

TEXTE

34/2019

Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärroh- stoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität

Abschlussbericht

TEXTE 34/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 93 330 0
UBA-FB 002704

Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität

Abschlussbericht

von

Sören Steger, Michael Ritthoff
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal

Winfried Bulach, Doris Schüler, Izabela Kosińska, Stefanie Degreif, Günter
Dehoust, Thomas Bergmann
Öko-Institut e.V., Darmstadt


Peter Krause, Rüdiger Oetjen-Dehne
Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Öko-Institut e.V.
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH
Levetzowstraße 10A
10555 Berlin

Abschlussdatum:

September 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie
Felix Müller

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Die Sekundärrohstoffwirtschaft ist ein wichtiger Baustein zur Reduzierung des Primär Materialeinsatzes in Deutschland. Die werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung von Abfällen ermöglicht eine Substitution entsprechender Primärmaterialien und trägt auf diese Weise zur Ressourcenschonung bei.

Das Projekt „Ressourcenschonung durch eine stoffstromorientierte Sekundärrohstoffwirtschaft“ hatte zum Ziel den physischen Beitrag der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Ressourcenschonung besser und möglichst umfassend zu quantifizieren. Dazu wurden unter Nutzung der im Vorgängerprojekt erarbeiteten Bottom-up-Methode die Datenbasis zur Berechnung der entsprechenden Indikatoren DIERec und DERec sowie des KEA erweitert, aktualisiert und in Zeitreihen von 2007 bis 2015 dargestellt. Auf Grundlage einer Auswahl an 30 masserelevanten Materialien ist es das Ziel dieses Projektes, ausgehend von einer stoffstromspezifischen Gliederung, näherungsweise das gesamte Aufkommen an Sekundärrohstoffen einschließlich der damit verbundenen Stoffströme in den Vorketten in ein Verhältnis zum gesamten Materialaufwand der Volkswirtschaft (DMI und RMI) zu setzen.

Zu diesem Zweck werden in diesem Projekt zunächst die Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit über die Substitutionswirkung und -potentiale der Sekundärrohstoffwirtschaft analysiert und anschließend detaillierte Untersuchungen für die 30 Materialien durchgeführt mit dem Schwerpunkt der Bestimmung der Verwertungswege dieser Sekundärrohstoffmengen und ihrer daraus abgeleiteten Substitutionspotentiale.

Abstract

Secondary raw materials management is an important component for reducing the use of primary materials in Germany. The material, raw material and energetic recovery of waste enables the substitution of corresponding primary materials and thus reduces Germany's material account.

The project "Resource conservation through material flow-oriented secondary raw materials management" aimed at reducing this data gap and thus quantifying the contribution of secondary raw materials management to resource conservation as comprehensively as possible. Using the bottom-up method developed in the previous project, the data basis for calculating the corresponding indicators DIERec and DERec and the CEA were extended, updated and presented in time series from 2007 to 2015. Based on a selection of 30 materials relevant to mass, the aim of this project, based on a material flow specification, is to put the entire volume of secondary raw materials, including the associated material flows in the upstream chains, in relation to the total material use of the national economy (DMI and RMI).

For this purpose, the project first analyses the Federal Statistical Office's waste statistics with regard to their relevance on the substitution effect and potential of the secondary raw material economy and then carries out detailed investigations for 30 materials with focus on determining the recovery routes of these secondary raw material quantities and their derived substitution potentials.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	19
Abkürzungsverzeichnis	32
Zusammenfassung.....	35
Summary.....	45
1 Einleitung	55
2 Methodische Grundlagen	56
2.1 Methodik der Stoffstrombilanzierung nach Abfallstatistik für die Materialkategorien	56
2.2 Methodik der detaillierten Stoffstrombilanzierung einzelner Materialien	57
2.3 Methodik zur ökonomischen Bewertung der untersuchten Verwertungswege	60
3 Materialspezifische Stoffstrombilanzierung der Abfallwirtschaft	62
3.1 Fe-Metalle	62
3.2 NE-Metalle	67
3.3 Biogene Abfälle	73
3.4 Kunststoffe.....	77
3.5 Nichtmetallische Mineralien.....	81
4 Auswahl der zu betrachtenden Materialien und Bewertungsansätze	89
4.1 Auswahl im Bereich der Metalle.....	89
4.2 Auswahl im Bereich der mineralischen Stoffströme	90
4.3 Auswahl im Bereich der Kunststoffe.....	90
4.4 Auswahl im Bereich organischer Abfälle	90
5 Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege der metallischen Materialien	91
5.1 Eisen und Stahl.....	91
5.1.1 Materialeinsatz in Deutschland.....	91
5.1.2 Stoffströme in Deutschland 2013	94
5.1.3 Verwertungswege	96
5.1.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	97
5.1.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	98
5.1.5.1 Verwertungsmengen	98
5.1.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	99

5.2	Edelstahl.....	101
5.2.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	102
5.2.2	Stoffströme in Deutschland 2013	103
5.2.2.1	Bereitstellung von Edelstahlschrott im Jahr 2013	106
5.2.2.2	Verluste	107
5.2.3	Verwertungswege	107
5.2.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	107
5.2.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	109
5.2.5.1	Verwertungsmengen	109
5.2.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	110
5.3	Aluminium.....	112
5.3.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	112
5.3.2	Stoffströme in Deutschland 2013	113
5.3.2.1	Bereitstellung von Hüttenaluminium	115
5.3.2.2	Bereitstellung von Sekundäraluminium	115
5.3.2.3	Produkt- und Halbzeugebene	117
5.3.2.4	Bilanzierung der Aluminiumverluste	118
5.3.3	Verwertungswege	118
5.3.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	119
5.3.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	120
5.3.5.1	Verwertungsmengen	120
5.3.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	121
5.4	Kupfer	123
5.4.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	123
5.4.2	Stoffströme in Deutschland 2013	124
5.4.2.1	Bilanzierung der Produktion von Raffinadekupfer (Anodenkupfer)	127
5.4.2.2	Bilanzierung der Sekundärströme zur Produktion von Raffinadekupfer und Guss	128
5.4.2.3	Bilanzierung der Produktion von Kupferhalbzeugen	129
5.4.2.4	Bilanzierung der Produktion von Kupferprodukten und der High-Grade- Abfälle	129
5.4.2.5	Bilanzierung des Kupferanteils im Messing-Kreislauf	129
5.4.2.6	Bilanzierung der Kupferverluste	130
5.4.3	Verwertungswege	132

5.4.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	132
5.4.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	134
5.4.5.1	Verwertungsmengen	134
5.4.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	135
5.5	Zink.....	136
5.5.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	136
5.5.2	Stoffströme in Deutschland 2013	137
5.5.2.1	Vorbemerkungen zu den Stoffströmen Zink	137
5.5.2.2	Zinkstoffströme in Deutschland 2013	138
5.5.2.3	Verwertung und Entsorgung von mineralischen Zinkabfällen	139
5.5.2.4	Bereitstellung von primärem Fein- und Feinstzink	140
5.5.2.5	Bereitstellung von Sekundärzink aus Altschrotten	141
5.5.2.6	Bereitstellung von Sekundärmessing	142
5.5.2.7	Produkt- und Halbzeugebene	143
5.5.3	Verwertungswege	145
5.5.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	146
5.5.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	148
5.5.5.1	Verwertungsmengen	148
5.5.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	149
5.5.6	Blei.....	150
5.5.7	Materialeinsatz in Deutschland.....	150
5.5.8	Stoffströme in Deutschland 2013	150
5.5.9	Verwertungswege	155
5.5.10	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	155
5.5.11	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	157
5.5.11.1	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	158
5.6	Zinn	159
5.6.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	159
5.6.2	Stoffströme in Deutschland 2013	161
5.6.2.1	Vorbemerkungen	162
5.6.2.2	Zinn in Abfällen	163
5.6.2.3	Verarbeitung von Primär- und Sekundärzinn in Deutschland	163

5.6.3	Verwertungswege	164
5.6.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	165
5.6.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	166
5.6.5.1	Verwertungsmengen	166
5.6.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	167
5.7	Silber	168
5.7.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	168
5.7.2	Stoffströme in Deutschland 2013	168
5.7.3	Verwertungswege	173
5.7.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	174
5.7.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	175
5.7.5.1	Verwertungsmengen	175
5.7.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	176
5.8	Gold.....	177
5.8.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	177
5.8.2	Stoffströme in Deutschland 2013	178
5.8.3	Verwertungswege und Verwertungsquoten.....	181
5.8.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	182
5.8.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	183
5.8.5.1	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	184
5.9	Platin und Palladium	186
5.9.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	186
5.9.2	Stoffströme in Deutschland 2013	188
5.9.2.1	Überblick	188
5.9.2.2	Autokatalysatoren	190
5.9.2.3	Industriekatalysatoren	194
5.9.2.4	Glasindustrie	196
5.9.2.5	Elektronik	196
5.9.2.6	Dentaltechnik	199
5.9.2.7	Schmuck	200
5.9.2.8	Investments	201
5.9.2.9	Sonstige industrielle Anwendungen	201

5.9.3	Verwertungswege und Verwertungsquoten.....	201
5.9.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	202
5.9.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	205
5.9.5.1	Verwertungsmengen	205
5.9.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	206
6	Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege der mineralischen Rohstoffe	208
6.1	Recycling-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen.....	208
6.1.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	209
6.1.2	Stoffströme in Deutschland 2013	209
6.1.3	Verwertungswege	210
6.1.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	210
6.1.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	211
6.1.5.1	Verwertungsmengen	211
6.1.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	212
6.2	Asphaltgranulat.....	213
6.2.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	213
6.2.2	Stoffströme in Deutschland 2013	213
6.2.3	Verwertungswege	214
6.2.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	215
6.2.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	216
6.2.5.1	Verwertungsmengen	216
6.2.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	218
6.3	Schlacken und Hüttensande aus der Eisen- und Stahlerzeugung.....	219
6.3.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	219
6.3.2	Stoffströme in Deutschland 2013	220
6.3.3	Verwertungswege	222
6.3.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	223
6.3.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	226
6.3.5.1	Verwertungsmengen	226
6.3.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	227
6.4	Kraftwerksnebenprodukte.....	229

6.4.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	229
6.4.2	Stoffströme in Deutschland	229
6.4.3	Verwertungswege	233
6.4.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	234
6.4.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	237
6.4.5.1	Verwertungsmengen	237
6.4.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	239
6.5	Verpackungsglas	241
6.5.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	241
6.5.2	Stoffströme in Deutschland 2013	241
6.5.3	Verwertungswege	243
6.5.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	243
6.5.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	244
7	Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege von Kunststoffen.....	246
7.1	Materialeinsatz in Deutschland	246
7.1.1	Polyethylen (PE)	249
7.1.2	Polypropylen (PP).....	250
7.1.3	Polyethylenterephthalat (PET).....	251
7.1.4	Polystyrol (PS).....	251
7.1.5	Polyvinylchlorid (PVC)	252
7.2	Stoffströme in Deutschland 2013	253
7.2.1	Polyethylen (PE)	253
7.2.2	Polypropylen (PP).....	256
7.2.3	Polyethylenterephthalat (PET).....	257
7.2.4	Polystyrol (PS).....	259
7.2.5	Polyvinylchlorid (PVC)	261
7.3	Verwertungswege und Verwertungsquoten	263
7.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos	267
7.4.1	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	277
7.4.1.1	Verwertungsmengen	277
7.4.1.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	279
8	Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege von organischen Abfällen.....	284

8.1	Altholz	284
8.1.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	284
8.1.2	Stoffströme in Deutschland 2010	285
8.1.3	Verwertungswege und Verwertungsquoten.....	288
8.1.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	290
8.1.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	292
8.1.5.1	Verwertungsmengen	292
8.1.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	293
8.2	Papier, Pappe, Kartonage (PPK).....	294
8.2.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	294
8.2.2	Stoffströme in Deutschland 2013	295
8.2.3	Verwertungswege und Verwertungsquoten.....	300
8.2.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	304
8.2.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	308
8.2.5.1	Verwertungsmengen	308
8.2.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	311
8.3	Lebensmittel- und Gartenabfälle.....	312
8.3.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	312
8.3.2	Stoffströme in Deutschland 2013	313
8.3.3	Verwertungswege und Verwertungsquoten.....	316
8.3.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	317
8.3.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	320
8.3.5.1	Verwertungsmengen	320
8.3.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	322
8.4	Altreifen	323
8.4.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	323
8.4.2	Stoffströme in Deutschland 2014	324
8.4.3	Verwertungswege	326
8.4.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	327
8.4.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	330
8.4.5.1	Verwertungsmengen	330
8.4.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	333

8.5	Alttextilien.....	334
8.5.1	Materialeinsatz in Deutschland.....	334
8.5.2	Stoffströme in Deutschland 2013	334
8.5.3	Verwertungswege	336
8.5.4	Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos.....	338
8.5.5	Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr.....	340
8.5.5.1	Verwertungsmengen	340
8.5.5.2	DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe	343
9	Wirtschaftliche Bedeutung des Recyclings.....	344
9.1	Stahl/Roheisen.....	344
9.2	Aluminium.....	346
9.3	Kupfer	347
9.4	Blei	349
9.5	Zink.....	351
9.6	Kunststoffe.....	353
10	Auswertung und Zusammenfassung	358
10.1	Sekundärproduktion aus in Deutschland verwerteten Abfällen und Nebenprodukten.....	358
10.2	Ermittlung der Indikatoren DIERec und DERec.....	364
10.3	Ermittlung der KEA-Salden.....	370
11	Quellenverzeichnis.....	373
11.1	Stoffunspezifische Quellen	373
11.2	Metalle	375
11.2.1	Eisen/Stahl.....	375
11.2.2	Edelstahl.....	375
11.2.3	Aluminium	376
11.2.4	Kupfer	377
11.2.5	Zink	378
11.2.6	Blei.....	379
11.2.7	Zinn.....	379
11.2.8	Silber.....	380
11.2.9	Gold	381
11.2.10	Platin und Palladium	382
11.3	Mineralische Rohstoffe.....	383

11.3.1	Recycling-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen	383
11.3.2	Asphaltgranulat	384
11.3.3	Schlacken und Hüttensand.....	384
11.3.4	Flugaschen und REA-Gips.....	385
11.3.5	Verpackungsglas.....	385
11.4	Kunststoffe.....	386
11.5	Organische Abfälle	387
11.5.1	Altholz	387
11.5.2	PPK.....	388
11.5.3	Lebensmittel und Gartenabfälle	388
11.5.4	Altreifen.....	389
11.5.5	Alttextilien.....	390

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Ergebnis für den Indikator DIERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %.....	40
Abbildung 1-2:	Ergebnis für den Indikator DERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %.....	41
Abbildung 1-3:	Rechnerische Erhöhung des RMI bzw. DMI ohne die Substitution von Primärmaterial durch die Verwertung der untersuchten Materialien und Nebenprodukte, in Mio. t.....	42
Abbildung 1-4:	Ergebnis für den Indikator KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorketten mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 3 %	43
Figure 1-1-5:	Result for the indicator DIERec showing all materials with shares of at least 2% in the overall result.....	50
Figure 1-1-6:	Result for the indicator DERec showing all materials with shares of at least 2% in the overall result.....	51
Figure 1-1-7:	Calculated increase of the RMI or DMI without substitution of primary material by using the analysed materials and by-products, in 1,000 t.....	52
Figure 1-1-8:	Result for the indicator KEA balance incl. foreign upstream chains with presentation of all materials with shares of at least 3 % in the overall result.	53
Abbildung 3-1:	Stoffströme der Materialkategorie Fe-Metalle im Jahr 2007 in Mio. t.....	64
Abbildung 3-2:	Stoffströme der Materialkategorie Fe-Metalle im Jahr 2013 in Mio. t.....	66
Abbildung 3-3:	Stoffströme der Materialkategorie NE-Metalle im Jahr 2007 in Mio. t.....	69
Abbildung 3-4:	Stoffströme der Materialkategorie NE-Metalle im Jahr 2013 in Mio. t.....	70
Abbildung 3-5:	Stoffströme der NE-Metalle Aluminium, Kupfer, Zink, Blei, Nickel im Jahr 2013 in Mio. t.....	72
Abbildung 3-6:	Stoffströme der Materialkategorie Biogene Abfälle im Jahr 2007 in Mio. t.....	74
Abbildung 3-7:	Stoffströme der Materialkategorie Biogene Abfälle im Jahr 2013 in Mio. t.....	75
Abbildung 3-8:	Stoffströme der Materialkategorie Kunststoffe im Jahr 2007 in Mio. t.....	79
Abbildung 3-9:	Stoffströme der Materialkategorie Kunststoffe im Jahr 2013 in Mio. t.....	80
Abbildung 3-10:	Bau- und Abbruchabfallaufkommen 2007 bis 2013.....	82
Abbildung 3-11:	Stoffströme der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle inkl. nichtmineralischer Baustellenabfälle im Jahr 2013 in Mio. t.....	84
Abbildung 3-12:	Stoffströme der Materialkategorie Nichtmetallische Mineralien im Jahr 2013 in Mio. t.....	86
Abbildung 3-13:	Stoffströme der Materialkategorie Nichtmetallische Mineralien im Jahr 2007 in Mio. t.....	87
Abbildung 3-14:	Entsorgungswege der Nichtmetallischen Mineralien 2007 bis 2013.....	88
Abbildung 5-1:	Stahlverbrauch nach Einsatzgebieten, 2015.....	92

Abbildung 5-2:	Verbleib der Legierungselemente bei der Schmelze von Stahlschrott.....	94
Abbildung 5-3:	Stoffströme Stahl und Fe-Guss in Deutschland 2013	95
Abbildung 5-4:	Schrotteinsatz in der Stahl und Gussproduktion 2007 - 2015.....	99
Abbildung 5-5:	Verwendung von rostfreiem Edelstahl nach Anwendung.....	101
Abbildung 5-6:	Produktion von rostfreiem Edelstahl in Deutschland.....	102
Abbildung 5-7:	Stoffströme bei der Herstellung von CrNi-Edelstahl in Deutschland, 2013	104
Abbildung 5-8:	Stoffströme bei der Herstellung von CrMn-Edelstahl in Deutschland, 2013	105
Abbildung 5-9:	Stoffströme bei der Herstellung von Cr-Edelstahl in Deutschland, 2013.....	106
Abbildung 5-10:	Schrotteinsatz bei der Herstellung rostfreier Edelstähle in Deutschland, 2007- 2015	110
Abbildung 5-11:	Verwendungsbereiche von Aluminium in Deutschland – 2013	112
Abbildung 5-12:	Stoffströme Aluminium in Deutschland 2013	114
Abbildung 5-13:	Zeitlicher Verlauf der Sekundäraluminiumproduktion in Deutschland von 2007- 2015, in kt.....	121
Abbildung 5-14:	Hauptverwendungsgebiete von Kupfer in Deutschland, 2013.....	124
Abbildung 5-15:	Stoffströme Kupfer in Deutschland 2013	125
Abbildung 5-16:	Verfahrensschema vom Kupfer-Recyclingmaterial zur Kathode.....	127
Abbildung 5-17:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärkupferproduktion inklusive Messing in Deutschland von 2007-2015, in kt.....	135
Abbildung 5-18:	Verwendungsgebiete von Zink in Deutschland – 2013	136
Abbildung 5-19:	Stoffströme Zink in Deutschland 2013	139
Abbildung 5-20:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärzinkproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt	149
Abbildung 5-21:	Deutscher Bleiverbrauch in in t, 2013	150
Abbildung 5-22:	Stoffstrom von Blei in Deutschland im Jahr 2013.....	152
Abbildung 5-23:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärbleiproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt	158
Abbildung 5-24:	Verwendungsgebiete von Zinn in Deutschland 2013	160
Abbildung 5-25:	Verwendung von Zinn im Jahr 2013 Deutschland und weltweit.....	160
Abbildung 5-26:	Stoffströme Zinn in Deutschland 2013	162
Abbildung 5-27:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärzinnproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt	167
Abbildung 5-28:	Internationaler Silberverbrauch in 2014	168
Abbildung 5-29:	Silberstoffströme in Deutschland 2013	169
Abbildung 5-30:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärsilberproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt	176
Abbildung 5-31:	Verarbeitete Goldmenge in Deutschland, 2013	177

Abbildung 5-32:	Stoffströme der Verwertung der in Deutschland angefallenen Goldabfälle, 2013.....	178
Abbildung 5-33:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärgoldproduktion in Deutschland von 2007-2015, in t.....	184
Abbildung 5-34:	Anwendungsgebiete von Platin (in % des Gesamtbedarfs) in Deutschland, 2013.....	187
Abbildung 5-35:	Anwendungsgebiete von Palladium (in % des Gesamtbedarfs) in Deutschland, 2013	188
Abbildung 5-36:	Platin-Stoffströme in der Verwertung in Deutschland im Jahr 2013	189
Abbildung 5-37:	Palladium-Stoffströme in der Verwertung in Deutschland im Jahr 2013.....	190
Abbildung 5-38:	Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge [Anzahl in Mio.], 2013	191
Abbildung 5-39:	Platin-Sekundärstoffströme bei Anfall und Verwertung von in Deutschland anfallenden Autokatalysatoren (Altfahrzeuge und Austausch-katalysatoren) im Jahr 2013.....	193
Abbildung 5-40:	Palladium-Sekundärstoffströme bei Anfall und Verwertung von in Deutschland anfallenden Autokatalysatoren (Altfahrzeuge und Austausch-katalysatoren) im Jahr 2013.....	194
Abbildung 5-41:	Platin-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenem Elektroschrott, 2013	198
Abbildung 5-42:	Palladium-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenem Elektroschrott, 2013	199
Abbildung 5-43:	Platin-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenen Abfällen im Schmuckbereich, 2013	200
Abbildung 5-44:	Palladium-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenen Abfällen im Schmuckbereich, 2013	201
Abbildung 5-45:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärplatinproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kg.....	205
Abbildung 5-46:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärpalladiumproduktion in Deutschland von 2007- 2015, in kg.....	206
Abbildung 6-1:	Übersicht über die relevantesten Abfallgruppen im Bau- und Straßenbau	208
Abbildung 6-2:	RC-Gesteinskörnungen-Stoffströme und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2013, in Mio. t.....	209
Abbildung 6-3:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärproduktion von RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen in Deutschland von 2007-2014, in Mio. t.....	212
Abbildung 6-4:	Asphaltgranulat-Stoffströme und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2013, in Mio. t.....	213
Abbildung 6-5:	Zeitlicher Verlauf der Verwertung von Asphaltgranulat in Deutschland von 2007-2015, in Mio. t	217
Abbildung 6-6:	Vereinfachte Darstellung der Schlackenströme aus der Eisen- und Stahlerzeugung (einschließlich Hüttensand) und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2013, in kt.....	222

Abbildung 6-7:	Zeitlicher Verlauf der Sekundärproduktion aus Hochofen- und Stahlwerksschlacken in Deutschland von 2007-2015, in kt.....	227
Abbildung 6-8:	Steinkohlekraftwerksnebenprodukte und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2011, in Mio. t.....	230
Abbildung 6-9:	Braunkohlekraftwerksnebenprodukte und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2011, in Mio. t.....	231
Abbildung 6-10:	Erzeugung von Steinkohleflugaschen und REA-Gips in Deutschland, 2007-2014.....	238
Abbildung 6-11:	Ströme von Verpackungsglas und Altglas in Deutschland im Jahr 2013, in Mio. t.....	242
Abbildung 6-12:	Stoffliche Verwertung von Verpackungsglas in Deutschland 2007 - 2014.....	245
Abbildung 7-1:	Stoffströme der Kunststoffherzeugung in Deutschland und Altkunststoffverwertung im In- und Ausland im Jahr 2013.....	247
Abbildung 7-2:	Stoffströme der Kunststoffsorte Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) in Deutschland im Jahr 2013.....	254
Abbildung 7-3:	Stoffströme der Kunststoffsorte Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) in Deutschland im Jahr 2013.....	255
Abbildung 7-4:	Stoffströme der Kunststoffsorte Polypropylen (PP) in Deutschland im Jahr 2013.....	257
Abbildung 7-5:	Stoffströme der Kunststoffsorte Polyethylenterephthalat (PET) in Deutschland im Jahr 2013.....	259
Abbildung 7-6:	Stoffströme der Kunststoffsorte Polystyrol (PS) in Deutschland im Jahr 2013.....	261
Abbildung 7-7:	Stoffströme der Kunststoffsorte Polyvinylchlorid (PVC) in Deutschland im Jahr 2013.....	263
Abbildung 7-8:	Stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen nach Kunststoffsorten 2007 - 2015.....	278
Abbildung 8-1:	Stoffströme der Altholzerfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2010.....	288
Abbildung 8-2:	Rohstoffeinsatz der Spanplattenindustrie im Jahr 2010.....	289
Abbildung 8-3:	Stoffströme der Altpapierfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2013.....	297
Abbildung 8-4:	Altpapiereinsatz in der Papierindustrie Deutschlands nach Altpapiersortenliste 2013.....	298
Abbildung 8-5:	Verwertungswege des in Deutschland erfassten Altpapiers 2013.....	303
Abbildung 8-6:	Stoffliche Verwertung von Altpapier und Aufbereitungsrückständen 2007 - 2015.....	310
Abbildung 8-7:	Stoffströme der Erfassung und Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen in Deutschland im Jahr 2013.....	315
Abbildung 8-8:	Stoffl. Verw. in Deutschland erfasster Lebensmittel- und Gartenabfälle 2007-2015.....	321
Abbildung 8-9:	Stoffströme der Altreifenfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2014.....	325
Abbildung 8-10:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2007 - 2015.....	332

Abbildung 8-11:	Verwertungswege von Alttextilien der Getrenntsammlung 2013	335
Abbildung 8-12:	Stoffströme der Alttextilerfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2013	336
Abbildung 8-13:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2007-2013	342
Abbildung 9-1:	Preisentwicklung von Stahlschrott und Roheisen (2007 – 2015)	345
Abbildung 9-2:	Preisentwicklung von Primäraluminium in Dollar/t	346
Abbildung 9-3:	Preisentwicklung von Aluminiumschrott und Primäraluminium in Euro/t	347
Abbildung 9-4:	Preisentwicklung von Primärkupfer in Dollar/t	348
Abbildung 9-5:	Preisentwicklung Kupferschrott und Primärkupfer in Euro/t.....	349
Abbildung 9-6:	Preisentwicklung von Primärblei in Dollar/t.....	350
Abbildung 9-7:	Preisentwicklung Bleischrott und Primärblei in Euro/t seit November 2011.....	351
Abbildung 9-8:	Preisentwicklung von Primärzink in Dollar/t	352
Abbildung 9-9:	Preisentwicklung Zinkschrott und Primärzink in Euro/t	353
Abbildung 9-10:	Preisentwicklung PE-Produktionsabfälle und LDPE-Primär in Folienqualität in Euro/t.....	354
Abbildung 9-11:	Preisentwicklung Post-Consumer PE-Folien in Euro/t.....	355
Abbildung 9-12:	Preisentwicklung PP-Produktionsabfälle und PP-Primär in Euro/t	356
Abbildung 9-13:	Preisentwicklung PVC-Produktionsabfälle und PVC-Primär in Folienqualität in Euro/t.....	356
Abbildung 9-14:	Preisentwicklung PS-Produktionsabfälle und PS-Primär in Euro/t.....	357
Abbildung 10-1:	Ergebnis für den Indikator DIERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %.....	365
Abbildung 10-2:	Ergebnis für den Indikator DERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %.....	366
Abbildung 10-3:	Rechnerische Erhöhung des RMI bzw. DMI ohne die Substitution von Primärmaterial durch die Verwertung der untersuchten Materialien und Nebenprodukte, in Mio. t	367
Abbildung 10-4:	Ergebnis für den Indikator KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorketten mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 3 %	370

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Ausgewählte Materialien zur vertieften Bearbeitung	37
Tabelle 1-2:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen metallischen Abfällen sowie Kunststoffen und Altreifen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat	38
Tabelle 1-3:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen mineralischen und organischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat	38
Tabelle 1-4:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen Nebenprodukten, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat	38
Tabelle 1-5:	Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärmetallen im Jahr 2013	44
Tabelle 1-6:	Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärkunststoffen im Jahr 2013	44
Table 7-2:	Secondary products produced in Germany from metallic waste generated as well as plastics and used tires, of which the recovery has partly or fully taken place in Germany in 2013	47
Tabelle 3-1:	Stahlschrottverwendung in Stahlwerken und Gießereien in Mio. t	65
Tabelle 3-2:	Verwendete Sekundärmetallmengen der NE-Metallerzeugung in Mio. t	68
Tabelle 3-3:	Zuordnung von Abfallarten nach AVV zu Abfallgruppen	81
Tabelle 3-4:	Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2012	85
Tabelle 4-1:	Ausgewählte Materialien zur vertieften Bearbeitung	89
Tabelle 5-1:	Stahl- und Eisenschrotteinsatz in der deutschen Stahl- und Gießereiindustrie und ihre Substitutionsäquivalente in Mio. t	96
Tabelle 5-2:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Eisen und Stahl 2013	97
Tabelle 5-3:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette Eisen und Stahl, 2013	98
Tabelle 5-4:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für Eisen und Stahl, 2013	98
Tabelle 5-5:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für Eisen und Stahl, 2013	98
Tabelle 5-6:	Abschätzung des Schrotteinsatzes in der Stahl- und Gussproduktion 2007 – 2015	99
Tabelle 5-7:	Indikatoren für Stahl/Guss für 2007 – 2015	100
Tabelle 5-8:	Edelstahlschrotte und Legierungselementfrachten, 2013	107
Tabelle 5-9:	Verluste bei der Herstellung des in Deutschland produzierten Edelstahl, 2013	107
Tabelle 5-10:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Edelstahl, 2013	108

Tabelle 5-11:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Edelstahl, 2013	108
Tabelle 5-12:	Eingesparter Energieaufwand inkl. der ausländischen Vorkette für Edelstahl, 2013	108
Tabelle 5-13:	Eingesparter Energieaufwand ohne ausländische Vorkette für Edelstahl, 2013	109
Tabelle 5-14:	Abschätzung des Schrotteinsatzes bei der Herstellung rostfreier Edeltähle 2007 – 2015	109
Tabelle 5-15:	Abschätzung der mit dem Schrotteinsatz verbundenen Materialfrachten bei der Herstellung rostfreier Edeltähle 2007 – 2013	110
Tabelle 5-16:	Indikatoren für rostfreien Edelstahl für 2007 – 2015	111
Tabelle 5-17:	Hüttenaluminiumquellen in Deutschland 2013	115
Tabelle 5-18:	Aluminiumschrotte und Aluminiumfrachten aus der Abfallbehandlung	116
Tabelle 5-19:	Stoffströme der Sekundäraluminiumherstellung 2013	117
Tabelle 5-20:	Bei der Bilanzierung berücksichtigte Aluminiumverluste.....	118
Tabelle 5-21:	Sekundäraluminiumerzeugnisse in Deutschland aus inländischen Aluminiumschrotten und Substitutionsäquivalente.....	119
Tabelle 5-22:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Aluminium, 2013	119
Tabelle 5-23:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Aluminium, 2013	119
Tabelle 5-24:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Aluminium, 2013.....	120
Tabelle 5-25:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Aluminium, 2013.....	120
Tabelle 5-26:	Abschätzung der Sekundäraluminiumproduktion 2007 – 2015, in kt.....	121
Tabelle 5-27:	Indikatoren für Aluminium für 2007 – 2015.....	122
Tabelle 5-28:	Typische Recyclingmaterialien und Aufbereitungsprodukte für Kupfer verändert	125
Tabelle 5-29:	Ermittlung von Inputströmen in der Kupferraffination (Verarbeitung von Low-Grade-Kupfer)	128
Tabelle 5-30:	Abschätzung der Kupferschrottströme	128
Tabelle 5-31:	Bilanzierung der Produktion von Cu-Halbzeugen auf High-Grade Inputströmen	129
Tabelle 5-32:	Als High-Grade-Kupfer recycelte Mengenströme	129
Tabelle 5-33:	Bei der Bilanzierung berücksichtigte Kupferverluste, 2013	131
Tabelle 5-34:	Sekundärkupferproduktion (inklusive Kupferanteil im Messing) in Deutschland aus inländischen Kupferschrotten und Substitutionsäquivalente.....	132
Tabelle 5-35:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Kupfer, 2013	132
Tabelle 5-36:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Kupfer, 2013	133
Tabelle 5-37:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Kupfer, 2013.....	133

Tabelle 5-38:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Kupfer, 2013	133
Tabelle 5-39:	Abschätzung der Sekundärkupferproduktion inklusive Messing 2007 – 2015, in kt	134
Tabelle 5-40:	Indikatoren für Kupfer inklusive Messing 2007 – 2015	135
Tabelle 5-41:	Deponierte Abfälle mit relevanten Zinkfrachten, 2013.....	140
Tabelle 5-42:	Produktion und Handelsbilanzen Primärzink in Deutschland 2013	141
Tabelle 5-43:	Abschätzung des Anfalls an Alt- und Neuschrotten aus Zink 2013	142
Tabelle 5-44:	Stoffströme der Herstellung von Bauteilen aus Zinkdruckguss.....	143
Tabelle 5-45:	Abschätzung der Stoffströme zur Herstellung von Zinkverbindungen und sonstigem Zink in Deutschland, 2013	144
Tabelle 5-46:	Verwendung von Feinzink in Deutschland 2013	144
Tabelle 5-47:	Abschätzungen der Stoffströme bei der Zink-Halbzeugverarbeitung in Deutschland 2013	145
Tabelle 5-48:	Sekundärzinkerzeugung (inklusive Zink im Messing) in Deutschland aus inländischen Zinkschrotten.....	146
Tabelle 5-49:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Zink, 2013	146
Tabelle 5-50:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Zink, 2013	147
Tabelle 5-51:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Zink, 2013.....	147
Tabelle 5-52:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Zink, 2013.....	148
Tabelle 5-53:	Abschätzung der Sekundärzinkproduktion 2007 – 2015	148
Tabelle 5-54:	Indikatoren für Zink inklusive Messing 2007 – 2015	149
Tabelle 5-55:	Die größten Bleihütten in Deutschland	154
Tabelle 5-56:	In Deutschland erzeugtes Sekundärblei aus inländischen Abfällen und Nettoimporten und angenommenes Substitutionsäquivalent, 2013	155
Tabelle 5-57:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Blei, 2013	155
Tabelle 5-58:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Blei, 2013	156
Tabelle 5-59:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Blei, 2013	156
Tabelle 5-60:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Blei, 2013	156
Tabelle 5-61:	Abschätzung der Sekundärbleiproduktion 2007 – 2015	157
Tabelle 5-62:	Indikatoren für Blei 2007 – 2015	158
Tabelle 5-63:	Deponierte Abfälle mit relevanten Zinnfrachten, 2013	163
Tabelle 5-64:	Verwendung von Primärzinn in Deutschland 2013	164
Tabelle 5-65:	Verarbeitung von Sekundärzinn in Deutschland 2013	164
Tabelle 5-66:	Sekundärzinnerzeugung in Deutschland aus inländischen Zinnschrotten, 2013	165

Tabelle 5-67:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Zinn, 2013	165
Tabelle 5-68:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Zinn, 2013	165
Tabelle 5-69:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Zinn, 2013	165
Tabelle 5-70:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Zinn, 2013	166
Tabelle 5-71:	Abschätzung der Sekundärzinnproduktion 2007 – 2015.....	166
Tabelle 5-72:	Indikatoren für Zinn 2007 – 2015	167
Tabelle 5-73:	Stoffströme und Berechnungsgrundlagen für das Sankeydiagramm zu Silber	170
Tabelle 5-74:	Berechnung der Silbermenge in Elektroschrott	172
Tabelle 5-75:	Deutsche Sekundärsilberproduktion aus inländischen Abfällen und Nettoabfallimporten und deren Substitutionsäquivalente (Abschätzung)	173
Tabelle 5-76:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Silber, 2013	174
Tabelle 5-77:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Silber, 2013	174
Tabelle 5-78:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Silber, 2013	174
Tabelle 5-79:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Silber, 2013	175
Tabelle 5-80:	Abschätzung der Sekundärsilberproduktion 2007 – 2015	175
Tabelle 5-81:	Indikatoren für Silber 2007 – 2015	176
Tabelle 5-82:	Abschätzung der Goldstoffströme in der deutschen Schmuckindustrie, 2013	179
Tabelle 5-83:	Abschätzung der Goldstoffströme im Elektronikschrottreycling in Deutschland, 2013	180
Tabelle 5-84:	Abschätzung der Goldstoffströme im Altfahrzeugrecycling in Deutschland, 2013.....	181
Tabelle 5-85:	Sekundärgold aus in Deutschland aus inländischen Abfällen, 2013	182
Tabelle 5-86:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Gold, 2013	182
Tabelle 5-87:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländischen Vorkette für Gold, 2013	182
Tabelle 5-88:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Gold, 2013	183
Tabelle 5-89:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Gold, 2013.....	183
Tabelle 5-90:	Abschätzung der Sekundärgoldproduktion 2007 – 2015	184
Tabelle 5-91:	Indikatoren für Gold 2007 – 2015	185
Tabelle 5-92:	Inländischer Bedarf von Platin und Palladium (Primär- und Sekundärmaterial) nach Verwendungsgebiet in Deutschland in kg, 2013.....	186
Tabelle 5-93:	Erzeugte Sekundärrohstoffe aus in Deutschland anfallenden Post-Consumer- und Produktionsabfällen, 2013	190
Tabelle 5-94:	Verwertungskette von Altautos.....	191

Tabelle 5-95:	Verluste entlang der Entsorgungskette von in Deutschland eingesetzten PGM-haltigen Industriekatalysatoren.....	196
Tabelle 5-96:	Sekundärplatin und -palladiumerzeugung aus inländischen Abfällen – Deutschland, 2013	201
Tabelle 5-97:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Platin, 2013	202
Tabelle 5-98:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Platin, 2013.....	202
Tabelle 5-99:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Platin, 2013	203
Tabelle 5-100:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Platin, 2013	203
Tabelle 5-101:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Palladium, 2013	203
Tabelle 5-102:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Palladium, 2013	204
Tabelle 5-103:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Palladium, 2013	204
Tabelle 5-104:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Palladium, 2013	204
Tabelle 5-105:	Abschätzung der Sekundärplatinproduktion 2007 – 2015	205
Tabelle 5-106:	Abschätzung der Sekundärpalladiumproduktion 2007 – 2015	206
Tabelle 5-107:	Indikatoren für Platin 2007 – 2015	207
Tabelle 5-108:	Indikatoren für Palladium 2007 – 2015	207
Tabelle 6-1:	Sekundäre Produkte aus der Verwertung von in Deutschland anfallenden RC-Gesteinskörnungen und deren Substitutionsäquivalente	210
Tabelle 6-2:	Ergebnisse für die Indikatoren DIERec (inkl. der ausländischen Vorkette) und DERec (ohne ausländische Vorkette) für RC-Gesteinskörnungen, 2013	211
Tabelle 6-3:	KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorkette für RC-Gesteinskörnungen, 2013	211
Tabelle 6-4:	Abschätzung der Produktion von RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen, ohne Straßenaufbruch, 2007 – 2014	211
Tabelle 6-5:	Indikatoren für RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen 2007 – 2015	212
Tabelle 6-6:	Sekundäre Produkte aus der Verwertung von in Deutschland anfallenden Asphaltgranulaten und deren Substitutionsäquivalente, 2013.....	214
Tabelle 6-7:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Asphaltgranulat, 2013	215
Tabelle 6-8:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Asphaltgranulat, 2013	215
Tabelle 6-9:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Asphaltgranulat, 2013.....	216
Tabelle 6-10:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Asphaltgranulat, 2013.....	216
Tabelle 6-11:	Abschätzung der Verwertungsmengen von Asphaltgranulat 2007 – 2015	217
Tabelle 6-12:	Indikatoren für Asphaltgranulat für 2007 – 2015	218

Tabelle 6-13:	Verwendung von Eisenhüttenschlacken in Deutschland in Mio. t, 2013	219
Tabelle 6-14:	Aufkommen und Verbleib von Eisenhüttenschlacken in Deutschland in Mio. t, 2013	221
Tabelle 6-15:	Verwertete Hochofen- und Stahlwerksschlacken und deren Substitutionsäquivalente in Deutschland, 2013	222
Tabelle 6-16:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger	223
Tabelle 6-17:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger, 2013	224
Tabelle 6-18:	KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger, 2013	224
Tabelle 6-19:	KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger, 2013	224
Tabelle 6-20:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013	225
Tabelle 6-21:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013	225
Tabelle 6-22:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013	225
Tabelle 6-23:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013	225
Tabelle 6-24:	Abschätzung der Verwertungsmengen von Hochofen- und Stahlwerksschlacken 2007 – 2015	226
Tabelle 6-25:	Indikatoren für Hochofen- und Stahlwerksschlacken für 2007 – 2015 in kt	228
Tabelle 6-26:	Aufkommen und Verwertung von Kraftwerksnebenprodukten in Deutschland in Mio. t, 2011	232
Tabelle 6-27:	Steinkohleflugaschen und deren Substitutionsäquivalente in Deutschland, 2013	233
Tabelle 6-28:	REA-Gips und dessen Substitutionsäquivalente in Deutschland 2013	234
Tabelle 6-29:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013	235
Tabelle 6-30:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013	235
Tabelle 6-31:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013	235
Tabelle 6-32:	Saldo KEA ohne die ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013	236
Tabelle 6-33:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013	236
Tabelle 6-34:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013	236

