohstoffe kommt hinzu, dass mit den Primärrohstoffen in der Regel ein perfektes Substitut zur Verfügung steht: Transaktionskosten, die auf den Preis für Sekundärrohstoffe aufgeschlagen werden, führen damit tendenziell zu einer niedrigeren Verwertungsquote. Solche (Anbahnungs-)kosten entstehen unter anderem, weil mit dem Austritt der Stoffe aus einem Unternehmen der Zugang zu Informationen über diesen Stoff verloren geht. Zu den Vereinbarungskosten zählen auch administrative Aufwendungen, die bei einer anlageninternen Kreislaufführung von Stoffen nicht anfallen, da hierbei juristisch überhaupt kein Abfall entsteht. Würde der identische Stoff aber in einer identischen Anlage eines anderen Unternehmens wieder eingesetzt, so würde es sich nach § 4 Abs. 2 des KrW/AbfG zunächst um Abfall handeln, womit eine Vielzahl von administrativ aufwendigen Auflagen (z.B. Nachweispflichten über den Abfallverbleib) verbunden wäre.

Die Relevanz dieser Transaktionskosten auf Märkten, bei denen mit Abfällen gehandelt wird, lässt sich indirekt an Preisunterschieden belegen. Auf perfekten Märkten ohne Transaktionskosten müsste im Prinzip ein einheitlicher Preis zu beobachten sein, da sonst rentable Arbitrage-Möglichkeiten bestünden. Transaktionskosten treiben jedoch einen Keil zwischen den Preis des Käufers und des Verkäufers. Enviros[170] hat am Beispiel von Plastikabfällen gezeigt, dass bei identischen Stoffen Preisunterschiede bis zu einem Faktor 10 zu beobachten sind, je nachdem welche Informationen über die Zusammensetzung der Abfälle vorlagen. Ein

[168] Akerlof 1970
[169] OECD 2006
[170] OECD 2006

weiterer zu beobachtender Effekt auf Recyclingmärkten ist eine deutlich höhere Preisvolatilität für Sekundärrohstoffe im Vergleich zu Primärrohstoffen, was ebenfalls auf hohe Transaktionskosten hinweist[171]. Dieses stark schwankende Preisniveau stellt ein besonderes Hindernis für innovative Recyclingtechnologien dar, weil die Rentabilität von Investitionen damit mit höheren Risiken behaftet ist.

Um Abfälle einer möglichst hochwertigen Verwertung als Sekundärrohstoff zuführen zu können, bedarf es natürlich einer Nachfrage am Markt nach diesen Stoffen. Dabei sind auch hier im Vergleich zum Einsatz von Primärrohstoffen besondere Informationsbedürfnisse zu berücksichtigen. Eine Kreislaufführung von Stoffen jenseits der eigenen Anlage setzt auf den Wiedereinsatz von Outputs, die nicht dem eigentlichen Produktionsziel des verursachenden Unternehmens entsprechen und daher von eher nebensächlicher Bedeutung sind. Dementsprechend existieren über Quantität und Qualität des Outputs keine so zuverlässigen Informationen, wie dies beim eigentlichen Produktionsgut der Fall wäre, aber auch für den Abnehmer notwendig wäre, der eine möglichst 100%ige Versorgungssicherheit für seine Produktionsinputs gewährleisten muss. Der Ausfall bereits eines Akteurs auf der Anbieterseite, sogar nur eine Modifikation seines Produktionsprozesses kann das ganze System zum Einsturz bringen. Diese Systemfragilität kann auch als der Hauptgrund angesehen werden, wieso Erfolgsbeispiele für industrielle Stoffkreislaufwirtschaft wie in Kalundborg oder in Pfaffengrund so wenig Nachahmer gefunden haben. Hintergrund der beiden Projekte ist eine firmenübergreifende Kooperation des Stoffstrommanagements.[172]

## 5.3 Rechtliche und institutionelle Hemmnisse

Betrachtet man die deutsche Abfallwirtschaft, so hat sich in vergangenen Jahrzehnten die Verwertung von Abfällen zu einem lukrativen Geschäftsfeld entwickelt. Speziell im Bereich der Siedlungsabfälle ist jedoch ein entscheidendes Hemmnis die unklare institutionelle Zuständigkeit zwischen öffentlich-rechtlicher geplanter Entsorgung und privat dominierter Verwertung. In der öffentlich-rechtlichen Abfallwirtschaftsplanung liegt der Fokus nach wie vor noch sehr stark auf der Entsorgung. Planerische Instrumente wie Abfallwirtschaftskonzepte oder -pläne sind überwiegend von der Vorstellung eines für alle Abfallfraktionen zuständigen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers geprägt. Das Problem besteht aus Sicht der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger vor allem in der Möglichkeit der Gewerbetreibenden, ihre Abfälle je nach Marktlage – also je nachdem, ob der Verbrennungspreis gerade in kommunalen Müllverbrennungsanlagen (MVA) oder in privat betriebenen Ersatzbrennstoff-Anlagen (EBS-Anlagen) niedriger ist – als Abfälle zur Verwertung oder als überlassungspflichtige Abfälle zu deklarieren[173]. Die Kommunen sind daher gezwungen, für sämtliche Abfälle Versorgungskapazitäten vorzuhalten.

Die Folgen dieser Entwicklung zeigen sich in Deutschland im Problem der Überkapazitäten in der Abfallverbrennung. Die technische Infrastruktur der Abfallwirtschaft in Deutschland ist

[171] Ebd., S. 20ff
[172] Pépin 2011
[173] Hieran haben auch die verschärften Getrennthaltungspflichten für Gewerbeabfälle wenig geändert, vgl. Dehoust et al. 2010.

vor allem durch eine Vielzahl an Müllverbrennungsanlagen gekennzeichnet: „Wir befinden uns in einer Epoche, in der mindestens im zentraleuropäischen Umfeld Müllverbrennung als Mittel der Wahl für die Entsorgung sonst nicht anderweitig verwertbarer Abfälle weitgehend akzeptiert ist.[174]“ Müllverbrennungsanlagen zeichnen sich durch ihre besondere Kapitalintensität aus: MVAs wie in Köln oder Stuttgart mit Jahreskapazitäten über 400.000 t haben Baukosten von über 400 Mio. Euro verursacht. Diese hohen Investitionen und die damit verbundenen langen Amortisationszeiten werden auch von Akteuren der Abfallwirtschaft als ein wesentliches Hemmnis für die Entwicklung eines nachhaltigen Ressourcenmanagements benannt. Sowohl private als auch öffentliche Investoren haben ein Interesse, bestehende Infrastrukturen so lange wie möglich zu nutzen, um sunk costs zu vermeiden oder hohe Gewinne aus bereits abgeschriebenen Anlagen zu erzielen. Die Gesamtkapazität der Müllverbrennung liegt nach allgemeiner Einschätzung zur Zeit deutlich über dem tatsächlichen Bedarf. Die aktuellen Überkapazitäten sind dabei vor allem auf zwei zusammenhängende Entwicklungen zurückzuführen: Erhebliche Kapazitätsengpässe zum Ende der Übergangsfrist der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASI) 2005 sowie eine dynamische Entwicklung von zusätzlichen Kapazitäten im Bereich der Ersatzbrennstoffe. Hier wurde angesichts stark steigender Energiepreise Mitte der 2000er Jahre in kürzester Zeit eine Vielzahl paralleler Projekte entwickelt. Gleichzeitig ist auch bei den kommunalen Müllverbrennungsanlagen zu berücksichtigen, dass viele dieser Anlagen Mitte der 1990er unter erheblichem politischen Druck geplant wurden, um einer seinerzeit drohenden „Müllschwemme“ zu begegnen.

Trotzdem beklagt die private Recyclingwirtschaft „massive Fehlinvestitionen der kommunalen Entsorgungswirtschaft“ in Höhe von ca. 4 Mrd. Euro[175]. Diese sind u.a. auf betriebswirtschaftliche Überlegungen verschiedener Kommunen zurückzuführen, für die in der Annahme eines gesicherten Abfallaufkommens in den 1990er Jahren Müllverbrennungsanlagen durchaus rentable Investitionsprojekte darstellen konnten. So berechnete zum Beispiel ein Leitfaden im Auftrag der Europäischen Kommission zur Kosten-Nutzen-Analyse von Infrastrukturprojekten für eine Müllverbrennungsanlage mit einem Investitionsvolumen von 50 Mio. Euro und einer Jahreskapazität von 200.000 t/a eine wirtschaftliche Gesamt-Rentabilität in Höhe von 11,77 %[176]. Dementsprechend sahen hier viele Kommunen Möglichkeiten, über eine als sicher eingeschätzte Investition Beiträge zum Kommunalhaushalt zu erwirtschaften. Zusätzlich zu den deutschen Überkapazitäten im Bereich der Müllverbrennung kommen auch noch Ausweitungen der Verbrennungskapazität in den Niederlanden und Polen, die sich ebenfalls auf den deutschen Markt auswirken könnten.

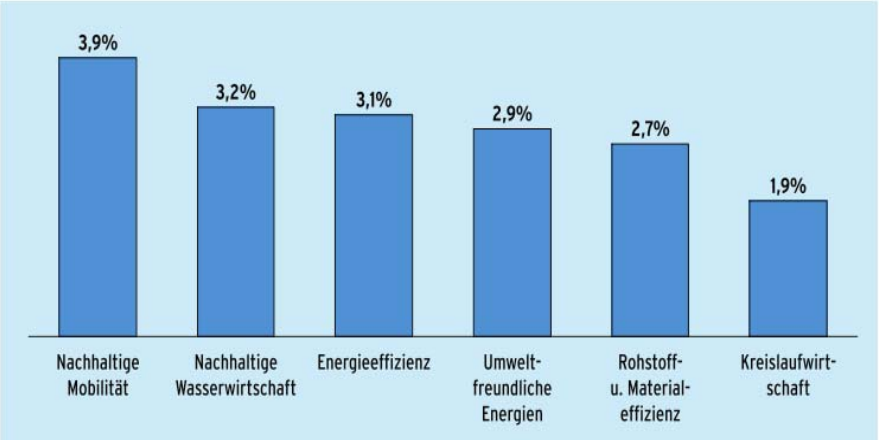
Eine vom BMWi beauftragte Unternehmensbefragung ergab, dass im Jahr 2007 die abfallwirtschaftlichen Anlagen im Bereich Siedlungsabfall in Deutschland insgesamt nur zu 66,3 % ausgelastet waren[177]. Die Angaben von Alwast zur Kapazitäts- und Mengenentwicklung zeigen, dass sich diese Situation bis 2013 nicht verbessert hat[178]. Damit ist zu erwarten, dass sich der zu beobachtende Preisverfall für die thermische Beseitigung und Verwertung von Abfällen auch in Zukunft fortsetzen wird. Henkes weist darauf hin, dass das Deponierungs-

[174] Mineur 2007, S. 202
[175] EUWID RE 2010
[176] Europäische Kommission 2003, S.58
[177] GIB/ ARGUS 2009, S. 246
[178] Alwast 2013

verbot und die TASi zu „Überkapazitäten bei den thermischen Abfallbehandlungsanlagen beigetragen haben, die mittlerweile so groß sind, dass den Recyclingunternehmen spätestens mit Ausbruch der Wirtschaftskrise der notwendige Abfall für eine stoffliche Verwertung fehlt“[179]. Dies schwächt die mittelständische Recyclingwirtschaft und reduziert die Investitionstätigkeit.

Diese institutionellen Rahmenbedingungen und die damit verbundenen Unsicherheiten führen auch dazu, dass die Kreislaufwirtschaft von den Leitmärkten der Umwelttechnik in Deutschland den mit Abstand am niedrigsten Anteil in Forschung und Entwicklung investiert (vgl. Abbildung 14). Insgesamt wird nach wie vor stark auf etablierte Techniken der thermischen Verwertung gesetzt, das stoffliche Recycling ist in vielen Bereichen ökonomisch nicht wettbewerbsfähig (sehr deutlich beispielsweise im Bereich der Kunststoffe).

**Abbildung 14: Durchschnittliche FuE-Quoten nach Leitmärkten in Deutschland**




Quelle: BMU 2009

## 5.4 Spezifische Hemmnisse in der Kreislaufführung von Technologiemetallen

Mit Blick auf die in den vorherigen Kapiteln betrachteten Technologiemetalle zeigen sich besondere Hemmnisse, die der Entwicklung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft in diesen Bereichen entgegenstehen und die gezeigten, nach wie vor sehr niedrigen Recyclingraten zur Folge haben. Ursache hierfür sind weniger technische Hindernisse, sondern vor allem die Ausgestaltung von Rahmenbedingungen, die nach wie vor zu einer Fokussierung auf Massenstoffströme führen. Dies soll exemplarisch an den Produktbereichen Elektronikaltgeräte und Altautos verdeutlicht werden.