Tabelle 6-35:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013	237
Tabelle 6-36:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013	237
Tabelle 6-37:	Abschätzung der Verwertungsmengen von Steinkohleflugaschen 2007 – 2014	238
Tabelle 6-38:	Abschätzung der Verwertungsmengen von REA-Gips 2007 – 2014	239
Tabelle 6-39:	Indikatoren für Steinkohleflugaschen für 2007 – 2014	240
Tabelle 6-40:	Indikatoren für REA-Gips für 2007 – 2014	240
Tabelle 6-41:	Verwendung von Altglas in Deutschland in Mio. t, 2013	243
Tabelle 6-42:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Altglas, 2013	243
Tabelle 6-43:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Altglas, 2013	243
Tabelle 6-44:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Altglas, 2013	244
Tabelle 6-45:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die substituierten Materialien durch Altglas, 2013	244
Tabelle 6-46:	Abschätzung der Verwertungsmengen von Verpackungsglas 2007 – 2014	244
Tabelle 6-47:	Indikatoren für Verpackungsglas für 2007 – 2014	245
Tabelle 7-1:	Erfassungsmengen Kunststoffabfälle zur stofflichen Verwertung im Jahr 2013	248
Tabelle 7-2:	Anwendung und Materialeinsatz von PE in Deutschland 2013	250
Tabelle 7-3:	Anwendung und Materialeinsatz von PP in Deutschland 2013	251
Tabelle 7-4:	Anwendung und Materialeinsatz von PET in Deutschland 2013	251
Tabelle 7-5:	Anwendung und Materialeinsatz von PS in Deutschland 2013	252
Tabelle 7-6:	Anwendung und Materialeinsatz von PVC in Deutschland 2013	252
Tabelle 7-7:	Stoffliche Verwertungsverfahren von Sekundärkunststoffen und deren Substitute	264
Tabelle 7-8:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC 2013	265
Tabelle 7-9:	Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC 2013	266
Tabelle 7-10:	Verwertungsquoten der betrachteten Kunststoffsorten: PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC im Jahr 2013	267
Tabelle 7-11:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013	268
Tabelle 7-12:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013	268

Tabelle 7-13:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013	269
Tabelle 7-14:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013	269
Tabelle 7-15:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013.....	269
Tabelle 7-16:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013.....	269
Tabelle 7-17:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013	270
Tabelle 7-18:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013.....	270
Tabelle 7-19:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013	270
Tabelle 7-20:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013	270
Tabelle 7-21:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013	271
Tabelle 7-22:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013	271
Tabelle 7-23:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013	271
Tabelle 7-24:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013	271
Tabelle 7-25:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013	272
Tabelle 7-26:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013	272
Tabelle 7-27:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013	272
Tabelle 7-28:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013	272
Tabelle 7-29:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013	273
Tabelle 7-30:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013	273
Tabelle 7-31:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013.....	273
Tabelle 7-32:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013.....	273

Tabelle 7-33:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013.....	274
Tabelle 7-34:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013.....	274
Tabelle 7-35:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013	274
Tabelle 7-36:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013	275
Tabelle 7-37:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013	275
Tabelle 7-38:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013	275
Tabelle 7-39:	Ergebnisse für den Indikator DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Kunststoffen, 2013	276
Tabelle 7-40:	Saldo KEA insgesamt für die energetische Verwertung von Kunststoffen, 2013.....	276
Tabelle 7-41:	Saldo KEA (nicht-erneuerbar für die energetische Verwertung von Kunststoffen, 2013	276
Tabelle 7-42:	Hochwertige werkstoffliche und rohstoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe im In- und Ausland, PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC in kt TM.....	277
Tabelle 7-43:	Werkstoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe im In- und Ausland, PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC in kt TM.....	277
Tabelle 7-44:	Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe in Deutschland PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC	279
Tabelle 7-45:	DIERec für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen in kt 2007 – 2015	280
Tabelle 7-46:	DERec für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen in kt 2007 – 2015	280
Tabelle 7-47:	KEA-Saldo mit Vorkette für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015	280
Tabelle 7-48:	KEA-Saldo ohne Vorkette für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015	280
Tabelle 7-49:	DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015	281
Tabelle 7-50:	KEA insgesamt für die energetische Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015.....	281
Tabelle 7-51:	KEA nicht erneuerbar für die energetische Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015	282
Tabelle 8-1:	Einteilung in Altholzkategorien gemäß AltholzV	284
Tabelle 8-2:	Abschätzung der Altholzkategorieanteile an separat erfassten Althölzern im Jahr 2003 (UBA 2006)	284

Tabelle 8-3:	Stoffliche Verwertung des in Deutschland erfassten Altholzes 2010.....	289
Tabelle 8-4:	Energetische Verwertung des in Deutschland erfassten Altholzes 2010	289
Tabelle 8-5:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010.....	290
Tabelle 8-6:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010.....	291
Tabelle 8-7:	Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010	291
Tabelle 8-8:	Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010.....	291
Tabelle 8-9:	Ergebnisse für DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Altholz, 2010	292
Tabelle 8-10:	Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altholz, 2010.....	292
Tabelle 8-11:	Stoffliche Verwertung von Altholz in Deutschland 2007 - 2015.....	292
Tabelle 8-12:	Energetische Verwertung von Altholz in Deutschland 2007 - 2015	293
Tabelle 8-13:	Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Altholz 2007 – 2015	293
Tabelle 8-14:	Indikatoren für die energetische Verwertung von Altholz 2007 – 2015	293
Tabelle 8-15:	Anwendung und Materialeinsatz von PPK in Deutschland 2013 (VDP 2015)	294
Tabelle 8-16:	Stoffliche Verwertung von Altpapier in der Papierindustrie 2013	299
Tabelle 8-17:	Stoffliche Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)	301
Tabelle 8-18:	Energetische Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)	302
Tabelle 8-19:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorketten für die verschiedenen Substitutionspfade bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013	304
Tabelle 8-20:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne die ausländischen Vorketten für EPS in den verschiedenen Substitutionspfaden bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013	304
Tabelle 8-21:	Saldo KEA inkl. ausländische Vorkette in den verschiedenen Substitutionspfaden bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013	305
Tabelle 8-22:	Saldo KEA ohne die ausländische Vorkette in den verschiedenen Substitutionspfaden bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013	305
Tabelle 8-23:	Ergebnisse für den Indikator DIERec für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier, 2013	306
Tabelle 8-24:	Ergebnisse für den Indikator DERec für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier, 2013	307
Tabelle 8-25:	Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier inklusive der ausländischen Vorketten, 2013.....	307

Tabelle 8-26:	Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier ohne ausländische Vorketten, 2013	308
Tabelle 8-27:	Stoffliche Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2007 - 2015	309
Tabelle 8-28:	Energetische Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2007 - 2015	310
Tabelle 8-29:	Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Altpapier 2007 – 2015	311
Tabelle 8-30:	Indikatoren für die energetische Verwertung von Altpapier 2007 – 2015	311
Tabelle 8-31:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2013	316
Tabelle 8-32:	Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2013	317
Tabelle 8-33:	Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. ausländischer Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013.....	318
Tabelle 8-34:	Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013.....	318
Tabelle 8-35:	Saldo KEA inkl. ausländische Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013	318
Tabelle 8-36:	Saldo KEA ohne die ausländische Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013	319
Tabelle 8-37:	Ergebnisse für die Indikatoren DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013.....	319
Tabelle 8-38:	Saldo KEA für die energetische Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013	320
Tabelle 8-39:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2007-2015.....	320
Tabelle 8-40:	Substitutionsäquivalente der stofflichen Verwertung von in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfällen 2007-2015	321
Tabelle 8-41:	Energ. Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2007-2015.....	322
Tabelle 8-42:	Indikatoren für die stoffliche Verwertung von in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfällen 2007 – 2015.....	322
Tabelle 8-43:	Indikatoren für die energetische Verwertung von in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfällen 2007 – 2015.....	322
Tabelle 8-44:	Stoffliche Zusammensetzung und Aufbau von Reifen (UBA 1999)	323
Tabelle 8-45:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2013	326
Tabelle 8-46:	Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2013.....	327

Tabelle 8-47:	Ergebnisse für den Indikator DIERec für die stoffliche Verwertung von Altreifen, 2013	328
Tabelle 8-48:	Ergebnisse für den Indikator DERec für die stoffliche Verwertung von Altreifen, 2013	328
Tabelle 8-49:	Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Altreifen, 2013.....	328
Tabelle 8-50:	Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Altreifen ohne ausländische Vorkette, 2013	329
Tabelle 8-51:	Ergebnisse für den Indikator DIERec für die energetische Verwertung von Altreifen, 2013	329
Tabelle 8-52:	Ergebnisse für den Indikator DERec für die energetische Verwertung von Altreifen, 2013	329
Tabelle 8-53:	Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altreifen inkl. ausländische Vorkette, 2013	330
Tabelle 8-54:	Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altreifen ohne ausländische Vorkette, 2013	330
Tabelle 8-55:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2007 - 2015	331
Tabelle 8-56:	Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2007 - 2015.....	332
Tabelle 8-57:	Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Altreifen 2007 – 2015	333
Tabelle 8-58:	Indikatoren für die energetische Verwertung von Altreifen 2007 – 2015	333
Tabelle 8-59:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)	337
Tabelle 8-60:	Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)	338
Tabelle 8-61:	Ergebnisse für den Indikator DIERec für die stoffliche Verwertung von Alttextilien, 2013	338
Tabelle 8-62:	Ergebnisse für den Indikator DERec für die stoffliche Verwertung von Alttextilien, 2013	339
Tabelle 8-63:	Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Alttextilien inkl. der ausländischen Vorketten, 2013	339
Tabelle 8-64:	Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Alttextilien ohne ausländische Vorkette, 2013	339
Tabelle 8-65:	Ergebnisse für die Indikatoren DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Alttextilien, 2013	340
Tabelle 8-66:	Saldo KEA für die energetische Verwertung von Alttextilien, 2013	340
Tabelle 8-67:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2007-2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)	341
Tabelle 8-68:	Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2007-2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)	342
Tabelle 8-69:	Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Alttextilien 2007 – 2013	343

Tabelle 8-70:	Indikatoren für die energetische Verwertung von Alttextilien 2007 – 2013.....	343
Tabelle 9-1:	Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärkunststoffen 2013.....	355
Tabelle 9-2:	Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärmetallen 2013.....	357
Tabelle 9-3:	Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärkunststoffen 2013.....	357
Tabelle 10-1:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen metallischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat	358
Tabelle 10-2:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen mineralischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat	360
Tabelle 10-3:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland 2013 angefallenen Kunststoffabfällen und Altreifen im Jahr 2014, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland stattgefunden hat.....	361
Tabelle 10-4:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen organischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat	362
Tabelle 10-5:	Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen Nebenprodukten, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat	363
Tabelle 10-6:	Zusammenfassung der Indikatoren DIERec und DERec für die stoffliche Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013.....	368
Tabelle 10-7:	Zusammenfassung der Indikatoren DIERec und DERec für die stoffliche Verwertung der untersuchten Nebenprodukte, 2013	369
Tabelle 10-8:	Zusammenfassung der Indikatoren DIERec und DERec für die energetische Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013.....	369
Tabelle 10-9:	Zusammenfassung des KEA-Saldos für die stoffliche Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013	371
Tabelle 10-10:	Zusammenfassung des KEA-Saldos für die stoffliche Verwertung der untersuchten Nebenprodukte, 2013	372
Tabelle 10-11:	Zusammenfassung des KEA-Saldos für die energetische Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013	372

Abkürzungsverzeichnis

ABANDA	Abfallanalysendatenbank
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
AP	Arbeitspaket
ASN	Abfallschlüsselnummer gemäß Abfallverzeichnis-Verordnung
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BBH	Berzelius Bleihütte
BDSV	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BHKW	Blockheizkraftwerk
Biogut	Mittels Biotonne und/oder Biosack getrennt erfasste Nahrungs- und Küchenabfälle sowie Gartenabfälle aus Privathaushalten
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Bvse	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung
CRT-Glas	Kathodenstrahlröhre (engl. cathode ray tube)
DAV	Deutscher Asphaltverband
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DERec	Direct Effects of Recovery
DIERec	Direct and Indirect Effects of Recovery
DMI	Direct Material Input
EAF	Elektrolichtbogenverfahren (engl. Electric Arc Furnace)
EAV	Europäisches Abfallverzeichnis
EBS-KW	Ersatzbrennstoff-Kraftwerk
EPS	Expandiertes Polystyrol
EU	Europäische Union
Fe-Metalle	Eisenhaltige Metalle
FKZ	Forschungskennzeichen
FM	Frischmasse
FTR	Fachverband Textilrecycling
GAVS	Gesellschaft für Altgummi-Verwertungsprozesse
GDA	Gesamtverband der Aluminiumindustrie
GFMS	Gold Fields Mineral Services

Grüngut	Getrennt erfasste Gartenabfälle aus Privathaushalten sowie bei der kommunalen Pflege erzeugte Park- und Landschaftspflegeabfälle.
HKW	Heizkraftwerk
IAI	International Aluminium Institute
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KRS	Kayser Recycling System
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KWB	Initiative Kreislaufwirtschaft Bau
kWh	Kilowattstunden
LCA	Life Cycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LME	Londoner Metal Exchange
LVP	Leichtverpackung
Ma.-%	Masse-/Gewichtsprozent
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
MDF	Mitteldichte Fasern
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	Megawatt
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PE-HD	Polyethylen-high density
PE-LD	Polyethylen-low density
PET	Polyethylenterephthalat
PGM	Platin Group Metals
PP	Polypropylen
PPK	Papier-Pappe-Kartonagen
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
RAL-Gütesicherung	Abkürzung für „Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen“
RC-Gesteinskörnung	Recycling-Gesteinskörnung
REA-Gips	Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen

RER	Länderkennzeichnung in ecoinvent für Europa
RME	Rohstoffäquivalente (engl. raw material equivalents)
RMI	Primärrohstoffeinsatz (engl. raw material input)
RoHS	Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
SAV	Sprüh-Absorptions-Verfahren
SK	Steinkohle
StNVP	Stoffgleiche Nichtverpackungen
TM	Trockenmasse
UF-Harze	Harnstoff-Formaldehyd-Harze
UStatG	Umweltstatistikgesetz
VDP	Verband Deutscher Papierfabriken
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WVM	Wirtschaftsvereinigung Metalle

Zusammenfassung

Die Sekundärrohstoffwirtschaft ist ein wichtiger Baustein zur Reduzierung des Primärmaterialeinsatzes in Deutschland. Die werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung von Abfällen ermöglicht eine Substitution entsprechender Primärmaterialien und reduziert damit die Materialaufwendungen Deutschlands. Das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) greift mit der Leitidee 3 diesen Gedanken auf und möchte die Kreislaufwirtschaft stärken und ausbauen (BMU 2012). Im Fortschrittsbericht des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes II) wird der Ausbau einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft als eines der Handlungsfelder beschrieben und im Kapitel 6 „Indikatoren und Ziele“ die Weiterentwicklung von Indikatoren zur Messung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Reduzierung des Primärmaterialeinsatzes angekündigt (BMUB 2016). Auf EU-Ebene ist der Bereich Abfallvermeidung und Abfallverwertung stark in den politischen Vordergrund gerückt. Unter den Schlagworten „Closing the loop“ hat die Europäische Kommission (European Commission 2015) einen Aktionsplan entwickelt und beschlossen, mit dem sichergestellt werden soll, dass die Europa 2020-Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 20% gegenüber 1990 und der Erhöhung der Energieeffizienz um 20% erreicht werden können. Der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft bezieht sich dabei auch auf schon bestehende Strategien wie der Leitinitiative Ressourcenschonendes Europa, mit der die Europa 2020-Strategie umgesetzt werden soll (Europäische Kommission 2011). Dabei spielt die Sekundärrohstoffwirtschaft eine entscheidende Rolle beim Übergang von einer „linear economy“ zu einer „circular economy“. Eine Quantifizierung des Beitrages der Sekundärrohstoffwirtschaft zum Ressourcenschutz gestaltet sich allerdings schwierig. Zum einen ist die Datenlage lückenhaft und zum anderen können aus der Systematik der Abfallstatistik nicht unmittelbar entsprechende Schonungseffekte abgeleitet werden, da zwar das Abfallaufkommen, nicht aber die Art und Qualität der Verwertung in der Abfallstatistik erfasst werden.

Das Projekt „Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität“ hatte zum Ziel, diese Datenlücke zu verringern und damit den Beitrag der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Ressourcenschonung besser und möglichst umfassend zu quantifizieren. Dieses Projekt schließt dabei an das UFOPLAN-Projekt „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“ (FKZ 3709 33 316) an, in dem erste methodische Ansätze und Indikatoren, namentlich DIERec und DERec, erarbeitet wurden, um die rohstoffwirtschaftlichen Effekte der Verwertung von Sekundärrohstoffen zu operationalisieren und ihren Beitrag zur Steigerung der Rohstoffproduktivität zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurden in diesem Projekt zunächst die Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit über die Substitutionswirkung und -potentiale der Sekundärrohstoffwirtschaft analysiert und anschließend detaillierte Untersuchungen für 30 Materialien durchgeführt. Hierbei wurden Verwertungswege dieser Sekundärrohstoffmengen bestimmt und daraus Substitutionseffekte abgeleitet.

Aggregierte Stoffstrombilanzierung der Abfallwirtschaft

Bei der Auswertung der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes wurden Stoffstrombilanzierungen für fünf Materialkategorien für die Jahre 2007 bis 2013 erstellt und dokumentiert. Dazu wurde im Wesentlichen auf die Methodik des Vorgängerprojektes (Wagner et al. 2012) zurückgegriffen, die auf einer Auswertung der Daten der Abfallstatistik beruht. Konkret wurden mit einer umfassenden Stoffstrombilanzierung die Massenströme der hochaggregierten Materialkategorien

- ▶ Fe- und NE-Metalle,
- ▶ Biogene Abfälle,
- ▶ Kunststoffe und

► Nichtmetallische Mineralien

von der Abfallerzeugung, über die Behandlung in Aufbereitungsanlagen bis hin zur Verwertung bzw. Beseitigung ermittelt. Durch die Wahl des Betrachtungszeitraums von 2007 bis 2013 können neben einer aktuellen Beschreibung der Materialströme in Deutschland zugleich Entwicklungen in einer Zeitreihe aufgezeigt werden. Die grundsätzliche Methodik zur Modellierung der Stoffströme für alle betrachteten Materialkategorien folgt einem 4-Stufen Modell.

1. Aufstellung der Abfalldatenbank für die Jahre 2007 bis 2013

Basis der Stoffstrommodellierung sind die an Abfallbehandlungsanlagen erfassten und unter dem Titel „Abfallentsorgung – Fachserie 19 Reihe 1“ vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Abfallmengen für die Jahre 2007 bis 2013 (Statistisches Bundesamt 2009-2015).

2. Modellierung der Abfallstoffströme

Aufbauend auf der Systematik der Abfallschlüsselnummern erfolgt eine herkunftsbezogene Zuordnung der Abfallmengen zu den jeweiligen Behandlungsanlagen.

3. Ermittlung der Materialanteile an den Abfallströmen

Die Bestimmung der Materialanteile der betrachteten Materialkategorien an den modellierten Abfallströmen erfolgt zu großen Teilen unter Rückgriff auf aktualisierte Werte der Abfallanalysendatenbank ABANDA des Landes Nordrhein-Westfalen (ABANDA 2015) sowie eigener Expertise.

4. Erweiterung um externe Materialströme und Plausibilitätsprüfung

Zusätzlich zu den in der Fachserie 19 Reihe 1 erfassten Abfällen bestehen weitere Material- und Warenflüsse, die aufgrund ihrer Eigenschaften bereits als Sekundärrohstoffe bzw. Produkte gelten und daher nicht als Abfälle registriert werden. Sofern möglich, erfolgt eine Erweiterung der materialspezifischen Stoffstrommodelle um diese Materialströme, welche keiner abfallrechtlichen Informations- oder Notifizierungspflicht unterliegen. Des Weiteren werden zusätzlich zu den in der Fachserie 19 Reihe gelisteten Abfallimporten auch die jeweiligen Materialimporte und -exporte gemäß Warenverzeichnis der Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes ausgewiesen.

Im Ergebnis wurde für jede Materialkategorie und für jedes untersuchte Jahr ein Sankey-Diagramm erstellt, das die Stoffflüsse von der Abfallentstehung, über die Behandlung bis zur Verwertung darstellt.

Allerdings bilden die Daten überwiegend nur die Menge an Sekundärmaterialien ab, die Teil der Abfallstatistik sind und lassen eine materialgenaue Differenzierung aus methodischen Gründen nicht zu. Daher wurde im weiteren Projektverlauf die Analyse weiter differenziert. Anhand der Erfassung der Sekundärmaterialströme jenseits der Abfallstatistik von insgesamt 30 Materialien und Nebenprodukten wurden Daten in einer höheren Detailtiefe ermittelt.

Auswahl und Untersuchung von 30 Materialien und Nebenprodukten

Die Auswahl der zu betrachtenden Materialien erfolgte in Abstimmung mit dem Auftraggeber. Wichtige Auswahlkriterien waren hierbei:

- Es sollen Materialien aus den vier Materialgruppen Metalle, Kunststoffe, organische Abfälle und mineralische Abfälle einbezogen werden, die bei der Auswertung der Abfallstatistik abgebildet wurden.
- Aus allen vier Materialgruppen sollen mengen- und ressourcenrelevante Materialien ausgewählt werden, davon mindestens 10 Metalle.
- Die mit den Materialien verbundenen Sekundärrohstoffströme sollen einen relevanten Beitrag zur Reduktion des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA) bzw. des kumulierten Energiebedarfs (KEA) liefern.

- ▶ Die Bearbeitung muss realistisch sein, insbesondere müssen Daten voraussichtlich verfügbar sein.

Aus diesen Kriterien heraus wurden folgende Materialien ausgewählt. Aufgrund ihrer Mengenrelevanz wurden wichtige industrielle Nebenprodukte der Stahlindustrie und Energieversorgung mit in die Auswahl integriert.

Tabelle 1-1: Ausgewählte Materialien zur vertieften Bearbeitung

Metalle	Mineralik	Kunststoffe	Biomasse
Edelstahl	Recycling-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen	PE-LD	Altholz
Stahl und Gusseisen	Asphaltgranulat	PE-HD	Papier Pappe Karton
Aluminium	Flugaschen aus der Steinkohlefeuerung	PP	Küchen-, Garten und Speiseabfälle
Kupfer	Behälterglas	PVC	Alttextilien
Zink	Hüttensand	PET	
Blei	REA-Gips	PS	
Zinn		Altreifen	
Silber			
Gold			
Platin			
Palladium			

Ziel der Analyse war es, für diese 30 Materialien und Nebenprodukte

- ▶ die Stoffflüsse für Deutschland abzuschätzen und grafisch mittels Sankey-Diagrammen aufzubereiten,
- ▶ über diese Analysen die damit verbundenen Verwertungswege und –mengen abzuschätzen und
- ▶ auf Grundlage dieser Daten die Größenordnung zu bestimmen, wie viele Primärrohstoffe durch die Verwertung dieser 30 Sekundärrohstoffe und Nebenprodukte substituiert werden können.

Dafür wurden zunächst für alle untersuchten Materialien und Nebenprodukte Stoffflussbilanzen für Deutschland erstellt. Das Basisjahr für die detaillierten Analysen war 2013. Etliche Informationslücken konnten jedoch nur mit Quellen geschlossen werden, die sich nicht auf das Jahr 2013 beziehen, weil z.B. die Studien schon vor 2013 veröffentlicht wurden (vor allem zu Angaben über Verwertungsmengen, die nicht im Abfallregime anfallen oder über dissipative Verluste im Rahmen der Verwertung). Die Im- und Exporte von Sekundärmaterialien und Nebenprodukten wurden – soweit Daten vorhanden waren – entsprechend in die Stoffflussbilanz integriert.

Neben der stofflichen Verwertung werden einige der untersuchten Materialien wie Kunststoffe oder PPK auch energetisch verwertet und substituieren dadurch fossile Energieträger. Die energetische Verwertung dieser Fraktionen in MVA, EBS und in anderen Feuerungsanlagen wurde ebenfalls erfasst.

Für die untersuchten 30 Materialien summieren sich die verwerteten Abfälle auf rund 119 Mio. t zuzüglich rund 20 Mio. t Nebenprodukte aus der Stahl- und Energieerzeugung (siehe nachfolgende drei Tabellen). Nahezu die Hälfte der verwerteten Abfallmengen sind auf die beiden mineralischen Abfallkategorien Bau- und Abbruchabfälle und Ausbausphal zurückzuführen. Jeweils ein weiteres Fünftel der Sekundärprodukte

aus der Abfallverwertung stammt aus der Eisen- und Stahlschrottverwertung bzw. der Verwertung von organischen Abfällen.

Tabelle 1-2: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen metallischen Abfällen sowie Kunststoffen und Altreifen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Menge [t]	Sekundärprodukt	Menge [t]
Stahl und Gusseisen	23.100.000	Polyethylen hoher Dichte(PE-HD)	304.000
Edelstahl	533.600	Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)	359.000
Aluminium	859.000	Polypropylen (PP)	276.000
Kupfer	726.000	Polyethylenterephthalat (PET)	463.000
Zink	317.000	Polystyrol (PS)	82.000
Blei	263.000	Polyvinylchlorid (PVC)	196.000
Zinn	5.100	Altreifen	325.000
Silber	538	Summe Sekundärprodukte aus Kunststoffen und Altreifen	2.005.000
Gold	7,6		
Platin	7,5		
Palladium	7,5		
Summe metallische Sekundärprodukte	25.804.261		

Tabelle 1-3: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen mineralischen und organischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Menge [t]	Sekundärprodukt	Menge [t]
RC Gesteinskörnung	52.700.000	Altholz	1.134.000
Asphaltgranulat	11.500.000	Altpapier	13.760.000
Verpackungsglas	2.446.000	Alttextilien	338.000
Summe mineralische Sekundärprodukte aus der Abfallverwertung	66.646.000	Lebensmittel- und Gartenabfälle	8.989.000
		Summe organische Sekundärprodukte	24.221.000

Tabelle 1-4: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen Nebenprodukten, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Menge [t]
Hochofen- und Stahlwerksschlacken	10.510.000
Kraftwerksnebenprodukte	9.293.000

Sekundärprodukt	Menge [t]
Summe verwertete Nebenprodukte	19.803.000

Ermittlung der Indikatoren DIERec und DERec

Aus der stofflichen sowie energetischen Verwertung der ermittelten Sekundärrohstoffmengen ergeben sich Einsparpotentiale für Primärmaterialien und Energierohstoffe. Diese wurden für jede Materialkategorie mittels der Indikatoren DIERec und DERec abgeschätzt.

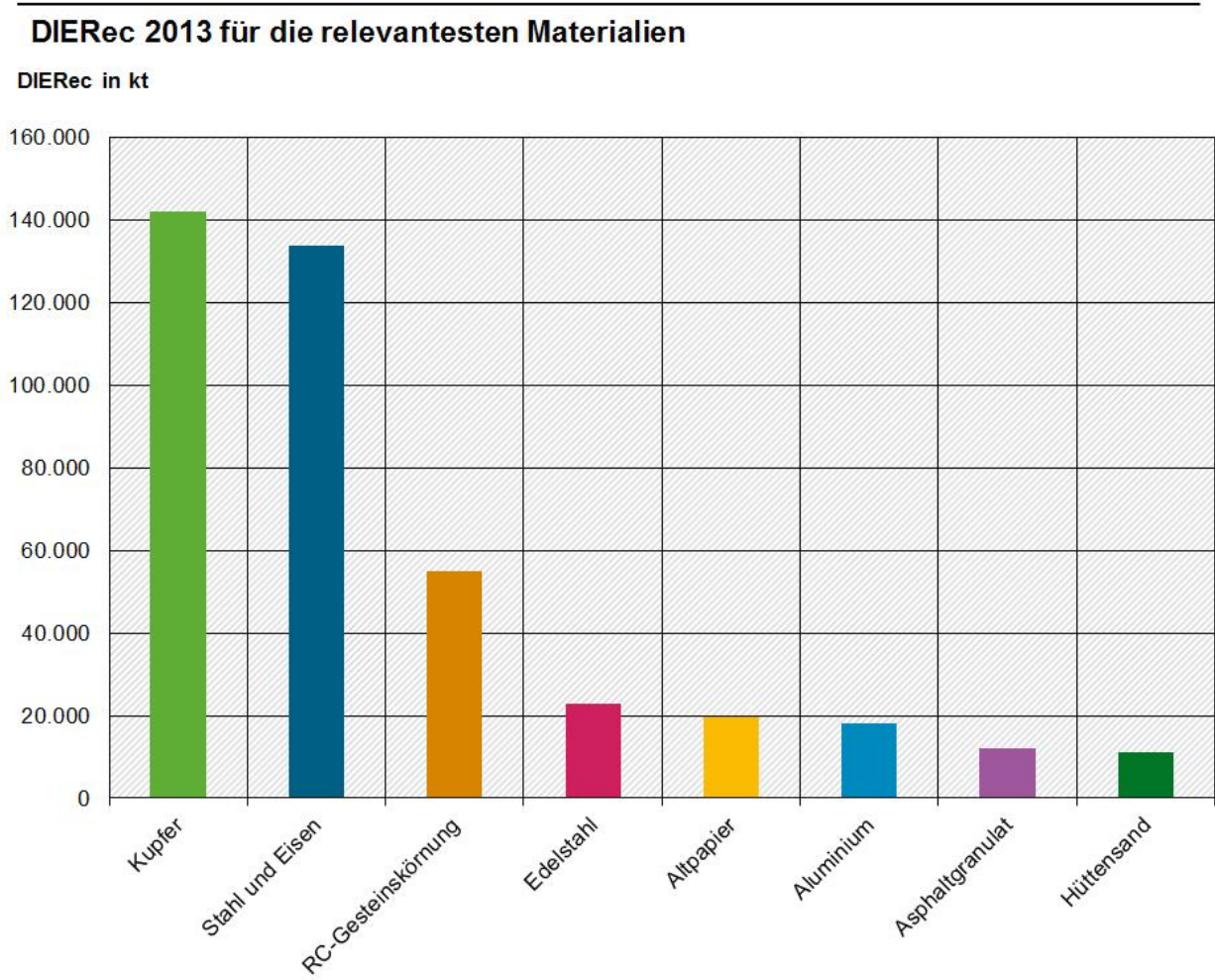
Mit Hilfe der beiden Indikatoren DIERec und DERec ist es möglich, die rohstofflichen und energetischen Effekte der Verwertungsprozesse der Sekundärmaterialien den jeweils entsprechenden Prozessen der substituierten Primärmaterialien gegenüberzustellen und so für jedes Material die tatsächlichen materiellen Beiträge der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Ressourcenschonung abzubilden. Die Methodik der Indikatoren DIERec und DERec ist somit anschlussfähig an die etablierten Inputindikatoren DMI (im Fall des DERec) und RMI (im Fall des DIERec) der gesamtwirtschaftlichen Materialflussrechnung. Der DIERec trägt somit den virtuellen primärrohstoffwirtschaftlichen Vorleistungen im Ausland Rechnung, der DERec hingegen den tatsächlichen im Inland verarbeiteten Materialmengen. Die Indikatoren zeigen an, um welchen Beitrag sich die Indikatoren DMI bzw. RMI erhöhen würden, wenn es keine werkstoffliche, rohstoffliche oder energetische Verwertung von Abfallstoffen und die Nutzung von Nebenprodukten gäbe.

Für die Erstellung der Indikatoren DIERec und DERec wurden die ermittelten Verwertungsmengen an Sekundärmaterialien sowie deren substituierten Primärmaterialien mit KRA-Koeffizienten bzw. KEA-Koeffizienten verknüpft. Dazu wurden für jedes Sekundärmaterial bzw. Nebenprodukt und den verschiedenen durch sie substituierten Primärmaterialien entsprechende Prozesse in ecoinvent 3.2 identifiziert. Wo diese nicht vorhanden waren, z.B. für eine Reihe von rezyklierten Metallen, wurden diese Prozesse auf Basis von vorhandenen ecoinvent-Daten der Primärprozesse modelliert.

Die Werte für den DIERec und DERec summieren sich für die untersuchten Substitutionsprozesse auf 493 Mio. t (DIERec) bzw. 222 Mio. t (DERec) für die stoffliche und energetische Verwertung. Folgende Aussagen können hierbei getroffen werden:

- ▶ Für die Indikatoren DIERec und DERec ist vor allem die stoffliche Verwertung verantwortlich: 469 Mio. t des DIERec (95 %) bzw. 198 Mio. t (89 %) des DERec fallen durch die (werk)-stoffliche Verwertung an.
- ▶ Die Abfallverwertung liefert für DIERec und DERec die größten Anteile: 94 % des DIERec bzw. 87 % des DERec werden durch die Abfallverwertung beigetragen (DIERec = 443 Mio. t; DERec = 172 Mio. t). Nebenprodukte spielen eine deutlich geringere Rolle (DIERec = 26 Mio. t; DERec = 26 Mio. t).
- ▶ Die Höhe des DIERec hängt maßgeblich von den Materialien Kupfer (29 %), Stahl und Gusseisen (27 %) und Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen (11 %) ab. Weitere Materialien haben Anteile zwischen 2 und 5 % (Edelstahl, Altpapier, Aluminium, Asphaltgranulat, Hüttensand). Die übrigen untersuchten Materialien haben Anteile von einem Prozent oder weniger. Die relevantesten Materialien mit Anteilen ≥ 2 % am Gesamtergebnis sind in der nachfolgenden Grafik abgebildet.

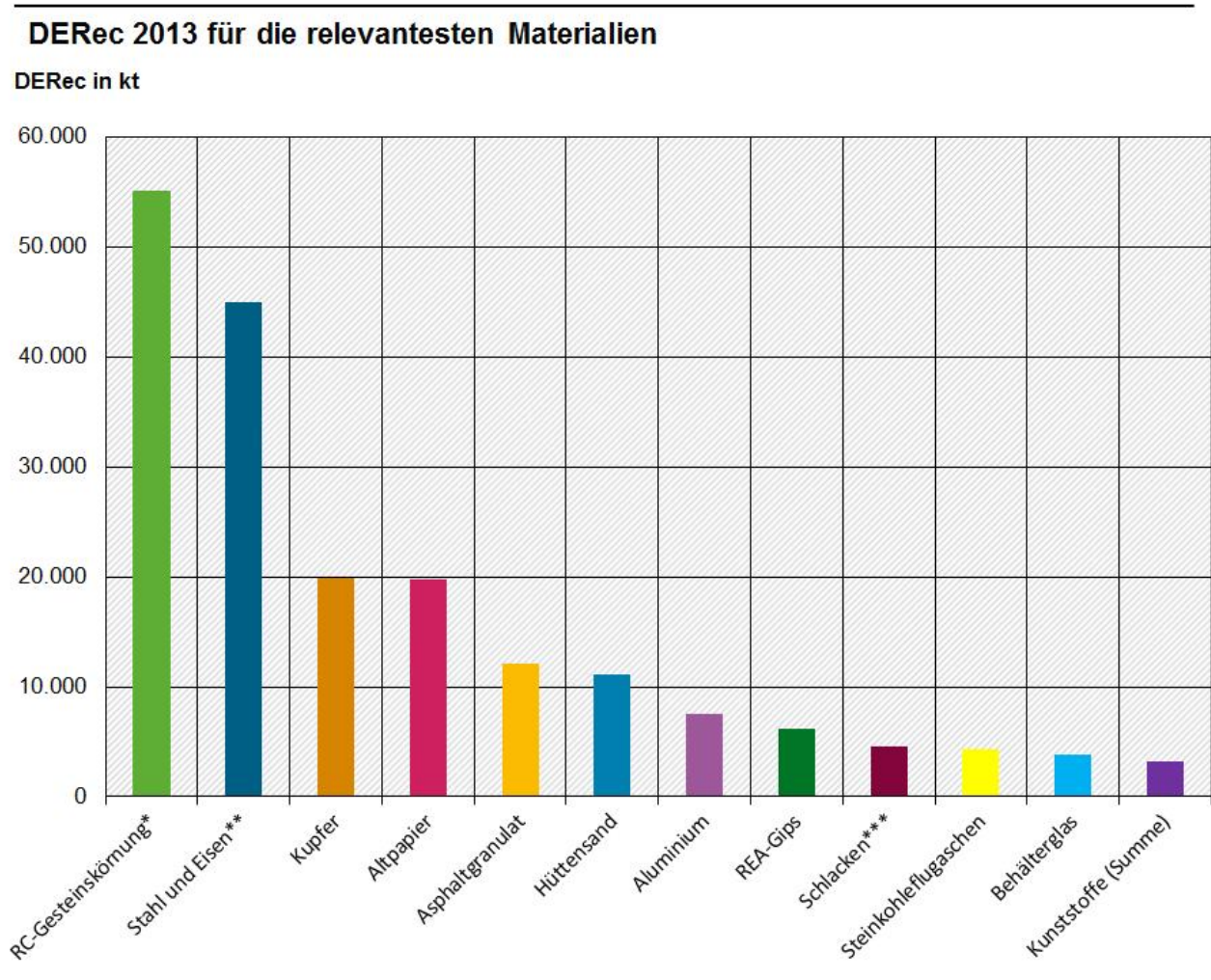
Abbildung 1-1: Ergebnis für den Indikator DIERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %



Quelle: eigene Berechnungen

- Für den DIERec ergibt sich ein etwas anderes Bild, weil hier Materialien ohne aufwändige ausländische Vorketten stärker an Bedeutung gewinnen. Die höchsten Beiträge zum Ergebnis mit jeweils rund einem Viertel liefern die RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen sowie Stahl und Eisen. Weitere Beiträge im Bereich von 5 – 10 % stammen von Kupfer, Altpapier, Asphaltgranulat und Hüttensand. Die nachfolgende Grafik zeigt die wichtigsten Materialien für den DIERec mit Beiträgen $\geq 2\%$ am Gesamtergebnis.

Abbildung 1-2: Ergebnis für den Indikator DERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %



*aus Bau- und Abbruchabfällen

**ohne Edelstahl

***aus der Eisen- und Stahlerzeugung (ohne Hüttensand)

Quelle: eigene Berechnungen

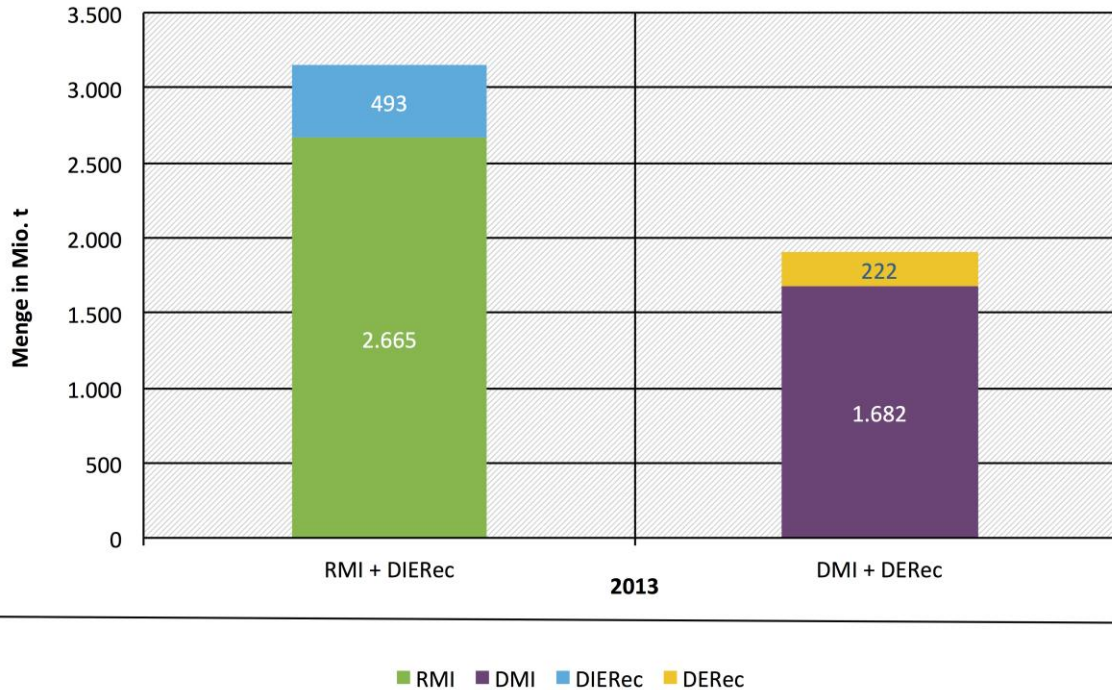
- ▶ Der Primär Materialeinsatz in Deutschland betrug im Jahr 2013 gemessen als DMI 1.683 Mio. t. Durch die inländische Verwertung von Abfall- und Nebenprodukten wurde ohne die Beachtung der ausländischen Vorketten 222 Mio. t Material eingespart. Ohne diese Recyclinganstrengungen bei den untersuchten Materialien in Deutschland wäre der DMI somit rechnerisch um diese 222 Mio. t auf 1.904 Mio. t erhöht. Dies entspricht einem hypothetischen Anstieg des DMI um 13 %.
- ▶ Für die Berücksichtigung der indirekten Flüsse im Ausland muss der DIERec mit den RMI verglichen werden. Der RMI des Jahres 2013 betrug für Deutschland 2.665 Mio. t und war somit um 58 % höher als der DMI (Destatis 2018). Setzt man den DIERec der untersuchten Sekundärmaterialien und Nebenprodukte von 2013 in Relation zum RMI des Jahres 2013, wird ersichtlich, dass sich ohne die Anstrengungen der Sekundärrohstoffwirtschaft der RMI auf 3.158 Mio. t erhöhen würde. Dies entspräche einem Anstieg des RMI um 18 %.

Die nachfolgende Abbildung stellt das Verhältnis von DIERec und DERec zu DMI bzw. RMI noch einmal grafisch dar.