<u>Elektronikaltgeräte</u>

[179] Henkes 2010, S. 24

Seit 2005 regelt das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) die Verwertung von Elektroaltgeräten (EAG) und setzt damit die europäische Richtlinie zu Elektronikschrott um (WEEE Directive). Die Richtlinie legt fest, dass in allen EU-Staaten mindestens 4 kg EAG pro Kopf und Jahr gesammelt werden müssen, wovon je nach Produktgruppe zwischen 50 und 75 % des Gerätegewichts stofflich verwertet werden müssen. Als Umsetzung des Prinzips der erweiterten Produzentenverantwortung soll die Sammlung und anschließende Verwertung für die Konsumenten unentgeltlich sein. In Deutschland teilen sich Kommunen und Hersteller die Verantwortung für die Sammlung bzw. die Verwertung. Mit Blick auf die enthaltenen Rohstoffe bietet die Sammlung und Verwertung noch erhebliche Optimierungspotenziale: Die gewichtsbasierten Ziele setzen keinerlei Anreize für in geringen Mengen verwendete Metalle wie Gold, Kupfer oder Palladium. Gerade für Haushaltskleingeräte, IT-Geräte und Unterhaltungselektronik sind die Sammelquoten im Vergleich zu den in Verkehr gebrachten Mengen niedrig. Speziell für Handys wird in einer Nokia-Studie berichtet, dass nur ca. 3 % aller Altgeräte einem hochwertigen Recycling zugeführt werden[180]. Viele Gebrauchtgeräte werden zur Zeit noch in den Haushalten gelagert, ein relevanter Anteil dieser Geräte wird jedoch nach wie vor über den Restmüll entsorgt, wodurch die enthaltenen Rohstoffe in der Verbrennung dissipativ verteilt und für ein stoffliches Recycling damit endgültig verloren gehen. Für Handys allein ergibt sich daraus allein in Deutschland ein jährlicher Verlust an Gold in Höhe von 350 kg[181].

**Tabelle 8: Erfassung von Elektroaltgeräten in Deutschland 2008**

| | | In Verkehr Gebracht | Gesammelte Menge | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | private Haushalte | andere Quellen als private Haushalte | Insgesamt |
| Kat. | Produktkategorie | Gesamtgewicht (t) | Gesamtgewicht (t) | Gesamtgewicht (t) | Gesamtgewicht (t) |
| 1 | Haushaltsgroßgeräte | 673.297 | 245.119 | 15.150 | 260.269 |
| 2 | Haushaltskleingeräte | 148.341 | 81.284 | 1.507 | 82.791 |
| 3 | IT- und Telekommunikationsgeräte | 319.983 | 136.952 | 18.055 | 155.007 |
| 4 | Geräte der Unterhaltungselektronik | 392.952 | 140.173 | 6.119 | 146.292 |
| 5 | Beleuchtung | 75.386 | 0 | 249 | 249 |
| 5a | Gasentladungslampen | 30.246 | 8.813 | 134 | 8.948 |
| 6 | Elektrische und elektronische Werkzeuge | 144.969 | 20.232 | 1.535 | 21.767 |
| 7 | Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte | 35.867 | 5.060 | 2.674 | 7.734 |
| 8 | Medizinische Geräte | 35.658 | 1.374 | 2.011 | 3.385 |
| 9 | Überwachungs- und Kontrollinstrumente | 14.381 | 1.433 | 344 | 1.777 |
| 10 | Automatische Ausgabegeräte | 12.465 | 1.847 | 3.710 | 5.557 |
| | **Summe** | **1.883.545** | **642.287** | **51.488** | **693.776** |

Quelle: UBA 2010

[180] 4 phones 2008
[181] Chancerel 2010

Die niedrigen Sammelmengen und die damit verbundenen Rohstoffverluste erklären sich u.a. durch den Export von Gebraucht- und Altgeräten, vor allem nach Osteuropa und Westafrika. Nach Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes werden jährlich ca. 155.000 t Elektronikgeräte exportiert[182]. Als wesentliches Problem erweist sich dabei vor allem die kaum praktikable Unterscheidung zwischen legalen Exporten von Gebrauchtgeräten und illegalen Exporten von nicht mehr funktionsfähigen Geräten, die nur deshalb exportiert werden, um die Behandlungskosten entsprechend den vorgeschriebenen hohen Umweltstandards in Deutschland einzusparen. In beiden Fällen ergeben sich Probleme der unsachgemäßen Entsorgung in den Zielländern, jedoch können Exporte von Gebrauchtgeräten durchaus auch mit positiven Effekten in Entwicklungsländern verbunden sein, z.B. basiert die Telekommunikation in vielen westafrikanischen Ländern wesentlich auf billigen Gebrauchthandys aus Deutschland. Letztendlich ist damit aber wegen der fehlenden bzw. technologisch geringwertigen Recyclinginfrastrukturen in diesen Ländern der Totalverlust der enthaltenen Rohstoffe verbunden. Die unsachgemäße Behandlung oder Deponierung dieser Geräte ist zudem aufgrund der enthaltenen toxischen Substanzen mit erheblichen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen verbunden.

Als schwerwiegendes Hemmnis erweist sich, dass bei den Verwertern über Menge und genaue Lokalisierung von relevanten Rohstoffen in Elektroaltgeräten erhebliche Unsicherheiten bestehen. Angesichts dieser Informationsdefizite ist der Aufbau entsprechend hochwertiger Verwertungsstrukturen für sie mit erheblichen Risiken behaftet. § 13 Abs. 6 ElektroG legt zwar fest, dass die Hersteller oder Importeure von Elektronikgeräten entsprechende Informationen den Behandlungsanlagen zur Verfügung stellen müssen, allerdings erst innerhalb eines Jahres nach Inverkehrbringen und nur soweit dies zur ordnungsgemäßen Verwertung der Altgeräte notwendig ist. Die Rückgewinnung von Rohstoffen wie Gold, Kupfer oder Palladium ist darin bisher nicht eingeschlossen. Diese Regelung erweist sich in der Verwertungs-Praxis aus mehreren Gründen als kaum praktisch handhabbar:

- Zum einen können die Hersteller in der Regel kaum einschätzen, welche Informationen die Behandler tatsächlich benötigen, um effiziente Behandlungstechniken etablieren zu können. Dabei handelt es sich häufig auch um sensible Daten, die der Konkurrenz Rückschlüsse auf neue Produktionstechniken oder innovative Produktkonzeptionen erlauben könnte.

- Zum anderen verfügen die letztendlichen Verkäufer des Endprodukts selber kaum über exakte Informationen bezüglich der stofflichen Zusammensetzung ihrer Produkte. Der Elektroniksektor ist durch eine extrem komplexe, mehrstufige Zuliefererstruktur gekennzeichnet, bei dem der Hersteller in der Regel nur solche Informationen zu Inhaltsstoffen verlangt, die er zur Erfüllung von gesetzlichen Vorgaben wie REACH[183] oder ROHS[184] benötigt – diese umfassen in der Regel jedoch nur potenzielle Schadstoffe. Durch dieses globale Netzwerk an Zulieferern kann sich zudem auch die stoff-

[182] Vgl. Sander/ Schilling 2010, S. 57
[183] Europäische Chemikalienverodnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
[184] EU-Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten

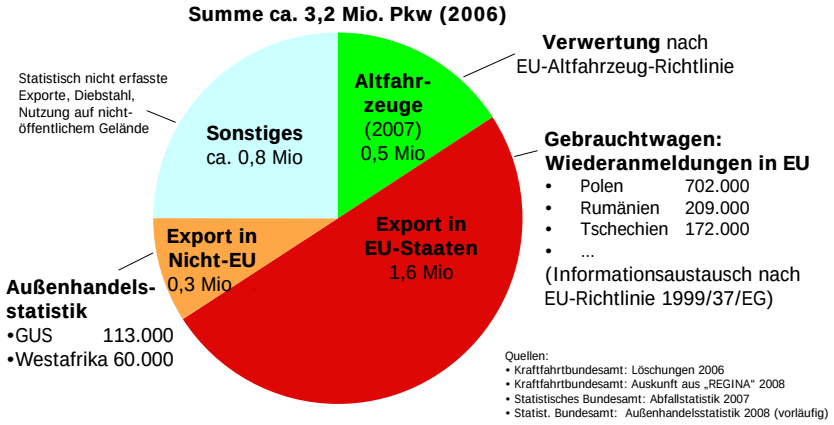
liche Zusammensetzung eines spezifischen Produktes quasi tagtäglich ändern, wenn einzelne Akteure aufgrund von Preisschwankungen auf andere Zulieferer zurückgreifen.

Diese Informationsdefizite können als ein wesentlicher Grund angesehen werden, dass trotz prinzipiell vorhandener Technologien in Deutschland nach wie vor, vor allem in der Vorbehandlung, Technologien eingesetzt werden, die hauptsächlich auf die Massenströme abzielen, bei denen aber relevante Mengen der enthaltenen Edelmetalle wie Gold, Silber oder Palladium verloren gehen. Empirische Untersuchungen zeigen, dass in Deutschland noch immer vor allem bei Elektrokleingeräten 60 % der enthaltenen Edelmetalle verloren gehen[185].

Altautos

Die umweltgerechte Entsorgung und Verwertung von Altfahrzeugen ist in Deutschland durch die Altfahrzeug-Verordnung vom 21. Juni 2002 geregelt. Mit der Verordnung wurden die Vorgaben der europäische Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge vom 18. Sept. 2000 in nationales Recht umgesetzt. Die Wirtschaftsbeteiligten - d.h. Hersteller, Importeure und Entsorgungswirtschaft - haben danach gemeinsam sicherzustellen, dass ab 2006 mindestens 85 % des durchschnittlichen Gewichts eines Altfahrzeugs verwertet oder wieder verwendet und mindestens 80 % stofflich verwertet oder wieder verwendet werden. Ab 2015 sind diese Verwertungsziele auf 95 % bzw. 85 % zu steigern. Auf eine Sammelmenge analog zum ElektroG wird komplett verzichtet. Zur Erreichung dieser Quoten hat die deutsche Recyclingwirtschaft in erheblichem Maße in Verwertungs-Infrastrukturen investiert, die bisher jedoch nur unzureichend ausgelastet sind. In noch stärkerem Maße als beim Elektronikschrott ist dies durch den Export von Gebrauchtwagen begründet. Abbildung 15 verdeutlicht, dass von den insgesamt 3,2 Mio. Fahrzeugen, die jedes Jahr in Deutschland abgemeldet werden, nur etwa 15 % tatsächlich in Deutschland recycelt werden. Etwa die Hälfte dieser Fahrzeuge wird zunächst in andere EU-Staaten exportiert und zu einem großen Teil nach einer weiteren Nutzungsphase in Nicht-EU-Länder, wo sie nicht mehr der EU Altautorichtlinie unterliegen.

**Abbildung 15: Verbleib der gelöschten Pkw in Deutschland 2008**




Quelle: UBA/ BMU 2012

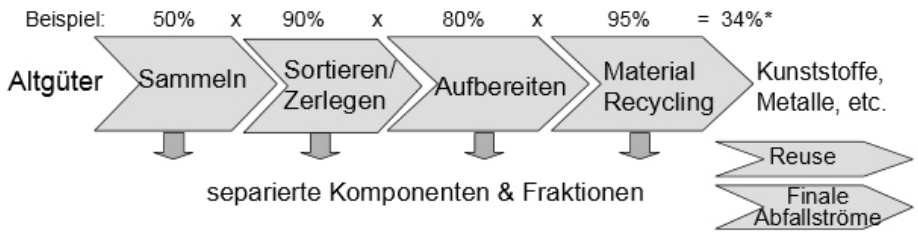
[185] Chancerel 2010

Auswertungen der EU-Außenhandelsstatistik für das Jahr 2007 haben ergeben, dass das wichtigste Exportland für Gebrauchtfahrzeuge aus der EU mit über 220.000 Fahrzeugen Kasachstan war (auf den weiteren Plätzen folgen Guinea, Russland, Weißrussland, Serbien und Benin). Insgesamt wurden von den Ländern der EU27 über 1,1 Mio. gebrauchte PKW mit einem Wert von über 4,1 Mrd. Euro in Länder außerhalb der EU exportiert. Damit verbunden war ein Massenstrom von 1,3 Mio. t, die nicht in der EU zum Recycling anfielen. Im Vergleich zu den Zahlen von 2002 bedeutet das einen Anstieg der exportierten Fahrzeuge in Länder außerhalb der EU um 41%, und das obwohl wichtige Zielländer mit dem Beitritt der Luxemburggruppe 2004 (Estland, Lettland, Litauen, Polen, Tschechien, Slowakei, Ungarn, Slowenien, Malta und Zypern) 2007 nicht mehr als Exporte außerhalb der EU, sondern als Inner-EU-Handel gewertet werden.