Abbildung 1-3: Rechnerische Erhöhung des RMI bzw. DMI ohne die Substitution von Primärmaterial durch die Verwertung der untersuchten Materialien und Nebenprodukte, in Mio. t

Reduzierung des theoretischen Rohstoffbedarfs durch die Sekundärrohstoffwirtschaft

DIERec und DERec im Verhältnis zu DMI und RMI



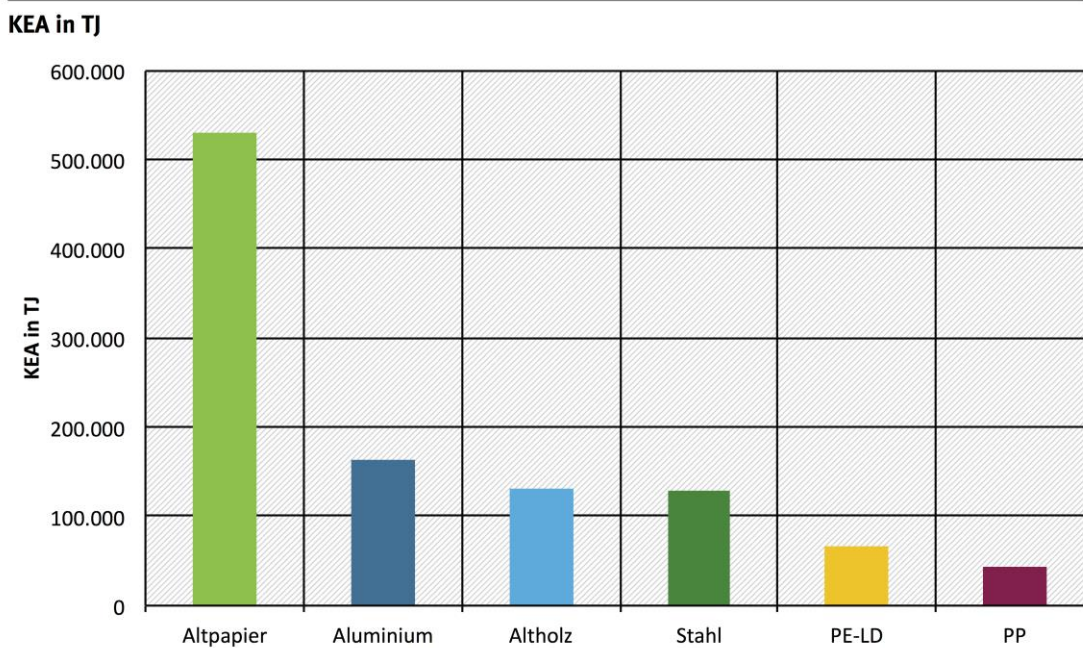
Quelle: Destatis 2018 und eigene Berechnung

- Ursprünglich war in diesem Projekt vorgesehen Zeitreihen für den Zeitraum 2007 bis 2013 zu erstellen. Während des Projektverlaufs wurde entschieden, dass nach Möglichkeit für alle Materialien Zeitreihen von 2007 bis 2015 erstellt werden sollen. Wo dies aufgrund von Datenverfügbarkeiten nicht möglich war, wurden Zeitreihen bis zum aktuellsten verfügbaren Jahr erstellt. Durch Datenlücken für einzelne Materialien können im Jahr 2014 und 2015 die vollständigen Gesamtsummen des DIERec und DERec nur in begrenztem Umfang verglichen werden. Als Gesamtergebnis ist vor allem festzuhalten, dass Differenzen des DIERec zwischen 2007 und 2013 im Wesentlichen von wenigen Materialien bestimmt werden: Kupfer (-30 Mio. t), Stahl und Gusseisen (-18 Mio. t), Edelstahl (-9 Mio. t), Gold (- 7 Mio. t). Die Ursachen hierfür sind vielfältig und stark verbunden mit den branchenspezifischen Entwicklungen und auch Änderungen in der statistischen Methodik.

Ermittlung der KEA-Salden

Das Ergebnis für die KEA-Salden fällt erwartungsgemäß anders aus als das Ergebnis für DIERec und DERec. Die nachfolgende Grafik zeigt den KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorketten für die Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von > 3 %. Es zeigt sich deutlich, dass das Ergebnis von den Materialien mit einer energetischen Verwertung (Altpapier, Kunststoffe, Altholz) und den Metallen, die durch das Zusammenwirken von energieintensiven Prozessen und großen Produktionsmengen gekennzeichnet sind, dominiert wird (Aluminium, Stahl, Kupfer).

Abbildung 1-4: Ergebnis für den Indikator KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorketten mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 3 %



Durch die Substitution von Primärrohstoffen durch die verwerteten Abfälle und Nebenprodukte wurde in Summe im Saldo ein Energieverbrauch von 1.406 PJ vermieden (inkl. ausländischer Vorketten). Ohne ausländische Vorketten wurde ein Energieverbrauch von 1.194 PJ vermieden.

- ▶ Der Vergleichswert analog zum RMI ist das Primärenergieaufkommen nach dem Inländerkonzept, der sowohl die Verwendung für die inländische Produktion wie für die Importe umfasst. Das Primärenergieaufkommen in 2013 lag bei 24.512 PJ (Destatis 2017). Demgegenüber steht eine KEA-Einsparung (inkl. ausländischer Vorketten) von 1.406 PJ durch die Sekundärrohstoffwirtschaft. Dies entspricht rund 6 % des Primärenergieaufkommens nach Inländerkonzept.
- ▶ Eine Vergleichsgröße zum DERec ist die Energiegewinnung im Inland. Im Jahr 2013 beträgt sie 4.109 PJ (AG Energiebilanzen 2015). Der berechnete KEA ohne Vorkette aus der Substitution von Primärrohstoffen durch die verwerteten Abfälle und Nebenprodukte beträgt im Jahr 2013 1.194 PJ, was 29 % entspricht. Dies zeigt, dass die Sekundärrohstoffwirtschaft im Verhältnis zur inländischen Energiegewinnung mit relevanten Energieeinsparungen einhergeht, die zum einen auf der energetischen Verwertung von heizwertreichen Abfällen und zum anderen auf der Vermeidung von energieintensiven metallurgischen Prozessen beruht.

Wirtschaftliche Bedeutung des Recyclings

Neben einer Einsparung von Primärrohstoffen und Energie sind mit dem Recycling und dem Einsatz von Sekundärmaterialien sowie Nebenprodukten auch Kosteneinsparungen verbunden. Diese stellen eine der wichtigsten Treiber für die Verwendung von Sekundärmaterialien und Nebenprodukten gegenüber Primärmaterialien dar. Wie im Vorgängerprojekt (Wagner et al. 2012) wurde versucht, für die untersuchten Materialien einen Marktpreisvergleich zwischen Primär- und Sekundärmaterial durchzuführen. Allerdings wurde im Projektverlauf deutlich, dass nur wenige Preisinformationen zur Verfügung stehen und eine Hochrechnung des Kosteneffekts der Nutzung von Sekundärmaterialien für die Mehrheit der 30 untersuch-

ten Materialien nicht möglich ist. Eine umfassende Hochrechnung der Kosteneinsparung durch den Vergleich der Preise von Primär- und Sekundärmaterialien scheiterte an folgenden Punkten:

- ▶ fehlende Preisangaben für Sekundär- wie Primärmaterial;
- ▶ Preise für Edelmetalle sind identisch zwischen Primär- und Sekundärmaterial;
- ▶ einige der Preisangaben für Primär- und Sekundärmaterial beziehen sich auf unterschiedlichen Material-Qualitäten;
- ▶ bei einigen Sekundärmaterialien sind die Verarbeitungsqualitäten auch bei sortenreiner Sortierung nicht exakt identisch mit der Qualität des Primärmaterials, so dass Sekundärmaterialien nur mit einem deutlichen Preisabschlag verkaufbar sind.

Letztlich konnten theoretische Einsparpotentiale für einige der Massenmetalle und Kunststoffe in ihrer Größenordnung abgeschätzt werden. In erster Linie sind dies Materialien, für die EUWID regelmäßig Preisangaben für Primär – wie Sekundärmaterial publiziert. Aufgrund der schlechten Datensituation wurde auf eine Abschätzung der Einsparpotentiale für die gesamte Untersuchungsperiode 2007 – 2015 verzichtet und lediglich für das Basisjahr 2013 entsprechend der Datenverfügbarkeit eine Abschätzung vorgenommen. Unter Beachtung der in den entsprechenden Kapiteln beschriebenen Annahmen ergeben sich aus der Substitution von Primärmaterial durch Sekundärmaterial folgende wirtschaftliche Einspareffekte:

Tabelle 1-5: Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärmetallen im Jahr 2013

	Stahl	Aluminium	Kupfer	Blei	Zink
verwertete Menge in t	19.400.000	860.000	741.000	263.000	110.000
theoretischer Einspareffekt in Mio. Euro	984	201	394	86	35

Tabelle 1-6: Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärkunststoffen im Jahr 2013

	PE-LD	PE-HD	PVC	PS
Hochwertig stofflich verwertete Menge in t	313.791	276.547	145.742	75.045
theoretischer Einspareffekt in Mio. Euro	223	183	77	61

Summary

Secondary raw materials management is an important component for reducing the use of primary materials in Germany. The material, raw material and energetic recovery of waste enables the substitution of corresponding primary materials and thus reduces Germany's material account. The German Resource Efficiency Programme (ProgRes) takes up this idea with its guiding principle 3 and aims to strengthen and expand the circular economy (BMU 2012). The progress report of the German Resource Efficiency Programme (ProgRes II) describes the development of a resource-efficient circular economy as one of the fields of action and in chapter 6 "Indicators and Objectives" the further development of indicators for measuring the contribution of the secondary raw materials industry to the reduction of primary material is announced (BMUB 2016). At EU level, the area of waste prevention and recycling has become a major political priority. Under the slogan "Closing the loop", the European Commission (European Commission 2015) has developed and adopted an action plan to ensure that the Europe 2020 targets of reducing greenhouse gas emissions by 20% compared to 1990 and increasing energy efficiency by 20% can be achieved. The circular economy action plan also refers to existing strategies such as the Roadmap for a Resource Efficient Europe, which aims to implement the Europe 2020 Strategy (European Commission 2011). The secondary raw materials industry plays a decisive role in the transition from a linear economy to a circular economy. However, it is difficult to quantify the contribution of the secondary raw materials industry to resource conservation. On the one hand, the data is incomplete and, on the other hand, it is not possible to derive corresponding material flows directly from the system of waste statistics, since the amount of waste produced but not the type of recovery is recorded in the waste statistics.

The project "Resource conservation through material flow-oriented secondary raw materials management" aimed to reduce this data gap and thus quantify the contribution of secondary raw materials management to resource conservation better and as comprehensively as possible. This project follows the UFOPLAN project "Determination of the contributions of the waste management sector to increasing resource productivity and of the share recycling takes in the value-added chain displaying the paths of recovery of relevant waste" (FKZ 3709 33 316), in which first methodological approaches and indicators, namely DIERec and DERec, were developed in order to operationalize the economic effects of secondary raw materials recycling and to determine their contribution to increasing raw material productivity.

For this purpose, the project first analyses the Federal Statistical Office's waste statistics with regard to their relevance on the substitution effect and potential of the secondary raw material economy and then carries out detailed investigations for 30 materials with focus on determining the recovery routes of these secondary raw material quantities and their derived substitution potentials.

Material flow balancing of waste management

In the evaluation of the Federal Statistical Office's waste statistics, material flow accounting was compiled and documented for five material categories for the years 2007 to 2013. To this end, the methodology of the previous project (Wagner et al. 2012) was used, which is based on an evaluation of the waste statistics data. In concrete terms, a comprehensive material flow balance was used to determine the mass flows of the highly aggregated material categories

- ▶ ferrous and non-ferrous metals,
- ▶ biogenic waste,
- ▶ plastics and
- ▶ non-metallic minerals

from waste generation to treatment in recycling facilities to recovery or disposal. By choosing the observation period from 2007 to 2013, recent developments can be shown in addition to a current description of

the material flows in Germany. The basic methodology for modelling material flows of all considered material categories follows a 4-step model.

1. Establishment of a waste database for the years 2007 to 2013

The material flow modelling is based on the quantities of waste collected at waste treatment plants and published by the Federal Statistical Office under the title "Waste Disposal - Technical Series 19 Volume 1" for the years 2007 to 2013 (Federal Statistical Office 2009-2015).

2. Modelling of waste material flows

Based on the system of waste code numbers, the waste quantities are assigned to the respective treatment plants on basis of their origin.

3. Determining material shares of waste streams

The material shares of the considered material categories in the modelled waste streams are largely determined by recourse to updated data from the waste analysis database ABANDA of the state of North Rhine-Westphalia (ABANDA 2015) and own expertise.

5. Extension to further material streams and plausibility checks

In addition to the waste covered in the Technical Series 19 Volume 1, there are other material and goods flows, which are already considered as secondary raw materials or products due to their characteristics, and are therefore not recorded as waste. Where possible, the material-specific material flow models are extended to include material flows designated as "waste not subject to notification". Furthermore, in addition to waste imports listed in the Technical Series 19 Volume 1, the respective material imports and exports are also shown in accordance with the Commodity Classification for Foreign Trade Statistics of the Federal Statistical Office.

As a result, a Sankey diagram was elaborated for each material category and for each analysed year, showing the material flows from waste generation to treatment and recycling.

However, to a large extent the data only represent the quantity of secondary materials that are part of the waste statistics and do not allow a methodologically exact differentiation of materials. For this reason, the analysis was further differentiated in the further course of the project and, based on the recording of secondary material flows beyond the waste statistics of a total of 30 materials and by-products, data were determined in more detailed level.

Selection of the materials and assessment approaches to be considered

The selection of the materials to be considered was made in consultation with the client. The following selection criteria were important:

- ▶ Materials from the four material groups of metals, plastics, organic waste and mineral waste, which were mapped in the evaluation of the waste statistics, will be included.
- ▶ From all four material groups, materials relevant to quantity and resources should be selected, of which at least 10 are metals.
- ▶ The secondary raw material flows associated with the materials should make a relevant contribution to the reduction of the cumulative raw material consumption (KRA) or the cumulative energy demand (KEA).
- ▶ Processing must be realistic and, in particular, data need to be foreseeably available.

The following materials were selected from these criteria and agreed upon with the client. Due to their volume relevance, the important industrial by-products of the steel industry and energy supply were integrated into the selection.

Table 1-1: Selected materials for in-depth analysis

Metals	Minerals	Plastics	Biomass
Stainless steel	Recycling aggregates from construction and demolition waste for recycling in road construction and civil engineering	PE-LD	Scrap wood
Steel and cast iron	Asphalt granulate	PE-HD	Paper and cardboard
Aluminium	Fly ash from coal firing for recycling in cement production	PP	Kitchen, garden and catering waste
Copper	Container glass	PVC	Old textiles
Zinc	Granulated slag	PET	
Lead	FGD gypsum	PS	
Tin		Scrap tyres	
Silver			
Gold			
Platinum			
Palladium			

For these 30 materials and by-products, the aim of the analysis was

- ▶ to estimate the material flows for Germany and prepare them graphically using Sankey diagrams,
- ▶ to estimate the associated recycling routes and quantities by means of these analyses and
- ▶ to determine, based on this data, how many primary raw materials can be substituted by the recovering these 30 secondary raw materials and by-products.

In order to do so, material flow balances for all examined materials and by-products were initially elaborated for Germany. The baseline year for the detailed analyses was 2013, but a number of information gaps could only be closed with sources that do not relate to 2013, e.g. because the studies were already published before 2013 (especially information on recovery volumes that do not occur in the waste regime or on dissipative losses due to recovery). The imports and exports of secondary materials and by-products were integrated into the material flow balance if data existed.

In addition to material recycling, some of the investigated materials such as plastics or paper and cardboard are also used for energy recovery and thus replace fossil fuels. The energy recovery of these fractions in waste incineration plants, RDFs and other combustion plants was also recorded.

For the 30 materials and by-products examined, the recycled waste amounts to about 119 million tonnes plus about 20 million tonnes of by-products from steel and energy production (see the following three tables). Almost half of the recycled waste volumes are attributable to the two mineral waste categories of construction and demolition waste and finishing asphalt. A further one-fifth of the secondary products from waste recycling originates from the recycling of iron and steel scrap or organic waste.

Table 7-2: Secondary products produced in Germany from metallic waste generated as well as plastics and used tires, of which the recovery has partly or fully taken place in Germany in 2013

Secondary product	Amount [t]	Secondary product	Amount [t]
Steel and cast iron	23,100,000	Polyethylene high density (PE-HD)	304,000

Secondary product	Amount [t]	Secondary product	Amount [t]
Stainless steel	533,600	Polyethylene low density (PE-LD)	359,000
Aluminium	859,000	Polypropylene (PP)	276,000
Copper	726,000	Polyethylenterephthalate (PET)	463,000
Zinc	317,000	Polystyrene (PS)	82,000
Lead	263,000	Polyvinyl chloride (PVC)	196,000
Tin	5,100	Scrap tyres	325,000
Silver	538	Total secondary products from plastics and used tyres	2,005,000
Gold	7.6		
Platinum	7.5		
Palladium	7.5		
Total metallic secondary products	25,804,261		

Table 1-3: Secondary products produced from mineral and organic waste generated in Germany, some or all of which was recycled in Germany in 2013.

Secondary product	Amount [t]	Secondary product	Amount [t]
RC aggregates	52,700,000	Scrap wood	1,134,000
Asphalt granulate	11,500,000	Waste paper	13,760,000
Packaging glass	2,446,000	Old textiles	338,000
Total mineral secondary products from waste recycling	66,646,000	Food and garden waste	8,989,000
		Total organic secondary products	24,221,000

Table 1-4: Secondary products produced from by-products originating in Germany, some or all of which were recycled in Germany in 2013

Secondary product	Amount [t]
Blast furnace and steel mill slag	10,510,000
Power plant by-products	9,293,000
Total by-products recycled	19,803,000

Identification of indicators DIERec and DERec

The material and energy recovery of the determined secondary raw material quantities results in potential savings for primary materials and energy resources. These were estimated for each material category using the indicators DIERec and DERec.

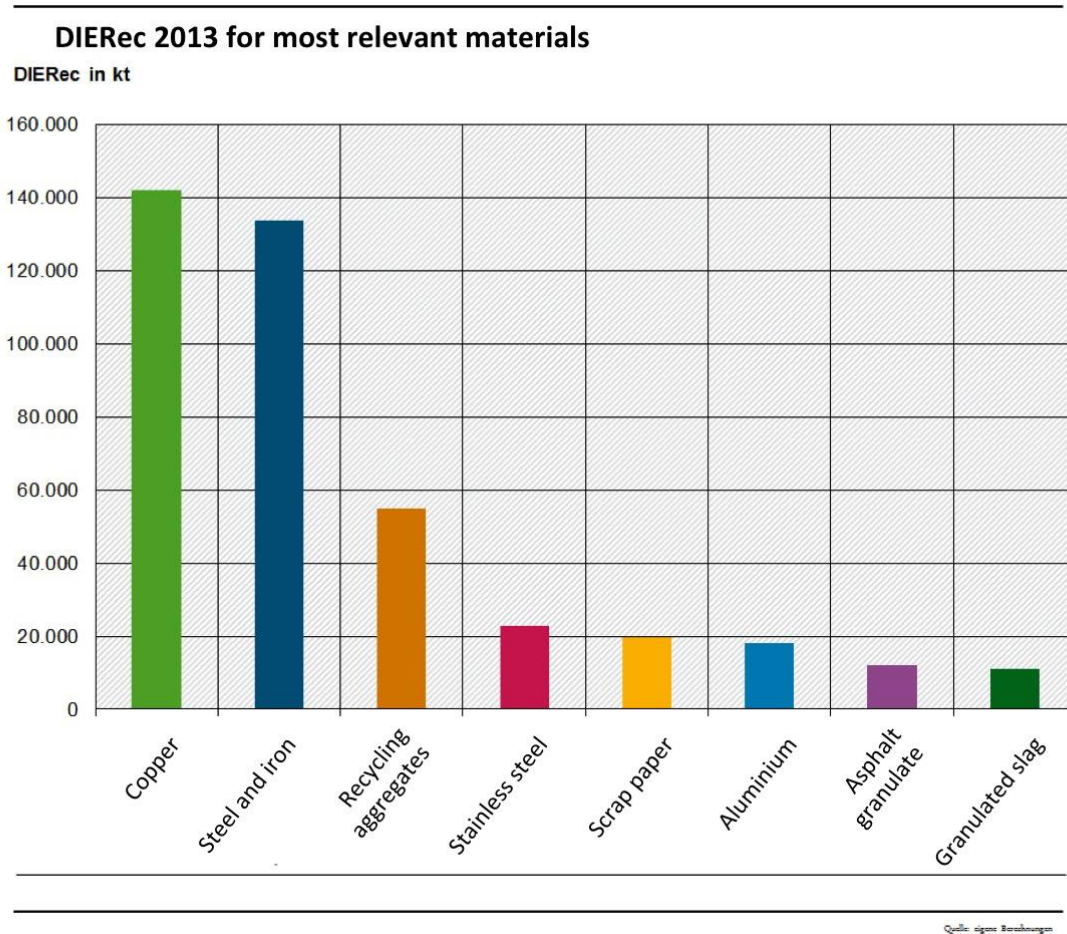
With the help of the two indicators DIERec and DERec it is possible to compare the raw material and energetic effects of the secondary material recycling processes with the corresponding processes of the substituted primary materials and thus to depict the actual contributions of the secondary raw materials industry to resource conservation for each (raw) material. The methodology of the indicators DIERec and DERec is therefore connectable to the established input indicators DMI (in the case of DERec) and RMI (in the case of DIERec) and indicate by which contribution the indicators DMI or RMI would increase if there were no material, raw material or energetic recovery of waste materials and no use of by-products.

For the compilation of the indicators DIERec and DERec, the determined recycling quantities of secondary materials and their substituted primary materials were combined with KRA coefficients or KEA coefficients. For each secondary material or by-product and the different primary materials it substitutes, corresponding processes were identified in ecoinvent 3.2. If these were not available, e.g. for a number of recycled metals, these processes were created by the project team on the basis of existing ecoinvent data from the primary processes themselves.

The indicators for DIERec and DERec add up to 492 million tonnes (DIERec) for the substitution processes studied and 222 million tonnes (DERec) for material and energy recovery. The following statements can therefore be made:

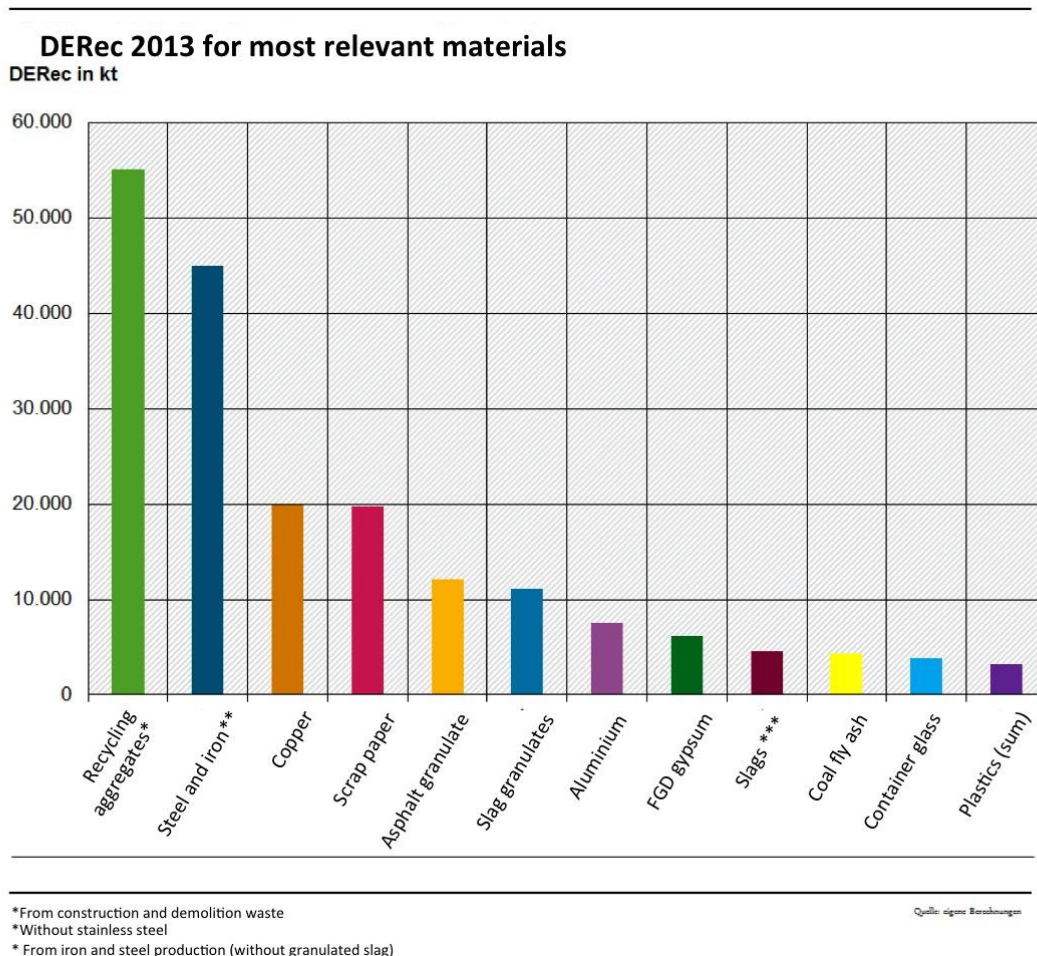
- ▶ Material recycling is mainly responsible for the indicators DIERec and DERec: 469 million tonnes of DIERec (95%) and 198 million tonnes (89%) of DERec are generated by the recycling.
- ▶ The recovery of waste provides the largest proportion for DIERec and DERec: 90 % of DIERec and 77 % of DERec are contributed by waste recycling (DIERec = 443 million tonnes; DERec = 172 million tonnes). By-products play a much smaller role (DIERec = 26 million tonnes; DERec = 26 million tonnes).
- ▶ The following chart clearly shows that the amount of DIERec largely depends on the materials copper (29 %), steel and cast iron (27 %) and aggregates from construction and demolition waste (11 %). Other materials have proportions between 2 and 5 % (stainless steel, waste paper, aluminium, asphalt granulate, blast furnace slag). The other materials examined have proportions of one percent or less and are not included in the graph.

Figure 1-1-5: Result for the indicator DIERec showing all materials with shares of at least 2% in the overall result



- For DERec, the picture is somewhat different because materials are becoming more and more important without the need for complex foreign upstream chains. The RC aggregates of construction and demolition waste, as well as steel and iron make the largest contributions to the result with around a quarter. Further contributions in the range of 6 - 10 % come from copper, waste paper, asphalt granulate and granulated slag. The following chart shows the most important DERec materials with contributions of $\geq 2\%$ to the overall result.

Figure 1-1-6: Result for the indicator DERec showing all materials with shares of at least 2% in the overall result



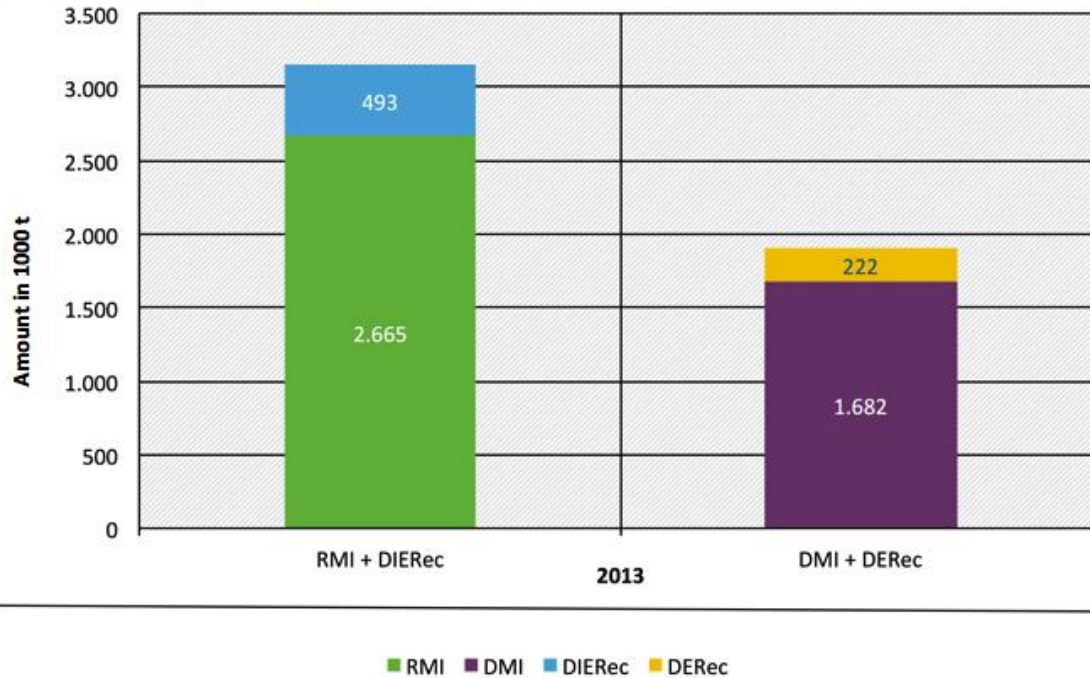
- ▶ The use of raw materials in Germany in 2013, measured as DMI, amounted to 1,683 million tonnes. 222 million tonnes of material were saved due to the domestic recycling of waste and by-products without taking foreign upstream chains into account. Without these recycling efforts for the investigated materials in Germany, DMI would have increased by these 222 million tonnes. This corresponds to a hypothetical DMI increase of 13 %.
- ▶ To take indirect flows abroad into account, DIERec must be compared with the RMI. The RMI for Germany in 2013 was 2,665 million tonnes and therefore 58% higher than the DMI (Destatis 2018). If the DIERec of the secondary materials and by-products examined from 2013 is put in relation to the RMI of 2013, it becomes apparent that without the efforts of the secondary raw materials industry RMI would increase to 3.158 million tonnes. This would correspond to an increase of 18 % in the RMI.

The following figure graphically depicts the ratio of DIERec and DERec to DMI or RMI.

Figure 1-1-7: Calculated increase of the RMI or DMI without substitution of primary material by using the analysed materials and by-products, in 1,000 t

Decline of theoretical raw materials need by secondary raw materials management

DIERec and DERec in comparison to DMI and RMI



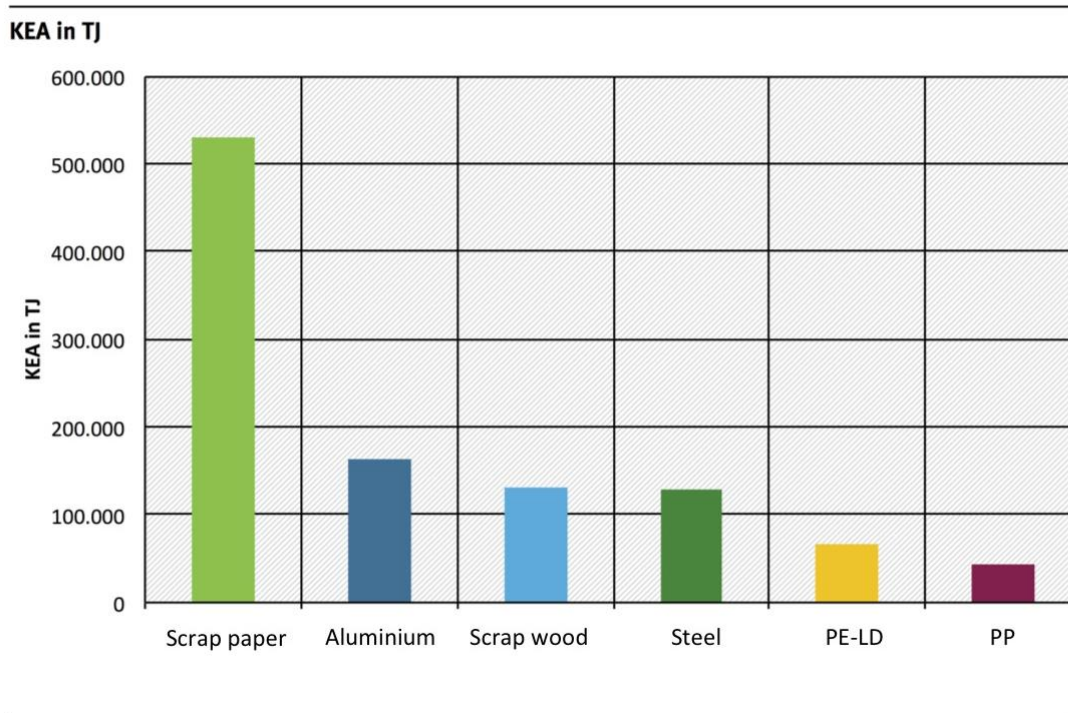
Source: Destatis 2018 and own calculations

- ▶ The original intention of this project was to create time series for the period 2007 to 2013. During the course of the project, it was decided that, if possible, time series should be created for all materials from 2007 to 2015. Where this was not possible due to data availability, time series were created up to the most current available year. Due to data gaps for individual materials, complete totals of DIERec and DERec can only be compared to a limited extent in 2014 and 2015. As an overall result, it should be noted above all that DIERec differences between 2007 and 2013 are mainly determined by a few materials: Copper (-30 million tonnes), steel and cast iron (-18 million tonnes), stainless steel (-9 million tonnes), gold (-7 million tonnes). The reasons for this are manifold and strongly connected with industry-specific developments and also changes in statistical methodology.

Determination of KEA balances

As expected, the result for the KEA balances is different from the result for DIERec and DERec. The following chart shows the KEA balance including foreign upstream chains for the materials with shares of > 3 % in the overall result. It shows clearly that the result is dominated by the materials with an energetic recovery (waste paper, plastics, waste wood) and the metals, which are characterized by the interaction of energy-intensive processes and large production quantities (aluminium, steel, copper).

Figure 1-1-8: Result for the indicator KEA balance incl. foreign upstream chains with presentation of all materials with shares of at least 3 % in the overall result.



By substituting primary raw materials with recycled waste and by-products, an overall energy consumption of 1,406 PJ was avoided (including foreign upstream chains). Without foreign upstream chains, energy consumption of 1,194 PJ was avoided.

- ▶ The reference value analogous to the RMI is the primary energy production according to the domestic concept, which includes both the use for domestic production and for imports. Primary energy production in 2013 was 24,512 PJ (Destatis 2017). On the other hand, the secondary raw materials industry saves 1,406 PJ on CER (including foreign upstream chains). This corresponds to around 6 % of primary energy production according to the domestic concept.
- ▶ A comparative figure compared to the DERec is domestic energy production. In 2013 it amounts to 4,109 PJ (AG Energiebilanzen 2015). In 2013, the KEA without upstream chain is 1,194 PJ, which corresponds to 29 %. This shows that the secondary raw materials industry is associated with significant energy savings in relation to domestic energy production, which is based on the thermal utilisation of high calorific value waste on the one hand and the avoidance of energy-intensive metallurgical processes on the other.

Economic relevance of recycling

In addition to saving primary raw materials and energy, recycling and the use of secondary materials and by-products also entail cost savings, as this is one of the most important drivers for the use of secondary materials and by-products over primary materials. As in the previous project (Wagner et al. 2012), an attempt was made to compare the market prices of primary and secondary materials for the analysed materials. However, it became clear during the course of the project that only a small amount of price information was available and that it was not possible to extrapolate the cost effect of the use of secondary materials for the majority of the 30 examined materials. A comprehensive extrapolation of the cost savings by comparing the prices of primary and secondary materials failed due to the following points:

- ▶ Missing prices for secondary and primary material

- ▶ Prices for precious metals are identical between primary and secondary material
- ▶ Some of the prices for primary and secondary materials refer to different material qualities
- ▶ For some secondary materials, the processing qualities are not exactly identical to the quality of the primary material, even when sorted by type, so that secondary materials can only be sold at a significant price discount.

Ultimately, theoretical savings potentials for some of the bulk metals and plastics could be estimated in their order of magnitude. First, these are materials for which EUWID regularly publishes prices for both primary and secondary material. Due to the poor data situation, no estimation of the savings potential for the entire investigation period 2007 - 2015 and only estimations for the base year 2013 according to the data availability were made. Taking into account the assumptions described in the corresponding chapter, the substitution of primary material by secondary material results in the following economic savings effects:

Table 1-5: Estimates of the monetary effect of the use of secondary metals recorded in Germany 2013

	Steel	Aluminium	Copper	Lead	Tin
Recovered amount in t	19,400,000	860,000	741,000	263,000	100,000
Theoretical savings effect in million t	984	201	394	86	35

Table 1-6: Estimates of the monetary effect of the use of secondary plastics recorded in Germany 2013

	PE-LD	PE-HD	PVC	PS
Amount recycled in high-quality, in t	313,791	276,547	145,742	75,045
Theoretical savings effect in million t	223	183	77	61

1 Einleitung

Die Sekundärrohstoffwirtschaft liefert wichtige Beiträge zum Ressourcenschutz. Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (ProgRes) greift mit der Leitidee 3 diesen Gedanken auf und möchte die Kreislaufwirtschaft stärken und ausbauen (BMU 2012). Auch auf EU-Ebene ist in den letzten Monaten der Bereich Abfallvermeidung und Abfallverwertung stark in den politischen Vordergrund gerückt. Unter den Schlagworten „Closing the loop“ hat die Europäische Kommission (European Commission 2015) einen Aktionsplan entwickelt und beschlossen, mit dem sichergestellt werden soll, dass die Europa 2020-Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 20% gegenüber 1990 und der Erhöhung der Energieeffizienz um 20% erreicht werden können. Der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft bezieht sich dabei auch auf schon bestehende Strategien wie der Leitinitiative Ressourcenschonendes Europa, mit der die Europa 2020-Strategie umgesetzt werden soll (Europäische Kommission 2011).

Den Beitrag der Gewinnung von Sekundärrohstoffen zur Reduktion der volkswirtschaftlichen Primärrohstoffflüsse zu bemessen, gestaltete sich bislang schwierig. Hierzu fehlte es an aussagekräftigen Indikatoren, die gesamtwirtschaftlich anschlussfähig sind. Zudem ist die Datenlage lückenhaft, und aus der Systematik der Abfallstatistik kann nicht unmittelbar auf entsprechende Material- oder Stoffflüsse abgeleitet werden, da zwar das Abfallaufkommen, nicht aber die Art der Verwertung in der Abfallstatistik erfasst wird.

Im UFOPLAN-Projekt „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“ (FKZ 3709 33 316) wurden erste methodische Ansätze und Indikatoren erarbeitet, um die rohstoffwirtschaftlichen Effekte der Verwertung von Sekundärrohstoffen zu operationalisieren und ihren Beitrag zur Steigerung der Rohstoffproduktivität zu ermitteln. In diesem Projekt wurden anhand der Auswertung verschiedener statistischer Datenquellen die materialspezifischen Verwertungswege der Materialkategorien Metalle, Kunststoffe, nichtmetallische Mineralien und biogene Abfälle aufgezeigt. Zusätzlich wurden exemplarisch für drei Metalle und drei Kunststoffe detailliert die Substitutionseffekte von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe bilanziert und mit den volkswirtschaftlichen Rohstoffinput-Indikatoren DMI und RMI in Verbindung gesetzt, sowie die energetischen Einsparungen abgebildet. Zusätzlich wurden mittels Preisdifferenzen für Primär- und Sekundärmaterial wirtschaftliche (Teil-) Effekte einer Sekundärrohstoffwirtschaft ermittelt.

Ziel dieses Vorhabens ist es, unter Nutzung der im Vorgängerprojekt erarbeiteten Bottom-up-Methode die Datenbasis zur Berechnung der entsprechenden Indikatoren zu erweitern, zu aktualisieren und in Zeitreihen von 2007 bis 2015 darzustellen. Ausgehend von einer Auswahl an 30 masserelevanten Materialien ist es das Ziel dieses Projektes, ausgehend von einer stoffstromspezifischen Gliederung, näherungsweise das gesamte Aufkommen an Sekundärrohstoffen einschließlich der damit verbundenen Stoffströme in den Vorketten in ein Verhältnis zum gesamten Materialaufwand der Volkswirtschaft (DMI und RMI) zu setzen.

2 Methodische Grundlagen

In Kapitel 2 sollen die methodischen Vorgehensweisen erläutert werden, mit denen die Ergebnisse der nachfolgenden Kapitel erarbeitet wurden.

2.1 Methodik der Stoffstrombilanzierung nach Abfallstatistik für die Materialkategorien

In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Stoffstrombilanzierung für fünf Materialkategorien (Fe-Metalle, NE-Metalle, Biogene Abfälle, Kunststoffe, Nichtmetallische Mineralien) für die Jahre 2007 bis 2013 dargestellt. Die hier angewandte Methodik entspricht weitestgehend der des Forschungsprojektes mit dem FKZ 3709 33 316 (Wagner et al. 2012), die auf den Daten der Abfallstatistik aufbaut. Darüber hinaus erfolgt eine methodische Weiterentwicklung, die zu einer verbesserten Abbildung der abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten und einem höheren Detaillierungsgrad führt.

Die grundsätzliche Methodik zur Modellierung der Stoffströme für alle betrachteten Materialkategorien folgt einem 4-Stufen Modell. Auf methodische Besonderheiten der einzelnen Materialkategorien wird in den entsprechenden Unterkapiteln eingegangen.

1. Aufstellung der Abfalldatenbank für die Jahre 2007 bis 2013

Basis der Stoffstrommodellierung sind die an Abfallbehandlungsanlagen erfassten und unter dem Titel „Abfallentsorgung – Fachserie 19 Reihe 1“ vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Abfallmengen für die Jahre 2007 bis 2013 (Statistisches Bundesamt 2009-2015). In Anlehnung an den Aufbau der Fachserie 19 Reihe 1 gliedert sich die Struktur der Datenbank nach den Abfallarten entsprechend ihrer Abfallschlüsselnummern gemäß Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) sowie den Ein- und Ausgängen an den verschiedenen Behandlungsanlagen¹.

2. Modellierung der Abfallstoffströme

Aufbauend auf der unter genannten Differenzierung und der Systematik der Abfallschlüsselnummern erfolgt eine herkunftsbezogene Zuordnung der Abfallmengen zu den jeweiligen Behandlungsanlagen.

Bezüglich der Verwertungs-/Beseitigungswege der aus Behandlungsanlagen herausgehenden Abfälle unterscheidet die Fachserie 19 Reihe 1 zwischen „Beseitigung“ (gemäß Anlage 1 KrWG), „Verwertung“ (gemäß Anlage 2 KrWG) und „an Sonstige“. Während Abfälle zur „Verwertung“ in weiteren Anlagen stofflich oder energetisch verwertet werden, handelt es sich bei den Abfällen „an Sonstige“ bereits um Sekundärrohstoffe bzw. Produkte, die an Direktverwerter oder Branchen außerhalb der Abfallentsorgung gehen. Diese grundsätzliche Zuordnung wird auch bei der Stoffstrommodellierung berücksichtigt.