Verluste entlang der gesamten Kette

Prinzipiell stehen sowohl für wertstoffhaltige Komponenten aus Altautos wie den platinhaltigen Katalysatoren sowie für Elektroaltgeräte Recyclingtechnologien zur Verfügung, die die meisten der enthaltenen Rohstoffe zu einem sehr hohen Prozentsatz zurückgewinnen können. Unternehmen wie Aurubis, Remondis oder Umicore haben enorme Investitionen in solche integrierte „Smelter“ getätigt, von denen es weltweit nur ca. 15-20 Stück gibt. Bei der Betrachtung der einzelnen Defizite bei der Sammlung, der Vorbehandlung und dem eigentlichen Recycling muss jedoch beachtet werden, dass sich die einzelnen Verluste aufmultiplizieren. Abbildung 16 zeigt dies am Beispiel von Mobiltelefonen: Obwohl einzelne Prozessschritte aufgrund der ausreichenden ökonomischen Anreize sehr hohe Rückgewinnungsraten aufweisen, ergibt sich für die Gesamtkette in diesem Rechenbeispiel nur eine Gesamteffizienz von 34%: „The total recycling efficiency is determined by the weakest step in the chain.[186]“ Wie dargestellt ist hierbei vor allem die Sammlung zu nennen, bei der Produkte mit hohen Technologiemetallgehalten entweder überhaupt nicht oder nicht separat erfasst werden und dann nicht mit den dafür eigentlich zur Verfügung stehenden Technologien behandelt werden.

**Abbildung 16: Recyclingeffizienz entlang der Gesamtkette: Beispiel Mobiltelefone**




Quelle: Hagelüken 2010

(*effektive Rückgewinnungsrate für z.B. Au, Cu etc. aus Altgeräten)

Das Prinzip der erweiterten Produzentenverantwortung soll den Herstellern von Fahrzeugen und Elektronikgeräten die physische und finanzielle Verantwortung für die Nachnutzungsphase ihrer Produkte übertragen und damit Anreize für ein abfallarmes und recyclingfreundli-

[186] Hagelüken 2007, S. 16

ches Design setzen. Durch den hohen Anteil an exportierten oder nicht ordnungsgemäß erfassten Gebrauchtprodukte werden diese Anreize jedoch deutlich unterlaufen. Für die Hersteller bestehen nur geringe Anreize, bestehende Produktionsprozesse auf eine Verwertung hin umzugestalten, wenn der Großteil ihrer Produkte dann doch nicht den entsprechenden Verwertungseinrichtungen zukommt, die von einem solchen „Design for Recycling“ profitieren könnten.

Hinzu kommt, dass sich in beiden Feldern Systeme einer kollektiven Produzentenverantwortung durchgesetzt haben, bei denen die anfallenden Kosten für Sammlung und Verwertung gleichmäßig nach Marktanteilen auf alle Hersteller verteilt werden. Damit ist das Gesamtsystem zunächst effizienter, weil nicht jeder Hersteller sein eigenes System aufbauen, betreiben und überwachen muss. Andererseits werden damit die durch das System anvisierten Effekte weitgehend außer Kraft gesetzt: Wenn ein Hersteller seine Produktionsprozesse auf ein recyclingfreundliches Design umstellt, so trägt er die Kosten dieser Maßnahme allein, während mögliche Kosteneinsparungen bei der Verwertung oder höhere Verwertungserlöse durch eine verbesserte Rückgewinnung von Rohstoffen auf alle Hersteller verteilt werden und er selber nur anteilig seines eigenen Marktanteils profitiert.

# 6 Optionen

Basierend auf den identifizierten Hemmnissen aus Kapitel 5 sollen im Folgenden Instrumente und handlungsorientierte Ansätze abgeleitet werden, die zu einer Verbesserung der Kreislaufführung beitragen könnten; dabei kann Deutschland auch von bestehenden Best Practice Ansätzen im Ausland profitieren. Ein Schwerpunkt liegt dabei speziell für die Technologiemetalle auf Ansätzen der erweiterten Herstellerverantwortung, die auf eine Optimierung der Rückgewinnung dieser Metalle entlang des gesamten Produktlebenszyklus abzielen.

## 6.1 Optimierung der Kreislaufführung im Inland

### 6.1.1 Stärkung des Wettbewerbs durch ökonomische Instrumente

Während die Abfallwirtschaft bisher stark durch ordnungsrechtliche Instrumente geprägt ist, geraten vor allem marktbasierte Ansätze in den Fokus, wenn durch die Schließung von Stoffkreisläufen die Effizienz der Ressourcennutzung und damit auch die Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften erhöht werden soll. Vor diesem Hintergrund wurden auf europäischer Ebene mit dem Fahrplan für ein ressourceneffizientes Europa (2011) und in Deutschland mit dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) (2012) konkrete Programme entwickelt, in denen spezifische Maßnahmen und Handlungsansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz beschrieben werden. In beiden Fällen wird ökonomischen Instrumenten eine besonders hohe Bedeutung beigemessen:

- Die EU-Roadmap identifiziert falsche Preissignale als ein entscheidendes Hemmnis auf dem Weg zu mehr Ressourceneffizienz; die EU und ihre Mitgliedsstaaten sollen dagegen auf die richtigen Preissignale für Produktion und Konsum setzen: „Addressing markets and prices, taxes and subsidies that do not reflect the real costs of resource use and lock the economy into an unsustainable path“[187]. Unter dem Stichwort „getting the prices right“[188] werden die Mitgliedsstaaten aufgefordert, die wichtigsten umweltschädlichen Subventionen zu identifizieren und eine Planung zu ihrer Abschaffung vorzubereiten sowie ihre bestehenden Steuersysteme auf ihre Effekte auf Ressourceneffizienz zu analysieren und den Fokus der Besteuerung vom Faktor Arbeit auf Umwelteinwirkungen zu verschieben. Dabei wird besonders die Funktion markt-basierter Elemente zur Korrektur von Marktversagenstatbeständen betont.

- Das Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung sieht ökonomische Instrumente zentral in Handlungsansatz 16 „Nutzung ökonomischer Instrumente und Abbau von Subventionen, die den Ressourcenverbrauch fördern“ vor, der ebenfalls auf den Abbau der Ressourceneffizienz entgegenstehender Subventionen abzielt, aber u.a. auch die Erhöhung des Innovationstempos oder die Erschließung von Recyc-

[187] Europäische Kommission 2011, Abschnitt 2.2
[188] ebd., Abschnitt 3.4

lingpotenzialen als Anwendungsfelder für ökonomische Instrumente benennt. Ein dabei zentraler Aspekt soll jedoch auch die mit dem internationalen Wettbewerb konforme Ausgestaltung dieser Instrumente sein[189].

Marktbasierten Instrumenten werden in der ökonomischen Theorie eine Reihe von Vorteilen zugesprochen, die ihre Anwendung vor allem in der bisher stark ordnungspolitisch geprägten Debatte um Instrumente zur Steigerung der Ressourceneffizienz zunehmend interessant erscheinen lassen. Grundsätzlich zielen ökonomische Instrumente auf eine Veränderung der Rahmenbedingungen handelnder Akteure und damit nur indirekt auf Verhaltensänderung. Während damit die ökologische Treffsicherheit gegenüber z.B. Grenzwerten eingeschränkt ist, liegen ihre Stärken vor allem bei Aspekten der statischen Effizienz („Fähigkeit, ein vorgegebenes Umweltziel mit minimalen volkswirtschaftlichen Kosten zu erreichen“[190]) sowie der dynamischen Effizienz („Fähigkeit, Anstrengungen zur Verminderung von Umweltbelastungen zu induzieren, die über das vorgegebene Ziel hinausgehen“[191]). Dies kann u.a. auf folgende Faktoren zurückgeführt werden:

- den Marktteilnehmern bleibt Entscheidungsspielraum, wie sie ihren Ressourceneinsatz oder ihre Emissionen reduzieren,

- damit werden das Wissen, die Innovations- und Investitionsmöglichkeiten der Marktteilnehmer genutzt,

- Kosten können durch Verhaltensänderungen oder technische Anpassungen vermieden werden,

- Entscheidungen dazu werden dezentral getroffen und können damit spezifische Kontexte berücksichtigen,

- die Eingriffstiefe und damit die Anforderungen an die Legitimation ist geringer als bei Ge- und Verboten,

- der Vollzug gestaltet sich potenziell einfacher als die Überwachung der Einhaltung von Ge- und Verboten.

---

[189] „Die Bundesregierung wird darum prüfen, wie Anreize durch geeignete Rahmenbedingungen und wirtschaftliche Instrumente sowie Innovationsförderungsprogramme zu einer Stärkung der Ressourceneffizienz der deutschen Wirtschaft unter Berücksichtigung ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit beitragen können. Die Bundesregierung wird bei der Wahl der Instrumente auf eine auch im internationalen Maßstab wettbewerbskonforme Ausgestaltung achten, Anreizen und freiwilligen Lösungen den Vorzug vor staatlichen Regulierungen geben und dabei Kostenbelastungen der Wirtschaft, die die Ressourcennutzung verteuern, vermeiden.“ (Bundesregierung 2012)

[190] SRU 2004, S. 150

[191] ebd., S. 150

Mit Blick auf die Entwicklung einer „europäischen Recyclinggesellschaft“ hat die Europäische Kommission eine Studie in Auftrag gegeben, mögliche Optionen zur Entwicklung ökonomischer Instrumente in der Abfall- und Recyclingwirtschaft zu untersuchen[192]. Einige der dort genannten Instrumente wie eine Deponiesteuer sind für Deutschland kaum geeignet oder überholt, weil hier die Deponierung unbehandelter Abfälle seit 2005 ohnehin untersagt ist. Andere Ansätze bieten jedoch prüfenswertes Potenzial, das hochwertige Recycling von Abfällen und damit die Entwicklung des Leitmarkts Kreislaufwirtschaft zu befördern:

**Verursachergerechte Abfallgebühren („pay as you throw“):** Damit abfallbezogene Kosten stärker in Entscheidungen sowohl zur Produktionstechnik als auch zum Konsumverhalten einbezogen werden, könnten sich Abfallgebühren stärker als bisher am tatsächlichen anfallenden Abfall orientieren. Dabei können die Gebühren sowohl am Volumen, am Gewicht oder auch an den verursachten Umweltbelastungen ausgerichtet werden. Speziell zur Förderung des Recyclings wird in einigen europäischen Mitgliedsstaaten diskutiert, analog zur Deponiesteuer eine Verbrennungsabgabe zu erheben, um so zusätzliche Stoffströme ins Recycling zu lenken.

**Steuern auf Primärmaterialien**: Steuern auf Primär-Rohstoffe können dazu beitragen, den Verbrauch von Materialien zu verringern, unterstützen die Wiederverwendung von Produkten und erhöhen die Verwendung von recycelten Materialien. In der Theorie könnte dies eine attraktive Option zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Umgang mit Materialien darstellen. In der Realität konfrontieren verschiedene Hindernisse den Einsatz eines solchen Instruments: der Handel mit Materialien und Produkten sowohl innerhalb der EU-Mitgliedsstaaten und zwischen der EU und dem Rest der Welt, die Notwendigkeit einer Einstimmigkeit in der EU in Steuerfragen und das Risiko einer reinen Verlagerung von Umweltbelastungen zwischen verschiedenen Materialien. Da ein Großteil der Ressourcennutzung und Rohstoffgewinnung im Ausland stattfindet, ist eine Besteuerung an der Quelle für den größten Teil der Produkte praktisch ausgeschlossen, daher wird auf die Materialen abgestellt, die in den hier auf den Markt gebrachten Produkten enthalten sind. Diese Form der Besteuerung von Ressourcenverbrauch wird auch unter der Bezeichnung Produkt-Ressourcensteuer diskutiert[193]. Die Produkt-Ressourcensteuer stellt eine marktkonforme finanzpolitische Maßnahme dar, die durch finanzielle Anreize/Sanktionen zu einer geringeren Materialnachfrage und -intensität und höheren Ressourcenproduktivität führen soll und dabei gleichzeitig zur Internalisierung von externen Kosten der Ressourcennutzung beiträgt. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen auch Überlegungen, Mehrwertsteuersätze auf das Recycling selbst, recycelte Materialien oder Produkte mit bestimmten Mindestanteilen an recycelten Stoffen zu reduzieren.

Ein dritter Ansatz, das Recycling von Stoffen durch ökonomische Instrumente zu erhöhen, zielt auf **Pfandsysteme** ab, die je nach Sektor unterschiedlich ausgestaltet werden müssten. Im Bausektor wird beispielsweise ein „refundable compliance bond“ diskutiert, bei dem Bauträger eine bestimmte Summe hinterlegen müssen, die ihnen erst bei Nachweis einer entsprechenden Recyclingrate wieder zurückerstattet wird. Auch für besonders ressourcenrelevante Produkte wie Elektrokleingeräte wird ein Pfandsystem angedacht, um die separate

[192] Watkins et al. 2012
[193] Vgl. z.B. UBA 2012

Sammlung dieser Abfälle zu erhöhen. Sind diese erst einmal sortenrein erfasst, reichen die ökonomischen Anreize z.B. bei Mobiltelefonen völlig, um diese einem hochwertigen Recycling zuzuführen.

### 6.1.2 Entsorgung vs. Verwertung

Angesichts der beschriebenen Defizite wird deutlich, dass der regulative Rahmen im Abfallbereich in Deutschland nach wie vor weitgehend auf die Gewährleistung einer sicheren Entsorgung ausgelegt ist. Die möglichst vollständige Nutzung von Abfällen und insbesondere der darin enthaltenen Materialien zur Produktion von Sekundärrohstoffen spielt dabei häufig nur eine untergeordnete Rolle. Vorgaben für Verwertungsquoten wie im Kreislaufwirtschaftsgesetz gewährleisten dabei auch nicht systematisch, dass Stoffe einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden. Die Orientierung an der Entsorgungssicherheit zeigt sich beispielsweise in der Verpflichtung der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger in den meisten Bundesländern, für alle möglicherweise anfallenden Abfälle eine zehnjährige Entsorgungssicherheit nachzuweisen. Diese Vorgaben führen zu systematischen Überkapazitäten in der Abfallentsorgung, die dann in Konkurrenz mit Verwertungsinfrastrukturen stehen. Angesichts des hohen Fixkostenanteils in der Abfallentsorgung (mit Investitionskosten in Höhe von bis zu 400 Mio. Euro für eine Müllverbrennungsanlage) ergibt sich ein „Kampf um den Müll“, wie er aktuell in vielen Regionen zu beobachten ist.

Eine stärker auf Rohstoffsicherheit ausgelegte Abfallpolitik müsste daher zu einer stärkeren Abstimmung in der Planung von Verbrennungskapazität beitragen. Bis 1993 unterlagen MVAs der Planfeststellung, bei der u.a. eine Bedarfsprüfung vorgenommen werden kann. Seitdem kann jeder Akteur auch gegen den Willen der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger z.B. Ersatzbrennstoffwerke errichten, solange er die umweltrechtlichen Auflagen erfüllt. Die fehlende Abstimmung hat in der Summe zu massiven Fehlinvestitionen geführt, die resultierenden Überkapazitäten verursachen Unterbietungsprozesse, die in historischen Niedrigpreisen in der Abfallverbrennung resultieren – mit Negativeffekten auf die Recyclingbranche, der damit der benötigte Input entzogen wird.

### 6.1.3 Integration von Abfallwirtschaft und Produktionssektor stärken

Die Nutzung von Sekundärrohstoffen weist besondere Herausforderungen auf, weil Abfall im Gegensatz zur Primärproduktion räumlich verteilt und mit Unsicherheiten über Menge und Zeitpunkt behaftet anfallen. Daraus entstehen Transaktionskosten, die durch eine stärkere Abstimmung zwischen Abfallwirtschaft als Produzent und Industrie als Abnehmer reduziert werden könnten. Stattdessen herrscht hier ein „Systembruch“, der im Endeffekt zu einer mangelhaften Ausnutzung von Materialeigenschaften in Form des „Downcyclings” führt. Speziell für Technologiemetalle ist ein zunehmender dissipativer Einsatz zu beobachten, der in der Tendenz dazu führt, dass ein Recycling weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll ist. Dies betrifft zum Beispiel den Einsatz von Indium oder Gallium in winzigen LEDs, Silber

in RFID-Chips[194] oder Seltene Erden in Elektronikkomponenten beim Fahrzeugbau. Um Abfallfraktionen mit ausreichenden Gehalten dieser Stoffe gewinnen zu können, stehen Vorgaben an die Hersteller zur Diskussion, ressourcenrelevante Rohstoffe für eine gezielte Demontage zugänglich einzusetzen.

### 6.1.4 Urban Mining: Verbesserung der informatorischen Grundlagen für die Erfassung sekundärer Lagerstätten

Unter dem Stichwort des „urban mining“ werden auch Rohstoffe in Infrastrukturen wie Gebäuden oder Straßen zunehmend zu ausbeutungswürdigen Lagerstätten. So weist zum Beispiel der Abbruch eines Hauses einen höheren Kupfergehalt auf als aktuell erschlossene Kupferminen. Viele dieser Strukturen wurden in der Nachkriegszeit errichtet und erreichen mittlerweile das Ende ihrer Nutzungsphase, hinzu kommt die schrumpfende Bevölkerung, die mancherorts den Rückbau ganzer Stadtquartiere zur Folge hat. Der Bereich der Abbruchabfälle – mengenmäßig der mit Abstand relevanteste Abfallstrom in Deutschland – weist zwar seit langem sehr hohe Verwertungsquoten auf, diese resultieren jedoch häufig aus Verwendungen als Bergversatz oder in Schallschutzwällen. Eine gezielte Nutzung der enthaltenen Rohstoffe weist noch erhebliche Potenziale auf, sowohl in der gezielten Erfassung von Stoffen wie Kupfer in Leitungen als auch bei der Kreislaufführung von Baustoffen, z.B. als Recyclingbeton[195].

Eine wesentliche Ursache sind auch hier Informationsdefizite: In der Regel ist nicht mehr nachvollziehbar, wo bestimmte Rohstoffe eingesetzt wurden. Die TU Wien hat hierzu einen materiellen Gebäudepass entwickelt, in dem in Zukunft solche Informationen in Kooperation mit Architekten, Baufirmen und Recyclern erfasst werden sollen[196]. Noch weitreichendere Informationsdefizite existieren im Bereich von Infrastruktursystemen. Im Rahmen des Projekts MaRess[197] wurden hierzu erstmals konkrete Abschätzungen vorgenommen, die das hier vorhandene enorme Rohstoffpotenzial verdeutlichen. Danach sind in Deutschland allein in den Bereichen Verkehr, Wasser/ Abwasser und Energie mehr als 11 Mrd. t Rohstoffe gebunden. Tabelle 9 zeigt die Verteilung der darin enthaltenen ca. 100 Mio. t metallischer Rohstoffe, hauptsächlich Eisen und Stahl.

---

[194] RFID-Systeme (Chip und Lesegerät) ermöglichen eine automatische Identifizierung von Gegenständen mittels elektromagnetischer Wellen.
[195] Vgl. Knappe 2009, S. 35f.
[196] Rechberger 2010, S. 14
[197] Ziel des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess)“ war die Entwicklung konsistenter Strategien und Ansatzpunkte für eine erfolgreiche Ressourceneffizienzpolitik. Das Projekt lief im Auftrag des Bundesumweltministeriums und des Umweltbundesamts unter der Leitung des Wuppertals Instituts von Juli 2007 bis Dezember 2010.

**Tabelle 9: Bestand metallischer Rohstoffe in Infrastruktursystemen in Deutschland**

| in 1.000 t | Stahl/ Eisen | Kupfer | Aluminium | andere Metalle | Summe |
|---|---|---|---|---|---|
| **Verkehrsinfrastruktur** | **33.003** | **436** | **134** | **46** | **33.619** |
| **Straßeninfrastruktur** | - | - | - | - | - |
| **Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen** | 4.380 | - | - | - | 4.380 |
| **Schieneninfrastruktur** | 20.848 | 436 | 134 | 46 | 21.464 |
| **Wasserstraßen** | 7.775 | - | - | - | 7.775 |
| **Wasser- und Abwasserinfrastruktur** | **20.077** | **93** | **18** | **13** | **20.201** |
| **Wasserinfrastruktur** | 11.996 | 12 | - | 13 | 12.021 |
| **Abwasserinfrastruktur** | 8.081 | 81 | 18 | - | 8.180 |
| **Energieinfrastruktur** | **38.733** | **3.637** | **2.026** | **1.172** | **45.568** |
| **Energienetze** | 25.891 | 3.408 | 1.817 | 1.124 | 32.240 |
| **Energieerzeugung** | 12.842 | 229 | 209 | 48 | 13.328 |
| **Summe** | **91.813** | **4.166** | **2.178** | **1.231** | **99.388** |

Quelle: Steger et al. 2011

Bisher fehlen strategische Ansätze, diese Rohstoffe wieder in den Stoffkreislauf einzuspeisen – Rohr- und Kabelleitungen verbleiben häufig einfach im Boden. Angesichts der hier vorhandenen Mengen würden im Vergleich zum Siedlungsabfall selbst geringfügige Erhöhungen der Rücklaufquoten relevante Ergebnisse bewirken. Eine gezielte Nutzung dieser Rohstoffe setzt jedoch eine systematische Erfassung voraus, die angesichts der langen Nutzungszeiträume mit wiederholten Wechseln der Besitzer und/oder Nutzer und den damit verbundenen Informationsverlusten die Einrichtung öffentlicher Rohstoffkataster sinnvoll erscheinen lässt. Die Ergebnisse weisen auch auf den extrem hohen Rohstoffbedarf zum Erhalt von Infrastrukturen hin (über 148 Mio. t jährlich[198]), diese Mengen werden bisher bei den Überlegungen zum weiteren Ausbau von Infrastruktursystemen weitgehend ausgeblendet.

### 6.1.5 Konkrete Optionen mit Blick auf den Export von Gebrauchtgütern

Export-Statistik und -kontrolle

Der Export stellt wie beschrieben eine der wesentlichen Ursachen für den Abfluss von Rohstoffen sowohl bei Elektronikgeräten als auch bei Fahrzeugen dar. Da jedoch der internationale Handel mit Gebrauchtgütern sowohl aus ökologischen Gründen einer verlängerten Nutzungsdauer als auch aus ökonomischen Gründen nicht eingeschränkt werden sollte, kommt einer klareren Abgrenzung zwischen Gebrauchtgut und Abfall eine entscheidende Bedeutung zu. Die kürzlich verabschiedete WEEE Rahmenrichtlinie sieht jetzt erstmals eine Umkehr der Beweislast vor: Wer gebrauchte Geräte exportieren will, muss nachweisen, dass sie am Bestimmungsort einer sinnvollen Nutzung zugeführt werden. Angesichts der extrem begrenzten personellen Kapazitäten des Zolls und der Umweltbehörden, die mit der Überprüfung dieser Angaben beauftragt sind, sollten möglichst einfache Abgrenzungskriterien entwi-

[198] Steger et al. 2011, S. 232

ckelt werden, die auch eine rechtssichere Verweigerung von Ausfuhrgenehmigungen ermöglichen. Verschiedene aktuelle Studien weisen darauf hin, dass sowohl die Ausstattung mit Personal als auch die innereuropäische Kooperation der Bedeutung dieser Aufgabe für die Rohstoffsicherheit in Europa noch in keinster Weise angemessen sind[199].

Dies betrifft auch die europäischen Außenhandelsstatistiken für Abfall: Betrachtet man Abfallströme als potenzielle Rohstoffquellen, ergeben sich ganz neue Anforderungen an deren Ausgestaltung. Neben einer Unterscheidung zwischen gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen würden zusätzliche Kriterien wie Alter oder genauere Vorgaben zur Bestimmung des Werts der exportierten Güter die Transparenz dieser Stoffströme deutlich erhöhen und damit die Ausgangsbasis für die Schließung von Stoffkreisläufen bilden[200]. Konkret sollte zum Beispiel eine Unterscheidung zwischen neuwertigen und gebrauchten Elektronikprodukten ermöglicht werden, wodurch der tatsächliche Verbleib dieser Geräte deutlich besser nachvollzogen werden könnte[201].

Internationale Vereinbarungen zum Rohstoffrecycling

Angesichts der nach wie vor hohen Relevanz von exportierten Gebrauchtgütern und dem damit verbundenen Abfluss von Rohstoffen, die damit einerseits nicht mehr direkt für die Versorgung der deutschen Industrie zur Verfügung stehen und andererseits auch insgesamt wegen fehlender Recyclinginfrastrukturen in den Abnehmerländern verloren zu gehen drohen, sollte die zukünftige Planung von Sammlungs- und Verwertungsstrukturen über den nationalen Rahmen hinaus erweitert werden.