Um ein Mehrfachregistrierung von Abfällen bei Behandlung in mehreren Anlagen weitestgehend auszuschließen, werden zum einen Abfälle mit der Kapitelnummer 19 (AVV), die erst nach einer Ab-

¹ Fachserie 19 Reihe 1 untergliedert nach den Behandlungs-/Beseitigungsanlagen: Deponien, Thermische Abfallbehandlungsanlagen, Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung von Abfällen, Chemisch/physikalische Behandlungsanlagen, Bodenbehandlungsanlagen, Biologische Behandlungsanlagen, Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen, Demontagebetriebe für Altfahrzeuge, Schredderanlagen und verwandte Anlagen, Sortieranlagen insgesamt, Zerlegeeinrichtungen für Elektro- und Elektronikaltgeräte, Sonstige Behandlungsanlagen, Bauschuttzubereitungsanlagen und Asphaltmischanlagen

fallbehandlung als solche ausgewiesen werden, gesondert betrachtet² und zum anderen bei mengenrelevanten Abweichungen zwischen Out- und Inputströmen die Inputmengen in Deponien, thermische Behandlungsanlagen und energetische Verwertungsanlagen (finale Senken) als vorrangig berücksichtigt.

3. Ermittlung der Materialanteile an den Abfallströmen

Die Bestimmung der Materialanteile der betrachteten Materialkategorien an den modellierten Abfallströmen erfolgt wie bereits im Vorgängerprojekt zu großen Teilen unter Rückgriff auf aktualisierte Werte der Abfallanalysendatenbank ABANDA des Landes Nordrhein-Westfalen (ABANDA 2015). Ferner fließen die Ergebnisse eigener sowie externer Abfallanalysen aus vergangenen Forschungsprojekten bzw. Studien ein. Aus der Anwendung der hieraus folgenden Materialgehalte je Abfallart auf die modellierten Abfallstoffströme resultieren die materialspezifischen Stoffstrommodelle. Die in der Modellierung der einzelnen Materialkategorien berücksichtigten Materialgehalte je Abfallart stellt Anhang II dar.

4. Erweiterung um externe Materialströme und Plausibilitätsprüfung

Zusätzlich zu den in der Fachserie 19 Reihe 1 erfassten Abfällen bestehen weitere Material- und Warenflüsse, die aufgrund ihrer Eigenschaften bereits als Sekundärrohstoffe bzw. Produkte gelten und daher nicht als Abfälle registriert werden. Sofern möglich, erfolgt eine Erweiterung der materialspezifischen Stoffstrommodelle um diese Materialströme, welche keiner abfallrechtlichen Informations- oder Notifizierungspflicht unterliegen. Des Weiteren werden zusätzlich zu den in der Fachserie 19 Reihe gelisteten Abfallimporten auch die jeweiligen Materialimporte und -exporte gemäß Warenverzeichnis der Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes ausgewiesen.

Abschließend erfolgt vor dem Hintergrund der Ergebnissicherung durch den Vergleich mit Veröffentlichungen abfallspezifischer Wirtschaftsverbände (BDSV, WVM, bvse, BGK, VDP etc.) eine Plausibilitätsprüfung der aus der Stoffstrommodellierung resultierenden Ergebnisse.

Im Sinne einer übersichtlichen Darstellungsweise werden in Kapitel 3 ausschließlich die Ergebnisse der Stoffstrommodellierung der beiden Jahre 2007 und 2013 (Grenzjahre des Betrachtungszeitraumes) dargestellt, sowie die hieraus ersichtliche Entwicklung abgeleitet. Die Ergebnisse der dazwischen liegenden Jahre sind im Anhang I aufgeführt.

2.2 Methodik der detaillierten Stoffstrombilanzierung einzelner Materialien

Die in Kapitel 3 angewandte Methodik erlaubt nur eine Stoffstrombilanz anhand der Abfallstatistik und erfasst somit keine verwerteten Reststoffe, die nie einen Status als Abfall erlangt haben, wie z.B. Neuschrotte. Ebenfalls nicht erfasst sind mineralische Nebenprodukte aus der Stahlindustrie und Kraftwerksnebenprodukte, durch deren Nutzung ebenfalls Primärrohstoffe eingespart werden können. Zudem erlaubt eine Stoffstrombilanzierung mittels Daten der Abfallstatistik nur eine geringe Detailtiefe. Es sind zwar Unterscheidungen zwischen Eisen- und Nichteisenmetallen möglich, weitere Unterscheidungen z.B. in Kupfer, Aluminium oder Blei jedoch nicht.

Daher wurde in den darauffolgenden Kapiteln in einer zum Teil sehr hohen Detailtiefe 30 Sekundärmaterialien und Nebenprodukte untersucht. Ziel der Analyse war es a) die Stoffflüsse für Deutschland abzuschätzen und grafisch mittels Sankey-Diagrammen aufzubereiten, b) über diese Analysen die Verwertungswege und -mengen abzuschätzen und c) auf Grundlage dieser Daten die Größenordnung zu bestimmen, wie viele

² Hiervon ausgenommen sind flüssige Abfälle aus der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung (AS 1908 und AS 1909). Diese Abfallarten werden bereits erzeugerseitig berücksichtigt.

Primärrohstoffe durch die Verwertung dieser 30 Sekundärrohstoffe und Nebenprodukte substituiert werden können.

Die Auswahl der 30 Materialien und Nebenprodukte, wie in Kapitel 4 ausführlich beschrieben, orientierte sich zum einen an den Mengenströmen, so dass sichergestellt wird, dass diese 30 Materialien näherungsweise die kompletten Verwertungsmengen in Deutschland darstellen können und zum anderen an ihrer ökologischen Relevanz gemessen an den Kriterien des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) und des kumulierten Energieaufwandes (KEA) für die Erzeugung aus Primärrohstoffen. Weitere Kriterien waren durch die Leistungsbeschreibung des Projektgebers vorgegeben: es sollten mindestens 10 Metalle untersucht werden und die Materialien und Nebenprodukte sollten sowohl Metalle als auch mineralische Rohstoffe, Kunststoffe und biotische Materialien abdecken. Im Ergebnis ist die Auswahl der 30 Materialien und Nebenprodukte eine Kombination von mengenrelevanten Materialien mit häufig kleinem spezifischen KRA- und KEA-Koeffizienten (vor allem bei mineralischen Reststoffen und Nebenprodukten), Materialien mit vergleichsweise geringen verwerteten Mengen, aber hohen spezifischen KRA- und KEA-Koeffizienten (vor allem Edelmetalle wie Gold, Platin oder Palladium) und Materialien, die sowohl eine hohe Mengenrelevanz als auch relativ hohe spezifische KRA- und KEA-Koeffizienten aufweisen (z.B. die Massenmetalle Stahl, Kupfer oder Aluminium).

Nachfolgend werden in den Kapiteln 5 bis 8 für alle untersuchten Materialien und Nebenprodukte die Verwertungswege individuell dargestellt und die jeweiligen Substitutionspotentiale für Primärrohstoffe, inklusive der Vorketten im Ausland, abgeschätzt. Zunächst wurden für alle Materialien und Nebenprodukte Stoffflussbilanzen für Deutschland erstellt. Das Basisjahr für die detaillierten Analysen war 2013. Etliche Informationslücken konnten jedoch nur mit Quellen geschlossen werden, die sich nicht auf das Jahr 2013 beziehen, weil z.B. die Studien schon vor 2013 veröffentlicht wurden (vor allem zu Angaben über Verwertungsmengen, die nicht im Abfallregime anfallen oder über dissipative Verluste im Rahmen der Verwertung). Die Im- und Exporte von Sekundärmaterialien und Nebenprodukten wurden – soweit Daten vorhanden waren – entsprechend in die Stoffflussbilanz integriert. Bei einigen Sekundärmaterialien dominieren die Exporte deutlich. Bei Kunststoffen und Platingruppenmetallen wurde daher in Abstimmung mit dem Auftraggeber bei der Berechnung der Substitutionspotentiale von der üblichen Vorgehensweise, die Nettoimporte zu verwenden, abgewichen. Stattdessen wurden die in Deutschland anfallenden Mengen berücksichtigt, da diese die Anstrengungen zur Erfassung und Vorbehandlung dieser Sekundärmaterialien in Deutschland widerspiegeln, selbst wenn der finale Recyclingprozess bzw. einzelne Schritte des Recyclingprozesses nicht in Deutschland stattfinden. Neben der stofflichen Verwertung werden einige der untersuchten Materialien wie Kunststoffe oder PPK auch energetisch verwertet und substituieren dadurch fossile Energieträger. Die energetische Verwertung dieser Fraktionen in Thermischen Abfallbehandlungsanlagen (Müllverbrennungsanlagen) und Feuerungsanlagen (EBS-Anlagen, Biomassekraftwerke, Heizwerke, Kohlekraftwerke, Zementwerke u.a.) wurde ebenfalls erfasst. Sofern nicht separat aufgeführt, sind in MVA thermisch behandelte Mengen in den als energetisch verwerteten Mengen enthalten. Aus der Menge und dem Heizwert der energetisch verwerteten Materialien sowie dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad der Anlage wurde die Menge an bereitgestellter Energie bzw. Wärme abgeleitet. Diese bereitgestellte Energie- bzw. Wärmemenge (in MJ) konnte anschließend wieder in einen kumulierten Rohstoffaufwand umgerechnet werden, der anfiel, wenn diese Mengen über eine fossile Energieerzeugung bereitgestellt worden wären.

Da sich die Wirkungsgrade der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen und der Feuerungsanlagen deutlich voneinander unterscheiden (siehe Kapitel 7.3 Fußnote 52), werden die in den Anlagen verarbeiteten Abfallmengen bis zur energetischen Umrechnung über den Heizwert getrennt voneinander geführt. Vor diesem Hintergrund weisen viele Stoffstromdarstellungen die in den Anlagen verbrannten Mengen getrennt voneinander aus. Die anschließende Darstellung des energetischen Nutzens durch die Bereitstellung von Energie und Wärme fasst die energetischen Effekte aller Verwertungswege zusammen und subsummiert

unter dem Begriff der „energetischen Verwertung“ die thermische Behandlung in Thermischen Abfallbehandlungsanlagen und die energetische Verwertung in Feuerungsanlagen.

Um diese Substitutionspotentiale und ihre Auswirkungen auf der Ebene des Kumulierten Rohstoffaufwands abschätzen zu können, wurden im Vorläuferprojekt (Wagner et al. 2012) die Bilanz-Indikatoren DIERec (Direct and Indirect Effects of Recovery) und DERec (Direct Effects of Recovery) konzipiert. Mit Hilfe dieser beiden Indikatoren ist es möglich, die rohstofflichen und energetischen Effekte der Verwertungsprozesse der Sekundärmaterialien den jeweils entsprechenden Prozessen der substituierten Primärmaterialien gegenüberzustellen und so für jeden Rohstoff/Material die tatsächlichen Beiträge der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Ressourcenschonung abbilden zu können. Um die entsprechenden Primärprozesse, gerade auch für die metallischen Rohstoffe, umfassend darstellen zu können, ist es notwendig, die globale Rohstoffperspektive einzunehmen. Deshalb werden sowohl die Materialaufwendungen der Verwertungsprozesse als auch die dadurch substituierten Mengen an Primärmaterial mit entsprechenden KRA-Koeffizienten multipliziert.

Die entsprechenden Formeln zur Berechnung des DIERec und DERec für die jeweiligen Materialien lauten wie folgt:

$$\text{DIERec} = (\text{KRA}_{\text{Primär}} * \text{substituierte Menge}) - (\text{KRA}_{\text{Sekundär}} * \text{verwertete Sekundärrohstoffmenge})$$

$$\text{DERec} = (\text{KRA}_{\text{Primär ohne Vorkette}} * \text{substituierte Menge}) - (\text{KRA}_{\text{Sekundär}} * \text{verwertete Sekundärrohstoffmenge})$$

Die Substitutionsverhältnisse bei der Verwertung von Sekundärprodukten (z.B. Sekundärmetall ersetzt entsprechenden Erzmengen), werden durch entsprechenden Substitutionsfaktoren abgebildet und zur Berechnung des DIERec und DERec jeder Substitutionsweg individuell erfasst und in die entsprechenden Formeln integriert. Der $\text{KRA}_{\text{Sekundär}}$ umfasst den Aufwand für das Sammeln, Transportieren und Verwerten der Sekundärmaterialien.

Die energetischen Nettoeffekte können analog über die Gegenüberstellung des KEA für Primärrohstoffe mit dem KEA ihres Substitutionsäquivalents der Sekundärrohstoffwirtschaft ermittelt werden. Zusätzlich können diese Salden unter Annahmen oder vorhandenen Informationen hinsichtlich des Energiemixes wiederum in entsprechende Mengen an Energieträger umgerechnet werden.

Die Methodik der Indikatoren DIERec und DERec sind anschlussfähig an die etablierten Inputindikatoren DMI (im Fall des DERec) und RMI (im Fall des DIERec) der gesamtwirtschaftlichen Materialflussrechnung. Der DIERec trägt somit den virtuellen primärrohstoffwirtschaftlichen Vorleistungen im Ausland Rechnung, der DERec hingegen den tatsächlichen im Inland verarbeiteten Materialmengen. Die Indikatoren zeigen an, um welchen Beitrag sich die Indikatoren DMI bzw. RMI erhöhen würden, wenn es keine werkstoffliche, rohstoffliche oder energetische Verwertung von Abfallstoffen und die Nutzung von Nebenprodukten gäbe. Der Indikator DIERec nimmt somit eine globale Rohstoffperspektive ein, die die ausländischen Vorketten der Importe als auch der Sekundärprozesse beachtet. Der DERec erfasst wiederum die Importe nur mit ihrem Eigengewicht und entspricht damit den Systemgrenzen des DMI.

Für die Ermittlung der Substitutionswirkung werden die ermittelten Verwertungsmengen an Sekundärmaterialien sowie deren substituierte Primärmaterialien mit KRA-Koeffizienten bzw. KEA-Koeffizienten verknüpft. Dazu wurden für jedes Sekundärmaterial bzw. Nebenprodukt und die verschiedenen durch sie substituierten Primärmaterialien entsprechende Prozesse in ecoinvent 3.2 identifiziert. Waren diese nicht vorhanden, z.B. für eine Reihe von rezyklierten Metallen, wurden diese Prozesse vom Projektteam auf Basis von vorhandenen ecoinvent-Daten der Primärprozesse selbst erstellt. Teilweise wurde aber auch auf Daten aus ecoinvent 2.2 zurückgegriffen, wenn den dort vorhandenen Prozessdaten eine größere Plausibilität zugesprochen wurde. Die jeweiligen KRA-Koeffizienten wurden mit Hilfe einer Methode berechnet, die in Saurat/Ritthoff (2013) dargestellt wird. Basis dieser Berechnung sind die Sachbilanzdaten, die in den ecoinvent-Datenbanken zu allen Prozessen in einheitlichem Format vorliegen. Ein Rechentool des Wuppertal Instituts (ein Life-Cycle-Impact Assessment (LCIA)-Methoden-Tool) ermöglicht es, dass diese Berechnung

der KRA-Koeffizienten in LCA-Software wie OpenLCA als Berechnungsmethode importiert werden kann, so dass für jeden Prozess in ecoinvent ein entsprechender KRA (oder RME) berechnet werden kann. Entsprechende LCIA-Methoden-Tools gibt es auch für den KEA.

Die Aufgabe des Projektes bestand somit darin, in ecoinvent entsprechende Prozesse zu identifizieren, die die Primärprozesse oder den Aufwand der Verwertungsprozesse der Sekundärmaterialien und damit die tatsächlichen Substitutionswirkungen darstellen können. Überwiegend gibt es in ecoinvent jedoch keine Prozessdaten, die konkret die deutsche Struktur abbilden. In der Regel gibt es Daten, die entweder den globalen Durchschnitt darstellen, sich auf den europäischen Durchschnitt beziehen oder den nationalen Fokus auf die Schweiz legen. Lagen verschiedene geographische Bezugsgrößen vor und sprachen keine inhaltlichen Überlegungen dagegen, dann wurde der geographisch am ehesten mit Deutschland zu vergleichende Prozess verwendet. Im Anhang III sind für jedes untersuchte Sekundärmaterial bzw. Nebenprodukt und für jedes daraus abgeleitete substituierte Primärmaterial dargestellt, welche konkreten ecoinvent-Prozesse als Datengrundlage zur Berechnung von DIERec und DERec bzw. der KEA herangezogen wurden.

2.3 Methodik zur ökonomischen Bewertung der untersuchten Verwertungswege

Neben einer Einsparung von Primärrohstoffen und Energie sind mit dem Recycling und dem Einsatz von Sekundärmaterialien sowie Nebenprodukten auch Kosteneinsparungen verbunden. Diese stellen einen der wichtigsten Treiber für die Verwendung von Sekundärmaterialien und Nebenprodukten gegenüber Primärmaterialien dar. Wie im Vorgängerprojekt (Wagner et al. 2012) wurde versucht, für die untersuchten Materialien einen Marktpreisvergleich zwischen Primär- und Sekundärmaterial durchzuführen. Allerdings wurde im Projektverlauf deutlich, dass nur wenige Preisinformationen zur Verfügung stehen und eine Hochrechnung des Kosteneffekts der Nutzung von Sekundärmaterialien für die Mehrheit der 30 untersuchten Materialien nicht möglich ist. Eine umfassende Hochrechnung der Kosteneinsparung durch den Vergleich der Preise von Primär- und Sekundärmaterialien scheiterte an folgenden Punkten:

- ▶ fehlende Preisangaben für Sekundär- wie Primärmaterial
- ▶ Preise für Edelmetalle sind identisch zwischen Primär- und Sekundärmaterial
- ▶ Einige der Preisangaben für Primär- und Sekundärmaterial beziehen sich auf unterschiedlichen Material-Qualitäten
- ▶ Bei einigen Sekundärmaterialien sind die Verarbeitungsqualitäten auch bei sortenreiner Sortierung nicht exakt identisch mit der Qualität des Primärmaterials, so dass Sekundärmaterialien nur mit einem deutlichen Preisabschlag verkaufbar sind.

Für typische Sekundärmaterialien wie Metallschrotte, Altkunststoffe, Altholz oder Altpapier werden Großhändler-Ankaufspreise in den wöchentlichen Marktberichten von EUWID publiziert. Allerdings werden nur wenige Preise für Primärmaterialien in ähnlicher Weise regelmäßig publiziert. Häufig liegen diese Daten nur auf Unternehmensebene vor, sind Vertragsbestandteil der Geschäftsbeziehung mit anderen Unternehmen und werden nicht nach außen kommuniziert. Daher wird sich in der Dokumentation der Preisentwicklung der untersuchten Materialien in Kapitel 9 auf EUWID-Daten konzentriert, die vor allem Kunststoffe und Metalle umfassen und für die sowohl Preise für Primär- als auch Sekundärmaterialien veröffentlicht werden. Für Altholz und Altpapier liegen aus den EUWID-Marktberichten zwar ebenfalls Sekundärrohstoffpreise vor, jedoch fehlen Preisangaben für die Primäräquivalente, so dass kein Bruttokosteneffekt abgeschätzt werden kann.

Bei Metallen besteht die Schwierigkeit, dass zwar häufig Börsenpreise zu finden sind, diese aber deutlich volatil als Schrottpreise sein können. Auf Grund von üblicherweise langfristigen Lieferverträgen und darin festgelegten Preisen bleibt zudem die Frage offen, ob diese Spot-Preise den tatsächlichen Preisen entsprechen. Die Spotpreise der LME (London Metal Exchange) werden in Dollar pro Tonne sowie als Kauf- oder Verkaufspreis publiziert. Für diese Studie wurden die Kaufpreise der LME verwendet. Für einen Vergleich mit den Schrottpreisen, die in EUWID in Euro/100kg veröffentlicht werden, kommt als weiterer Faktor der

Umtauschkurs Dollar/Euro hinzu, welcher die Preisunterschiede zwischen Sekundär- und Primärmetall beeinflussen kann.

Selbst wenn Primär- und Sekundärpreise für ein Material vorliegen, beziehen sich diese Preise nicht automatisch auf identische Materialqualitäten und sind deshalb nicht immer geeignet, um einen direkten monetären Kosteneffekt abzuleiten. So beziehen sich die Ankaufpreise für PP (Polypropylen) auf Produktionsabfälle, die als Folien-Waren in Ballen gehandelt werden und nicht auf Mahlgut oder Re-Granulat. Ballenwaren von Post-Consumer-Kunststoffen sind häufig deutlich preiswerter als Mahlgut. Altkunststoffe als Re-Granulat sind wiederum noch einmal deutlich teurer als Mahlgut. Je nach Aufbereitungsqualität sind entsprechende Aufbereitungsschritte wie Sortierung, Waschen und Granulierung notwendig, die sich in den Preisdifferenzen niederschlagen. Ebenso ist der Einschmelzaufwand von Schrott im Preis der Altschrotte nicht enthalten und letzterer daher nur bedingt mit den Preisen der fertigen Produkte aus Primärmaterial vergleichbar.

Die Preise für Primär-Kunststoffe und Altkunststoffe werden in EUWID monatlich in Euro publiziert. Altmetallpreise hingegen werden im wöchentlichen Turnus für unterschiedliche Qualitäten veröffentlicht. Diese wöchentliche Preisangabe wurde in dieser Studie auf monatliche Durchschnittspreise normiert. Als Primäräquivalent stehen für die Metalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink tägliche Spotpreise der LME zur Verfügung, die ebenfalls wöchentlich in EUWID publiziert werden. Ebenso der Wechselkurs des Dollars zum Euro. Für die Auswertung der Preisentwicklung der Jahre 2007 bis 2015 wurden für jeden Monat zwei Tagesnotierungen, zumeist ein Kurs am Monatsanfang und ein Kurs zur Monatsmitte verwendet, um daraus einen durchschnittlichen Monatskurs für den Zeitraum 2007 bis 2015 abzuleiten.

Da nur für wenige der untersuchten Materialien letztlich ein Kosteneffekt aus der Gegenüberstellung der Preise für Primär- und Sekundärmaterial ermittelt werden konnte und selbst in diesen wenigen Fällen nicht immer komplette Zeitreihen für den Zeitraum 2007-2015 vorlagen, wurde darauf verzichtet die Kosteneinsparungen über den gesamten Zeitverlauf abzuschätzen. Vielmehr werden die Größenordnungen der theoretischen Einsparungen in den möglichen Fällen für das Jahr 2013 ausgewiesen. Für diese Ableitung des theoretischen Kosteneffektes wurden die monatlichen Preisangaben des Jahres 2013 in einen Jahresdurchschnitt umgerechnet, der mit den entsprechenden Sekundärmaterialmengen und den daraus abgeleiteten substituierenden Mengen an Primärmaterial des Jahres 2013 multipliziert wurde.

3 Materialspezifische Stoffstrombilanzierung der Abfallwirtschaft

Voraussetzung für eine detaillierte Betrachtung der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe und Einordnung ihres volkswirtschaftlichen Nutzens ist ein übergeordnetes Verständnis für die aus Abfällen stammenden Materialströme vom Ort ihrer Entstehung bis hin zum abschließenden Verbleib.

Unter Anwendung einer umfassenden Stoffstrombilanzierung bildet das vorliegende Kapitel daher die ermittelten Massenströme der hochaggregierten Materialkategorien

- ▶ Fe- und NE-Metalle,
- ▶ Biogene Abfälle,
- ▶ Kunststoffe und
- ▶ Nichtmetallische Mineralien

von der Abfallerzeugung über die Behandlung in Aufbereitungsanlagen bis hin zur Verwertung bzw. Beseitigung ab. Durch die Wahl des Betrachtungszeitraums von 2007 bis 2013 können neben einer aktuellen Beschreibung der Materialströme in Deutschland zugleich Entwicklungen jüngster Zeit aufgezeigt werden.

Einschränkend sei erwähnt, dass die in diesem Kapitel vorliegenden Ergebnisse lediglich eine erste Übersicht zur Einordnung der betrachteten Materialströme darstellen. Unsicherheiten und Abweichungen sind aufgrund der angewandten Methodik (siehe Kapitel 2.1) nicht auszuschließen. Ursächlich ist insbesondere die Wahl eines durchschnittlichen Materialanteils je Abfallschlüssel für die Vielzahl an heterogenen Abfällen, die mit einem Abfallschlüssel zusammengefasst werden. Da diese Methode zur Charakterisierung sowohl für ein- als auch ausgehende Abfallmengen einer Behandlungsanlage Anwendung findet, können trotz Massenerhalt in der Realität Mengenabweichungen im Stoffstrommodell auftreten.

Eine Aussagefähigkeit für die Verwertungswege spezieller Materialarten ist vor diesem Hintergrund nicht gegeben. Diesbezüglich wird auf die detaillierten Darstellungen einzelner Materialien ab Kapitel 5 verwiesen.

3.1 Fe-Metalle

Dem Ergebnis der durchgeführten Stoffstrommodellierung nach enthielten die an inländischen Abfallbehandlungsanlagen registrierten Abfälle im Jahr 2007 rund 11,6 Mio. t Fe-Metalle. Wie die Sankey-Diagramm-Darstellung in Abbildung 3-1 zeigt, entfällt mehr als die Hälfte davon auf Bau- und Abbruchabfälle (ca. 55 %), des Weiteren insbesondere auf die Sektoren Thermische Prozesse, Altfahrzeugentsorgung und Siedlungsabfälle (insg. ca. 31 %).

Bis auf die zur Deponierung gehenden 1,1 Mio. t, welche größtenteils auf Rost-/Kesselaschen sowie Schlacken aus Kraftwerken und der Eisen-/Stahlindustrie zurückgehen, werden alle in Abfällen enthaltenen Fe-Metalle Behandlungsanlagen zugeführt. Im Sinne der Übersichtlichkeit fasst Abbildung 3-1 unter „Behandlungsanlagen“ alle in der Fachserie 19 Reihe 1 ausgewiesenen Behandlungsanlagen mit Ausnahme der getrennt dargestellten Entsorgungswege Deponien und Energetische Verwertung³ zusammen. Auf die ferromagnetischen Eigenschaften zurückgehend, ist eine verhältnismäßig leichte Rückgewinnung von Fe-Metallen aus Abfallgemischen gegenüber anderen Materialien möglich, was zu einer zurückgewonnenen Fe-Altschrottmenge von 9,5 Mio. t führt.

³ Thermische Abfallbehandlungsanlagen und Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung von Abfällen

Mit rund 7 Mio. t kann der Großteil der in Abfällen enthaltenen Fe-Metalle durch Abfallbehandlungsanlagen als Altschrott-Reinfraktion⁴ separiert und an Direktverwerter weitergeführt werden. Zusätzlich werden 2,5 Mio. t durch die Behandlung in weiteren Recyclingverfahren zurückgewonnen⁵.

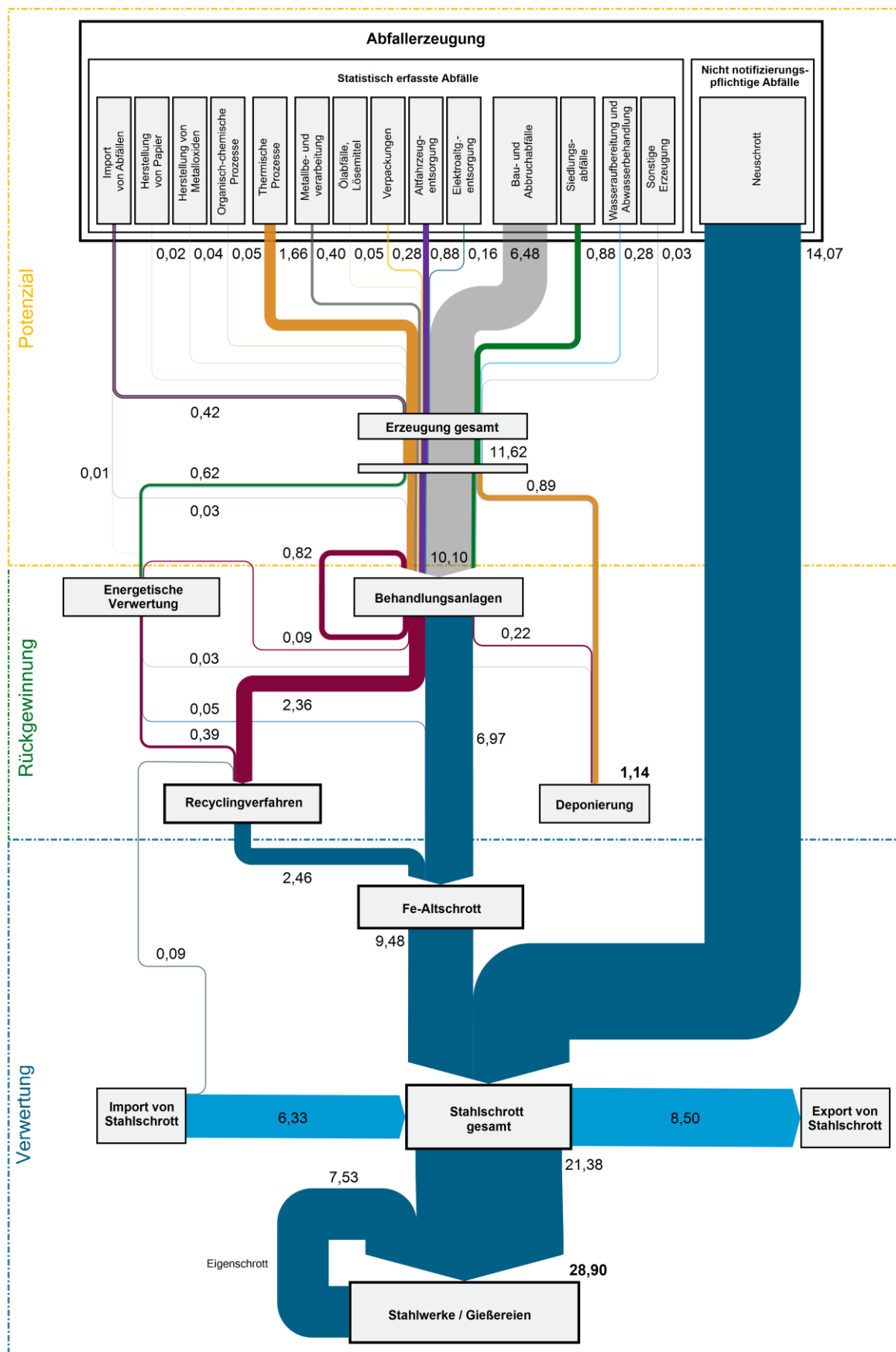
Parallel zur Altschrott-Rückgewinnung aus registrierten Abfällen bestehen in Deutschland darüber hinaus weitere Wirtschaftsstrukturen zur Fe-Schrott Erfassung und Verwertung in Stahlwerken und Gießereien. Hierbei handelt es sich zum einen um Produktionsreste aus Stahlwerken und Gießereien, sog. Eigenschrott, und zum anderen um Bearbeitungsreste aus der industriellen Fertigung und Verarbeitung von Stahl, sog. Neuschrott. In Summe bilden Eigenschrott, Neuschrott und abfallstämmiger Altschrott die im Jahr 2007 in Stahlwerken und Gießereien verwendete Stahlschrottmenge von 28,9 Mio. t (BDSV 2014), mit einem Rückgewinnungsanteil von rund 33 % aus registrierten Abfällen.

Durch den Stahlschrotteinsatz von 28,9 Mio. t konnten im Jahr 2007 rund 54 % der deutschen Stahlproduktion gedeckt werden.

⁴ Als Fe-Reinfraktionen werden die im Output von Behandlungsanlagen verzeichneten Abfallarten AS 170405, 190102, 191001 und 191202 bezeichnet.

⁵ Der Rückgewinnung in nachfolgenden Recyclinganlagen liegen Rückgewinnungsquoten von 95 % für die Behandlung von Fe-Reinfraktionen und 50 % für die Behandlung sonstiger Abfallarten zugrunde.

Abbildung 3-1: Stoffströme der Materialkategorie Fe-Metalle im Jahr 2007 in Mio. t



Da die Warenwege der Eigen- und Neuschrottmengen keiner systematischen Erhebung unterliegen, gehen die in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 dargestellten diesbezüglichen Materialströme auf Hochrechnungen zurück, die neben den berechneten Altschrottmengen auf den veröffentlichten Mengen der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen beruhen (BDSV 2014). Die im- und exportseitig berücksichtigten Stahlschrottmengen sind die unter der Warennummer WA7204 des Warenverzeichnisses für die Außenhandelsstatistik geführten Abfälle und Schrotte aus Eisen bzw. Stahl. Zusätzlich wird bzgl. der importierten Mengen an Schlacken, Aschen und Verbrennungsrückstände (WA2618, WA2619 und WA26211000) ein Eisengehalt von 10 % angenommen (siehe Anhang II).

Wie Abbildung 3-2 zeigt, betrug die im Jahr 2013 durch Abfallaufbereitung zurückgewonnene Fe-Altschrottmenge rund 11,1 Mio. t. Im Vergleich zum Jahr 2007 nahm damit nicht nur die in Abfällen enthaltene Fe-Metallmenge, sondern auch die durch Separation und Aufbereitung zurückgewonnene Altschrottmenge zu.

Der gegenüber dem Jahr 2007 (9,5 Mio. t) zu verzeichnende Anstieg ist vordergründig auf eine Zunahme der im Baubereich getrennt gesammelten Eisen- und Stahlabfälle (AS 170405) von 5,8 auf 7,1 Mio. t zurückzuführen. Ferner führte ein Ausbau der Getrenntsammlung von Siedlungsabfällen zu Zusatzmengen in der separaten Erfassung von Metallen (AS 200140) und metallhaltigen Abfällen wie elektrischen Geräten (AS 200135, 200136).

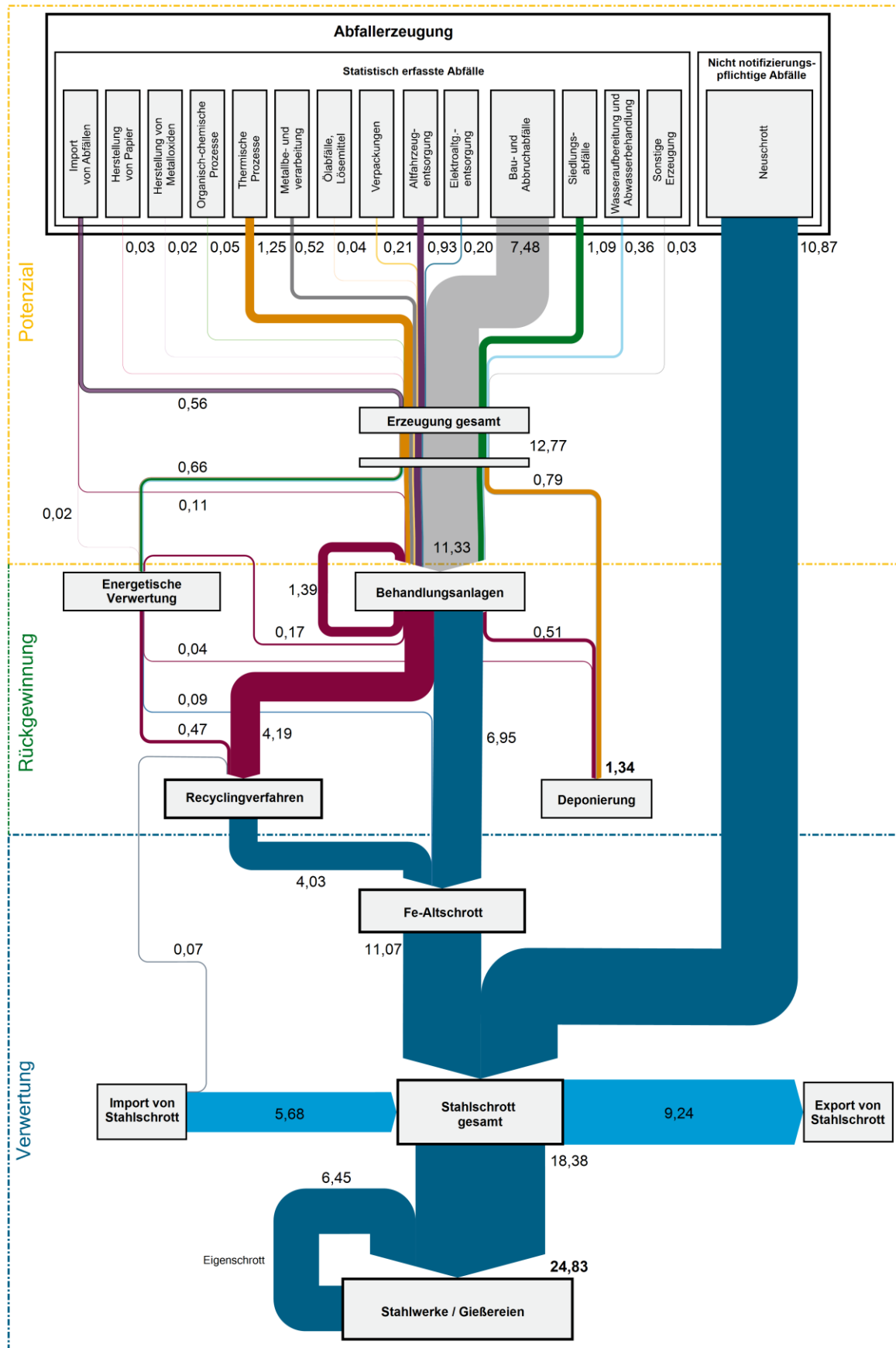
Die Bedeutung der Altschrottrückgewinnung aus Abfällen hat im betrachteten Zeitraum auch aus Sicht der Stahlindustrie zugenommen. Während die in Stahlwerken und Gießereien eingesetzten Schrottmengen auf 24,8 Mio. t zurückgingen, stieg der hierin enthaltene Schrottanteil aus Abfällen von 33 % im Jahr 2007 auf 45 % im Jahr 2013.

Tabelle 3-1: Stahlschrottverwendung in Stahlwerken und Gießereien in Mio. t

Einsatzort	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Stahlwerke	21,744	20,722	15,203	19,240	20,346	19,677	19,439
Gießereien	7,161	7,198	4,410	5,030	6,211	5,860	5,390
Summe	28,905	27,92	19,613	24,270	26,557	25,537	24,829

Quelle: BDSV (2014)

Abbildung 3-2: Stoffströme der Materialkategorie Fe-Metalle im Jahr 2013 in Mio. t



3.2 NE-Metalle

Das Abfallaufkommen Deutschlands enthält neben Fe-Metallen auch relevante Mengen an NE-Metallen, insbesondere Aluminium, Kupfer, Blei und Zink. Die an inländischen Abfallbehandlungsanlagen im Jahr 2007 registrierten Abfälle beinhalten rund 3,6 Mio. t NE-Metalle.

Der Großteil dieser NE-Metalle befindet sich in Abfällen aus Thermischen Prozessen (ca. 30 %) und der Bau- und Abbruchbranche (ca. 20 %). Ferner als mengenrelevant einzustufen sind NE-Metalle aus Siedlungsabfällen, der Entsorgung von Altfahrzeugen und der Metallbe- und -verarbeitung.

Wie Abbildung 3-3 zeigt, werden mit rund 0,7 Mio. t, insbesondere Schlacken sowie Rost- und Kesselasche aus Thermischen Prozessen, 19 % des NE-Metallaufkommens, ohne Behandlung direkt deponiert und somit der Möglichkeit einer Rückgewinnung als Sekundärrohstoff entzogen.

Aufgrund der mehrheitlichen Aufbereitung in Behandlungs- und sich weiter anschließenden Recyclinganlagen wurden dagegen im Jahr 2007 rund 1,4 Mio. t an NE-Metallen aus Abfällen zurückgewonnen. Davon werden bereits rund 0,8 Mio. t an Altschrott-Reinfraktionen⁶ in Abfallbehandlungsanlagen abgetrennt und direkt verwertet. Weitere 0,6 Mio. t NE-Metalle können durch zusätzliche Aufbereitungsschritte aus dem Abfallgemisch zurückgewonnen und der Altschrottverwertung zugeführt werden⁷.

Wie bei den Ergebnissen der Fe-Stoffstrommodellierung umfassen auch die in Abbildung 3-3 dargestellten, abfallstatistisch registrierten NE-Metallmengen der Metallbe- und -verarbeitung von rund 0,3 Mio. t nicht alle Bearbeitungsreste der industriellen Fertigung und Verarbeitung von NE-Metallen. Parallel zu den Abfallwirtschaftsstrukturen bestehen aus diesen Wirtschaftszweigen direkte Verwertungswege zu den Metallhütten und Gießereien.

Da keine diesbezüglichen Studien oder Erhebungen vorliegen, ist eine Benennung der nicht abfallrechtlich erfassten NE-Altschrotte aus industrieller Fertigung und Verarbeitung nicht möglich. Auch die Wirtschaftsvereinigung Metalle erfasst in ihrer Metallstatistik als NE-Altmetallmengen zum Recycling in Metallhütten und Gießereien zwar NE-Altschrotte aus Abfällen und Produktionsreste aus den Hütten/Gießereien, die bei der weiteren Produktverarbeitung der Metalle entstehenden Reste sind hingegen nicht enthalten (WVM 2015).

Daher ist davon auszugehen, dass die in der Metallindustrie tatsächlich verwerteten Sekundärmetallmengen die von der WVM veröffentlichten Mengen noch übersteigen (siehe Tabelle 3-2). Zumal neben dem Fehlen der Bearbeitungsreste die von der WVM benannten NE-Mengen lediglich die Metalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink enthalten.

⁶ Als NE-Reinfraktionen werden die im Output von Behandlungsanlagen verzeichneten Abfallarten AS 170401-170404, 170406-170409, 191002 und 191203 bezeichnet.