Die aktuelle Rohstoffstrategie der Bundesregierung begrenzt „bilaterale Rohstoffpartnerschaften[202]“ bisher auf rohstoffproduzierende Länder, um darüber den Zugriff auf Rohstoffe zu sichern und gleichzeitig einen Beitrag zur Entwicklungsarbeit zu leisten. Dieser Ansatz könnte zum einen auch auf solche Länder ausgeweitet werden, in denen die Nutzungsphase von rohstoffhaltigen Produkten endet, um damit den Input hochwertiger Verwertungsanlagen zu sichern. Zum anderen könnten dabei auch im wesentlich stärkeren Maße als bisher sowohl die produzierende Industrie als auch die Recyclingwirtschaft einbezogen werden. Vor dem Hintergrund der erweiterten Herstellerverantwortung für Produkte wie Altautos und Elektronikschrott ist nicht nachvollziehbar, wieso diese physische und finanzielle Verantwortung der Hersteller für die Nachnutzungsphase ihrer Produkte enden sollte, nur weil das Produkt die Grenzen der Europäischen Union verlassen hat.

In diesem Kontext wurde im Projekt MaRess das Instrument des Metall-Covenants entwickelt, bei dem sich Export- und Importland sowie Hersteller- und Recyclingindustrie untereinander auf langfristige Zielvorgaben für die Rückgewinnung von Rohstoffen einigen[203]. Da Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung des Rechtsrahmens ein wesentliches

[199] Monier et al. 2011, S. 67
[200] Buchert et al. 2007
[201] Sander/ Schilling 2010
[202] BMWi 2010
[203] Vgl. Lucas/ Wilts 2011

Hemmnis für Investitionen in Recyclinginfrastrukturen darstellen, sollen die beteiligten Staaten dessen weitgehende Stabilität garantieren, solange auch die privaten Partner ihre Vorgaben einhalten. Im Gegenzug soll sich die Herstellerseite über die gewichtsbezogenen Ziele der bestehenden Regulierungen hinaus auf Rücklaufquoten für eingesetzte Stoffe verpflichten, z.B. dass 80 % des in Autokatalysatoren eingesetzten Platins einem hochwertigen Recycling zugeführt werden. Für die Recyclingindustrie würde dies einen Mindestinput garantieren, wofür sie sich auf den Aufbau entsprechender Sammelstrukturen verpflichtet. Ein solcher privatrechtlicher Vertrag auf internationaler Ebene unter Beteiligung privater Akteure muss eine Vielzahl rechtlicher Fragestellungen wie z.B. die Vereinbarkeit mit dem WTO-Handelsrecht berücksichtigen. Diese Probleme wurden im Projekt geprüft und scheinen prinzipiell lösbar. Der Vertrag zielt damit vor allem auf die Senkung von Unsicherheiten und Informationsdefiziten der Beteiligten ab und könnte ein sehr effizientes Instrument zur Innovationsförderung im Bereich der Schließung internationaler Stoffkreisläufe darstellen[204].

Die grundsätzliche Machbarkeit eines solchen globalen Ansatzes zur Kreislaufführung von Rohstoffen beweist beispielhaft das Projekt „Best of two worlds“: Initiiert durch Umicore, einem der weltweit größten Recyclingunternehmen der Welt, wurden Kooperationsstrukturen mit Verwertern von Elektronikschrott in China und Afrika aufgebaut: Anstatt die Geräte dort unter extrem umweltbelastenden Bedingungen zu verwerten, werden sie lediglich manuell demontiert und die rohstoffhaltigen Komponenten wie Platinen in das Umicore-Werk in Hoboken, Belgien, gebracht. Die deutlich höheren Rückgewinnungsraten für Edelmetalle übersteigen die Transportkosten deutlich, so dass sich sowohl ökonomisch als ökologisch eine Win-Win-Situation ergibt[205].

## 6.2 Innovative Ansätze im Ausland

Der Blick über die deutschen Grenzen hinweg zeigt, dass verschiedene Mitgliedsstaaten unter den identischen regulativen Rahmenbedingungen der europäischen Abfallrahmenrichtlinie bereits darüber hinausgehende Konzepte entwickelt haben, die Kreislaufführung von Rohstoffen signifikant zu steigern. Im Folgenden soll eine Auswahl solcher Ansätze dargestellt werden, die in dieser Form sicherlich nicht 1:1 auf Deutschland zu übertragen sein werden, aber wichtige Impulse für die Weiterentwicklung des Recyclings in Deutschland geben könnten.

### 6.2.1 Rückgewinnung von Massenmetallen und Technologiemetallen aus Altfahrzeugen in den Niederlanden

1995 wurde mit der Gründung von Auto Recycling Nederland (ARN) der Grundstein des aktuellen Autorecyclingmodells in den Niederlanden gelegt. Die ARN ist somit zentrales Ausführungsorgan und koordiniert den Altautorecyclingprozess von der Rückgabe durch den Verbraucher bis hin zu den einzelnen Recyclingschritten. Hierzu kooperiert die ARN mit ver-

[204] Vgl. Wilts et al. 2011
[205] Vgl. Manhart 2011

schiedenen Recyclingunternehmen. Um für einen reibungslosen Ablauf zu sorgen, war bei der Einführung 1995 vor allem der Aufbau eines Rücknahme-Netzes notwendig. Die Altautoverwerterbetriebe, die Partner von ARN wurden, mussten zusätzlich noch die Norm für die Zertifizierung von Autodemontagebetrieben erfüllen. Diese verpflichten sich hierbei, Fahrzeuge kostenlos zurückzunehmen und sachgemäß zu demontieren. Im Gegenzug wurde eine Demontageprämie eingeführt, so dass die Ausführung der Demontage für die beteiligten Altautoverwerter betriebswirtschaftlich interessant ist. Außerdem übernimmt die ARN die Transportkosten und bietet Recyclingunternehmen finanzielle Unterstützung bei der unwirtschaftlichen Verwertung von Materialien.

Der Unterschied zum deutschen Modell liegt vor allem in der Finanzierung. Während in Deutschland die Herstellerverantwortung weitgehend ohne Effekte bleibt, weil die hohen Schrottpreise auch eine qualitativ minderwertige Verwertung rentabel erscheinen lassen, zahlen Autobesitzer in den Niederlanden einen Betrag von aktuell 15 Euro (vor 1.1.2007 45 Euro) bei der Erstzulassung von Fahrzeugen in einen Fonds, über den wie beschrieben hochwertige Verwertungsstandards gewährleistet bleiben. Die restlichen Verwertungs- und Rücknahmekosten tragen Hersteller und Importeure. Seit der Einführung dieses Modells ist die Recyclingquote von Altautos in den Niederlanden konstant gestiegen - zuletzt auf 96,2 % im Jahr 2011[206]. Der Anteil der über dieses System erfassten Fahrzeuge in Relation der gesamten, in den Niederlanden anfallenden Altautos lag von 1997-2010 bei ca. 90% (vgl. Tabelle 10). 1995 als dieses System eingeführt wurde lag der Anteil bei ca. 30 %[207].

**Tabelle 10: Durch ARN-zertifizierte Betriebe demontierte Altautos**

| | Anzahl Altautos insgesamt | Durch ARN demontierte Autos | Marktanteil ARN |
|---|---|---|---|
| **2009** | 263 572 | 228 783 | 87,50% |
| **2010** | 249 008 | 215 975 | 86,50% |
| **2011** | 249 607 | 206 150 | 82,60% |

Quelle: ARN 2010; ARN 2011; ARN 2012

### 6.2.2 Rückgewinnung von Technologiemetallen aus Elektrokleingeräten in Schweden

Mit Blick auf die mangelhafte Erfassung von Elektrokleingeräten zeigt vor allem Schweden, dass durch ein integriertes und umfassendes System deutlich größere Mengen einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden können. Das schwedische System zur Sammlung von Elektroaltgeräten basiert dabei auf einer engen Zusammenarbeit zwischen Gemeinden, Produzenten und Handel, Recyclinghöfen sowie einer hohen Bereitschaft zur Abfalltrennung in der Bevölkerung. Die Summe aller erfassten Elektroaltgeräte betrug 2010 in Schweden 15,99 kg/Kopf. In Deutschland beläuft sich diese 2010 lediglich auf 9,5 kg/Kopf[208]. 2001

[206] ARN 2012
[207] Wallau 2000
[208] Eigene Berechnung auf Grundlage von Daten des BMU 2011 und Destatis 2012

schlossen die Erzeugerorganisation El-Kretsen und die Schwedischen Gemeinden, zeitgleich mit der Einführung eines Herstellerverantwortungssystems, ein Abkommen ab. Demnach übernehmen die Gemeinden jegliche Kosten für die Sammlung elektronischer Altgeräte, während El-Kretsen für sämtliche verbleibende Kosten aufkommt. So kann gewährleistet werden, dass die gesammelten Elektroaltgeräte ordnungsgemäß entsorgt und recycelt werden. Durch die frühe Einbindung diverser Stakeholder aus öffentlichen und privaten Sektoren konnte die Akzeptanz dieser Richtlinie frühzeitig gefördert werden[209]. 2008 wurde die EÅF (Verband zum Recycling von Elektroaltgeräten) neu als Herstellerorganisation eingeführt und stellt seitdem zusätzlich ihre Geschäftsstellen als Sammelpunkte zur Verfügung. Daneben kann Elektroschrott an allen üblichen Abfallsammelpunkten abgegeben werden. Für Kleingeräte und Glühbirnen stehen zusätzliche Annahmegeräte an günstig gelegenen Orten, wie Supermärkten, bereit[210].

Hersteller und Händler von elektronischen Geräten müssen sich bei dem schwedischen Umweltschutzamt eintragen und diesem über die Menge der verkauften, gesammelten und behandelten Einheiten Bericht erstatten. Werden diese Berichte nicht oder verspätet eingereicht, droht ein Bußgeld von 10.000 SEK. Um die Finanzierung garantieren zu können, zahlen *EÅF* - und *El*-Kretsenmitglieder eine jährliche Versicherung[211]. Die genaue Summe richtet sich nach Produktmenge und Produktgruppe. Die spezifische Gebühr für eine Produktgruppe ist hauptsächlich abhängig von dem aktuellen Weltmarktpreis für die jeweiligen, recycelten Rohstoffe und den entstehenden Recyclingkosten/Recyclingaufwand. El Kretsen gibt hierzu in regelmäßigen Abständen aktualisierte Preislisten heraus, welche 6 Wochen nach Veröffentlichung in Kraft treten[212]. Durch diese Versicherung wird sicher gestellt, dass auch im Fall einer Insolvenz die Recyclingkosten gedeckt sind. El-Kretsens Finanzgarantie wurde in den letzten Jahren mehrfach geändert. Neben der Möglichkeit, dem kollektiven Versicherungssystem beizutreten, besteht u.a. die Option, ein Sperrkonto zu Gunsten der Umweltschutzbehörde einzurichten[213]. Seit der Einführung dieser aktuellen Richtlinie für alte Elektrogeräte 2001 ist die erfasste Menge stetig gestiegen. Zum Beispiel wurden 2004 ca. 17.700 Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik und Bürogeräte erfasst, während 2008 bereits ca. 28.100 Geräte dem Recycling zugeführt werden konnten[214]. Insgesamt zeigt das schwedische Beispiel eindrücklich, wie durch eine engere Verzahnung von Herstellern und Handel einerseits und Sammlung und Verwertung andererseits deutliche Fortschritte im Stoffstrommanagement erreicht werden können.

### 6.2.3 Kreislaufführung von Baustoffen in Zürich

Mit Blick auf die in Kapitel 4 beschriebenen Defizite im Bereich Bau- und Abbruchabfälle zeigt in Europa vor allem das Beispiel Zürich, welche Potenziale unter geeigneten Rahmenbedingungen realisiert werden können.

---

[209] Swedish EPA 2009
[210] Avfall Sverige 2012
[211] Swedish EPA 2009
[212] El-kretsen o.J.; El-Kretsen 2007
[213] Swedish EPA 2009
[214] Avfall Sverige 2012

Nachhaltiges Bauen konstituiert einen der Schlüsselbereiche der Züricher Stadtvision von einer „2000-Watt-Gesellschaft“. Als wichtige Grundlage hierfür gilt das seit 2001 im Hochbaudepartment richtungsweisende Programm „7 Meilenschritte zum umwelt- und energiegerechten Bauen“, welches 2007 so weiterentwickelt wurde, dass es auch von anderen öffentlichen Bauherren benutzt werden kann. Zentraler Bestandteil der Meilenschritte 1 „Neubauten“, 2 „Bestehende Bauten“, 3 „Gesundheit und Baustoffe“ sowie 6 „Nachhaltigkeit in Architekturwettbewerben und Studienaufträgen“ ist der Einsatz von Recycling (RC)-Beton[215]. Genauere Vorgaben wurden 2009 in dem Programm „Ressourcenstrategie <<Bauwerk Stadt Zürich>>“ formuliert. Eine hier zunächst gemachte Bestandsaufnahme zeigt, dass 2005 das gesamte Gebäudevolumen der Stadt Zürich bei ca. 166.000.000 $m^3$ lag. Knapp 1/3 des Baustoffvolumens besteht aus Beton, jeweils 1/4 aus Kies und Sand. Viele Gebäude aus den 1960er und 1970ern gelten heute als sanierungsbedürftig und werden häufig abgerissen. Somit wird der Gebäudepark, wenn effizient genutzt, zum größten Ressourcenlager der Zukunft. Ca. 11 % des gesamten Gebäudebestands in Zürich gehört der Stadt[216]. Hier will diese gerade in Bezug auf nachhaltiges Baustoffmanagement ein Vorbild für andere öffentliche und private Bauherrschaften sein. Durch den geförderten Einsatz von Recyclingbaustoffen konnte in Hinsicht auf den Einsatz von RC-Beton bereits ein Anteil zwischen 70 % und 90 % in stadteigenen Neubauten erreicht werden[217]. Durch die Verwendung von RC-Baustoffen im öffentlichen Hochbau soll deren allgemeine Verbreitung gefördert werden. Die nach einer Reihe von Pilotprojekten entwickelte Strategie zur Förderung von RC-Beton beruht auf einer Kombination von Materialbewirtschaftungskonzept, ökologischen Vorgaben und Controlling[218]. So können bei einem frühzeitig aufgestellten Bewirtschaftungsplan gerade in Rückbauprojekten die Transportdistanzen kurz gehalten werden. Ökologische Vorgaben werden demnach gleich stark gewichtet wie andere wichtige Kriterien, wie z.B. Preis und Qualität. Um die Verwendung von Recyclingmaterialien garantieren zu können, setzt die Stadt seit 2009 auf zusätzliche Baustellenkontrollen mit externen Beauftragte; Ziel ist eine Quote von 50 % Kontrollen ohne Abweichungen von ökologischen Vorgaben. Seitdem die Kontrollen durch externe Kräfte durchgeführt werden, hat sich die Situation so weitgehend verbessert, dass die 50%-Marke 2010 erstmals erreicht wurde[219]. Zusätzlich wird durch Netzwerkbildung und speziellen Kursen das nötige Know-How in Bezug auf RC-Beton vermittelt und verbreitet.

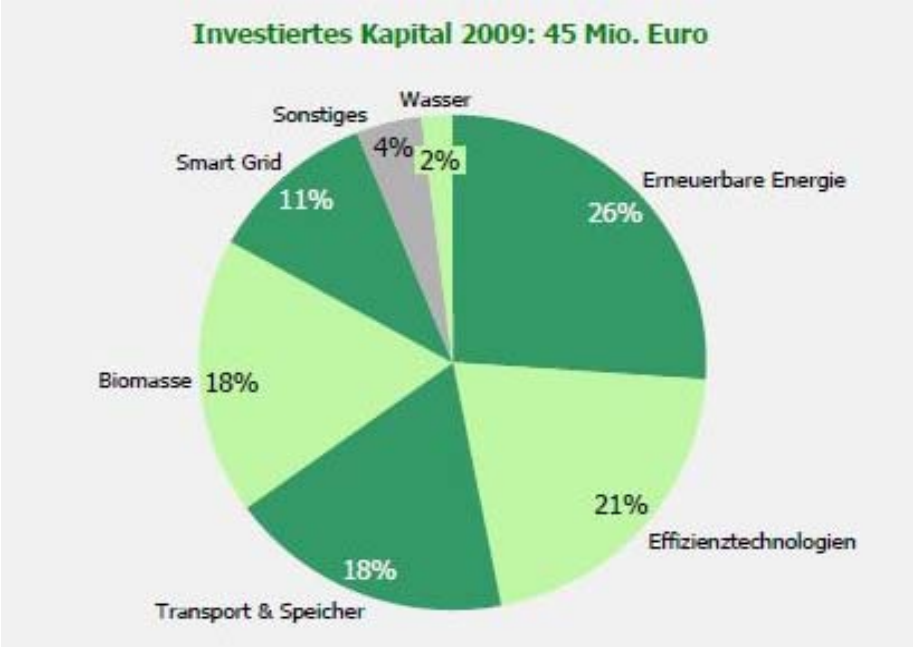
## 6.3 Green Tech Funds

Als ein wesentliches Hemmnis für innovative Recyclingtechnologien und Business-Modelle erweisen sich häufig Finanzierungs-Schwierigkeiten bei der Entwicklung zur Marktreife und der frühen Markteinführungsphase. Abbildung 17 verdeutlicht, dass in Deutschland im Jahr 2009 für Innovationen im Bereich Effizienztechnologien nur ca. neun Mio. Euro Venture Capital zur Verfügung standen. Angesichts der skizzierten Einsparpotenziale wird deutlich, dass

[215] Stadt Zürich, Hochbaudepartment 2010
[216] Stadt Zürich 2009
[217] Stadt Zürich, Hochbaudepartment 2012
[218] Stadt Zürich 2009
[219] Stadt Zürich, Hochbaudepartment 2012

hier über zusätzliche öffentliche Finanzierungsmöglichkeiten noch weitere erhebliche Kosteneinsparungen ermöglicht werden könnten.

**Abbildung 17: Venture Capital im Cleantech-Sektor**




Quelle: FHP 2010

Bereits in der Konzeption einer „ökologischen Industriepolitik“ des Bundesumweltministeriums[220] war ein Vorschlag zur Entwicklung eines GreenTech-Funds enthalten, der speziell innovative Umwelttechnikunternehmen jünger als ein Jahr unterstützen sollte. Der Fonds war als Public-Private-Partnership konzipiert, das Fondsvolumen von 500 Mio. Euro sollte sich sowohl aus privatem als auch aus öffentlichem Kapital speisen.[221] Die Diskussionen mit Venture Capital Unternehmen haben jedoch gezeigt, dass einerseits viele Unternehmen im Bereich Rohstoffeffizienz explizit nicht unter dem Label „grüne Technologie“ firmieren wollen, zum anderen ein solcher technologiegebundener teil-öffentlicher Förderfonds beihilferechtlich und auch politisch schwer zu begründen wäre[222], u.a. weil damit Vorgaben für spezifische Einzeltechnologien verbunden gewesen wären. Alternativ wäre daher zu überlegen, einen stärker technologieoffenen Fonds zu etablieren, in dem stattdessen spezifische Kriterien zur Rohstoff- oder Ressourceneffizienz festgelegt werden. Für einen solchen Fonds könnte auf sehr gute Erfahrungen im Rahmen des österreichischen Förderprojekts „Fabrik der Zukunft“ zurückgegriffen werden, in dem eine ganze Reihe erfolgversprechender Innovationen im Bereich der Rohstoffeffizienz angestoßen wurden.

Neben der Bereitstellung von Venture Capital könnten auch strategische Leuchtturmprojekte zur Förderung von Innovationen in speziellen, strategisch relevanten Bereichen der Rohstoffeffizienz beitragen. Solche Projekte, die aufgrund ihrer Größe und Öffentlichkeitswirk-

[220] BMU 2006
[221] Machnig 2011, S. 4.
[222] Rennings 2010, S. 19.

samkeit die „Funktion eines Richtungsweisers erfüllen“[223] sollen, zielen auf einen *Return on Investment*, der deutlich langfristiger als bei Venture Capital ausgelegt ist. Solche, zum Beispiel als Wettbewerb ausgestaltete Förderprogramme könnten Ansatzpunkte für weitere Innovationen liefern, ohne dem Fehler der staatlichen Wissensanmaßung durch die Vorgabe bestimmter Lösungsrichtungen oder zu strikte Themenvorgaben zum Opfer zu fallen.

Speziell mit Blick auf die Recyclingwirtschaft ist vor allem das „Waste & Resources Action Programme“ (WRAP) in Großbritannien zu nennen. WRAP wurde 2000 als unabhängige Einrichtung gegründet und wird finanziert durch England, Schottland, Wales und Nord-Irland. Es versteht sich als Entwicklungsagentur für Partnerschaften im Bereich der Recyclingwirtschaft und Ressourceneffizienz. In Kooperation mit der Industrie soll die öffentliche Förderung möglichst effizient in innovative Ansätze investiert werden und so private Investitionen nach sich ziehen. WRAP bietet Finanzierungsmöglichkeiten im Bereich Abfallvermeidung oder Re-Use. Ein spezieller Fonds für gemischte Plastikabfälle mit 5 Mio. Pfund soll dazu beitragen, bis 2015 Behandlungskapazität für 100.000 t Kunststoffabfälle pro Jahr aufzubauen. Als besonders erfolgreiche Initiativen der vergangenen Jahre sind dabei u.a. zu nennen:

- Das Courtauld Commitment, bei dem sich mehr als 45 Hersteller und Handelsketten verpflichtet haben, das wachsende Verpackungsabfallaufkommen durch intelligenteres Design einzudämmen.

- Eine Initiative zur Halbierung der deponierten Abfallmenge im Baubereich („Halve Waste to Landfill“) mit mehr als 500 Unterzeichnern und substanziellen Fortschritten im Recycling von Bau- und Abbruchabfällen.

- Unterstützung von Forschung und Umsetzungsaktivitäten im Bereich Lebensmittel- und Kunststoffabfällen, die zur Inbetriebnahme der ersten Behandlungseinrichtungen für diese Abfälle in Großbritannien geführt haben.

- Multi-Media-Kampagnen zum Recycling und zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen („Recycle now“ und „Love food hate waste“), auf deren Projekt-Homepages alleine jedes Jahr mehr als 1 Millionen Menschen sich informieren.

Mit einer jährlichen öffentlichen Unterstützung von unter 100 Mio. Euro ist es WRAP gelungen, durch private Kofinanzierung und eine sehr sorgfältige Projektauswahl allein zwischen 2008 und 2011 ca. 2,5 Mrd. Euro an Investitionen mit entsprechenden volkswirtschaftlichen Benefits zu initiieren. Auch für die kommenden Jahre wurden ökologische und ökonomische Ziele definiert, danach sollen durch die unterstützten Projekte jährlich[224]:

- 7 Mio. t weniger $CO_2$ produziert werden,

- 3 Mio. t weniger Bioabfälle deponiert werden,

[223] Rennings 2010, S. 20.
[224] WRAP 2013

- 3 Mio. t weniger Primärressourcen eingesetzt werden,
- 2 Mio. t weniger Abfälle produziert werden,
- 150 Mio. Euro Wachstum im Recyclingsektor erzielt werden,
- 2 Mrd. Euro Einsparungen für Konsumenten, Unternehmen und die öffentliche Hand erzielt werden.

# 7 Literatur

4Phones (2008). Nokia-Studie: Nur 3 Prozent der Handys werden recycelt. http://www.4phones.de/Ticker_Nokia_Studie_Nur_3_Prozent_der_Handys_werden_recycelt_4678.html (Zugriff am 31. Januar 2012).

Acosta-Fernández, J., Bringezu, S. (2007). Sektorale Potenziale zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs der deutschen Wirtschaft und ihre Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen, Bruttowertschöpfung und Beschäftigung. Wuppertal: Wuppertal Institut.

Akerlof, G. (1970). The Market for Lemons, Quality Uncertainty and the Market Mechanism. In: Quarterly Journal of Economics Ausgabe 3/84, S. 488-500.

ALBA Group (2011). Recycling für den Klimaschutz. Ergebnisse der Fraunhofer UMSICHT-Studie zur CO2-Einsparung durch Recycling. Berlin.

Alwast, H. (2013): Konsequenzen der Abfallhierarchie für die Abfallverbrennung. Präsentation auf der Fachtagung Abfallwirtschaft 2013, Frankfurt.

Andrews-Speed, P., Bleischwitz, R., Boersma, T., Johnson, C., Kemp, G., VanDeveer, S. D. (2012). The Global Resource Nexus. The Struggles for Land, Energy, Food, Water, and Minerals. Transatlantic Academy. http://www.bosch-stiftung.de/content/language2/downloads/TA_2012_report_web_version.pdf

Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., Marwede, M. (2009). Rohstoffe für Zukunftstechnologien. ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale", Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

ARN (2012). Minder auto's via ARN gedemonteerd. http://www.arn.nl/ARN/Nieuws/Minder-auto-s-via-ARN-gedemonteerd (Zugriff am 21. Dezember 2012).

ARN (2011). Recyclingpercentage autowrakken flink omhoog. http://www.arn.nl/ARN/Nieuws/Recyclingpercentage-autowrakken-flink-omhoog (Zugriff am 21. Dezember 2012).