⁷ Der Rückgewinnung in nachfolgenden Recyclinganlagen liegen Rückgewinnungsquoten von 95 % für die Behandlung von NE-Reinfraktionen und 25 % für die Behandlung sonstiger Abfallarten zugrunde.

Tabelle 3-2: Verwendete Sekundärmetallmengen der NE-Metallerzeugung in Mio. t

NE-Metall	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Aluminium	0,836	0,721	0,561	0,611	0,634	0,635	0,597
Kupfer	0,364	0,389	0,379	0,302	0,308	0,293 ⁸	0,306 ⁸
Blei	0,244	0,302	0,300 ⁹	0,300 ⁹	0,321 ⁹	0,320 ⁹	0,270 ⁹
Zink	0,097	0,078					
Summe	1,541	1,490	1,240	1,213	1,263	1,248	1,172

Quelle: (WVM 2008-2014)

Aus den vorgenannten Gründen und hierdurch bestehenden Unsicherheiten für eine gesamtwirtschaftliche Darstellung der NE-Metallströme beschränkt sich die Ergebnisdarstellung in Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 auf die NE-Metallrückgewinnung aus Abfällen.

Gegenüber dem Jahr 2007 nahm die im Jahr 2013 aus Abfällen zurückgewonnene NE-Schrottmenge von rund 1,4 auf 1,9 Mio. t zu, was auf eine Überlagerung mehrerer Effekte zurückzuführen ist. Neben dem Wiedererstarren der Bauwirtschaft ab 2010 ist dies insbesondere der kurzzeitige Einfluss der Umwelt- bzw. Abwrackprämie aus dem Jahr 2009, durch die immerhin rund 1,9 Mio. Fahrzeuge abgemeldet und verschrottet wurden.

Haupttreiber für die Zunahme der NE-Schrottmengen über den gesamten Zeitraum 2007 bis 2013 ist allerdings der Anstieg an Nichteisenmetallen aus mechanischer Behandlung (AS 191203, insb. aus „Sortieranlagen insgesamt“ und „Sonstige Behandlungsanlagen“) von 0,4 (2007) auf 0,9 Mio. t (2013). Bedingt durch die angewandte statische Methodik, die Metallrückgewinnung in Recyclingverfahren über eine feste Rückgewinnungsquote zu berücksichtigen, erhöht die Mengen dieses Abfallschlüssels unmittelbar die NE-Schrottmenge. Würde die genannte Abfallmenge über den Zeitraum konstant verlaufen, wären die NE-Sekundärmetallmengen gemäß hier angewandter Methodik auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 und gemäß Veröffentlichung der Wirtschaftsvereinigung Metalle in der zeitlichen Entwicklungen nicht gegenläufig. Zur Erklärung des starken Anstiegs der statistisch verzeichneten Abfallmengen des Abfallschlüssels AS 191203 besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

⁸ Wert berechnet, da ab dem Jahr 2012 keine Getrenntausweisung von sekundärem Kupfer mehr erfolgt. Annahme: 43 % des raffinierten Kupfers geht auf Sekundärkupfer zurück (Mittelwert der Jahre 2010 und 2011).

⁹ Gemeinsame Ausweisung von Blei und Zink ab dem Jahr 2009

Abbildung 3-3: Stoffströme der Materialkategorie NE-Metalle im Jahr 2007 in Mio. t

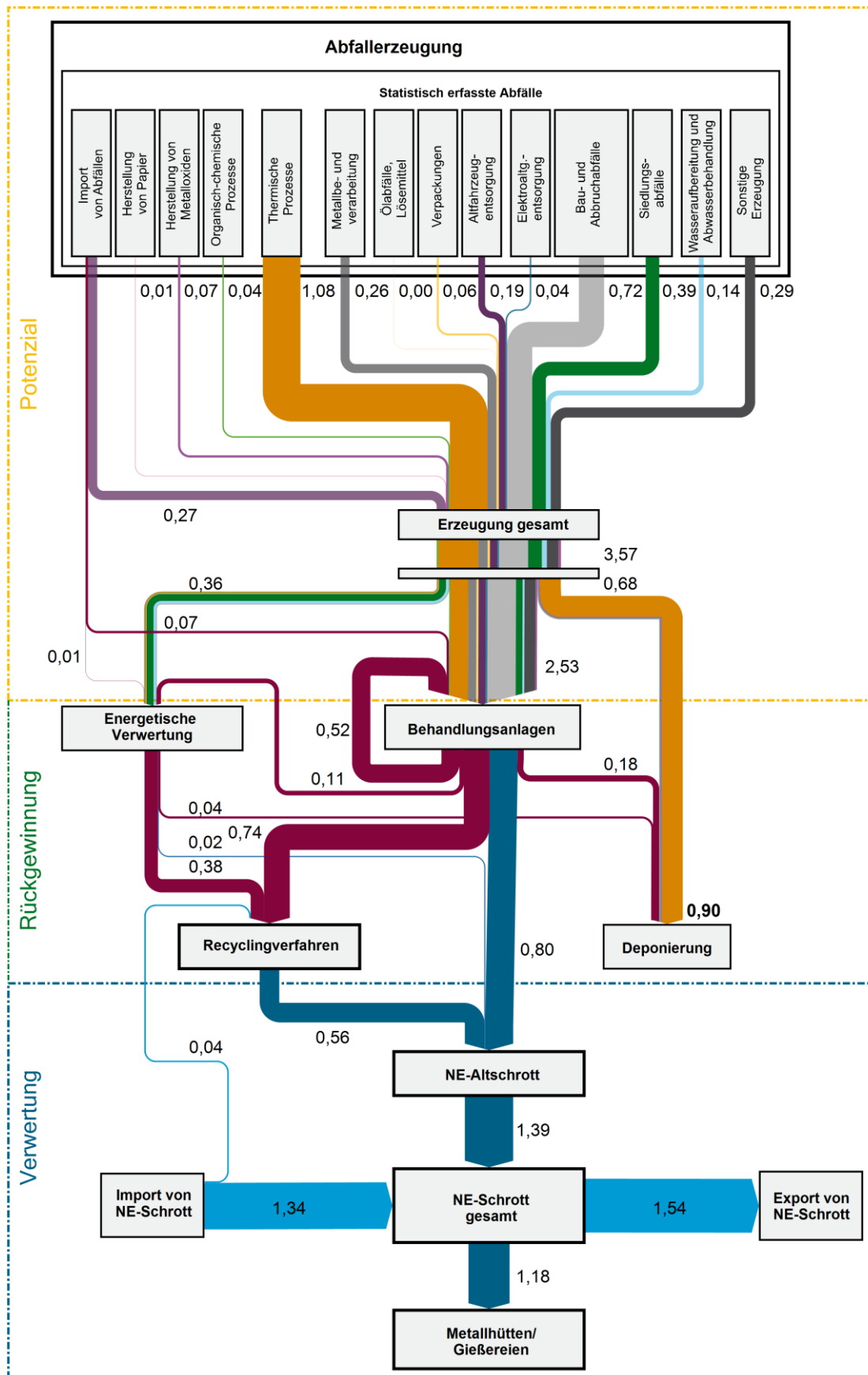
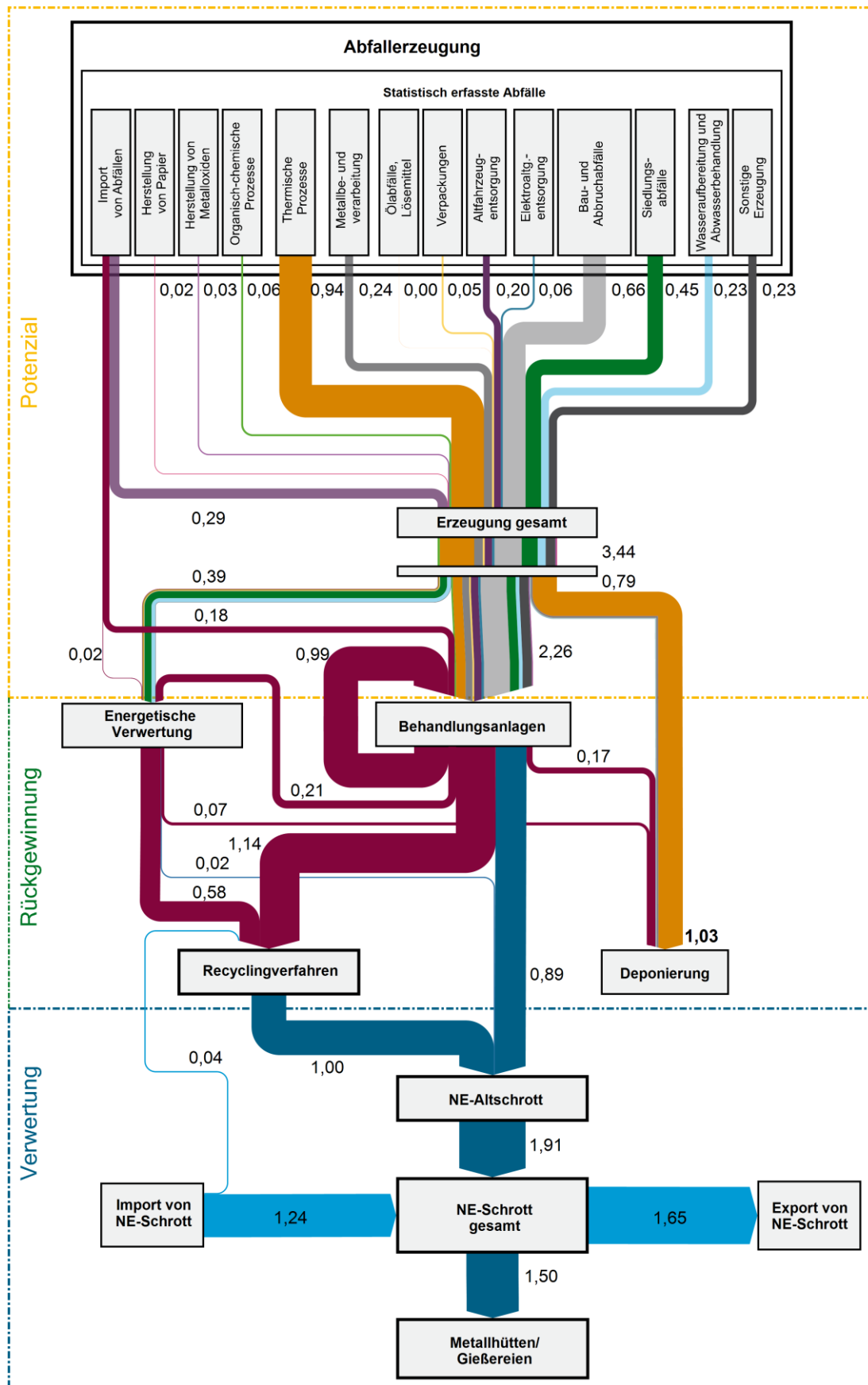


Abbildung 3-4: Stoffströme der Materialkategorie NE-Metalle im Jahr 2013 in Mio. t



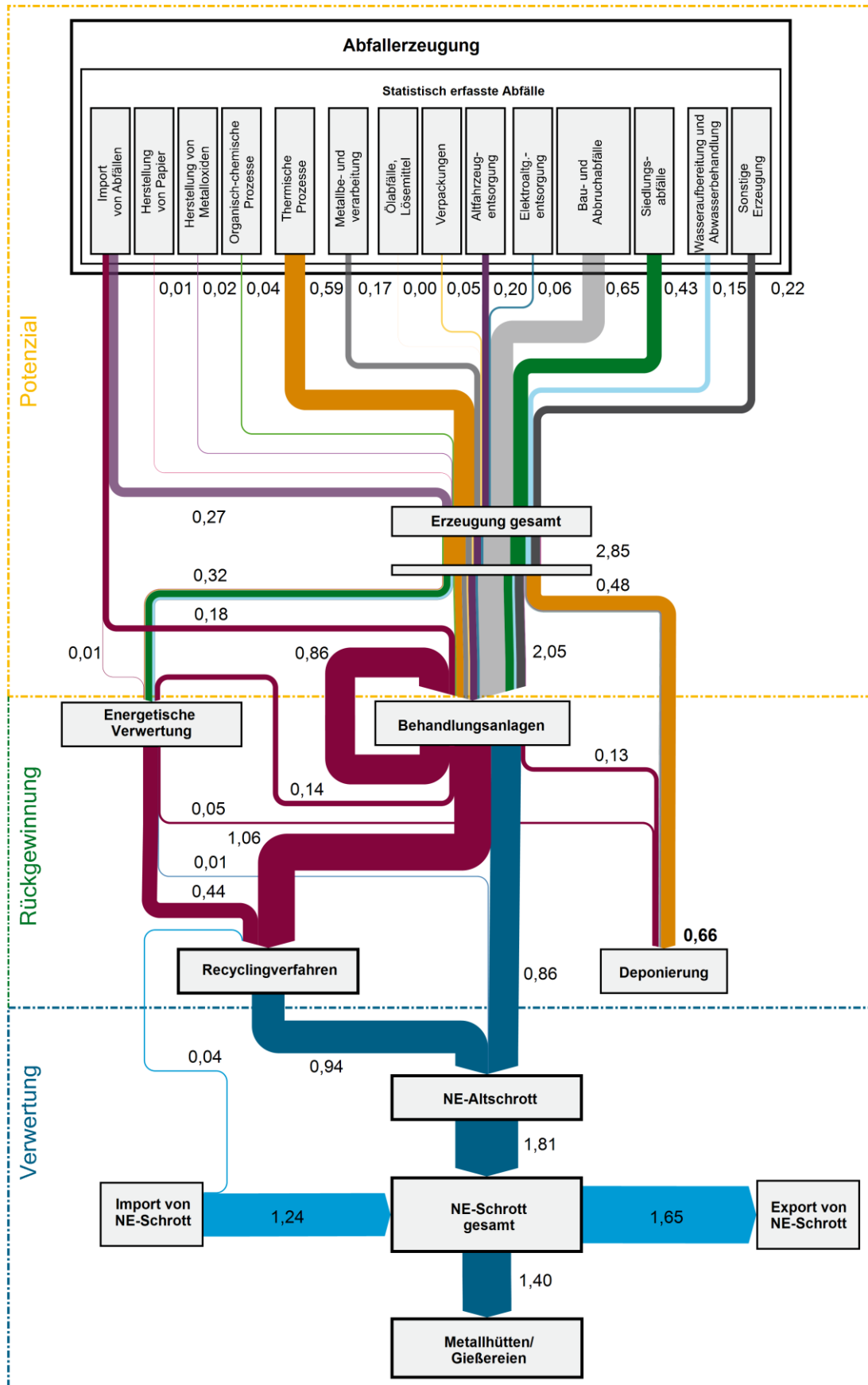
Der Sammelbegriff „Nichteisenmetalle“ fasst streng genommen alle Metalle und Metall-Legierungen zusammen, in denen der Anteil an Reineisen 50 Ma.-% nicht übersteigt. Die hinsichtlich ihrer weltweiten Produktionsmenge relevantesten NE-Metalle sind in absteigender Reihenfolge Aluminium, Kupfer, Zink und Blei, sowie mit einigem Abstand Nickel¹⁰. Aber auch Edelmetalle wie Gold, Silber und Platin sowie Metalle der seltenen Erden sind für die Industrie wichtige Metalle und damit wirtschaftlich bedeutsam. Insgesamt ist der Großteil der Elemente des Periodensystems zu den NE-Metallen zu zählen.

Aufgrund großer natürlicher Vorkommen und einer leichten Gewinnung sind einige der NE-Metalle jedoch aus wirtschaftlichen Gründen für das Recycling aus Abfällen bisher nicht von Bedeutung. Bezüglich ihres Mengenanteils in Abfällen von besonderer Relevanz sind diesbezüglich Kalium und Natrium (Alkalimetalle) sowie Calcium (Erdalkalimetall). Mit dem Ziel sich auf die tatsächliche Sekundärrohstoffwirtschaft zu fokussieren und kein verzerrtes Bild wiederzugeben, werden diese Elemente in der Stoffstrommodellierung nicht berücksichtigt. Folglich sind sie auch in der Ergebnisdarstellung in Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 nicht enthalten.

Welchen Anteil allein die mengenrelevanten NE-Metalle Aluminium, Kupfer, Zink, Blei und Nickel an den innerdeutschen Abfallströmen haben, verdeutlicht eine auf diese Elemente beschränkte Stoffstrommodellierung für das Jahr 2013 (Abbildung 3-5). Mit einer aus Abfällen zurückgewonnenen NE-Schrottmenge von rund 1,8 Mio. t vor Im- und Export stellen diese fünf Metalle bereits 95 Ma.-% der gesamten NE-Sekundärmetallmenge.

¹⁰ Weltweite Produktionsmenge 2013: Aluminium 57,2 Mio. t, Kupfer 21,0 Mio. t, Zink 13,1 Mio. t, Blei 10,6 Mio. t, Nickel 2,0 Mio. t (Statista 2015)

Abbildung 3-5: Stoffströme der NE-Metalle Aluminium, Kupfer, Zink, Blei, Nickel im Jahr 2013 in Mio. t



3.3 Biogene Abfälle

Die Materialkategorie „Biogene Abfälle“ ist eine Gruppierung aller auf natürlichem Wege entstandenen Organik. Im Rahmen der Stoffstrombilanzierung hochaggregierter Materialkategorien im Kapitel 3 werden nachfolgende wesentliche Abfallströme mit biogenem Ursprung betrachtet:

- ▶ Altholz,
- ▶ Papier, Pappe, Kartonage,
- ▶ Klärschlamm und
- ▶ Sonstige biogene Abfälle (Küchen-, Gartenabfälle etc.).

Da die Zuordnung einiger organischer Materialien zu der Bezeichnung biogene Abfälle unscharf ist, bedarf es einer genauen Eingrenzung des Bilanzierungsrahmens. Wir beschränken uns daher auf das Potenzial biogener Abfälle, welches die statistisch erfassten Systeme der Abfallwirtschaft durchlaufen oder durchlaufen könnten und ermöglichen somit die Fortschreibung der aufgezeigten Ergebnisse.

Damit umfasst die Modellierung z.B. die gemäß Fachserie 19 Reihe 1 unter der Gruppennummer AS 2002 erfassten Gartenabfälle aus Privathaushalten sowie Grünabfälle aus der Landschaftspflege von Erholungsflächen, Friedhöfen etc., nicht aber das bei Pflegemaßnahmen anfallende Straßen- und Schienenbegleitgrün. Gleichermaßen außen vor ist das bei der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen meist ungenutzt im Wald verbleibendes Waldrestholz und Ähnliches. Diese Beispiele zeigen, dass eine umfängliche Bilanzierung aller biogenen Abfälle im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht möglich ist.

Mit Blick auf die seit 1. Januar 2015 geltende Pflicht zur Getrenntsammlung von Bioabfällen und dem hiermit verbundenen abfallwirtschaftlichen Umbruch in einigen Entsorgungsgebieten (Einführung der Biotonnensammlung, Anpassung der bestehenden Sammelsysteme etc.) nimmt die Betrachtung der Küchen- und Gartenabfälle aus Privathaushalten eine Sonderrolle ein. Wie sich bereits seit 2012/2013 andeutete, ist ein Anstieg der Biogutmengen bei gleichzeitigem Rückgang der im Restabfall und im eigenen Garten entsorgten Bioabfälle in den nächsten Jahren zu erwarten. Um diese Stoffstromverschiebungen auch zukünftig darstellen zu können, wird auf die Erkenntnisse des 2014 abgeschlossenen Forschungsprojektes mit dem FKZ 371233328 zurückgegriffen (Krause, Peter et al. 2014). Es werden die dort für das Jahr 2010 kalkulierten Bioabfallmengen der Eigenkompostierung in der Stoffstrommodellierung der weiteren Jahre in Abhängigkeit von den erfassten Restabfall-, Biogut- und Grüngutmengen fortgeführt.

Ebenso umfasst die Modellierung der Altpapierströme neben den statistisch erfassten Abfällen die nicht notifizierungspflichtigen Altpapiermengen aus gewerblicher Nutzung / Industrie. Da deren Entsorgungswege keiner Veröffentlichungspflicht unterliegen, basiert die Stoffstrommodellierung für Altpapier auf der Statistik des Verbandes Deutscher Papierfabriken, die den Altpapierverbrauch an innerdeutschen Papierfabriken ausweist (siehe Anhang II). Ausgehend vom Altpapierverbrauch lässt sich unter Einbezug von Im- und Export sowie der Entsorgungswege des statistisch erfassten Altpapiers auf die aus dem Gewerbebereich stammende Altpapiermenge rückschließen.

Die in Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 dargestellten Ergebnisse für die Materialkategorie Biogene Abfälle weisen alle Stoffströme als Frischmasse aus. Eine Darstellung von Trockenmassen durch pauschale Ansätze für den Wassergehalt der betrachteten Abfallarten wäre zwar vorstellbar, wird der Vielfalt innerhalb einer Abfallart (z.B. Entwässerungsschlämme, Biotonnen oder Speiseabfälle) jedoch nicht gerecht und würde somit die Präzision der Modellierung verschlechtern. Zugleich vereinfacht die Modellierung von Frischmassen die zukünftige Fortschreibung anhand der Fachserie 19 Reihe 1.

Von dieser Darstellungsweise am meisten betroffen ist die Modellierung von Klärschlamm, dessen Bemessungsgröße häufig Trockenmasse ist. Für eine ausführliche Betrachtung der Klärschlammherzeugung und -verwertung aus öffentlicher Abwasserreinigung als Trockenmasse sei auf die 2013 erstmalig beim Statisti-

schen Bundesamt erschiene Veröffentlichung „Abwasserbehandlung Klärschlamm“ verwiesen (Statistisches Bundesamt 2013).

Abbildung 3-6: Stoffströme der Materialkategorie Biogene Abfälle im Jahr 2007 in Mio. t

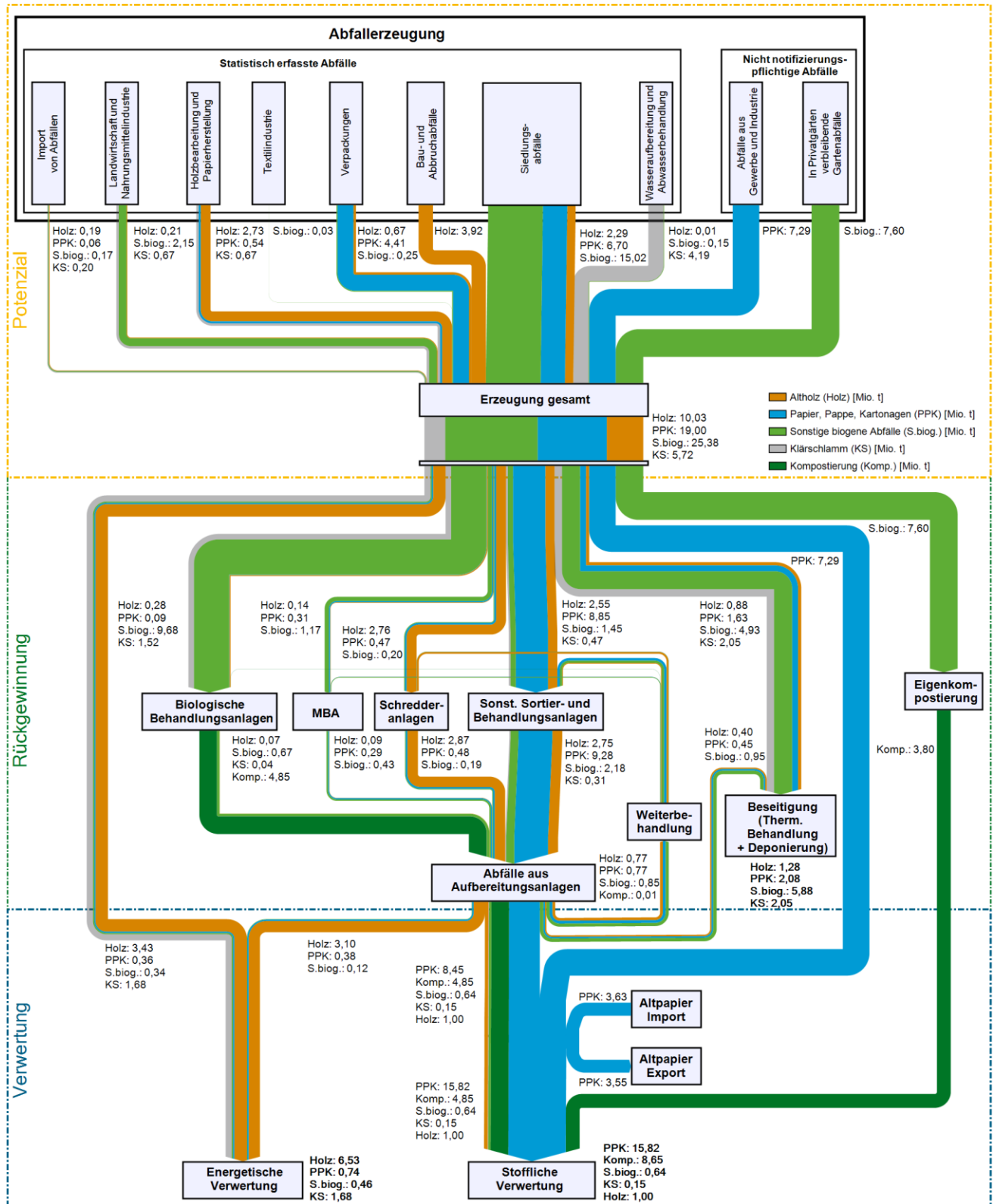
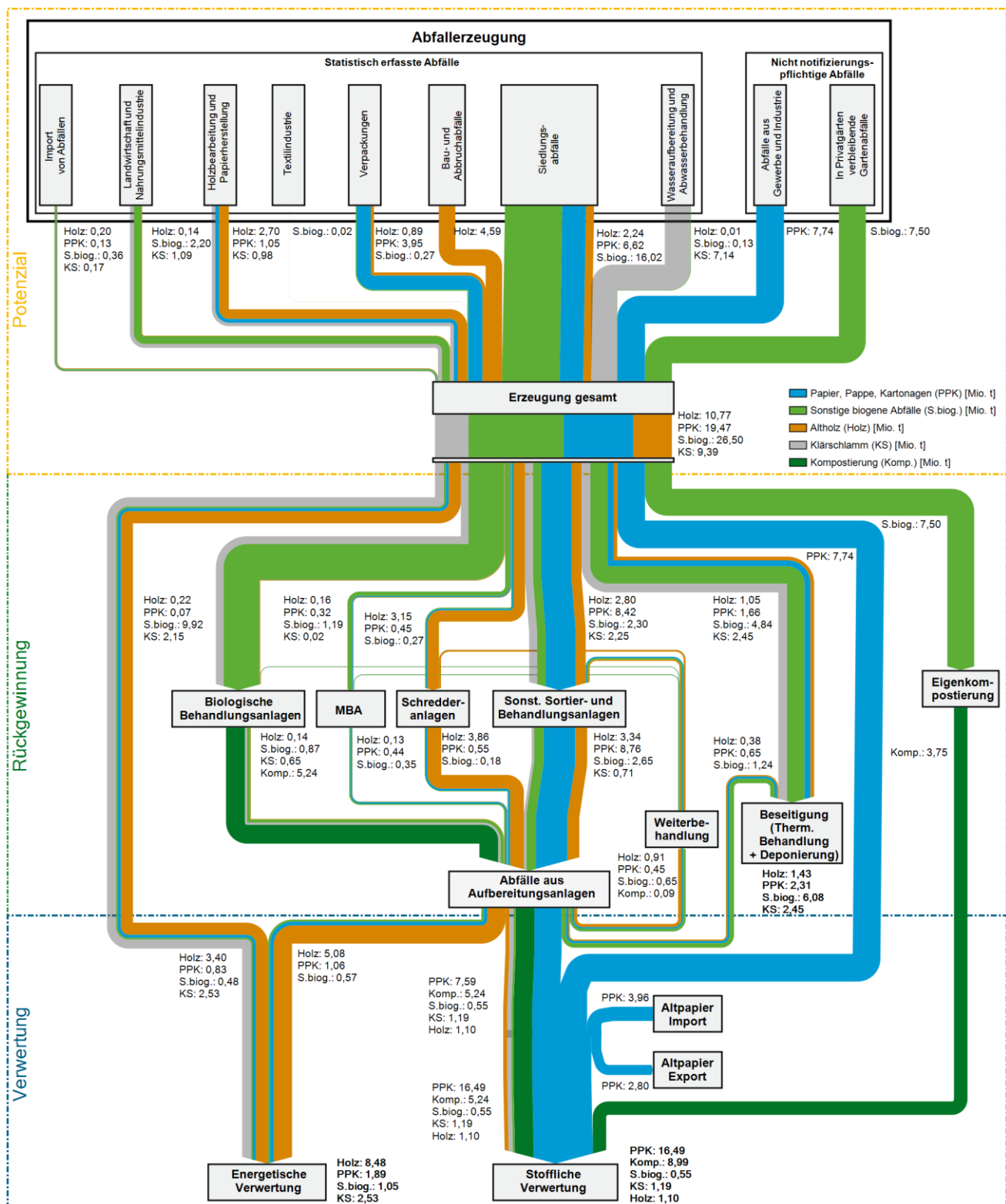


Abbildung 3-7: Stoffströme der Materialkategorie Biogene Abfälle im Jahr 2013 in Mio. t



Wie die Ergebnisse für das Jahr 2007 grundsätzlich zeigen, stellen die Sonstigen biogenen Abfälle mit 25,4 Mio. t den größten Anteil am biogenen Abfallaufkommen. Deren Ursprung liegt hauptsächlich im Siedlungsabfallbereich und beinhaltet sowohl getrennt gesammeltes Bio- und Grüngut als auch die in gemischten Siedlungsabfällen (Hausmüll, Gewerbeabfälle) enthaltene Organik. Durch die differenzierende Darstellung der Behandlungsanlagen in Biologische -, Mechanisch-Biologische -, Schredder - und Sonstige Behand-

lungsanlagen wird ersichtlich, dass durch die Behandlung der getrennt gesammelten Bioabfälle in biologischen Behandlungsanlagen knapp 5 Mio. t Kompost und Gärrückstände erzeugt und anschließend stofflich verwertet wurden, während ein Großteil der mit den gemischten Siedlungsabfällen erfassten Organik thermischen Behandlungsanlagen zugeführt wird.

Das vornehmlich in der Baubranche, bei der Holzbearbeitung und als Siedlungsabfallbestandteil anfallende Altholz wird dagegen mehrheitlich energetisch verwertet (direkt oder im Anschluss an eine mechanische Aufbereitung) oder thermisch behandelt.

Eine Aufbereitung der in gemischten Siedlungsabfällen enthaltenen Altpapiere zu einer für die stoffliche Verwertung annehmbaren Qualität ist in der Regel nicht möglich. Daher sind es insbesondere diese Altpapiermengen, die als Bestandteil eines Gemisches über thermische Behandlungs- oder energetische Verwertungsanlagen entsorgt werden. Obwohl es sich bei diesen in Abfallgemischen enthaltenen Altpapiermengen immerhin um rund 3 Mio. t handelt, wird Altpapier aufgrund der bestehenden Getrenntsammlung mehrheitlich stofflich verwertet.

Die sich aus dem Vergleich der Jahre 2007 und 2013 vordergründig abzeichnenden Entwicklungen betreffen insbesondere die Entsorgung der sonstigen biogenen Abfälle und des Klärschlammes.

Durch den Ausbau der Getrenntsammlung von Bioabfällen stieg die in biologischen Behandlungsanlagen verarbeitete Abfallmenge und folglich auch die verwertete Kompost- / Gärproduktmenge von 4,9 auf 5,2 Mio. t. Der abrupte Sprung des Klärschlammaufkommens von 5,7-6,3 Mio. t FM in den Jahren 2007 bis 2010 auf rund 9,4 Mio. t FM im Jahr 2013, insbesondere auf die Behandlungsrückstände aus der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung zurückzuführen, lässt sich nicht ohne Weiteres erklären. Denkbar ist eine Änderung in der statistischen Erfassung von Klärschlämmen und deren Behandlungsprodukte.

3.4 Kunststoffe

Mit der Stoffstrombilanzierung hochaggregierter Materialkategorien des vorliegenden Kapitels wird die Gesamtheit aller in Abfallströmen enthaltenen erdölbasierenden Kunststoffe betrachtet. Neben den Kunststoffen der offensichtlichen Anwendungsbereiche als Verpackungsmaterial, Baustoff oder Automobilteil werden auch weniger offensichtliche Kunststoffe, wie z.B. Textilien, Schuhe, Gummi (Synthesekautschuk), Lacke, Klebstoffe, und Anteile an Verbundmaterialien mit in die Bilanzierung einbezogen.

Die für Deutschland umfassendste Betrachtung der Kunststoffindustrie von der Erzeugung über die Verarbeitung und den Verbrauch bis hin zur Verwertung erfolgt in der von Consultic erarbeiteten Studie „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland“ (Consultic 2008-2016), welche im Auftrag des Verbandes der Kunststoffherzeuger PlasticsEurope, dem Beratungsnetzwerk BKV, dem bvse u.a. regelmäßig alle zwei Jahre erscheint.

Der Methodik dieses Arbeitspaketes zur Stoffstrombilanzierung entsprechend, wird das in Abfallströmen enthaltene Aufkommen an Kunststoffen auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 in Verbindung mit entsprechenden Materialanteilen aus Abfallsortieranalysen modelliert (Kunststoffanteile siehe Anhang II). Hinsichtlich der Darstellung von Produktionsresten aus Kunststoffproduktion und -verarbeitung, die nicht als Abfälle deklariert sind, erfolgt eine Ergänzung anhand der Ergebnisse der Consultic-Studie. Aufgrund des Rückgriffs auf die alle zwei Jahre erscheinende Consultic-Studie können für Kunststoffe nur Stoffstromdarstellungen der Jahre 2007, 2009, 2011, 2013 und 2015 erstellt werden.

Im Ergebnis der Stoffstrommodellierung betrug das inländische Aufkommen an Kunststoffabfällen im Jahr 2007 rund 7,7 Mio. t, von denen gemäß Consultic 1,1 Mio. t¹¹ auf Abfälle aus der kunststoffproduzierenden und verarbeitenden Industrie entfallen. Demgegenüber ist für das Jahr 2013 mit einem Kunststoffabfallaufkommen von rund 8 Mio. t ein leichter Anstieg zu verzeichnen, wobei ca. 0,9 Mio. t davon auf die Kunststoffindustrie zurückgehen.

Für das Jahr 2013 benennen Consultic die Menge an Kunststoffabfällen dagegen mit 5,7 Mio. t (Consultic 2008-2016). Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Differenz von mehr als 2 Mio. t teilweise methodischen Ursprungs, in Anwendung unterschiedlicher Betrachtungsräume, ist. So werden im vorliegenden Forschungsprojekt auch mit den Erfassungssystemen für Bioabfälle, Textilien, medizinische Abfälle, Bauabfälle, Lacke/Farben u.a. erfasste Kunststoffanteile bzw. Kunststoffbestandteile mit einbezogen. Ferner ist ein Großteil der Differenz auf unterschiedliche Ansätze beim Kunststoffanteil an gemischten Siedlungsabfällen (Hausmüll und Gewerbeabfälle) zurückzuführen. Unter Berücksichtigung aller Kunststoffe auf Basis fossiler Rohstoffe schätzt die vorliegende Studie anhand diverser Sortieranalysen den Anteil am Hausmüll auf 15 %. Eine zu Projektende im Juli 2017 erschienene Auswertung weiterer Restabfallanalysen, anhand derer sich der Kunststoffanteil über alle Sortierfraktionen auf 13 - 14 % abschätzen lässt, plausibilisiert den Studienansatz (Bothe 2017).

Der Vergleich der Ergebnisse der Stoffstrommodellierung mit jenen der Consultic-Studie verdeutlicht die Unsicherheiten mit denen Hochrechnungen von Einzelergebnissen auf Gesamtmengen Deutschlands generell behaftet sind. In Einordnung und Bewertung der Ergebnisse beider Studien lässt sich für die Materialkategorie Kunststoffe zusammenfassen, dass das tatsächliche Kunststoffabfallaufkommen Deutschlands im Jahr 2013 bis zu 8 Mio. t betrug.

In methodischer Konsistenz dieses Arbeitspaketes zur Stoffstrombilanzierung aggregierter Materialkategorien wird das Aufkommen an Kunststoffabfällen anhand der eigenständigen Stoffstrommodellierung ausgewiesen.

¹¹ Davon in der Fachserie 19 Reihe 1 an Abfällen aus Kunststoffproduktion und -verarbeitung statistisch erfasst: 0,35 Mio. t

Die Kunststoffmengen aus Abfallbehandlungsanlagen auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 präzise aufzuzeigen, ist aufgrund von Mehrfachbehandlungen in verschiedenen Anlagen und zunehmender Aggregation diverser Inputströme zu Abfallschlüsselnummern 19... (gemäß AVV) kaum möglich. Die im Jahr 2007 auftretenden Mengendifferenzen zwischen In- und Output sind hierauf zurückzuführen. Eine Abgrenzung zwischen stofflicher und energetischer Verwertung kann nur überschlägig erfolgen.

Vor diesem Hintergrund erfolgt zur Darstellung der stofflich verwerteten Kunststoffmengen in Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 ein Rückgriff auf die differenzierenden Untersuchungen des Kapitels 7.

Demnach wurden im Jahr 2013 knapp 2,5 Mio. t Kunststoffabfälle einer stofflichen Verwertung zugeführt, unter Berücksichtigung von Im- und Exporten rund 1,6 Mio. t in Deutschland.

Mit rund 2,4 Mio. t stofflich verwerteten Kunststoffen weicht die von Consultic ausgewiesene Menge nur geringfügig ab. Somit lässt sich die zuvor diskutierte Abweichung des Kunststoffabfallaufkommens auf Unsicherheiten bei den energetisch verwerteten Abfallmengen eingrenzen.