ARN (2010). Sustainability Report 2009. http://www.arn.nl/english/ARN/Publications/Sustainability-Report (Zugriff am 21. Dezember 2012).

Aurubis AG (2012a). Kupfer ist unser Antrieb. http://www.aurubis.com/fileadmin/media/documents/de/Geschaeftsberichte_Quartalsberichte/Geschaeftsbericht_Aurubis_2011_12_d.pdf (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Aurubis AG (2012b). Kupfer ist unser Antrieb. http://www.aurubis.com/fileadmin/media/documents/de/Geschaeftsberichte_Quartalsberichte/Jahresabschluss_Lagebericht_AG_2011_12_www.pdf (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Avfall Sverige (2012). Sweden – World Leader in WEEE Collection. http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/elretur_eng.pdf (Zugriff am 4.Januar 2013).

Bahn-Walkowiak, B., Bleischwitz, R., Distelkamp, M., Meyer, M. (2012). Taxing construction minerals: a contribution to a resource-efficient Europe, In: Mineral Economics, Vol. 25, Issue 1, 2012, S. 29-43.

bifa (2013): Leitfaden zur ökoeffizienten Verwertung von Bioabfällen. bifa-Text Nr. 60, Augsburg.

Bleischwitz, R., Bahn-Walkowiak, B., Bringezu, S., Lucas, R., Steger, S. (2009). Outline of a resource policy and its economic dimension. In: Bringezu, Stefan (Hrsg.): Sustainable resource management : global trends, visions and policies. – Sheffield : Greenleaf Publishing, S. 216-296.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012). „GreenTech made in Germany 3.0 - Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland.“ Berlin.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011). Elektro- und Elektronikgeräte in Deutschland: Daten 2010 zur Erfassung, Wiederverwendung und Behandlung. http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do;jsessionid=24417FC989202900B2BC1324E3BE3F3C?nodeIdent=2312 (Zugriff am 7. Januar 2013).

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, UBA, BAFU, Um weltbundesamt, Lebensministerium (2009). Re-Source 2009. Berlin.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009). GreenTech made in Germany 2.0 - Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland. Verlage C.H.Beck / Vahlen, München.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2006). Ökologische Industriepolitik. http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/memorandum_oekol_industriepolitik.pdf (Zugriff am 17. Juni 2013).

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010). Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin.

Boliden (2011). Annual Report. http://investors.boliden.com/files/press/boliden/Boliden_Annual_Report_2011.pdf (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Boliden. (2010). Expansion of e-scrap capacity at Rönnskär. http://www.boliden.com/Documents/Press/Presentations/100503_e-skrot_ronnskar_eng.pdf (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Boliden (o. J.). Raw material. http://www.boliden.com/Documents/Press/Publications/Recycling/World_Class_Recycling_raw_material.pdf (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Bringezu et al. (2009). Sustainable Resource Management.Wuppertal Institute, Germany.

Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel, D. (2012). Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. Recklingshausen: Öko-Institut.

Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D. (2009). Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Sustainable innovation and technology transfer industrial sector studies, UNEP, Öko-Institut.

Buchert et al. (2007). Verbesserung der Edelmetallkreisläufe. Analyse der Exportströme von Gebraucht-Pkw und -Elektro(nik)geräten am Hamburger Hafen. Darmstadt.

Bundeskartellamt (2012). Bundeskartellamt legt Sektoruntersuchung duale Systeme vor – Wettbewerbsöffnung senkt die Kosten der Verpackungsentsorgung um eine Mrd. Euro/Jahr. http://www.bundeskartellamt.de/wDeutsch/archiv/PressemeldArchiv/2012/2012_12_03.php (Zugriff am 17. Juni 2013).

Bundesregierung (2012). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/089/1708965.pdf (Zugriff am 17. Juni .2013).

Chancerel, P. (2010). Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. Dissertation, Berlin: ITU-Schriftenreihe.

Clenfield,J., Shiraki, M. (2010). Hitachi Develops Machinery to Recycle Rare Earths. http://www.bloomberg.com/news/2010-12-06/hitachi-says-it-developed-machine-to-recycle-rare-earths.html (Zugriff am 27. Dezember 2012).

CocaCola (2013): Recycling. Corporate Responsbibilty and Sustainability Report 2012/ 2013. http://www.cokecce.com/system/file_resources/57/Recycling_Factsheet.pdf (Zugriff am 17. September 2013).

Commerzbank AG (2012). Entsorgung und Recycling. Branchenbericht – Group Risk Research. Frankfurt a.M.

Consultic (2012). Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011.

Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Kanthak, M. (2011): Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen. Dessau, UBA-Texte 19/2011.

Dehoust, G., Küppers, P., Bringezu, S., Wilts, C. H. (2010). Development of scientific and technical foundations for a national waste prevention programme / by Dehoust, G., Küppers, P., Bringezu, S., Wilts, H.. - Texte; 60/2010 - Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Destatis (2013). Erzeugung von Roheisen, Rohstahl, Walzstahl, Stahlrohren: Deutschland, Jahre (bis 2009). https://www-genesis.destatis.de/genesis/online;jsessionid=C359F087C259BAC397DF7B49F9EC5AF6.tomcat_GO_2_1?operation=previous&levelindex=2&levelid=1368004098275&step=2 (Zugriff am 08. Mai 2013)

Destatis (2013a). Umwelt – Abfallintensität- https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Tabellen/Abfallintensitaet.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 18.10.2013)

Destatis (2012). Umwelt – Abfallentsorgung. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallentsorgung2190100107004.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 17.06.2013).

Destatis. Bevölkerung nach dem Gebietsstand (o.J.). https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/LangeReihen/Bevoelkerung/lrbev03.html (Zugriff am 7. Januar 2013).

Deutsche Rohstoffagentur (2012). Daten – Fakten – Argumente, Rohstoffsicherung für die deutsche Wirtschaft. Erläuterungen zur Folie des Monats November 2012. http://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/erlaeuterungen-rohstoffchart-november.pdf (Zugriff am 17. Dezember 2012).

Deutsche Rohstoffagentur (2011). Deutschland Rohstoffsituation 2010. Hannover.

DKR – Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH (2013a). Kunststoffe aus haushaltsnaher Sammlung dualer Systeme. http://www.dkr.de/produkteleistungen/kunststoffe/dsd-fraktion-ballenware.html (Zugriff am 09. Mai 2013).

DKR – Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH (2013b). Gewerbekunststoffe. http://www.dkr.de/produkteleistungen/kunststoffe/gewerbekunststoffe.html (Zugriff am 09. Mai 2013).

DKR – Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH (2013c). Kunststoffe. http://www.dkr.de/produkteleistungen/kunststoffe.html (Zugriff am 09. Mai 2013).

DKR – Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH (2012). Erfolg mit innovativen Dienstleistungen und Produkten. http://www.dkr.de/news/ansicht/article/erfolg-mit-innovativen-dienstleistungen-und-produkten.html (Zugriff am 09. Mai 2013).

El-Kretsen (o.J.). Prislistor. http://www.el-kretsen.se/producentansvar/redan-kund/prislistor/ (Zugriff am 7. Januar 2013).

El-Kretsen (2011). Presseinformation 2011-02-15. http://www.el-kretsen.se/sitespecific/elkretsen/files/dokument/insamlingsstatistiken2010.pdf (Zugriff am 7. Januar 2013).

El-Kretsen (2007). Affiliation Contract Products. http://www.el-kretsen.se/sitespecific/elkretsen/files/dokument/productagreement..pdf (Zugriff am 7. Januar 2013).

EuPR (European Plastics Recycler) (2010). How to increase post-consumer plastics. Strategy paper of the European Plastics Association. Brussels.

Europäische Kommission (2011). Ressourcenschonendes Europa - eine Leitinitiative der Strategie Europa 2020. KOM(2011) 21. Brüssel. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/pdf/resource_efficient_europe_de.pdf (Zugriff am 26. Januar 2012).

European Commission (2010). Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission - Enterprise and Industry. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm (Zugriff am 26. Januar 2012).

Europäische Kommission (2003). Anleitung zur Kosten-Nutzen-Analyse von Investitionsprojekten. Studie im Auftrag der Generaldirektion Unternehmen. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/guides/cost/guide02_de.pdf, (Zugriff am 14. April 2012).

European Environment Agency (2011). Resource efficiency in Europe : Policies and approaches in 31 EEA member and cooperating countries ; Prepared by: Kaźmierczyk, Paweł ; Stenbæk Hansen, Mikkel ; Günther, Jens ; McKinnon, David ; Loewe, Christian ; Lingvall, Fredrik ; Kallay, Tamas Kristof ; Szlezak, Jozsef ; Bahn-Walkowiak, Bettina ; Herczeg, Marton ; Wittmer, Dominic; EEA Report No 5/2011. – Copenhagen: European Environment Agency.

EUWID RE (Europäischer Wirtschaftsdienst Recycling und Entsorgung) (2010). Entsorgungsmarkt für Siedlungsabfälle. Ausgabe 51/2010, S. 37.

FHP Private Equity Consultants (2010). Cleantech Venture Capital Report 2010. http://fhpe.de/vc-panel/CleanTech-VentureCapital-Report.pdf

Fischer, C., Junker, H., Mazzanti, M., Paleari, S., Wuttke, J., Zoboli, R. (2012). Transboundary shipments of waste in the European Union. Reflections on data, environmental impacts and drivers. ETC/SCP Working Paper 2/2012. http://scp.eionet.europa.eu/publications/wp2012_2/wp/wp2012_2

Fripan (2002). Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur. http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/zusammensetzung/restm_anly.pdf (Zugriff am 17. Juni 2013).

GIB/ ARGUS (Gesellschaft für Innovationsforschung und Beratung mbH; ARGUS Statistik und Informationssysteme in Umwelt und Gesundheit GmbH) (2009). Die wirtschaftliche Bedeutung der Recycling- und Entsorgungsbranche in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin.

GTAI (2012). Solvay recycelt seltene Erden in Frankreich. http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=680842.html (Zugriff am 27. Dezember 2012).

H.C. Starck (2012). Umweltgerecht, kompetent, einzigartig - High-Tech-Recycling für Refraktärmetalle. http://www.hcstarck.com/hcs-admin/file/8a8181e225548334012554ccf6091424.de.0/HC_Starck_Recycling_DE_2012.pdf (Zugriff am 27. Dezember 2012).

Hagelüken, C. (2012). Recycling the Platinum Group Metals: A European Perspective. Platinum Metals Review (John Ma), S. 29-35.

Hagelüken, C. (2011). Rohstoffsicherung durch Recycling - Chancen, Herausforderungen & Grenzen. http://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DREP_2011_Hagelueken.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Zugriff am 19. Oktober 2012).

Hagelüken, C. (2010). Edelmetalle und Edelmetallrecycling. Heft 121 der Schriftenreihe der GDMB 44. Metallurgisches Seminar.

Hagelüken, C. (2007). Metals Recovery from e-scrap in a global environment. 6. OEWG Basel Convention, Genf.

Henkes, W. (2010). Kirchturmdenken. In: Recycling Magazin 8/2010, S. 24-25.

Hennicke, P., Kristof, K., Götz, T. (Hrsg.) (2011). Aus weniger mehr machen: Strategien für eine nachhaltige Ressourcenpolitik in Deutschland. Oekom Verlag, München.

Hüther, M. (2010). Volkswirtschaftliche Bedeutung der Entsorgungs- und Rohstoffwirtschaft. http://www.bde-berlin.org/wp-content/pdf/2010/20100909_iw_studie.pdf (Zugriff am 17.06.2013).

IUTA; FEM (2011). Metallurgische Rückgewinnung von Indium, Gallium und Germanium aus Elektronikschrott und Entwicklung entsprechender Aufarbeitungsmethoden für die Verwertungsindustrie. http://www.veu.de/files/abschlussbericht_16040_n.pdf (Zugriff am 27. Dezember 2012).

InvestmentMine (o.J.). Commodity and Metal Prices. http://www.infomine.com/investment/metal-prices/ (Zugriff am 17. Juni 2013).

Interseroh (2011). Geschäftsbericht 2011. http://www.interseroh.de/ueber-uns/investor-relations/finanzberichte/geschaeftsberichte/ (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Interseroh (2010). Konzernbroschüre. http://www.interseroh.de/ueber-uns/investor-relations/finanzberichte/geschaeftsberichte/ (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Johnson Mattheys (o.J.a). „Palladium Supply and Demand.“ *Palladium Demand by Application: Regions.* 2011a. http://www.platinum.matthey.com/uploaded_files/Int_2012/pd_03_to_12.pdf (Zugriff am 16. Dezember 2012).

Johnson Mattheys (o.J.b). „Platinum Supply and Demand.“ *Gross Platinum Demand by Application: Regions.* 2011b. http://www.platinum.matthey.com/uploaded_files/Int_2012/pt_03_to_12.pdf (Zugriff am 17. Dezember 2011).