Abbildung 3-8: Stoffströme der Materialkategorie Kunststoffe im Jahr 2007 in Mio. t

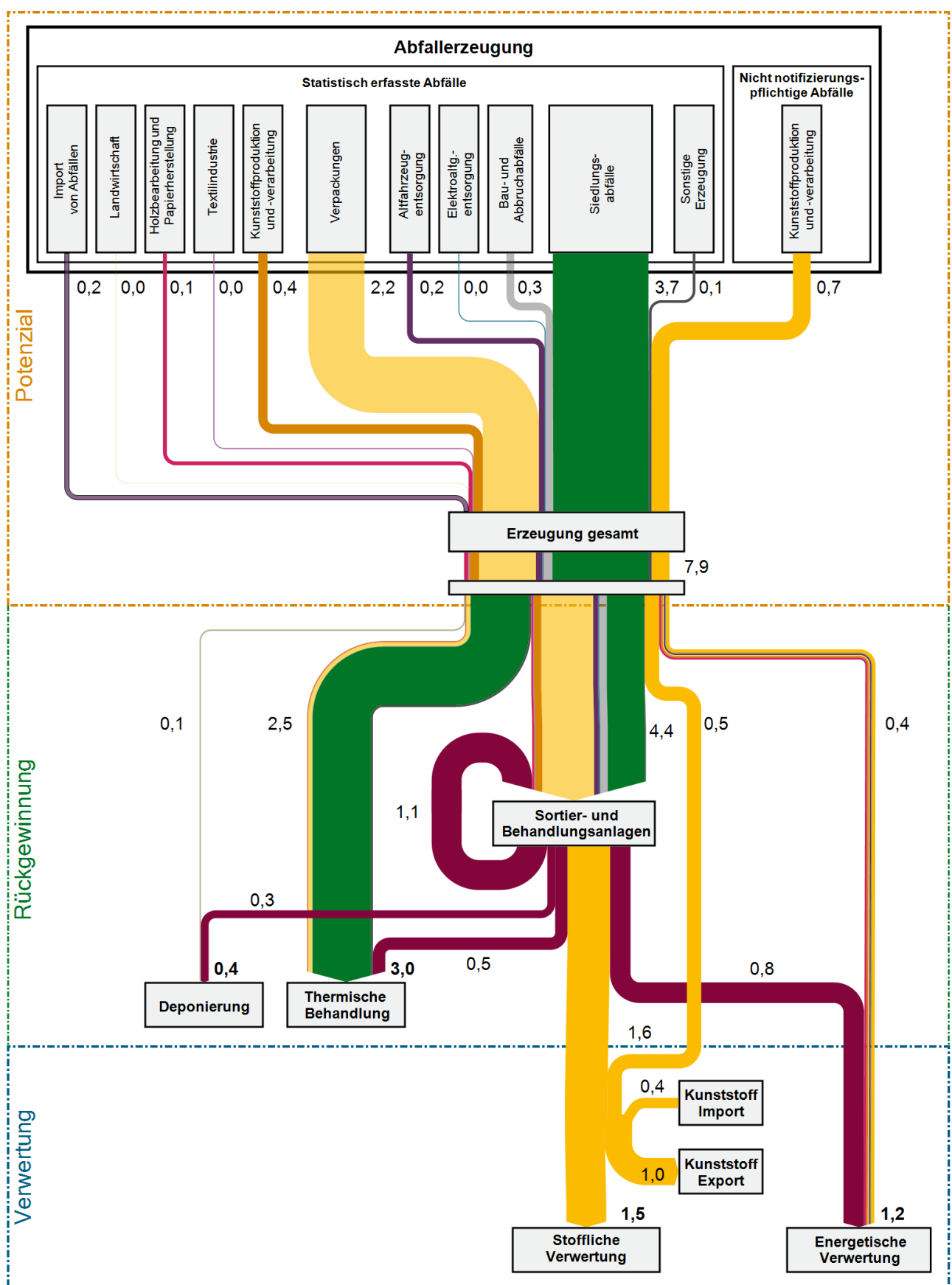
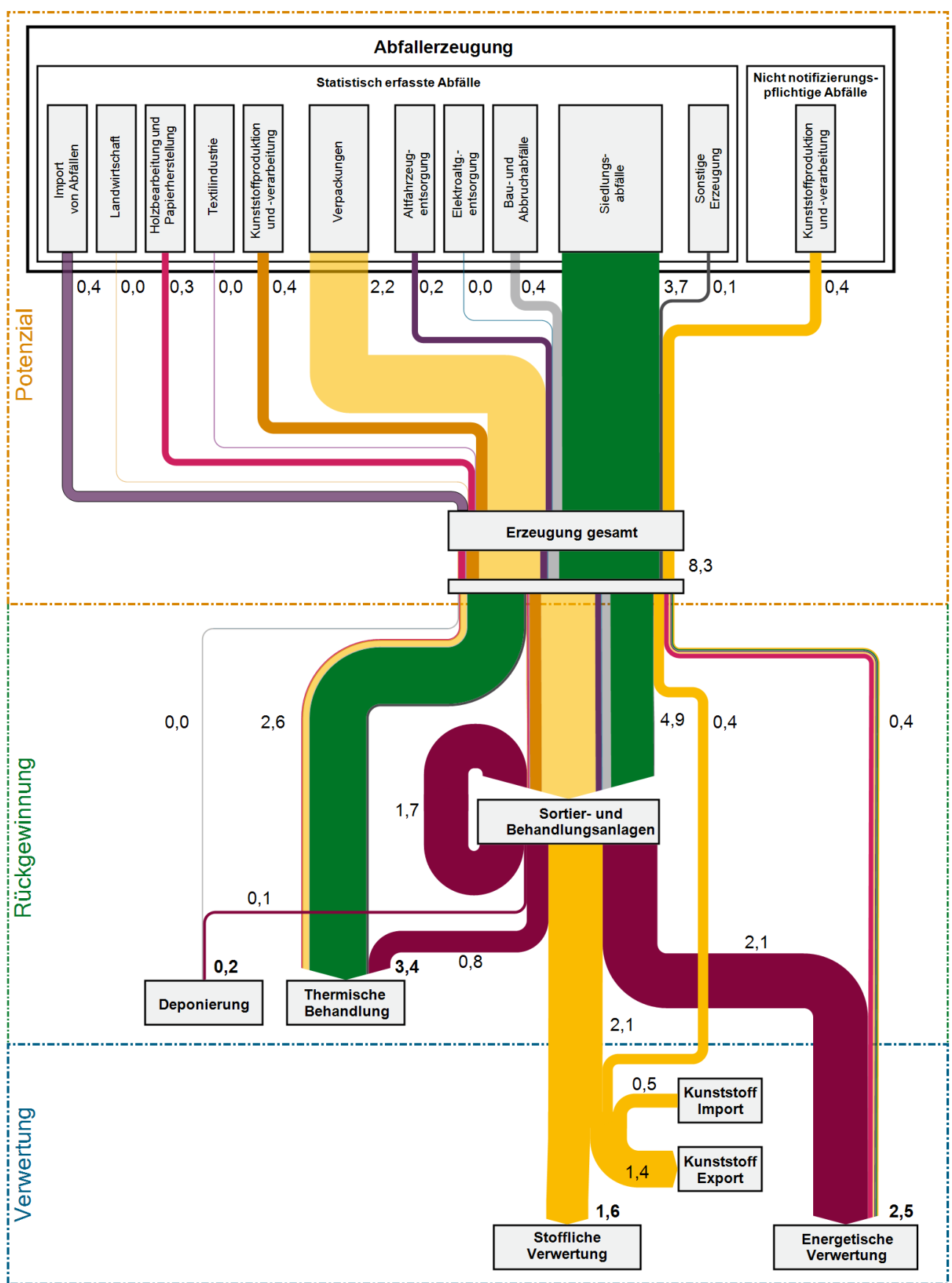


Abbildung 3-9: Stoffströme der Materialkategorie Kunststoffe im Jahr 2013 in Mio. t



3.5 Nichtmetallische Mineralien

Eine ausführliche Betrachtung zu Aufkommen und Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen erfolgt durch die alle zwei Jahre veröffentlichten Monitoring-Berichte der Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (KWB (2011-2015)). Diese stützen sich ebenfalls auf die durch das Statistische Bundesamt in der Fachserie 19 Reihe 1 dokumentierten Abfallmengen und die hierin aufgezeigten Verwertungswege. Im Sinne einer übersichtlicheren Darstellung führen die Monitoring-Berichte die aus Sicht der Baubranche relevanten, nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfallarten der Fachserie zu fünf Abfallgruppen zusammen (Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Zuordnung von Abfallarten nach AVV zu Abfallgruppen

Abfallgruppe	Abfallarten nach Kreislaufwirtschaft Bau	Abfallarten nach studienkonsistenter Methodik
Bauschutt	AS 170101, AS 170102, AS 170103, AS 170107	AS 170101, AS 170102, AS 170103, AS 170107
Straßenaufbruch	AS 170302	AS 170302
Bodenaushub	AS 170504, AS 170506, AS 170508	AS 170504, AS 170506, AS 170508
Bauabfälle auf Gipsbasis	AS 170802	AS 170802
Baustellenabfall	AS 170201, AS 170202, AS 170203 AS 1704, AS 170604, AS 170904	AS 170904

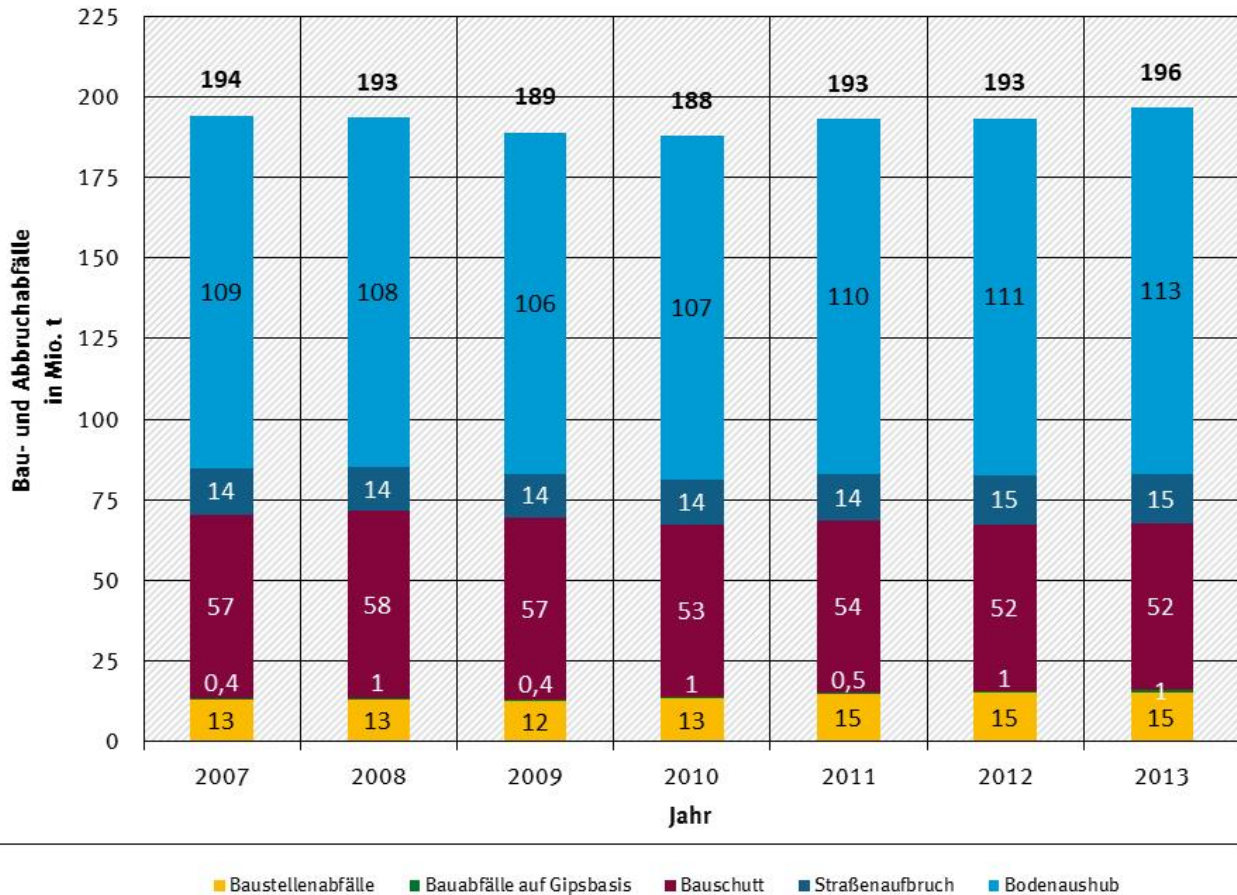
Gemäß Kreislaufwirtschaft Bau (KWB (2011-2015) und studienkonsistenter Methodik

Wie die Entwicklungen des betrachteten Zeitraums zeigen, betrug das Aufkommen an Bau- und Abbruchabfällen trotz baukonjunktureller Schwankungen relativ konstant 188 bis 196 Mio. t (Abbildung 3-10). Damit stellen Bau- und Abbruchabfälle den größten Abfallstrom Deutschlands dar.

Abbildung 3-10: Bau- und Abbruchabfallaufkommen 2007 bis 2013

Aufkommen an Bau- und Abbruchabfällen

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2013



Quelle: Fachserie 19 Reihe 1 (Statistisches Bundesamt (2009-2015))

Ein unmittelbarer Vergleich zwischen den dokumentierten Bau- und Abbruchabfällen der Fachserie 19 Reihe 1 und der Aufbereitung im KWB-Monitoring-Bericht ist lediglich in den geraden Jahren möglich. Der Zweijahresrhythmus der KWB-Veröffentlichung liegt darin begründet, dass die statistische Erhebung für Bauschuttaufbereitungs- und Asphaltmischanlagen nur in den geraden Jahren durchgeführt wird. Zwangsläufig beinhalten auch die Daten der Fachserie 19 Reihe 1 in den ungeraden Jahren für diese beiden Anlagentypen die Abfälle des Vorjahres. Bau- und Abbruchabfälle aller anderen Abfallanlagen werden dagegen jährlich bilanziert.

Da eine jährliche Darstellung des gesamten Betrachtungszeitraumes 2007 bis 2013 nur unter Rückgriff auf die Fachserie 19 Reihe 1 möglich ist, wird diese auch als Grundlage für die Stoffstrommodellierung der Nichtmetallischen Mineralien verwendet.

Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, zeigt Abbildung 3-11 zunächst die Ergebnisse der Stoffstrommodellierung für die Gesamtheit der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle für das Jahr 2013, wie sie auch von der Initiative KWB berücksichtigt werden (siehe Tabelle 3-3).

Da die Modellierung primär auf den Input-Mengen der Entsorgungsanlagen beruht, ist bis zur Erstbehandlung eine weitestgehende Differenzierung nach den fünf Abfallgruppen möglich. Zusätzlich zu den betrachteten Bau- und Abbruchabfällen (Kapitelnummer 17 (AVV)) werden auch die Stoffströme der durch Aufbe-

bereitung in Behandlungsanlagen erzeugten mineralischen Abfälle (AS 19120900 - 19120906 und AS 191302) berücksichtigt. Diese über die statistische Erhebung für Bauschutttaufbereitungs- und Asphaltmischanlagen erfasst und in der Fachserie 19 Reihe 1 verzeichneten Mengen stellen in den nachfolgenden Stoffstromdarstellungen die im Straßenbau, als Betonzuschlag, im Erdbau etc. verwerteten Mengen dar. Da eine eindeutige Herkunftsrekonstruktion der Abfälle aus Behandlungsanlagen zu den fünf Abfallgruppen nicht möglich ist, erfolgt eine summarische Darstellung.

Scheinbare Mengenverluste bei den Anlagentypen Bodenbehandlung, Sortieranlagen und Sonstige Behandlungsanlagen sind darauf zurückzuführen, dass ein Großteil der Abfälle nach der Behandlung nicht den Abfällen aus Behandlungsanlagen (Kapitelnummer 19 (AVV)) zugeordnet, sondern weiterhin als Bau- und Abbruchabfälle (Kapitelnummer 17 (AVV)) deklariert wird. Auf eine outputseitige Mengendarstellung der Abfälle mit der Kapitelnummer 17 wurde in der Darstellung verzichtet, andernfalls könnten Abgrenzungsschwierigkeiten und Mehrfachnennungen auftreten¹².

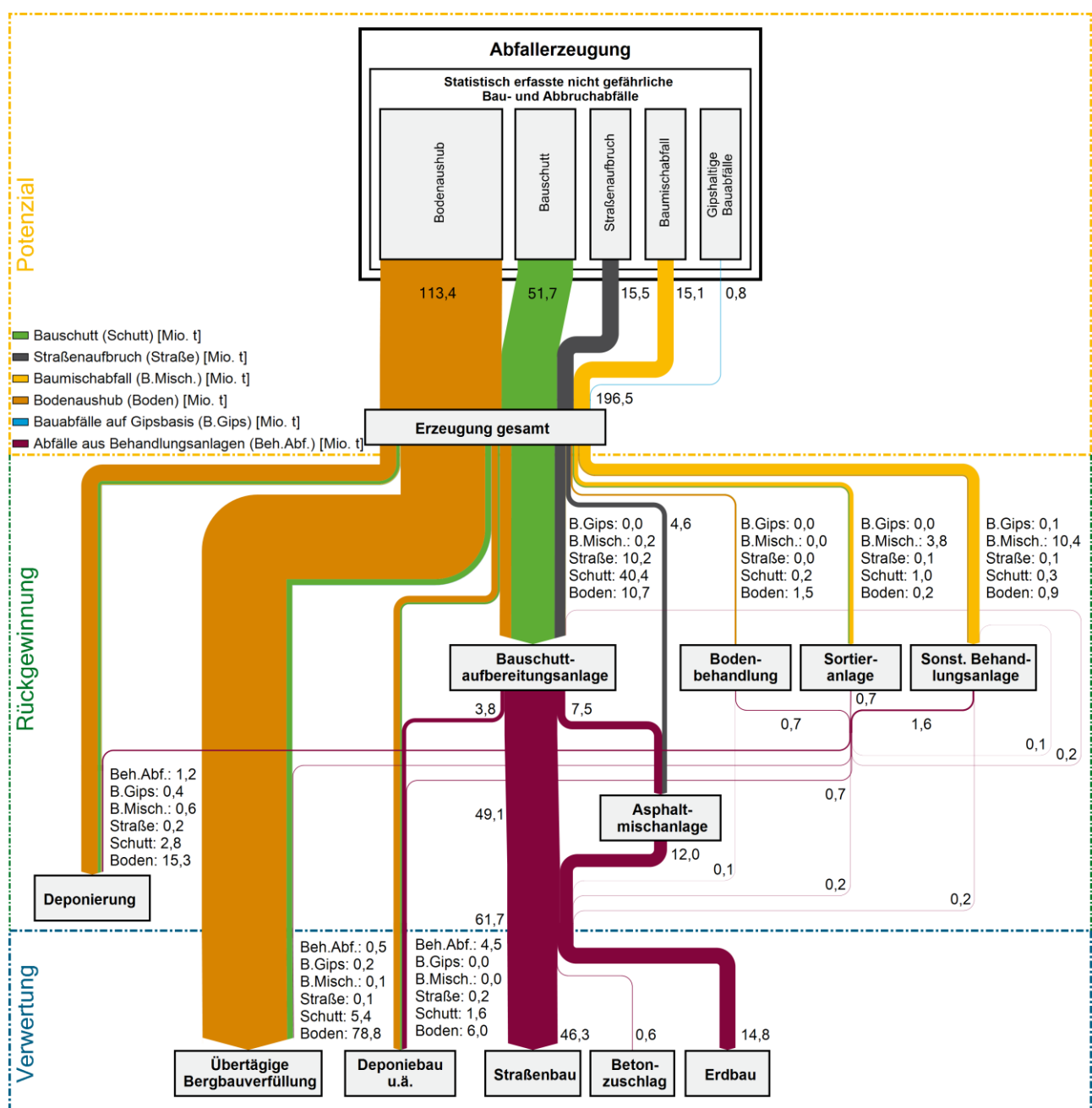
Obwohl die fünf unterschiedenen Verwertungswege

- ▶ Verfüllung in übertägigen Abbaustätten,
- ▶ Verwendung bei Deponiebaumaßnahmen, für den Bau von Sportplätzen, Lärmschutzwänden etc.
- ▶ Verwertung im Straßenbau,
- ▶ Verwendung als Betonzuschlag und
- ▶ Verwendung im Erdbau

alle als stoffliche Verwertung gelten, sind sie in Hinblick auf eine Kreislaufführung als nicht gleichrangig anzusehen. Während die Verwendung mineralischer Abfälle im Straßenbau, im Erdbau und als Betonzuschlag als tatsächliches Recycling mit mehreren Zyklen bezeichnet werden kann, stellen die Verfüllung im Bergbau und die Verwendung bei Deponiebaumaßnahmen eine endgültige Verwertung dar.

¹² Sofern mit der Kapitelnummer 17 deklarierte Abfälle aus Behandlungsanlagen in anderen Anlagen weiterbehandelt werden, sind diese dort bereits in den Input-Mengen und somit auch im dargestellten Abfallaufkommen enthalten.

Abbildung 3-11: Stoffströme der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle inkl. nichtmineralischer Baustellenabfälle im Jahr 2013 in Mio. t



Dem Ergebnis der Stoffstrommodellierung nach wurden im Jahr 2012 rund 35 % der Bau- und Abbruchabfälle als Sekundärrohstoffe wieder in den Produktionskreislauf zurückgeführt, weitere 55 % fanden in sonstigen stofflichen Verwertungsmaßnahmen ihre Verwendung. Dagegen mussten 10 % beseitigt werden.

Die in diesen Verwertungs- bzw. Beseitigungsquoten enthaltenen Stoffströme der Abfälle aus Behandlungsanlagen ermöglichen eine möglichst präzise Darstellung der tatsächlichen Stoffströme. Gleichzeitig wird jedoch eine Aufschlüsselung nach Abfallgruppen unterbunden. Eine untergliederte Darstellung nach Abfallgruppen für den Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen, wie in den Monitoring-Berichten der KWB veranschaulicht, kann nur mit Einschränkungen benannt werden. Dabei umfasst die Betrachtung der Stoffströme lediglich die Abfallströme bis zur Erstbehandlung, Direktverwertung bzw. unmittelbaren Deponierung. Alle weiterführenden Ströme aus Behandlungsanlagen (in Abbildung 3-11 rot dargestellt) bleiben unberücksichtigt. Stattdessen werden in den Monitoring-Berichten für die Zuordnung zu den Wegen Recyc-

ling, sonstige Verwertung und Beseitigung vereinfachende Annahmen getroffen, wie z.B. einer 100 %-igen Recyclingquote aller in Bauschuttzubereitungsanlagen behandelten Abfälle (Ausnahme gipshaltige Bauabfälle) u.a.¹³.

Wie der Vergleich beider Betrachtungsweisen in Tabelle 3-4 zeigt, unterscheidet sich die Verteilung der Bau- und Abbruchabfälle auf die jeweiligen Verwertungs-/Beseitigungswege jedoch kaum.

Tabelle 3-4: Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2012

Methodik	Abfallgruppe	Recycling	Sonstige Verwertung	Beseitigung
Studien-Methodik (inkl. 19er Abfälle)	Gesamt	35 %	55 %	10 %
KWB-Methodik	Bauschutt	78 %	17 %	5 %
	Straßenaufbruch	96 %	3 %	1 %
	Bodenaushub	10 %	79 %	12 %
	Bauabfälle auf Gipsbasis	0 %	52 %	48 %
	Baustellenabfall	2 %	94 %	4 %
	Gesamt	34 %	57 %	9 %

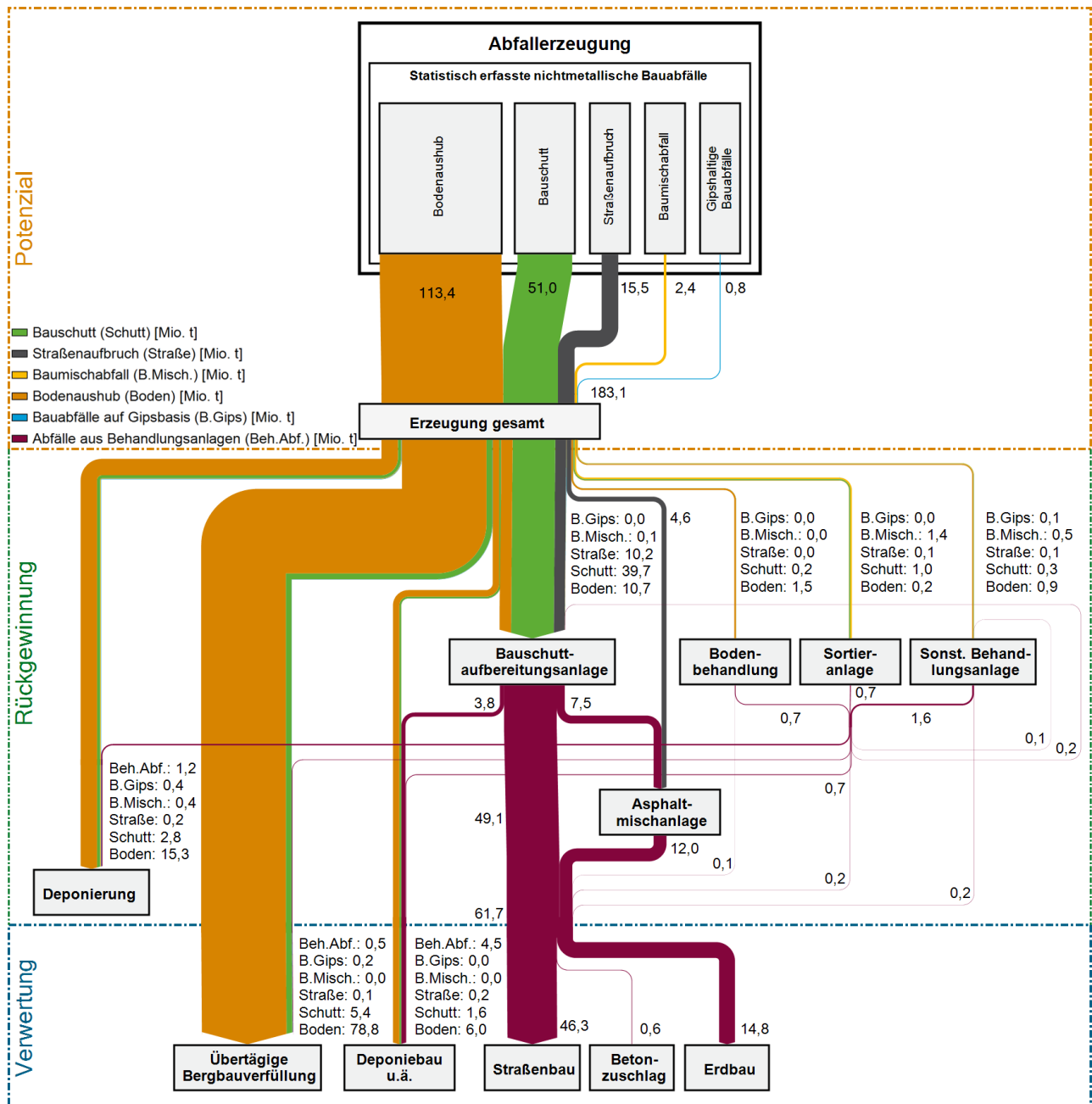
Bis hierhin erfolgte eine Betrachtung von Abfallarten der Bau- und Abbruchabfälle, wie sie von der Initiative Kreislaufwirtschaft Bau vorgenommen wird. Diese berücksichtigt neben den mineralischen Bau- und Abbruchabfällen auch die auf Baustellen getrennt gesammelten Metall-, Kunststoff-, Holz- und Glasabfälle. Da diese Abfallarten bereits mit den spezifischen Materialkategorien der Kapitel 2.1 bis 3.4 betrachtet wurden, erfolgt in Konsistenz zu diesem Forschungsprojekt nachfolgend eine ausschließliche Betrachtung der Nichtmetallischen Mineralien (siehe rechte Spalte in Tabelle 3-3).

Anstelle der Gesamtheit an Baustellenabfällen wird in der Materialkategorie Nichtmetallische Mineralien dementsprechend ausschließlich der mineralische Anteil der Baumischabfälle (AS 170904) betrachtet (siehe Anhang II).

Die Eingrenzung der betrachteten Abfallarten und der Ausschluss der in anderen Kategorien bereits betrachteten Materialanteile (insb. Fe-Anteile) führen zu einem Aufkommen an Nichtmetallischen Mineralien von rund 183 t im Jahr 2013 (Abbildung 3-12). Da die modellierten Abfälle aus Behandlungsanlagen bereits auf mineralische Abfälle abzielten, sind gegenüber den in Tabelle 3-4 gelisteten Anteilen für den Verbleib der Nichtmetallischen Mineralien keine Veränderungen zu verzeichnen.

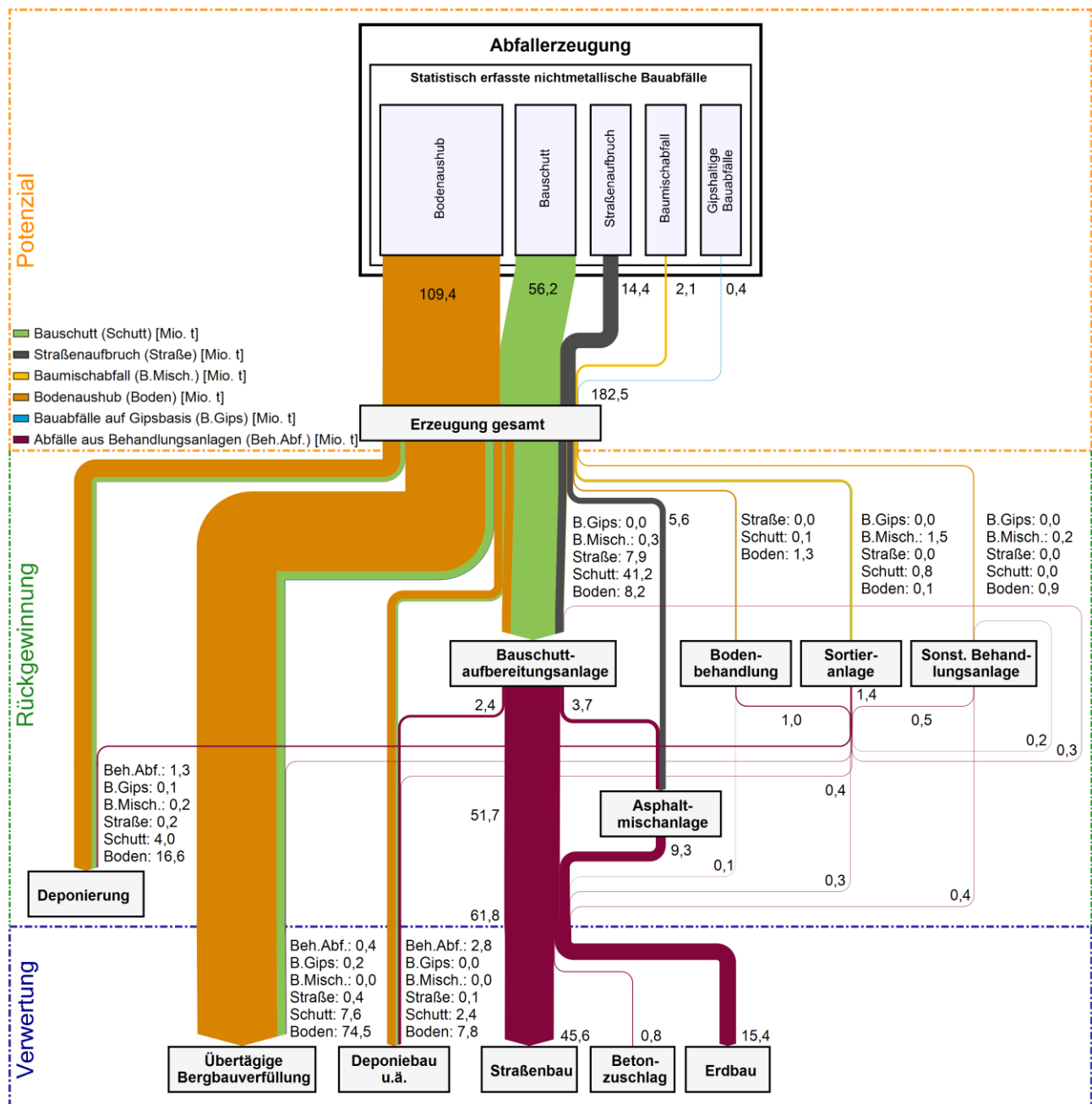
¹³ Für Abfallgruppen, die in anderen Behandlungsanlagen als Bauschuttzubereitungs- und Asphaltmischanlagen behandelt werden, erfolgt eine pauschale Zuordnung zur „Sonstigen Verwertung“ (Verfüllung von Abbaustätten, Deponiebau).

Abbildung 3-12: Stoffströme der Materialkategorie Nichtmetallische Mineralien im Jahr 2013 in Mio. t



Das Aufkommen an Nichtmetallischen Mineralien und deren Stoffstromverteilung im Jahr 2007 zeigt Abbildung 3-13.

Abbildung 3-13: Stoffströme der Materialkategorie Nichtmetallische Mineralien im Jahr 2007 in Mio. t

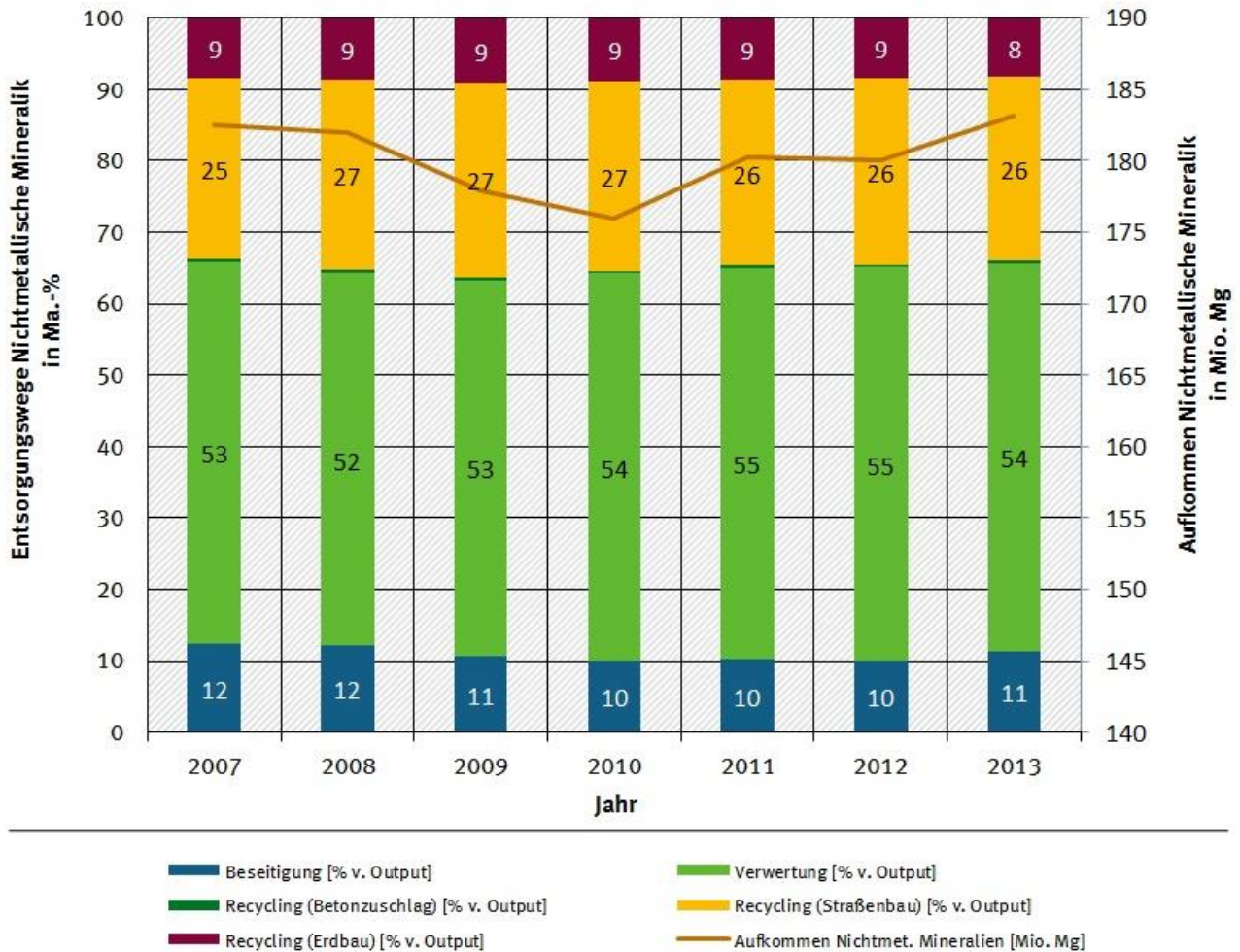


Die Entwicklung der Entsorgungswege für Nichtmetallische Mineralien verdeutlicht, dass es in den Jahren 2007 bis 2013 bis auf einen leichten Rückgang der Abfälle zur Beseitigung kaum zu Veränderungen kam (Abbildung 3-14). Obwohl diese übergeordnete Betrachtungsebene ein hohes Maß an stofflicher Verwertung aufzeigt, sollte die Aufgabe, Bauabfälle vermehrt für das Recycling verfügbar zu machen anstatt sie für die Verfüllung zu nutzen, nicht aus dem Blick geraten.

Abbildung 3-14: Entsorgungswege der Nichtmetallischen Mineralien 2007 bis 2013

Entsorgungswege der Nichtmetallischen Mineralien

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2013



Quelle: Modellierung auf Basis Fachserie 19 Reihe 1 (Statistisches Bundesamt (2009-2015))

4 Auswahl der zu betrachtenden Materialien und Bewertungsansätze

Die Auswahl der zu betrachtenden Materialien erfolgte in Abstimmung mit dem Auftraggeber. Wichtige Auswahlkriterien waren hierbei:

- ▶ Es sollen Materialien aus den vier Materialgruppen Metalle, Kunststoffe, organische Abfälle und mineralische Abfälle einbezogen werden. Der breite Fokus ist wichtig, damit die Projektergebnisse für die weitere Entwicklung von rohstoffspezifischen Indikatoren genutzt werden können. Zudem soll eine Anschlussfähigkeit zu den Analysen in AP1 (Kapitel 3) gegeben sein, die auf der Ebene der Materialgruppen stattfinden.
- ▶ Aus allen vier Materialgruppen sollen mengen- und ressourcenrelevante Materialien ausgewählt werden.
- ▶ Die mit den Materialien verbundenen Sekundärrohstoffströme sollen einen relevanten Beitrag zur Reduktion des kumulierten Rohstoffaufwands liefern.
- ▶ Die Bearbeitung muss realistisch sein, insbesondere müssen Daten voraussichtlich verfügbar sein.

Eine schnelle, rein quantitative Abschätzung der Relevanz der Materialien über die Ermittlung des kumulierten Rohstoffaufwands der Sekundärstoffströme war zum Bearbeitungsbeginn nicht möglich, weil für viele Materialien noch keine Daten zum spezifischen kumulierten Rohstoffaufwand vorlagen und auch Daten zur erzeugten Sekundärproduktion erst im Laufe der Bearbeitung erhoben wurden. Stattdessen wurde die Auswahl anhand der oben aufgelisteten Auswahlkriterien vorgenommen und mit dem Auftraggeber abgestimmt.

Die im Zuge des Auswahlprozesses gewählten Materialien für eine vertiefende Betrachtung zeigt nachfolgende Tabelle.

Tabelle 4-1: Ausgewählte Materialien zur vertieften Bearbeitung

Metalle	Mineralik	Kunststoffe	Biomasse
Edelstahl	Recycling-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen	PE-LD	Altholz
Stahl und Gusseisen	Asphaltgranulat	PE-HD	Papier Pappe Karton
Aluminium	Flugaschen aus der Steinkohlefeuerung	PP	Küchen-, Garten und Speiseabfälle
Kupfer	Behälterglas	PVC	Alttextilien
Zink	Hüttensand	PET	
Blei	REA-Gips	PS	
Zinn		Altreifen	
Silber			
Gold			
Platin			
Palladium			

4.1 Auswahl im Bereich der Metalle

Die ausgewählten Metalle zeigt die obige Tabelle. Mit den Analysen zu Stahl und Edelstahl sind auch erheblich Mengenanteile des Chrom- und Nickelkreislaufes erfasst. So wird **Nickel** zu rund 70 % in Stahl- und

Edelstahllegierungen eingesetzt. **Chrom** geht zu rund 90 % als Ferrochrom in die Stahlindustrie. Auch **Niob** wird zu mehr als 90 % in der Stahlindustrie eingesetzt. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Mengenströme wird es jedoch nicht berücksichtigt (European Kommission 2014).

Metalle mit weit verteilten bzw. dissipativen Anwendungen wie **Cobalt** und **Antimon** werden bei der Auswahl nicht berücksichtigt. Ebenso werden Metalle nicht berücksichtigt, für die wenige oder keine quantitativen Daten zur deutschen Produktion und zu Recyclingkreisläufen zur Verfügung stehen. Hierzu zählen **Bronze, Titan** und **Magnesium**.

Lithium wird ebenfalls nicht berücksichtigt, da derzeit noch kein relevantes Recycling stattfindet und im Projekt die aktuelle Sekundärwirtschaft abgebildet werden soll. In Zukunft ist jedoch von einem starken Anwachsen der Sekundärlithiummengen auszugehen.

4.2 Auswahl im Bereich der mineralischen Stoffströme

Mit der Auswahl von Recycling-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen, Asphaltgranulat, Flugaschen aus der Steinkohlefeuerung zur Verwertung in der Zementherstellung, Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung, Behälterglas und REA-Gips wurden wichtige mengenrelevante Sekundärstoffströme berücksichtigt. Weitere Materialien, die ebenfalls Gesteinskörnungen und Sand substituieren, jedoch deutlich geringere Mengenströme aufweisen (beispielsweise **Hausmüllverbrennungsaschen, Gießereialtsande, Schmelzgranulat aus der Steinkohlefeuerung** oder **Kesselasche aus der Steinkohlefeuerung**) werden in die Auswahl nicht aufgenommen.

Ebenso nicht berücksichtigt werden Stoffströme mit hohen Verwertungsanteilen in Tagebau, Deponiebau und Lärmschutzwällen (**Böden und Steine, Aschen und Schlacken aus der Braunkohlefeuerung**).

4.3 Auswahl im Bereich der Kunststoffe

Bei den Kunststoffen werden die Kunststoffe mit der höchsten Mengen- und Ressourcenrelevanz ausgewählt (PE-LD, PE-HD, PP, PVC, PET und PS). Des Weiteren werden Altreifen, die als Mehrkomponentenprodukt neben Naturkautschuk zu einem großen Teil aus Synthetikautschuk bestehen, als ein mengenrelevanter Sekundärstoffstrom betrachtet.

Nicht betrachtet werden die Mengenströme von **PUR, PA** und **ABS**, da deren Abfallaufkommen und sekundärrohstoffwirtschaftliche Relevanz gegenüber den betrachteten Kunststoffsorten von untergeordneter Bedeutung ist. Aufgrund des nicht praktizierten Recyclings im industriellen Maßstab entfällt auch eine Berücksichtigung von **EPS**. Für eine Bewertung von **PC** liegen keine ausreichenden Daten vor.

4.4 Auswahl im Bereich organischer Abfälle

Im Bereich Biomasse werden die dominierenden Mengenströme Altpapier, Altholz, Lebensmittel- und Speiseabfälle sowie Alttextilien betrachtet. Da der Projektfokus auf der Abfallwirtschaft liegt, werden **organische Reststoffe aus der Landwirtschaft** (Gülle, Mist, Stroh etc.) nicht betrachtet.

Weiterhin wird die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm nicht berücksichtigt. Hier liegt zwar ein interessantes Potential vor, doch sind die derzeitigen Recyclingaktivitäten noch sehr beschränkt.

5 Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege der metallischen Materialien

5.1 Eisen und Stahl

5.1.1 Materialeinsatz in Deutschland

Eisen ist das viert-häufigste Element in der Erdkruste und in ca. 300 Mineralien enthalten. Für den Abbau von Eisenerz kommen vor allem die sechs eisenhaltige Mineralien Hämatit, Magnetit, Goethit, Siderit, Ilmenite und Pyrit in Frage. Auf Grund ihres hohen Eisenanteils sind vor allem Hämatit sowie Magnetit und Goethit-Vorkommen für die weltweite Eisenerzproduktion von Relevanz (Mohr et al. 2014).

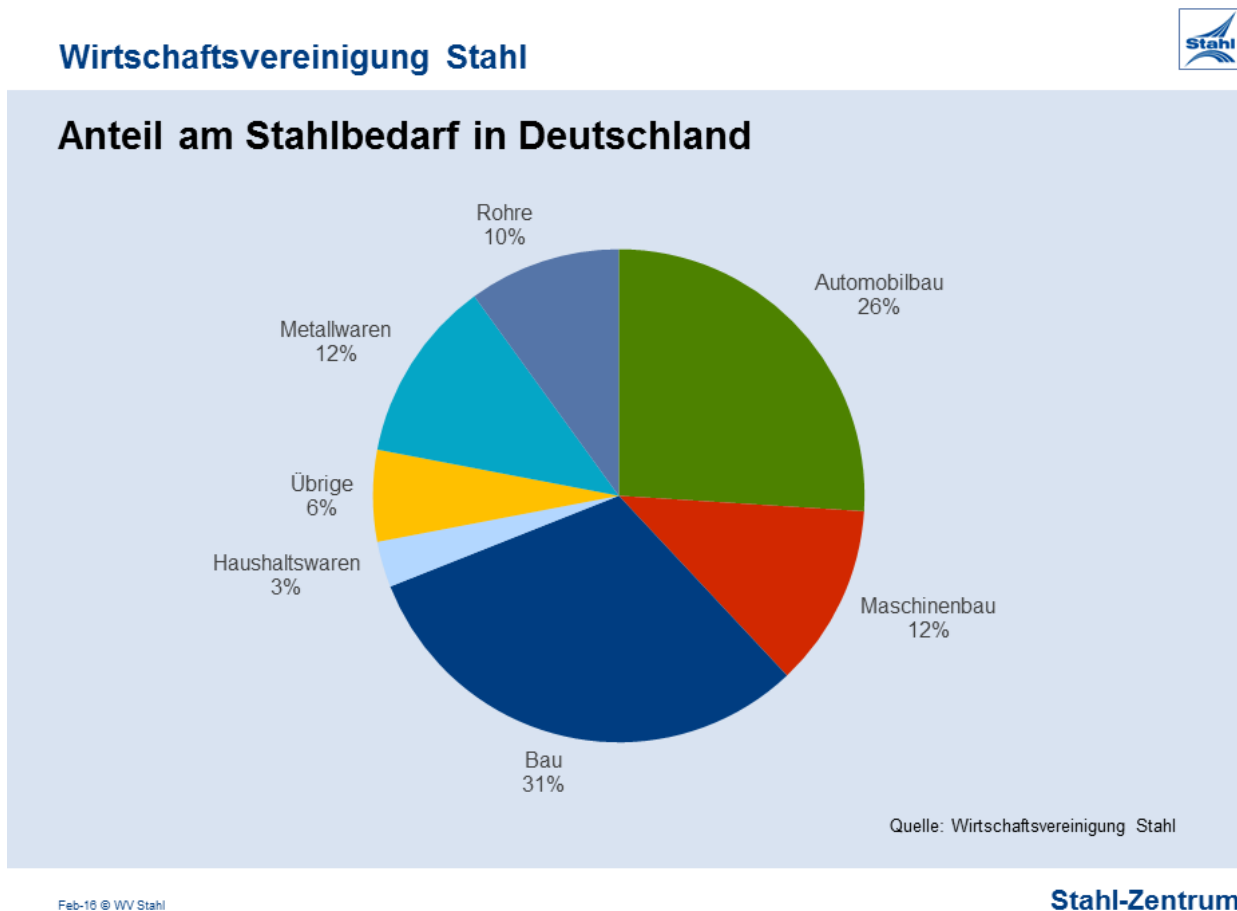
Eisen und Stahl sind die mit Abstand wichtigsten metallischen Werkstoffe. Stahl spielt für die Entwicklung von Volkswirtschaften eine so große Rolle, so dass der Pro-Kopf-Verbrauch von Stahl häufig als Indikator verwendet wird, um das Entwicklungsniveau einer Volkswirtschaft einzuschätzen. In der Tat zeigen Untersuchungen eine logarithmische Funktion des Stahlverbrauchs pro Kopf mit dem pro-Kopf-Einkommen (siehe Yellishetty et al. 2011).

In Deutschland wurden im Jahr 2013 27,2 Mio. t Roheisen erzeugt, das bis auf eine kleine Menge für die Erzeugung von Gusseisen (0,7 Mio. t) vollständig zur Stahlherstellung verwendet wurde (26,5 Mio. t). Bei der Umwandlung von flüssigem Roheisen zu Stahl wird im Konverter mit Hilfe von Sauerstoff der Kohlenstoffgehalt weiter reduziert, störende Elemente wie Phosphor und Schwefel ausgebrannt und anschließend in der Sekundärmetallurgie durch verschiedenen Produktionsschritte wie Zulegieren verschiedener Elemente, der Zugabe von Desoxidationsmitteln oder der Tiefenentkohlung durch Vakuumbehandlung die gewünschte Stahlqualität erzeugt. Durch die Sauerstoffzufuhr im Blasverfahren erhöht sich die Temperatur, so dass Stahlschrott oder Eisenerz zur Kühlung zugeführt werden muss. In Europa sind rund 2500 unterschiedliche Stahlsorten mit entsprechenden chemischen Zusammensetzungen und Eigenschaften registriert.

Aus dem in Deutschland produzierten Roheisen, Schrott und Legierungsmetallen wurden im Jahr 2013 42,6 Mio. t Rohstahl hergestellt, davon 97% als Strangguss. Ein Drittel des in Deutschland hergestellten Stahls wird im Elektrostahlwerk hergestellt (13,5 Mio. t), der Rest (29,2 Mio. t) als Oxygenstahl im Hochofen/Konverter (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015). Der Außenhandel mit Stahlerzeugnissen ab Stahlwerk ist in etwa ausgeglichen: im Jahr 2013 wurde 19,4 Mio. t Stahlerzeugnisse importiert und 19,8 Mio. t exportiert. Von den 42,6 Mio. t Rohstahl sind 8,4 Mio. Edelstahl, die im Kapitel „Edelstahl“ genauer analysiert werden.

Laut der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2016) wird ein Viertel des in Deutschland verbrauchten Stahls im Automobilsektor eingesetzt, ein weiteres Drittel im Baugewerbe. Weitere wichtige Sektoren sind der Maschinenbau (12%), Metallwaren (12%) und Rohre (10%).

Abbildung 5-1: Stahlverbrauch nach Einsatzgebieten, 2015



Quelle: WV Stahl, 2016

Aufgrund der Vielfalt an Stahlsorten, die jeweils sehr unterschiedliche Legierungsmetalle enthalten, ist das oft postulierte unentwegte Stahlrecycling nicht ohne weiteres erreichbar. Geschlossene Kreisläufe sind eher theoretischer Natur. Stahlschrott wird zumeist zwischen drei verschiedenen Kategorien unterschieden:

- ▶ Eigenschrott, der direkt im Stahlwerk anfällt und bei dem die chemische Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften bekannt sind. Diese können entsprechend sortenrein direkt wieder der Herstellung von Stahl zugeführt werden. In Deutschland fielen laut der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2015a) im Jahr 2013 4,2 Mio. t Eigenschrott an. Mit anderen Worten fällt in den deutschen Stahlwerken pro 1 t Rohstahl ein Eigenschrott von rund 100 kg an. Diese Angaben stimmen mit Zahlen in Janke et al. (2000) überein.
- ▶ Neuschrott bezeichnet Schrott, der in der stahlverarbeitenden Industrie anfällt, z.B. Stanzabfälle im Automobilbau. Dieser Schrott wird häufig direkt wieder an das Stahlwerk verkauft. Auch hier ist teilweise ein sortenreines Recycling möglich, wenn die chemische Zusammensetzung der einzelnen Chargen zum einen bekannt und zum anderen einheitlich ist. Zudem ist dieser Schrott häufig nur mit wenigen Fremdstoffen verunreinigt. Allerdings können auch Neuschrotte aus der Metallverarbeitung schon mit Fremdstoffen beschichtet sowie (z.B. beklebt, lackiert, besprüht, galvanisiert, verzinkt, verzinkt)¹⁴ mit Hilfsstoffen aus der Verarbeitung (z.B. Kühlschmiermittel) verunreinigt sein.

¹⁴ Die Verzinnung und Verzinkung findet in Deutschland in der Regel schon in der Stahlindustrie statt.

Die Schrottstatistik der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2015b) weist einen Ankauf von Neuschrott in Höhe von 6,3 Mio. t im Jahr 2013 aus. Der Anteil des Schrottaufkommens wird sich dabei von Branche zu Branche stark unterscheiden.

- ▶ Altschrott bezeichnet schließlich den Schrott, der am Ende der Lebensdauer von Gütern über Recyclingeinrichtung erfasst und verwertet wird. Dies können Karosserieteile von Fahrzeugen sein, Stahlelemente von Haushaltsgeräten, Stahl aus Abbrucharbeiten etc. Da dieser Stahlschrott aus verschiedensten Einsatzbereichen stammt und zum Teil vor Jahrzehnten hergestellt wurde, ist die chemische Zusammensetzung des Schrottes oft nicht bekannt. Dieser Schrott ist zudem häufig mit anderen Materialien vermischt und verbunden.

Altschrotte werden - wie in Kapitel 3.1 gezeigt - in den verschiedenen Behandlungsanlagen aus den Abfallströmen wiedergewonnen. Aus der Auswertung der Abfallstatistik in Kapitel 3.1 ergab sich ein Altschrott in Höhe von 11 Mio. t, die Schrottstatistik der Wirtschaftsvereinigung Stahl dokumentiert Zukäufe von Altschrott in Höhe von insgesamt 10,1 Mio. t. Im Recyclingprozess durchlaufen die verschiedenen Altschrotte unterschiedliche Sortiermaßnahmen. Diese können vor oder nach dem Schredderprozess stattfinden, bei dem die anfallenden Metallteile auf handflächengroße Stücke zerkleinert werden. Zur Trennung des Stahls von Verunreinigungen, die noch untergemischt sind - wie andere Metalle, Glas oder mineralische Reststoffe - kommen verschiedene Sortiermethoden zum Einsatz: Magnete, Siebung, Dichtesortierung, Luftsartierung oder auch händische Sortierung. Trotz aller Anstrengungen verbleibt am Ende der verschiedenen Sortierschritte eine gewisse Unreinheit.

Neben den Verunreinigungen, die dem Stahlschrott auch nach Sortierung noch untergemischt sind, sind auch die Legierungsmetalle selbst problematisch. Zudem sind Stahlteile, z.B. im Automobilbereich häufig verzinkt. Während sich Zink beim Einschmelzen von Schrott verflüchtigt und in der Rauchgasfilteranlage aufgefangen werden kann, ist die Verunreinigung mit Kupfer oder Zinn besonders problematisch, da Eisen ein vergleichsweise unedles Element ist und sich damit nur schwer von den anderen Elementen trennen lässt (Reck/Graedel 2012, Savov et al. 2003). Wird der Schrott im Oxygenstahlkonverter als Kühlmittel beigemischt, ist der Eintrag an gleichzeitig unerwünschten Verunreinigungen durch den niedrigen Schrotanteil (ca. 15%) geringer als im Elektrostahlwerk, bei dem bis zu 100% Schrott eingesetzt wird. Dafür sind die Grenzwerte für Verunreinigungen der dünnen Walzelemente der Hochofenroute wie Warmband oder Bleche jedoch auch deutlich niedriger. Neben dem Kohlenstoffanteil als technologische Grenze für den Einsatz von Schrott im Oxygenstahlprozess, sind laut Björkman/Samuelsson (2014) auch diese Legierungsmetalle ein limitierender Faktor für den Schrotteinsatz. Im Elektrostahlwerk werden dagegen entweder sehr sortenreine Neu- und Eigenschrotte wieder zu hochwertigen Stählen verarbeitet oder eben Altschrotte zu voluminöseren Stahlprodukten, wie Balken und Stäbe, die eine höhere Toleranz gegenüber Verunreinigung haben als flachgewalzte Produkte.

Viele Studien (Reck/Graedel 2012, Bowyer et al. 2015, Rod et al. 2006) weisen jedoch darauf hin, dass sich mit jedem Recyclingdurchgang die Verunreinigungen mit Legierungselementen weiter im Stahl akkumulieren und einerseits die Qualität des Stahls immer weiter reduzieren und andererseits die Legierungselemente, die bei der Stahlschmelze in flüssigen Stahl verbleiben, für ein Recycling tendenziell verloren gehen. Abbildung 5-2 zeigt den Verbleib der verschiedenen Elemente beim Einschmelzen von Stahlschrott im Elektrostahlhofen an. Dies hat zur Folge, dass einerseits durch Stahlrecycling große Mengen an Rohstoffen und Energie eingespart werden können, und gleichzeitig in weit entwickelten Volkswirtschaften die Nachfrage nach Stahl stagniert und zunehmende Mengen an Altschrotten dem Recycling zur Verfügung stehen. Auf der anderen Seite fragen Branchen wie der Automobilbau aber nach immer leistungsfähigere Stahlsorten, die eine immer niedrigere Toleranz gegenüber Verunreinigungen aufweisen und derzeit entweder nur über die Hochofenstahlroute hergestellt werden können oder durch sehr sauber sortierten Stahlschrott im Elektrostahlwerk. Diese Schrottqualität kann aktuell aber häufig nur aus den begrenzten Mengen an Eigen- und Neuschrott befriedigt werden.

Abbildung 5-2: Verbleib der Legierungselemente bei der Schmelze von Stahlschrott¹⁵

To Bath			To Slag		To Gases	
Sb	Cr	B	Al	B	Ca	Pb
As	Pb	Cb	Be	Cr	Zn	
Bi		P	Ca	Cb		
Co		Se	Hf	P		
Cu		S	Mg	Se		
Mo		Te	Si	S		
Ni		V	Ti	Te		
Ag		Zn	Zr	V		
Ta						
Sn						
W						

Totally
 Mostly
 Partially

Figure 2 Some residual elements present in commercial grades and general behaviour under meltdown conditions in EAF operation [11].

Quelle: Rod et al. 2006

5.1.2 Stoffströme in Deutschland 2013

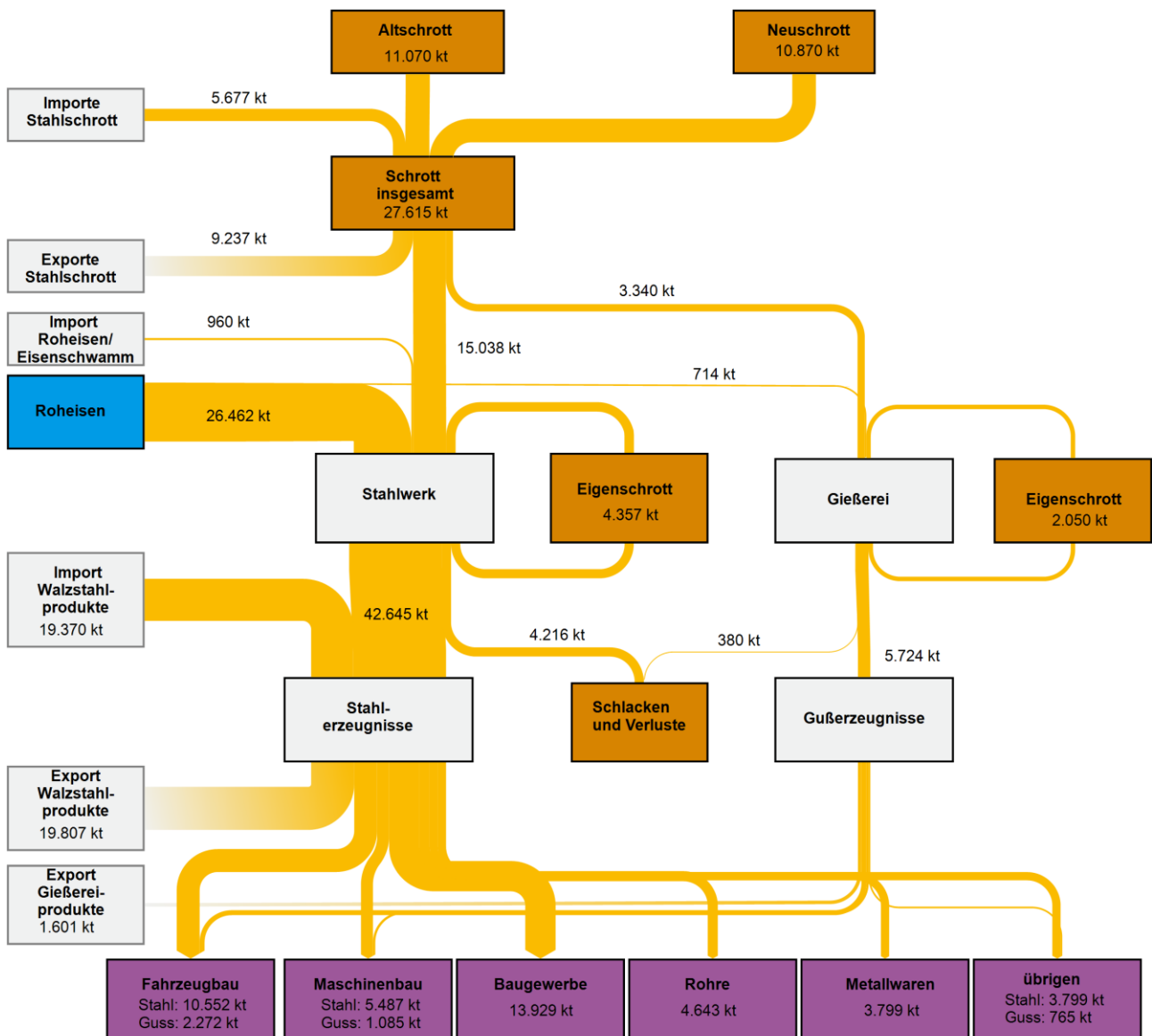
Zur Darstellung der Stoffströme an Eisen und Stahl in Deutschland wurde vor allem auf die Daten der Wirtschaftsvereinigung Stahl zurückgegriffen (WV Stahl 2015a, WV Stahl 2015b). Zudem wurde für die Angaben der Verbrauchsmengen an Stahl und Gussprodukten nach Branchen auf die jeweiligen Verbandsangaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl (Abbildung 5-1) sowie des Bundesverbands der deutschen Gießereindustrie (www.bdguss.de) und des BVSE (2014) zurückgegriffen.

Die vorgelagerten Behandlungsschritte zur Bestimmung der Herkunftsquellen der Altschrotte laut Abfallstatistik können dem Sankey-Diagramm in Kapitel 3.1 entnommen werden. Die anfallenden Schrottmengen sind jedoch nicht identisch zu den hier angegeben, da in Kapitel 3.1 vor allem mit der Abfallstatistik und den Fe-Gehalten der einzelnen Abfallschlüsselnummern laut Abanda-Datenbank gearbeitet wurde, in diesem Kapitel aber mit den Daten der Stahlindustrie.

Laut WV Stahl wurden in Deutschland 27,2 Mio. t Roheisen produziert und fast vollständig zu Stahl weiterverarbeitet. Der Außenhandel mit Roheisen spielt nahezu keine Rolle, da Roheisen in der Regel direkt in flüssiger Form zu Rohstahl weiterverarbeitet wird. Für die Herstellung des Roheisens wurden laut statistischem Jahrbuch der Stahlindustrie (WV Stahl 2015a) 40,3 Mio. t Eisenerz importiert. Für die Stahlherstellung weist das Statistische Jahrbuch der Stahlindustrie weiterhin Importe in Höhe von rund 370.000 t Eisenschwamm sowie verschiedene Legierungsmetalle aus (19.000 t Manganerz, 136.000 t Ferromangan, 291.000 t Ferrolegierungen).

¹⁵ Dies ist eine generalisierte Darstellung, die mit der konkreten Stahlherstellung in Deutschland nicht übereinstimmen muss. So wird laut dem Stahlinstitut VDEh im Stahl-Zentrum in Deutschland Arsen nicht zur Legierung eingesetzt (pers. Kommunikation 2017)

Abbildung 5-3: Stoffströme Stahl und Fe-Guss in Deutschland 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung basierend auf WV Stahl 2015a, WV Stahl 2015b, BD Guss 2016, BDSV 2017.

Für die Herstellung der 42,6 Mio. t Rohstahl im Jahr 2013 in Deutschland kamen neben den 26,6 Mio. t Roheisen 19,4 Mio. t Eisen- und Stahlschrott zum Einsatz. Die angegebenen Größenordnungen im Sankey-Diagramm entstammen den statistischen Angaben der Stahlindustrie, gehen in ihrer Bilanz jedoch nicht vollständig auf. Die 26,4 Mio. t Schrott insgesamt ergeben sich aus der Summe der Schrottimporte, sowie den publizierten Mengen an zugekauftem Alt- und Neuschrott sowie dem Eigenschrott. Die Menge des Schrotteinsatzes sowie die Schrottexporte übersteigen jedoch die Menge von 26,6 Mio. t, zumal die Gießereien zusätzlich ebenfalls noch ca. 3,7 Mio. t Eisen- und Stahlschrott für die Produktion von 4,1 Mio. t Gussprodukten verwendet haben. Diese Diskrepanz erklärt sich durch einen höheren Schrotteinsatz im Elektrostahlwerk, der über der Ausbringungsmenge liegt. Von den 19,5 Mio. t Stahlschrotteinsatz wurden 14,1

Mio. t im Bereich der Elektrostahlwerke eingesetzt (bei einer Produktionsmenge von 13,5 Mio. t¹⁶). Im Bereich der Oxygenstahlherstellung wurden 5,3 Mio. t Stahlschrott zum Zwecke der Kühlung eingesetzt.

Der Anteil an Eigenschrott, der direkt während der Produktion im Stahlwerk anfällt, beträgt rund 10%. Etwas höher ist der Anteil der Neuschrotte in der verarbeitenden Industrie: bei einem Verbrauch von 43,7 Mio. t Stahlerzeugnissen fielen Neuschrotte in Höhe von 6,3 Mio. t an. Dies entspricht einem Anteil von 14,5% der eingesetzten Menge. Diese Zahlen entsprechen in der Größenordnung den Anteilen in der japanischen stahlverarbeitenden Industrie, die im Jahr 2003 bei einer eingesetzten Stahlmenge von 60 Mio. t eine Menge an Neuschrott in Höhe von 6,76 Mio. t (oder 11,3%) dokumentieren (International Iron and Steel Institute 2005).

Eine unbekannte Menge an Stahlschrott, vor allem an Altschrott, geht für die zeitnahe Verwendung als Stahl in Deutschland verloren. Dies kann entweder im Rahmen der Abfallbehandlung geschehen: nach Auswertung der Abfallstatistik in Kapitel 3.1 wird diese Größenordnung mit 0,87 Mio. t angegeben. Damath et al. (2010) schätzen für die USA, dass rund 25% des eingesetzten Stahls nach seiner Nutzungsphase nicht wiederverwendet wird. Zum einen würden rund 1% des produzierten Stahls letztlich durch Korrosion während der Nutzungsphase verloren gehen. Der größte Anteil würde dagegen in Abfallströmen landen, bei der ein Recycling entweder nicht möglich ist, oder zu kostenintensiv. Für Deutschland dürften diese Schätzungen niedriger ausfallen, da der Anteil der auf Deponie abgelagerten Abfallmengen u.a. durch das Deponieverbot für unbehandelte Abfälle niedriger ist als in den USA.

Neben diesen Verlusten im Rahmen der Abfallbehandlung bzw. der dissipativen Verluste stehen relevante Produktionsmengen an Eisen und Stahl erst nach Jahrzehnten wieder zur Verfügung, da sie in langlebigen Gütern wie Gebäuden oder Infrastruktursystemen gespeichert sind. Gleichzeitig verlassen große Mengen an Eisen und Stahl in Form von Exportgütern wie Werkzeugmaschinen oder Fahrzeugen Deutschland und stehen inländisch nicht mehr als Altschrott nach ihrer Nutzungsphase zur Verfügung.

5.1.3 Verwertungswege

In Deutschland wurden im Jahr 2013 – wie geschildert – 19,4 Mio. t Schrott in der Stahlherstellung verwendet. Entsprechende Mengen an Stahl aus Primärrohstoffen wurden eingespart. Laut dem Bundesverband der Gießereiindustrie beträgt der Anteil der Stahl- und Eisenschrotte an der Gusseisenerzeugung 90% (Wilhelm 2013). Daraus ergibt sich bei einer Produktionsmenge von 4,1 Mio. t ein Schrotteinsatz von 3,7 Mio. t. Eisen- und Stahlschrott ersetzen damit Roheisen. 73% des Schrotteinsatzes wurde in Elektrostahlwerken verarbeitet, die zu 100% Schrott als Ausgangsrohstoff einsetzen. Würde kein Schrott zur Verfügung stehen, müssten diese Produktionsmengen über die integrierten Stahlwerke produziert werden.

Weiterhin werden in der Produktion von Oxygenstahl 5,3 Mio. t Schrott zur Kühlung der exothermen Reaktionen im Konverter eingesetzt. Theoretisch könnte auch Eisenerz als Kühlmittel zugesetzt werden, falls Schrott nicht zur Verfügung stehen würde. Allerdings ist dies eine rein hypothetische Annahme, da dieses Vorgehen mit verfahrenstechnischen Nachteilen verbunden wäre (z.B. mit Rohstoffverlusten, da ein relevanter Teil des Eisenoxides nicht in den Stahl übergehen würde, sondern mit der Schlacke ausgeschieden wird, während Stahlschrott vollständig im Kühlungsprozess einschmilzt).

Tabelle 5-1: Stahl- und Eisenschrotteinsatz in der deutschen Stahl- und Gießereiindustrie und ihre Substitutionsäquivalente in Mio. t

Herkunft	Input von Schrott [Mio. t]	Erzeugtes Sekundärprodukt [Mio. t]	Substitutionsäquivalent
----------	----------------------------	------------------------------------	-------------------------

¹⁶ Die Differenz von 0,6 Mio. t ergibt sich aus der Schlackebildung im Elektrostahlwerk.

Herkunft	Input von Schrott [Mio. t]	Erzeugtes Sekundärprodukt [Mio. t]	Substitutionsäquivalent
Stahlschrott	19,41	Elektrostahl (13,5 Mio. t)	Stahl aus Primärprodukten (inkl. aller Vorketten)
Eisen- und Stahlschrott	3,72	Gussprodukte aus überwiegend Eisen- und Stahlschrott	Gussprodukte aus 100% Roheisen

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.1.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Eisen- und Stahlproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Berechnung der ausländischen Vorketten für Eisenerz wurde ebenfalls der Weltmix verwendet sowie für importierte Eisenerzpellets der Prozess mit der geographischen Dimension RER (Europa) abgebildet.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-2: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Eisen und Stahl 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Stahl, Konverter, unlegiert primär	6,71	
Stahl, Elektro, niedriglegiert	0,81	79.385
Roheisen	5,92	54.538
	DIERec	133.923

Quelle: eigene Zusammenstellung

Zur Abschätzung der eingesparten Rohstoffmenge durch den Einsatz von Stahlschrott in der Elektrostahlroute gegenüber einer theoretischen Herstellung von Stahl im Konverter ohne Schrotteinsatz muss zum einen dem spezifischen Rohstoffaufwand der Konverterstahlroute (6,71 kg/kg) mit dem spezifischen Rohstoffaufwand der Elektrostahlroute (0,81 kg/kg) gegengerechnet werden. Hieraus ergibt sich, dass die anfallende Stahlschrottmenge, die zu Elektrostahl verarbeitet wurde, mit dem spezifischen Rohstoffaufwand von 5,90 kg/kg multipliziert werden muss. Zum anderen sind zusätzlich die Roheisenmengen zu beachten, die sich aus dem Schrottanteil ergeben, der rechnerisch im KRA-Koeffizienten des Konverterstahls enthalten ist (125 kg/t), sowie die Menge an Roheisen, die notwendig ist, um den Stahlschrott zu erzeugen, der in der Konverterstahlroute zur Kühlung eingesetzt wird. Der energetische und rohstoffliche Aufwand zur Einschmelzung von Schrott wurde ebenso bei der Substitutionwirkung von Roheisen gegengerechnet.

Für die Berechnung der DERec-Indikatoren im Bereich Eisen und Stahl wurden die Vorketten der im Ausland stattfindenden Wertschöpfung abgeschnitten und der spezifische KRA für Roheisen entsprechend angepasst. Mithilfe dieses spezifischen KRA-Koeffizienten wurden dann wiederum der Substitutionseffekt im Absatz weiter oben für den DIERec beschrieben, neu berechnet. Zusätzlich sind noch die Roheisenäquivalente zu berücksichtigen, die sich aus dem Einsatz von 3,5 Mio. t Schrott in der Gussproduktion ergeben.

Tabelle 5-3: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette Eisen und Stahl, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Roheisen ohne Vorkette	1,76	44.991
	DERec	44.991

Quelle: eigene Zusammenstellung

Für die Berechnung des eingesparten Energieaufwandes gelten die gleichen Berechnungskriterien wie für den eingesparten Materialaufwand gemessen als DIERec bzw. DERec. Der KEA der Konverter-Stahlroute ist stärker durch nichterneuerbare Energiequellen geprägt als der KEA der Elektrostahlroute, der wiederum vom KEA Konverterstahl abgezogen werden muss. Das hat zur Folge, dass die Energieeinsparung an nicht-erneuerbaren Energiequellen größer ist als der gesamte eingesparte Energieaufwand. Bei der Berechnung der fiktiven Roheisenmengen als Substitut von Stahlschrott ergibt sich keine Energieeinsparung.

Tabelle 5-4: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für Eisen und Stahl, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Stahl, Konverter, unlegiert primär	17,52	16,83		
Stahl, Elektro, niedriglegiert	9,77	8,90	104.391	106.728
Roheisen	16,12	15,79	23.563	24.753
		KEA-Saldo	127.953	131.481

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-5: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für Eisen und Stahl, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Roheisen ohne Vorkette	5,46	6,1	101.613	112.631
		KEA-Saldo	101.613	112.631

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.1.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.1.5.1 Verwertungsmengen

Die Stahlproduktion sank zwischen 2007 und 2015 in Deutschland um rund 14%. Dabei sank die Stahlproduktion von Oxygenstahl etwas stärker (-13%) als die Produktion von Elektrostahl (-10%). Da drei Viertel des Schrotteinsatzes im Produktionsprozess von Elektrostahl verwendet wird, liegt der Rückgang des

Schrotteinsatzes in der Stahlproduktion ebenfalls bei -10%. Die Erzeugung von Gussprodukten (und der analog dazu eingesetzten Schrottmenge) ging im Zeitverlauf ebenfalls um 13% bzw. 14% zurück.

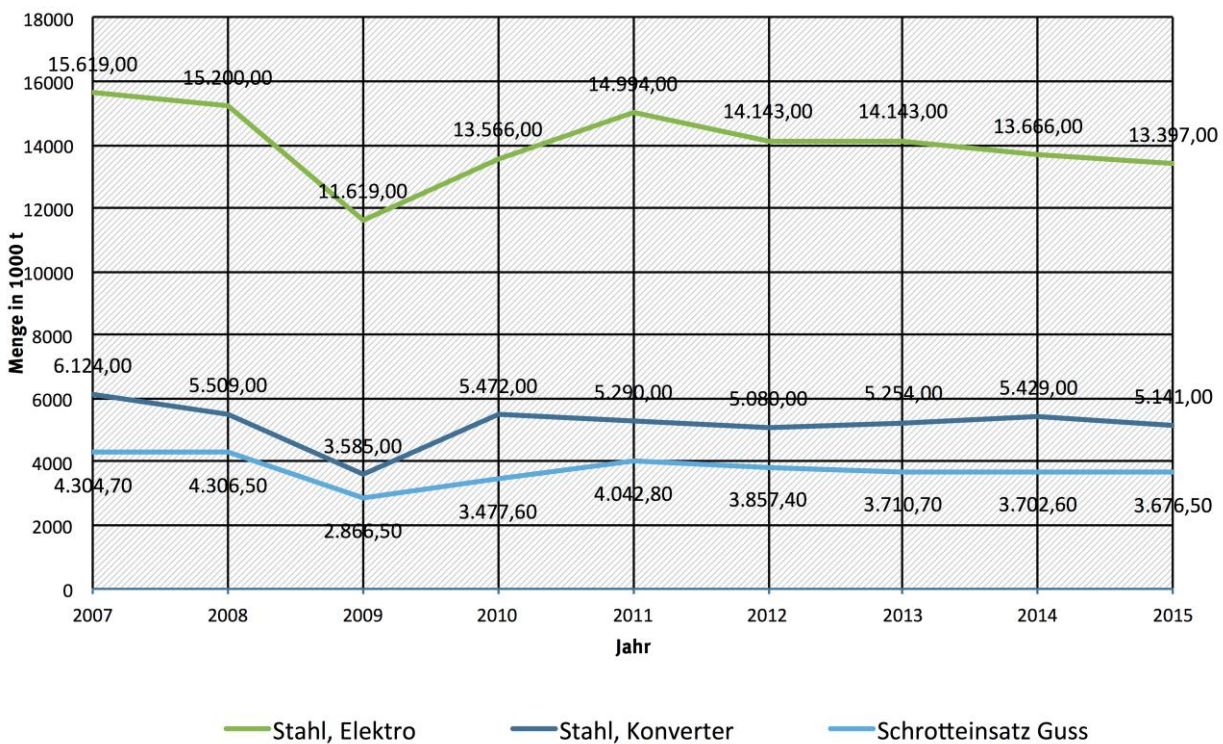
Im Krisenjahr 2009 ist ein starker Rückgang der Stahlproduktion festzustellen (siehe Abbildung 5-4), der im Bereich des Oxygenstahls stärker zum Tragen kam als im Bereich der Herstellung von Elektro Stahl. Entsprechend steigt die Quote des Schrotteinsatzes in der Rohstahlerzeugung im Jahr 2009 spürbar an (von rund 31% in 2007/2008 auf 35% in 2009), um anschließend wieder zu sinken.

Tabelle 5-6: Abschätzung des Schrotteinsatzes in der Stahl- und Gussproduktion 2007 – 2015

Verwertungsort	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Stahl, Elektro	15.619	15.200	11.619	13.566	14.994	14.143	14.143	13.666	13.397
Stahl, Konverter	6.124	5.509	3.585	5.472	5.290	5.080	5.254	5.429	5.141
Schrotteinsatz Guss	4.305	4.306	2.866	3.478	4.043	3.857	3.711	3.703	3.676

Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015, 2017, Angaben des Bundesverbands der Deutschen Gießerei-Industrie

Abbildung 5-4: Schrotteinsatz in der Stahl und Gussproduktion 2007 - 2015



Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl 2015, 2017, Angaben des Bundesverbands der Deutschen Gießerei-Industrie

5.1.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Anhand der Zahlen zum Schrotteinsatz in den Jahren 2007 bis 2015 und den Substitutionswegen und Verhältnissen wie sie detailliert für das Jahr 2013 ermittelt wurden, können DIERec, DERec und die KEA-Salden für die Jahre 2007 bis 2015 ermittelt werden.

Tabelle 5-7: Indikatoren für Stahl/Guss für 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	151.551	145.932	107.245	132.287	140.652	136.527	133.923	132.152	127.644
DERec	kt	50.916	49.002	36.004	44.464	47.233	45.849	44.991	44.405	42.881
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	143.794	140.889	106.126	124.581	135.841	132.143	127.953	124.823	121.244
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	114.220	111.931	84.237	98.908	107.898	104.945	101.613	99.144	96.318

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.2 Edelstahl

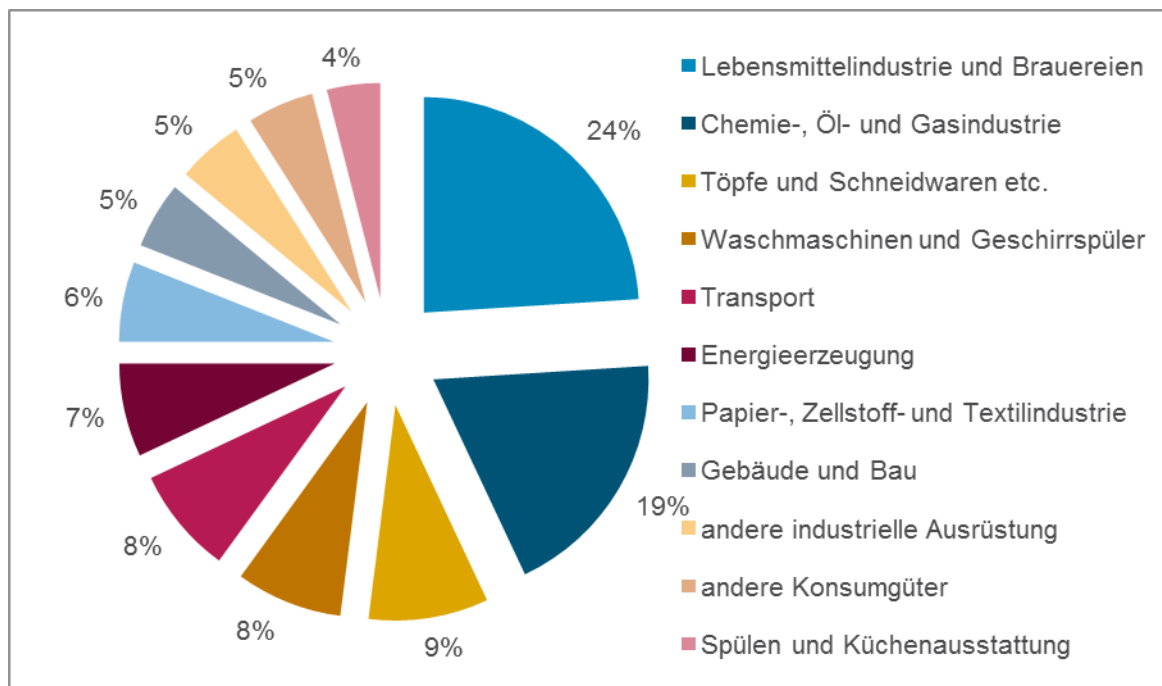
Edelstahl umfasst eine Reihe von Stahlwerkstoffen. Nach EN 10020¹⁷ ist Edelstahl eine Bezeichnung für legierte oder unlegierte Stähle mit besonderem Reinheitsgrad. Abweichend davon, werden im Rahmen dieser Untersuchung und analog zum umgangssprachlichen Verständnis, hierbei nur nichtrostende Stähle betrachtet.

Rostfreier Edelstahl wird vor allem in drei Legierungsgruppen eingeteilt. CrNi-Stähle (300er/austenitisch), CrMn-Stähle (200er/austenitisch) und Cr-Stähle (400er/ferritisch). Andere Stähle sind demgegenüber von vernachlässigbarer Bedeutung. CrNi Stähle haben mit 54,6 % den größten Anteil an der weltweiten Produktion von rostfreiem Edelstahl, gefolgt von Cr- Stählen mit 25,2 % und CrMn-Stählen mit 18,9 % (ISSF 2015). Die übrigen rostfreien Edelstähle sind dagegen mit einem Anteil von insgesamt 1,3 % von nachrangiger Bedeutung.

Ein wichtiger Unterschied zwischen den verschiedenen Edelstahlgruppen, sind ihre magnetischen Eigenschaften. Die austenitischen Edelstähle sind nicht ferromagnetisch und können daher gut von anderen Stählen unterschieden werden.

Die Verwendung von Edelstahl erfolgt sowohl in industriellen Anwendungen als auch in Konsumgütern (Abbildung 5-5).

Abbildung 5-5: Verwendung von rostfreiem Edelstahl nach Anwendung



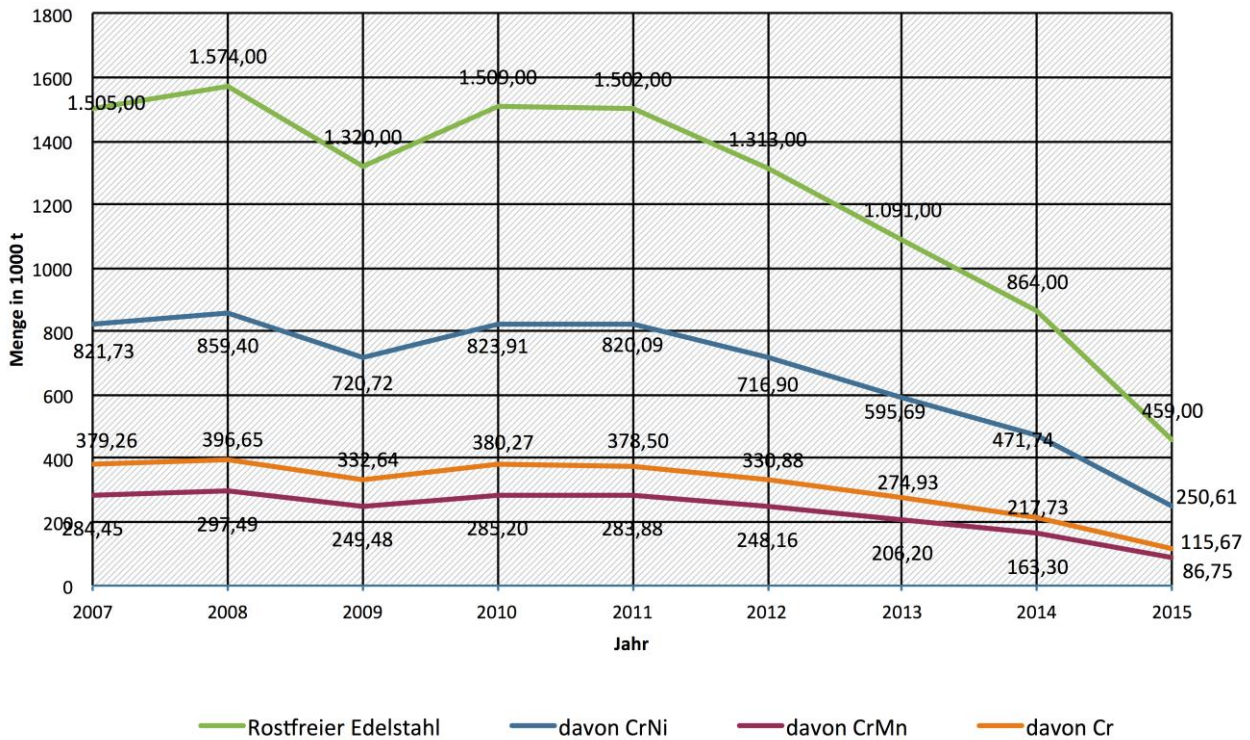
Quelle: Leffler Béla

¹⁷ DIN EN 10020:2000-07: Begriffsbestimmungen für die Einteilung der Stähle; Deutsche Fassung EN 10020:2000

5.2.1 Materialeinsatz in Deutschland

Die Produktion von nichtrostenden Stählen in Deutschland ist rückläufig, vor allem wegen der Schließung des Bochumer Outokumpu Werks und der Flüssigphase¹⁸ im Krefelder Werk von Outokumpu mit einer ehemaligen Kapazität von 600 kt/a. 2014 wurden in Deutschland 864.000 t hergestellt (ISSF 2015).