JRC IPTS (2012). End-of-waste criteria for waste plastic for conversion. Technical proposals. Sevilla.

Kawohl, C. (2011). Praxisdialog „Ressourcen- und materialeffiziente Produktgestaltung“. http://www.demea.de/umfeldinformationen/praxisdialog/praxisdialog_02112011_kawohl.pdf (Zugriff am 18. Dezember 2012).

Kern, M., Sprick, W. (2011): Bioabfallvergärung in Deutschland – Potenzial, Technik und Perspektiven. 5. Biomasseforum, Witzenhausen.

Knappe, F. (2009). Hochwertiger Einsatz von Recyclingstoffen – Hemmnisse, Potenziale und ökologische Bewertung. In: BMU; UBA; BAFU; Umweltbundesamt; Lebensministerium (2009): Re-Source 2009. Berlin, S. 35-36.

Knappe, F., Dehoust, G., Petschow, U., Jakubowski, G. (2012): Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente. Dessau: UBA-Texte Nr. 28/2012.

Kranert, M., Cord-Landwehr, K. (2010). Einführung in die Abfallwirtschaft. Wiesbaden. Vieweg und Teubner Verlag.

Kuchta, K. (2012). Recycling seltener Erdmetalle gewährleistet Klimaschutz und Versorgungssicherheit. http://www.alumni.tu-berlin.de/fileadmin/Redaktion/ABZ/PDF/TUI/69/TUI69_Kuschta.pdf (Zugriff am 27. Dezember 2012).

Lucas, R. (2011). Innovationsstrategien in der Altfahrzeugverwertung. In: Frank Beckenbach et al. (Hrsg.): Methoden der Stoffstromanalyse : Konzepte, agentenbasierte Modellierung und Ökobilanz. - Marburg : Metropolis-Verl., S. 236-251.

Lucas, R.; Wilts, C. H. (2011). Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM). Wuppertal.

Lucas, R., Wilts, H., Richter, N., Thomas, S. (2008). Perspektiven dezentraler Infrastrukturen im Spannungsfeld von Wettbewerb, Klimaschutz und Qualität. Ergebnisse für die Abfallwirtschaft. Wuppertal.

Machnig, M. (2011). Ökologische Industriepolitik als Schlüsselelement einer zukunftsfähigen Wirtschaft in Europa. Friedrich-Ebert-Stiftung. Berlin. Online verfügbar unter http://library.fes.de/pdf-files/id/08690.pdf (Zugriff am 27. Januar 2012).

Manhart, A. (2011). International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment. In: Journal of Industrial Ecology, Vol. 15, Issue 1, S. 13-30.

Martens, H. (2011). Recyclingtechnik – Fachbuch für Lehre und Praxis. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.

McKinsey Global Institute (2011). Resource Revolution: Meeting the world’s energy, materials, food, and water needs.

Mettke, A. (2009). Pilotprojekt Recycling-Beton. http://www.rc-beton.de/vortraege_pdfs/Vortrag-Dr-Mettke-BTU.pdf (Zugriff am 17. Juni 2013).

Mineur, M. (2007). Müllverbrennung im Spannungsfeld von Energienutzung und Ökonomie. In: Faulstich, M.; Urban, A.I.; Bilitewski, B. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung. Band 12, kassel university press, Kassel. S. 202-211.

Monier, V., Hesten, M., O´Connor, C., Anderson, G., Neubauer, A., Sina, S., Homann, G., Reisinger, H. (2011). Impelementing EU Waste Legislation for Green Growth. Final Report for European Commission, DG Environment. Brussels.

mtm plastics (o.J.). Recycling von Altkunststoffen: Herstellung. http://www.mtm-plastics.eu/de/produkte/herstellung-von-regranulat.php (Zugriff am 09. Mai 2013).

mtm plastics (o.J.). Universell und übergreifend: Geschäftsfeld. http://www.mtm-plastics.eu/de/unternehmen/unser-geschaeftsfeld.php (Zugriff am 09. Mai 2013).

Nordhausen. thueringer-allgemeine.de. (2013). MTM aus Niedergebra plant Millioneninvestitionen. http://nordhausen.thueringer-allgemeine.de/web/lokal/wirtschaft/detail/-/specific/MTM-aus-Niedergebra-plant-Millioneninvestitionen-1795311751 (Zugriff am 09. Mai 2013).

Oakdene Hollins Ltd (2011). Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England. Annexes.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2006). Improving recycling markets. Paris.

Pépin, Laura Cécilia (2011). Umweltschonender, effizienter Ressourcenaustausch: Vergleich industrieller Ökosysteme am Beispiel Kalundborg und Heidelberg-Pfaffengrund. Projektarbeit.

PlasticsEurope (2010). Anwendungsgebiete von Kunststoff. http://www.plasticseurope.de/anwendung.aspx (Zugriff am 08. Mai 2013).

Rechberger, H. (2010). Urban Mining: Definition, Potenzial, Aufgaben. Workshop Verwertung ressourcenrelevanter Stoffe aus dem anthropogenen Lager, Berlin.

Recycling Magazin (2012). Solvay eröffnet Recyclinganlagen für Seltene Erden. http://www.recyclingmagazin.de/rm/news_detail.asp?ID=17470&NS=1 (Zugriff am 27. Dezember 2012).

Recycling Magazin (2011). Abfallexpertin sucht nach Recyclingwegen für Edelmetalle. http://www.recyclingmagazin.de/rm/news_detail.asp?ID=14908&SID=702874192168100100&NS=1 (Zugriff am 27. Dezember 2012).

Remondis Argentia (2012). Kennzahlen. http://www.remondis.nl/ar/profil/kennzahlen/ (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Remondis Argentia (2006). Broschüre: Edelmetallrecycling. http://www.remondis.de/downloads_46451/ (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Remondis.(2012a). Konsequente Verwertung. Rohstoffgewinnung auf höchstem Niveau. http://www.remondis.de/spektrum_294/rohstoffe_2274/ (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Remondis (2012b). REMONDIS in Zahlen und Fakten. http://www.remondis.de/profil/kennzahlen_305/ (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Rennings, K. (2010). Innovationspolitische Instrumente zur Förderung von Materialeffizienz und Ressourcenschonung. Arbeitspapier zu Arbeitspaket 3 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). Ressourceneffizienz Paper 3.8. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal. Online verfügbar unter http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP3_8.pdf (Zugriff am 26. Januar 2012).

Reuters, T. (2012). World Silver Survey 2012 - A Summary. London, Washington D.C. : The Silver Institute und GFMS.

Sander, K., Schilling, S. (2010). Transboundary shipment of waste electrical and electronic equipment/electronic scrap – Optimization of material flows and control. Dessau, Germany: UBA Texte Nr. 11/2010.

Schiller, G., Deilmann, C. (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Dessau, Germany: UBA Texte Nr. 56/2010.

Scholz AG (2010). Unternehmen. http://www.scholz-austria.at/de/unternehmen/unternehmen.php (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Schrott Wetzel (o. J.). Märkte. http://www.schrott-wetzel.de/maerkte/index.html (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Schrott Wetzel (o. J.). Portrait. http://www.schrott-wetzel.de/portrait/index.html (Zugriff am 19. Dezember 2012).

Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Merz, S., Dittrich, C. (2011). Study on Rare Earths and Their Recycling. Darmstadt.

Sharp (2012). Recycling technologies. http://www.sharpdirect.co.uk/environment/recycling-technologies/page/recyclingtechnologies/ (Zugriff am 27. Dezember 2012).

Solvay (2012). Solvay launches its rare earth recycling activity in France . http://www.solvay.com/EN/NewsPress/20120927_Coleopterre.aspx (Zugriff am 27. Dezember 2012).

SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (2004). Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern. Bundestagsdrucksache 15/3600, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft, Bonn.

Stadt Zürich (2009). Ressourcenstrategie <<Bauwerk Stadt Zürich>>.

Stadt Zürich, Hochbaudepartment (2012). Jahresbericht 2011 - 7 Meilenschritte zum umwelt- und energiegerechten Bauen Rahmenkredite Energieeffizienz und erneuerbare Energien.

Stadt Zürich Hochbaudepartment (2010). Jahresbericht 2009 – 7 Meilenschritte zum umwelt- und energiegerechten Bauen.

Steger, S., Fekkak, M., Bringezu, S. (2011). Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Arbeitspapier zu Arbeitspaket 2 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). Ressourceneffizienz Paper 2.4. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal.

Swedish EPA (2009). WEE Directive in Sweden – Evaluation with future study. http://www.swedishepa.se/Documents/publikationer/978-91-620-8421-9.pdf (Zugriff am 4. Januar 2013).

Tang, Jiel, Wei, C. Zhao, D., Lin, H., Tian, G. (2009). Nd2O3 Recovery from sintered NdFeB scrap. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-XYJY200901004.htm (Zugriff am 27. Dezember 2012).

UBA (2010). Elektro- und Elektronik-Altgeräte. http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2312 (Zugriff am 17. Juni 2013).

UBA (2011). Abfallaufkommen (einschließlich gefährlicher Abfälle). Daten zur Umwelt. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt-daten-zur-um-welt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do;jsessionid=58D248419F1318CDAAD2F8F3A5207A51?ident=24981 (Zugriff am 08. Mai 2013)

UBA (2012). Grenzüberschreitende Abfallverbringung. Daten zur Umwelt. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2308 (Zugriff am 19. Dezember 2012).

UBA (2013). Verwertungsquoten der Hauptabfallströme. Daten zur Umwelt. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2663 (Zugriff am 08. Mai 2013).

UBA, BMU (2012). Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2010 gemäß § Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG. Qualitätsbericht: Beschreibung der verwendeten Daten nach Artikel 1 der KOM-Entscheidung 2005/293/EG über Altfahrzeuge. Dessau/ Bonn.

Umicore (2012). Recycling. http://www.umicore.com/en/ourBusinesses/recycling (Zugriff am 19. Dezember 2012).

UNEP (2011). Recycling Rates of Metals - A Status Report. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.

USGS (2011). Rare Earth Elements – End Use and Recyclability. Scientific Investigations Report 2011–5094, Virginia, 2011.

USGS (2012). Commodity Statistics and Information. http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/ (Zugriff am 17. Juni 2013).

Wagner, J., Heidrich, K., Baumann, J., Kügler,T. Reichenbach, J. (2012). Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens. Umweltforschungsplan des BMU, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Wallau, F. (2000). „Finanzierungsmodelle zur Altautoentsorgung in ausgewählten europäischen Ländern“ (S. 24-96). In K. Brockmann, S. Deimann, F. Wallau: Endbericht zum UBA-Forschungsvorhaben „Evaluierung von Finanzierungsmodellen zur Durchführung der kostenlosen Rückgabe von Altautos“ (http://wko.at/up/Alt-Pkw-FinanzierungsstudieBRD2.pdf).

Walz, R., Ostertag, K., Doll, C., Eichhammer, W., Frietsch, R., Helfrisch, N., Marscheider-Weidemann, F., Sartorius, C. (2008). Innovationsdynamik und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in grünen Zukunftsmärkten. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3690.pdf (Zugriff am 17. Juni 2013).

Watkins, E. et al. (2012). Use of Economic Instrument and Waste Management Performances. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Umwelt. Paris.

Wilts, C. H. ; Bleischwitz, R. (2012). Combating material leakage: a proposal for an international metal covenant. In: Surveys and perspectives integrating environment and society : SAPIENS, 4 (2012), 2, S. 53-61.

Wilts, C. H. (2012). The ambiguous relation between waste incineration and waste prevention. In: Avraam Karagiannidis (Hrsg.): Waste to energy. - London [u.a.] : Springer, S. 349-370.

Wilts, C. H. (2011). Internationale PGM-Stoffströme und nachhaltiges Ressourcenmanagement : Herausforderungen für Bilanzierung und Bewertung. In: Frank Beckenbach et al. (Hrsg.): Methoden der Stoffstromanalyse: Konzepte, agentenbasierte Modellierung und Ökobilanz. - Marburg: Metropolis-Verl., S. 209-235.

Wilts, C. H., Bringezu, S., Bleischwitz, R., Lucas, R., Wittmer, D. (2011). Challenges of metal recycling and an international covenant as possible instrument of a globally extended producer responsibility. In: Waste management & research, 29 (2011), 9, S. 902-910.

Wittmer, D., Erren, M.,Lauwigi, C., Dressler, M., Ritthof, C. (2011). Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Wuppertal.

WRAP (2013). Our Goals. http://www.wrap.org.uk/content/our-goals (Zugriff am 10. Januar 2013).

WRAP (2008). The determinants of recovered plastics prices in the UK. London.

World Gold Council (2012). Gold demand trends - Full year 2011.