Abbildung 5-6: Produktion von rostfreiem Edelstahl in Deutschland



Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von ISSF (verschieden Jahrgänge)

Edelstahl besteht im Durchschnitt aus 62,6 % Fe, 18,8 % Cr, 8,2 % Ni und 10,6 % anderer Elemente (Outokumpu 2007 nach Mauss 2013). Damit wurden in Deutschland 2014 im rostfreien Edelstahl ca. 540 kt Fe, 162 kt Cr, 71 kt Ni und 92 kt andere Legierungselemente eingesetzt.

Edelstahl wird in Elektrolichtbogenöfen erschmolzen. Hierbei wird i. d. R. Schrott eingesetzt, der die ansonsten eingesetzten Primärrohstoffe ersetzen kann. Getrennte Primär- und Sekundärproduktionsrouten bestehen bei rostfreiem Edelstahl nicht. Neben Edelstahlschrott kann auch Karbonstahlschrott bei der Herstellung von Edelstahl eingesetzt werden.

Bei der Herstellung von rostfreiem Edelstahl werden Schrott und Primärrohstoffe in einem Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen. Anschließend wird der Stahl in einem Konverter behandelt und der Kohlenstoffgehalt reduziert. Gleichzeitig können im Konverter noch weitere Legierungsmetalle hinzugefügt werden. Der Edelstahl wird dann in einer Stranggussanlage gegossen und anschließend warmgewalzt.

Da weltweit eine Steigerung der Produktion von rostfreiem Edelstahl zu beobachten ist, kann der Anfall an Schrott den Bedarf aus der Produktion nicht decken. Weltweit werden derzeit bei austenitischem Edelstahl

¹⁸ Bedeutet, dass das Krefelder Werk keine eigenen Produktionskapazitäten für Stahl mehr besitzt, sondern nur noch angelieferte Stahlmengen verarbeitet, z.B. walzt.

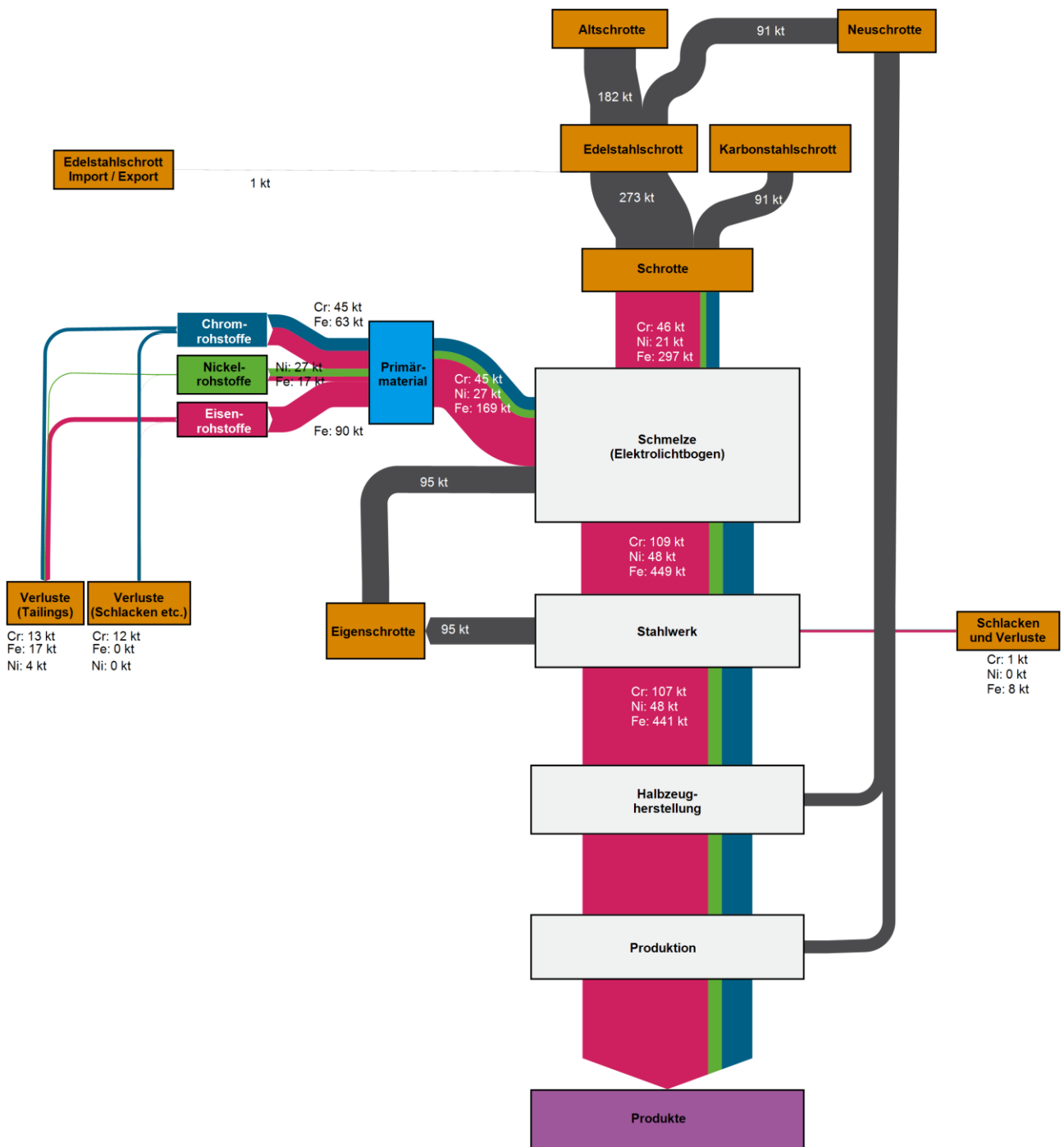
ca. Schrotteinsatzquoten von 60 % erreicht. Die Recyclingquote ist deutlich höher (Johnson 2008; Mauss 2013).

5.2.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Die Datenlage hinsichtlich der Stoffströme der Edelstahlherstellung in Deutschland ist insgesamt wenig zufriedenstellend. Es fehlen insbesondere Informationen zu den Schrottkomponenten (Mauss 2013). Sowohl hinsichtlich der eingesetzten Primärrohstoffe als auch der Sekundärrohstoffe sind keine entsprechenden statistischen Daten öffentlich verfügbar. Daher müssen aufgrund von Informationen zu Produktionsmengen, typischen Zusammensetzungen und typischen Schrottmengen die Stoffströme abgeschätzt werden.

Am günstigsten ist hierbei noch die Datenlage für die wichtigste Gruppe von rostfreien Edelstählen, den CrNi-Stählen. Auf der Grundlage der Produktionsmenge von 1.091 kt im Jahr 2013 und des Anteils der CrNi-Stähle an der Gesamtproduktion (siehe oben) und Daten zu den in der Herstellung von austenitischen Edelstahl eingesetzten Stoffen und Stoffverlusten (Johnson et al. 2007) können die Stoffströme abgeschätzt werden. Hierbei wird von einem Sekundärmaterialanteil von ca. 60 % ausgegangen (Johnson 2007; Mauss 2013). Eigen- und Neuschrottmengen wurden auf der Grundlage von Igarashi et al. (2007) mit 16 % Eigenschrott und 15,3 % Neuschrott für austenitische Edelstähle berücksichtigt.

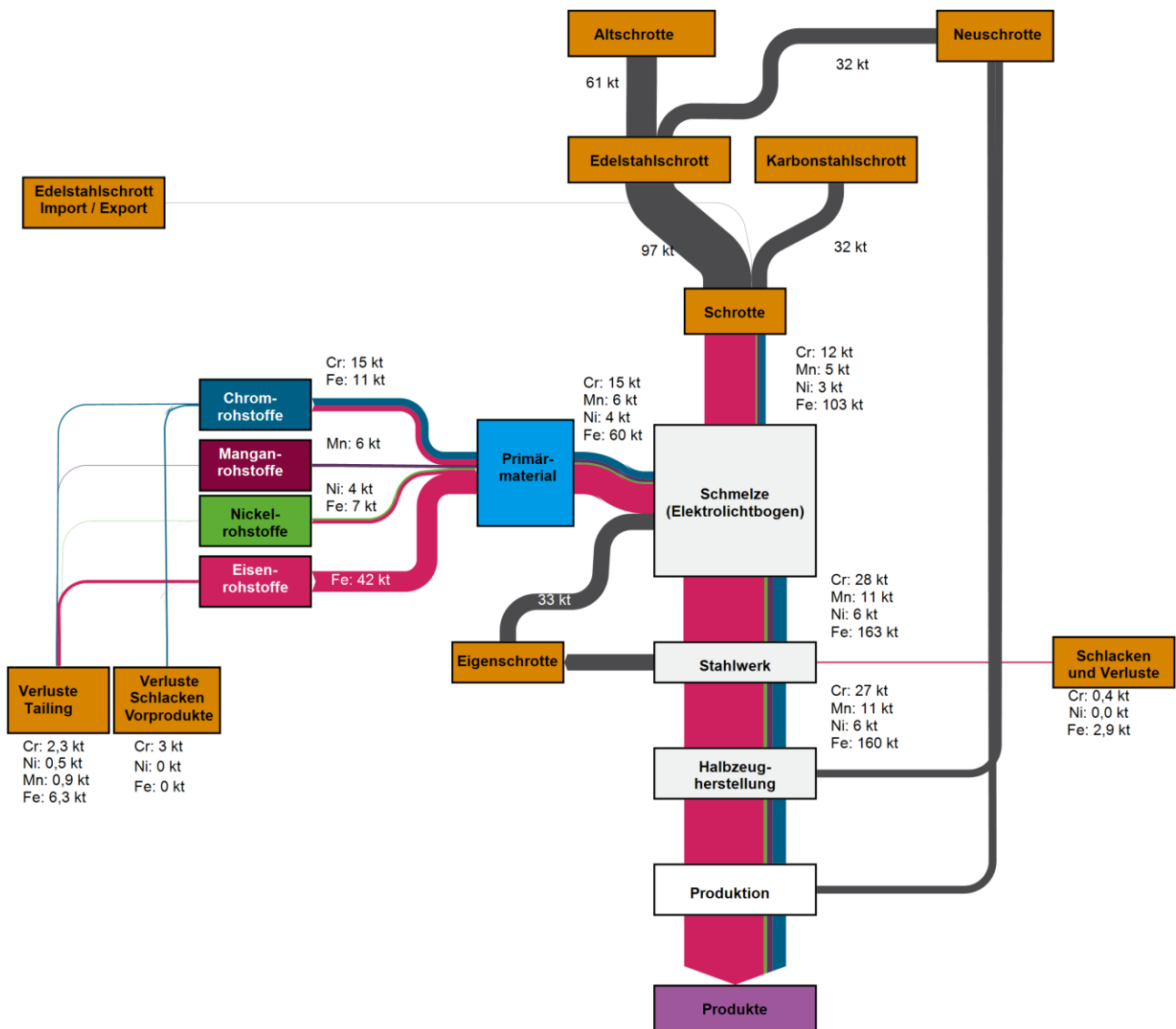
Abbildung 5-7: Stoffströme bei der Herstellung von CrNi-Edelstahl in Deutschland, 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

Analog dazu wurden auch für die CrMn-Edelstähle die Stoffströme abgeschätzt. Hierzu wurden die Verluste der CrNi-Edelstahlproduktion übernommen.

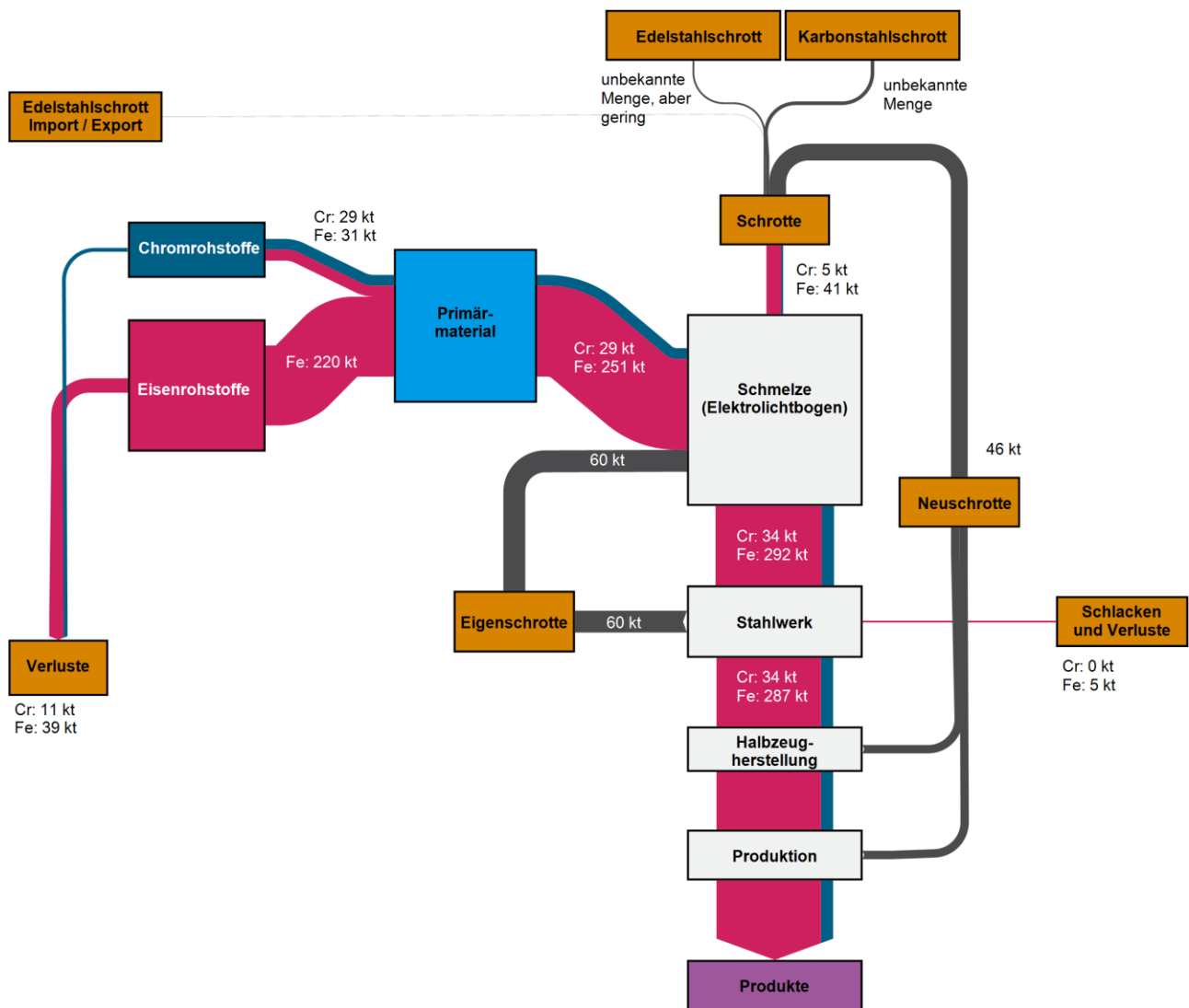
Abbildung 5-8: Stoffströme bei der Herstellung von CrMn-Edelstahl in Deutschland, 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

Die Stoffströme für die Herstellung von Cr-Edelstahl wurden ebenfalls abgeschätzt. Hierbei wurde jedoch davon ausgegangen, dass der Anteil an Edelstahlschrott vernachlässigbar gering ist. Grund hierfür ist, dass diese ferritischen Edelstähle sich nicht aufgrund der magnetischen Eigenschaften von Karbonstahl trennen lassen und daher überwiegend zusammen mit Karbonstahl recycelt werden (Igarashi et al. 2007). Eigen- und Neuschrottmengen wurden auf der Grundlage von Igarashi et al. (2007) mit 22 % Eigenschrott und 16,8 % Neuschrott für ferritische Edelstähle berücksichtigt.

Abbildung 5-9: Stoffströme bei der Herstellung von Cr-Edelstahl in Deutschland, 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

5.2.2.1 Bereitstellung von Edelstahlschrott im Jahr 2013

Statistische Daten über den Anfall von Edelstahlschrott in Deutschland sind nicht verfügbar. Verfügbar sind jedoch statistische Informationen zum Im- und Export von Edelstahlschrott von und nach Westeuropa (ISSF 2015). Hier zeigt sich ein, trotz leichter Schwankungen, ausgeglichenes Verhältnis von Im- und Exporten. Informationen zur stofflichen Zusammensetzung der Schrotte fehlen jedoch.

Bei der Herstellung von Edelstahl werden nicht nur Edelstahlschrotte, sondern auch Karbonstahlschrotte eingesetzt. Edelstahlschrott umfasst ca. 50% des Rohstoffinputs der Edelstahlproduktion (Johnson 2007, Mauss 2013).

Bei den in der Edelstahlproduktion eingesetzten Schrotten handelt es sich um Eigenschrott der bei der Herstellung anfällt, Neuschrott, der bei der Verarbeitung anfällt und Altschrotten aus gebrauchten Produkten.

Auf der Basis der Produktionsmengen, typischer Schrottanteile und typischer Zusammensetzungen von Schrotten kann die Schrottnutzung und Zusammensetzung, wenn auch recht grob, abgeschätzt werden.

Tabelle 5-8: Edeltahlschrotte und Legierungselementfrachten, 2013

Material	Massenstrom [kt/a]	Fe-Fracht [kt/a]	Cr-Fracht [kt/a]	Ni-Fracht [kt/a]	Mn-Fracht [kt/a]
Edeltahlschrott (Altschrott)	243,3	186,4	38,3	15,4	3,3
CrNi-Edelstahl Neuschrott	90,9	67,3	16,3	7,3	
CrMn-Edelstahl Neuschrott	31,6	24,6	4,2	1,0	1,8
Cr-Edelstahl Neuschrott	46,2	41,4	4,8		
Karbonstahlschrott	>121,9	>121,9			

Quelle: eigene Zusammenstellung

Der Anfall von Edeltahlschrotten wird maßgeblich durch die Lebensdauer der unterschiedlichen Produkte bestimmt.

5.2.2.2 Verluste

Sowohl beim Recycling als auch bei der Herstellung von Edelstahl aus Primärrohstoffen treten Verluste auf. Auf der Grundlage der vorhandenen Informationen kann keine Unterscheidung hinsichtlich der Verluste im Schmelzprozess vorgenommen werden. Erhebliche Unterschiede bestehen jedoch hinsichtlich der Verluste bei der Aufbereitung der Rohstoffe. Hier kommt es bei der Herstellung aus Primärmaterialien zu relevanten Verlusten, die auch in den Sankey-Diagrammen dargestellt sind.

Weitere Verluste treten auf, da nicht alle Edeltahlschrotte recycelt werden und teilweise das Recycling zusammen mit Karbonstahl erfolgt. Hierzu liegen nur wenige Informationen vor. Abschätzungen gehen davon aus, dass die Recyclingrate von Edeltahlschrott bei ca. 79 % (70 % Recycling und 9 % Downcycling) für 2005 lag (Reck et al. 2010).

Tabelle 5-9: Verluste bei der Herstellung des in Deutschland produzierten Edelstahl, 2013

Prozess	Fe-Fracht [kt/a]	Cr-Fracht [kt/a]	Ni-Fracht [kt/a]	Mn-Fracht [kt/a]
Herstellung von Edelstahl	12,6	1,8	0,2	k.A.
Rohstoffaufbereitung	75	58	9	k.A.

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.2.3 Verwertungswege

Edelstahlrecycling spart erhebliche Primärrohstoffmengen. Bei der Herstellung von Edelstahl kommen Eigenschrotte, Neuschrotte und Altschrotte zum Einsatz. Mit dem Einsatz von Edeltahlschrotten werden nicht nur primäre Eisenrohstoffe, sondern insbesondere auch Legierungsmetalle eingespart. Für die drei dargestellten Legierungsgruppen, ergeben sich hierbei insgesamt Einsparungen von zusammen ca. 442kt/a Eisen, 63,5 kt/a Chrom, 23,7 kt/a Nickel und 5,1 kt/a Mangan die nicht durch Primärrohstoffe in die Edeltahlproduktion eingebracht werden müssen.

5.2.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Edeltahlproduktion wurde für unterschiedliche Gruppen von Edelstahl die europäische Produktion abgebildet.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-10: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Edelstahl, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Edelstahl, primär (Durchschnitt der Altschrotte)	62,3	15.159
Edelstahl, primär (CrNi)	62,52	5.684
Edelstahl, primär (CrMn)	30,15	952
Edelstahl, primär (Cr)	6,88	306
Roheisen	5,92	697
	DIERec	22.798

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-11: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Edelstahl, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Edelstahl, primär (Durchschnitt der Altschrotte)	2,61	634
Edelstahl, primär (CrNi)	2,70	245
Edelstahl, primär (CrMn)	3,11	98
Edelstahl, primär (Cr)	3,35	155
Roheisen	1,76	240
	DERec	1.373

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-12: Eingesparter Energieaufwand inkl. der ausländischen Vorkette für Edelstahl, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Edelstahl, primär (Durchschnitt der Altschrotte)	60,82	47,98	14.800	11.675
Edelstahl, primär (CrNi)	60,89	48,19	5.536	4.381
Edelstahl, primär (CrMn)	39,68	32,17	1.253	1.016
Edelstahl, primär (Cr)	20,87	18,85	964	871
Roheisen	5,671	6,226	774	850
		KEA-Saldo	23.326	18.793

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-13: Eingesparter Energieaufwand ohne ausländische Vorkette für Edelstahl, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Edelstahl, primär (Durchschnitt der Altschrotte)	1,79	1,60	435	389
Edelstahl, primär (CrNi)	1,79	1,60	163	145
Edelstahl, primär (CrMn)	1,79	1,60	56	50
Edelstahl, primär (Cr)	1,79	1,60	83	74
Roheisen	5,459	6,051	745	826
		KEA-Saldo	1.482	1.484

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.2.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.2.5.1 Verwertungsmengen

Die Verwertungsmenge von rostfreiem Edelstahl und die damit verbundenen Legierungsmetalle werden in dieser Studie auf Grund der schlechten Datenlage aus wenigen Literaturquellen abgeleitet und sind in erster Linie typische Verteilungszahlen über a) die Zusammensetzung der rostfreien Edelstähle nach Stahlqualitäten, b) den typischen Anteilen von Legierungsmetallen je untersuchter Stahlsorte und c) dem Anteil von Eigen- und Neuschrott an den verwerteten Schrottmengen insgesamt. Aus diesen Informationen wurde für das Jahr 2013 die Menge an Legierungsmetallen abgeleitet, die durch den Einsatz von Schrott bei der Herstellung von rostfreien Edelstählen eingespart werden konnten. Über eine zeitliche Veränderung dieser Verteilungszahlen liegen keine Informationen vor. Entsprechend wurden diese Annahmen unverändert auf die Produktionsmengen (ISSF 2015, ISSF 2014) an rostfreiem Edelstahl der Jahre 2007 bis 2015 angewandt.

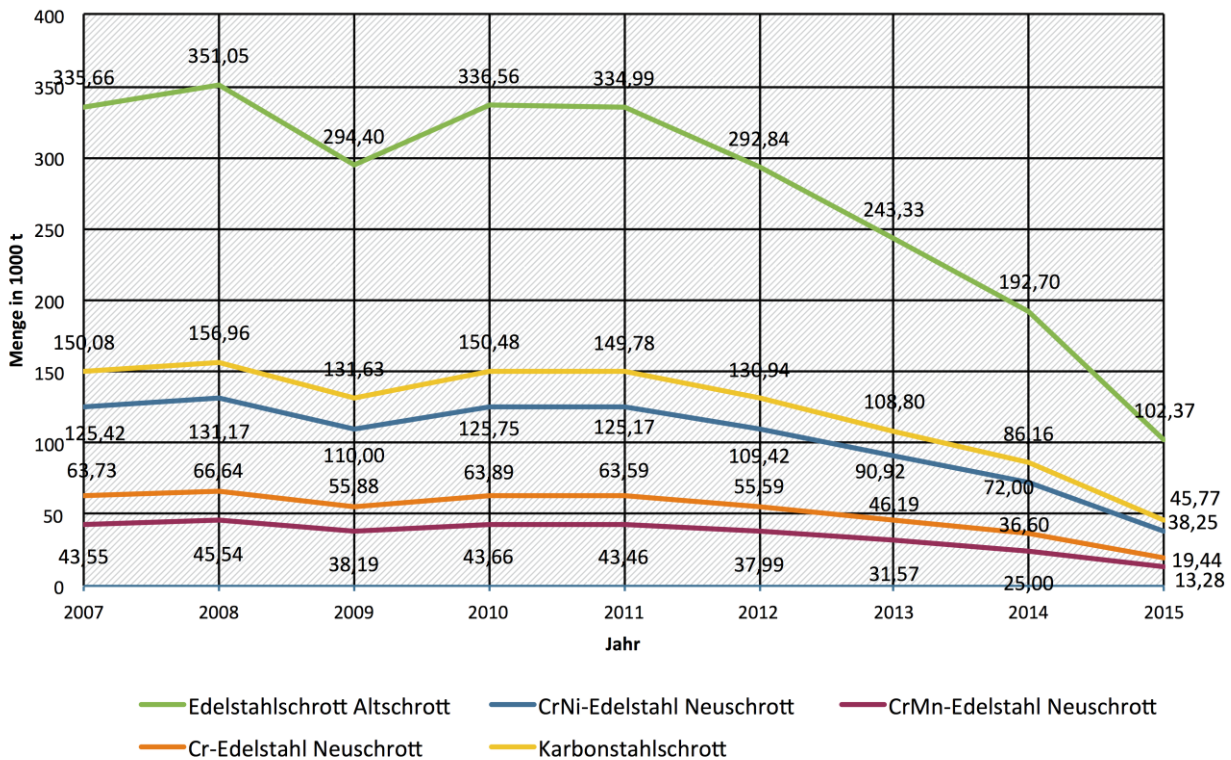
Wie aus Abbildung 5-6 ersichtlich sank die Produktionsmenge an rostfreiem Edelstahl ab 2011 kontinuierlich. Entsprechend sanken auch die verwerteten Schrottmengen (Abbildung 5-10).

Tabelle 5-14: Abschätzung des Schrotteinsatzes bei der Herstellung rostfreier Edelstähle 2007 – 2015

Material	Massenstrom in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Edelstahlschrott (Altschrott)	335,7	351,1	294,4	336,6	335,0	292,8	243,3	192,7	102,3
CrNi-Edelstahl Neuschrott	125,4	131,2	110,0	125,8	125,2	109,4	90,9	72	38,2
CrMn-Edelstahl Neuschrott	43,5	45,5	38,2	43,7	43,5	38,0	31,6	25	13,3
Cr-Edelstahl Neuschrott	63,8	66,6	55,9	63,9	63,6	55,6	46,6	36,6	19,4
Karbonstahlschrott	168,1	175,8	147,4	168,5	167,8	146,7	121,9	96,5	51,3

Quelle: eigene Zusammenstellung

Abbildung 5-10: Schrotteinsatz bei der Herstellung rostfreier Edelstähle in Deutschland, 2007-2015



Quelle: eigene Berechnung

Aus den unterschiedlichen Massenströmen an Edelstahlschrott lassen sich folgenden Eisen- und Legierungsfrachten ableiten, die durch den Einsatz von Schrott wieder in den Produktionsprozess von rostfreiem Edelstahl eingehen und somit nicht über Primärrohstoffe ersetzt werden müssen.

Tabelle 5-15: Abschätzung der mit dem Schrotteinsatz verbundenen Materialfrachten bei der Herstellung rostfreier Edelstähle 2007 – 2013

Material	Eisen- und Legierungsmetallfrachten in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Fe-Fracht	609,1	637,0	534,2	610,7	607,9	531,5	441,6	349,7	185,8
Cr-Fracht	87,6	91,6	76,8	87,8	87,4	76,4	63,8	50,3	26,7
Ni-Fracht	32,7	34,2	28,7	32,8	32,7	28,6	23,7	18,8	10
Mn-Fracht	7,0	7,3	6,1	7,0	7,0	6,1	5,1	4	2,1

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.2.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Anhand der Zahlen zum Schrotteinsatz in den Jahren 2007 bis 2015 und den Substitutionswegen und Verhältnissen, wie sie detailliert für das Jahr 2013 ermittelt wurden, kann der DIERec, DERec und die KEA-Salden für die Jahre 2007 bis 2012 sowie 2014-2015 ermittelt werden.

Tabelle 5-16: Indikatoren für rostfreien Edelstahl für 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	31.449	32.891	27.583	31.553	31.386	27.437	22.798	18.055	9.591
DERec	kt	1.894	1.980	1.661	1.899	1.890	1.625	1.373	1.087	578
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	32.178	33.653	28.222	32.263	32.113	28.072	23.326	18.473	9.814
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	2.045	2.138	1.793	2.050	2.040	1.784	1.482	1.174	624

5.3 Aluminium

Aluminium wird als Leichtmetall insbesondere im Bau- und Transportbereich eingesetzt. Aufgrund erhöhter Festigkeit werden häufig Legierungen genutzt, bei denen die Elemente Kupfer, Magnesium, Mangan, Silizium und Zink zumeist in geringen Konzentrationen eingesetzt werden. Die weltweite Raffinerieproduktion lag im Jahr 2014 bei 53 Mio. t. Für die Primärherstellung von Aluminium aus Bauxit ist mit 13 bis 18 kWh elektrischem Strom für die Schmelzflusselektrolyse von einem kg Al sehr energieaufwendig (Dechema 2015, Seite 14).

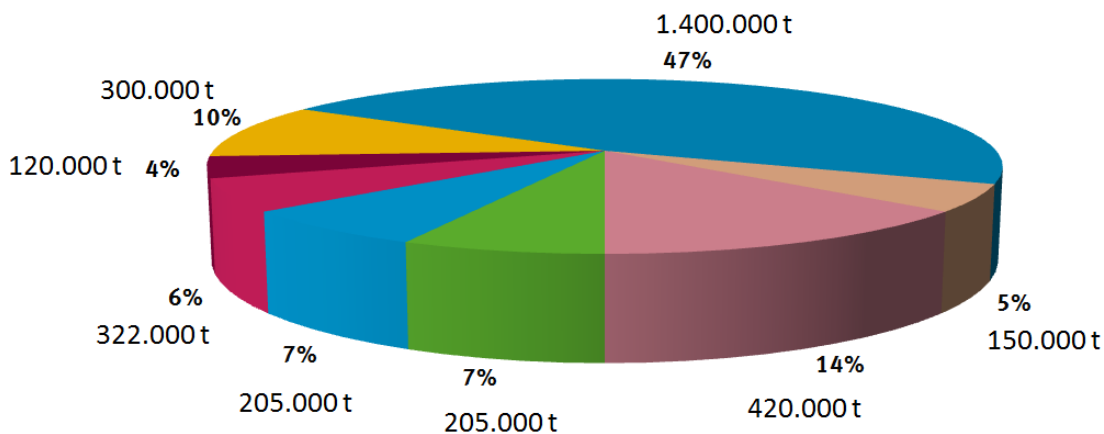
Grundsätzlich wird Aluminium in folgenden Qualitäten eingesetzt:

- ▶ Hüttenaluminium (> 99% Al) in Elektrotechnik und Folien
- ▶ Aluminiumknetlegierungen (Al ~ 97%) in Bauwesen, Fahrzeugbau, Maschinenbau
- ▶ Aluminiumgusslegierungen (Al > 87%) in Haushaltsgeräten, Bauwesen, Motoren

5.3.1 Materialeinsatz in Deutschland

Die Wirtschaftsvereinigung Metalle macht für die Verwendungsbereiche von Aluminium folgende Angaben:

Abbildung 5-11: Verwendungsbereiche von Aluminium in Deutschland – 2013



- | | | |
|------------------|------------------|-----------------------------|
| ■ Maschinenbau | ■ Elektrotechnik | ■ Eisen- und Stahlindustrie |
| ■ Haushaltswaren | ■ Verpackung | ■ Verkehr |
| ■ Sonstige | ■ Bauwesen | |

Quelle: Schätzung nach GDA (2014a)

Die in der Abbildung gezeigten Mengen beziehen sich auf die inländische Verwendung von Aluminium und umfassen damit auch die importierten Mengen. Die Wirtschaftsvereinigung gibt für das Jahr 2013 eine Gesamtmenge von 2.980.000 t Aluminium an, die in Produkten auf den deutschen Markt gelangen. Aufgrund der zunehmenden Energiesparbemühungen wird das Leichtmetall Aluminium vor allem im Transportbereich eingesetzt.

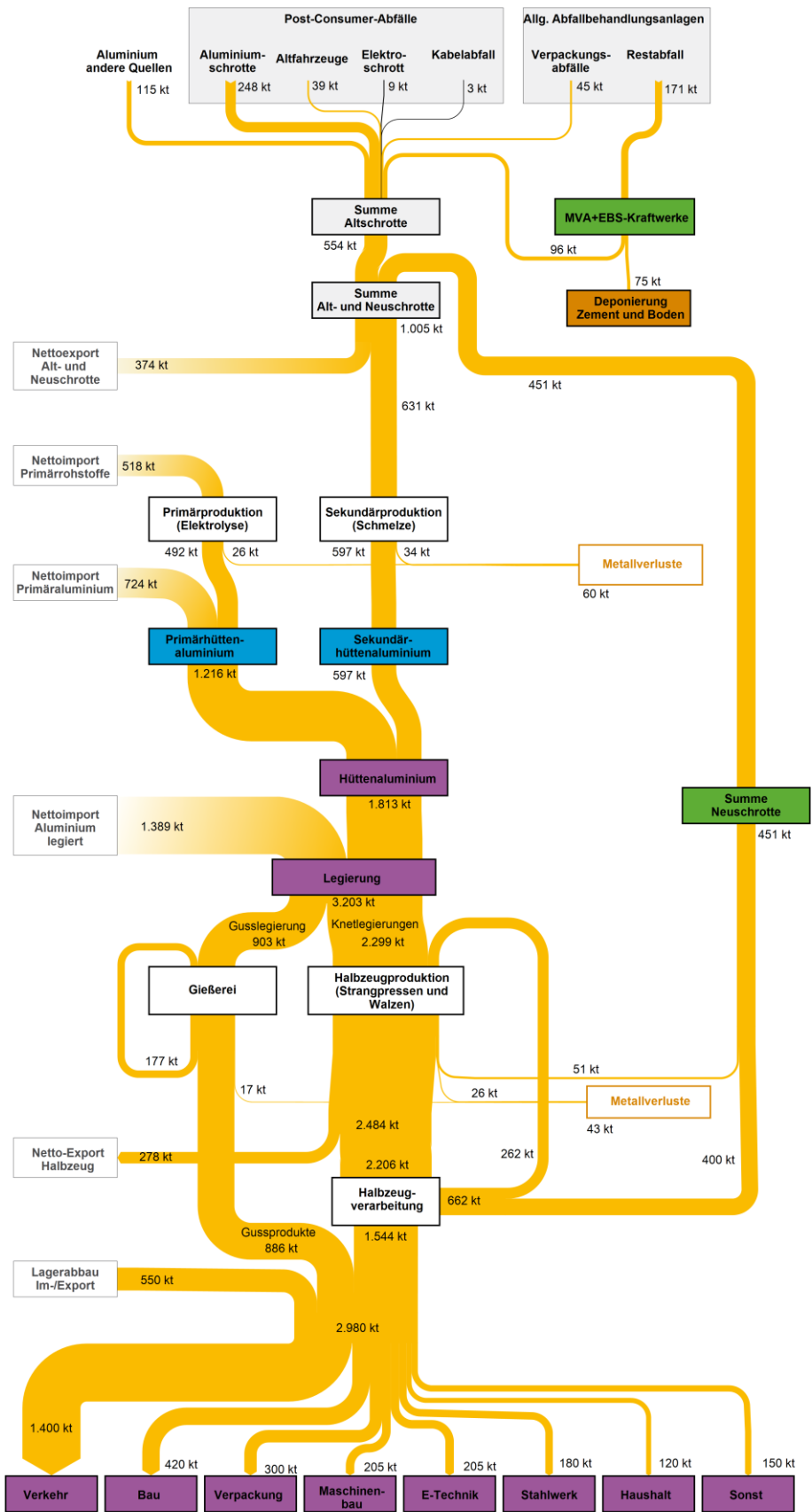
5.3.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Eine belastbare Abbildung der Stoffströme für Aluminium in Deutschland ist nicht einfach, da große Handelsmengen auftreten, deren Qualitäten insbesondere in Bezug auf den Sekundärbereich unklar bleiben. Um eine Abschätzung der Stoffströme vorzunehmen, ist wie folgt vorgegangen worden:

- ▶ Erstellung eines qualitativen Grundgerüsts auf Basis und unter Abgleich vorliegender Herstellungsdaten von:
 - Produktions- und Anwendungsmengen aus der Statistik der Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM 2015)
 - Der Aluminiumbilanz für Europa des International Aluminium Institute (IAI 2014)
 - Der Aluminiumbilanz für Österreich 2010 (Buchner, Laner 2015)
 - Einer Bilanz für Aluminium aus der Dissertation von Paulus (Paulus 2005)
- ▶ Ergänzung von Im- und Exporten aus Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2014)
- ▶ Ergänzung von Daten zum Aufkommen von Aluminiumschrotten, Kabelabfällen und aluminiumhaltigen Verpackungsabfällen aus der Fachserie 19 Reihe 1 (DESTATIS 2015)
- ▶ Ergänzung durch Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland (BMUB(a) 2014)
- ▶ Ergänzung von Daten zu Altfahrzeugen aus dem Altfahrzeugbericht (BMUB(b) 2014)
- ▶ Abschätzung der Konzentrationen und Stoffströme von metallischem Aluminium in den Sekundärrohstoffströmen
- ▶ Abschätzung von Sammelmengen für Sekundärrohstoffe außerhalb des Abfallregimes auf der Basis der Angaben zum Einsatz von Sekundärmaterial
- ▶ Abschätzung von dissipativen Verlusten an metallischem Aluminium in sonstigen Abfallströmen wie Restabfällen, Sekundärbrennstoffen und sonstigen metallischen Abfällen.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die mit diesem Vorgehen abgeschätzten Aluminiumstoffströme in Deutschland. Eine Diskussion erfolgt ausgehend von den am unteren Ende der Abbildung angegebenen Aluminiumprodukten im deutschen Markt.

Abbildung 5-12: Stoffströme Aluminium in Deutschland 2013



Quelle: eigene Berechnungen

Aufgrund des unedlen Charakters von Aluminium sind die Begleitelemente des Aluminiums in der Regel edler, was eine Reinigung durch Raffination erschwert, da die Legierungselemente im Aluminium verbleiben (Martens 2011, Seite 94). Die Kenntnis der Legierungszusammensetzung der verarbeitenden Schrotte ist daher von herausragender Bedeutung. Darüber hinaus sind bei der Aufarbeitung von Altschrotten Sortiertechnologien, bei denen eine Werkstofferkennung stattfindet, hilfreich.

Entsprechend zu den Einsatzlegierungen fallen Produktionsabfälle in Gießereien und Halbzeugwerken sehr rein und in definierter Form an. Diese Neuschrotte werden üblicherweise direkt in Schmelzöfen eingesetzt und sind nicht in Schrottbilanzen enthalten. Für die Gesamtbetrachtung der Stoffströme sind die direkt eingeschmolzenen Neuschrottmengen nicht relevant, allerdings werden sie aus Gründen der Transparenz im Text behandelt.

Saubere Neuschrotte mit geringen Verunreinigungen werden vielfach ohne Schmelzsatz in Umschmelzwerken (Remeltern) wiedergewonnen. Die bei der Produktherstellung aus Halbzeugen anfallenden Neuschrotte sind zumindest teilweise weniger definiert und werden daher vielfach wie Altschrotte behandelt, die zunächst in speziellen Umschmelzwerken (Refinern) unter Salz im Hinblick auf ihre Zusammensetzung definiert werden, bevor sie wieder zur Produktion eingesetzt werden (Martens 2011, Seite 95; 108). Dabei kommen in gewissem Umfang sowohl Legierungselemente als auch Primäraluminium zum Einsatz (Paulus 2005, Seite 62). Vorrangige Wege des neu raffinierten Aluminiums sind Gusserzeugnisse und Desoxidationsaluminium, das in der Stahlindustrie zur Reinigung der Schmelzen eingesetzt wird (EAA OEA 2006, Seite 11). Gussanwendungen sind deshalb geeignet, da hier anteilig mehr Legierungselemente enthalten sind und in Bezug auf die Zusammensetzung ggf. nachgesteuert werden kann.

5.3.2.1 Bereitstellung von Hüttenaluminium

Produktionsseitig stehen für das in Deutschland eingesetzte Hüttenaluminium folgende Daten zur Verfügung:

Tabelle 5-17: Hüttenaluminiumquellen in Deutschland 2013

Material	Massenstrom [t]	Anteil [%]
Nettoimport Aluminium legiert	1.389.000	43
Nettoimport Primäraluminium	724.000	23
Primärproduktion in Deutschland	492.000	15
Sekundärproduktion in Deutschland	597.000	19
Summe Hüttenaluminium	3.202.000	100

Quelle: WVM 2014, BGR 2014

Bemerkenswert sind die hohen Anteile der Primäraluminiumimporte (legiert und unlegiert) am in Deutschland verwendeten Hüttenaluminium. Sie machen rund zwei Drittel des Gesamtverbrauchs von Hüttenaluminium aus.

Die Tabelle zeigt weiterhin, dass die inländische Sekundärproduktion von Aluminium etwas höher als die inländische Primärproduktion ist.

5.3.2.2 Bereitstellung von Sekundäraluminium

Die in Deutschland 2013 produzierte Masse von 597.000 t Sekundäraluminium entstammt unterschiedlichen Prozessen, die von der Direktschmelze bis hin zu Raffination unter Salz und Aufarbeitung der Salze reichen. Um die Quellen zu ermitteln, wurden die Aluminiummengen abgeschätzt, die im Rahmen der Abfallaufbereitung anfallen. Darüber hinaus werden die Abschätzungen für Neuschrottmengen aus der Halbzeug- und Produktfertigung übernommen.

Um abzuschätzen, welche Aluminiumfrachten aus der Abfallbehandlung stammen, sind die Daten des Statistischen Bundesamtes zu Abfallschlüsselnummern ausgewertet worden, die einen konkreten Bezug zu metallischem Aluminium aufweisen. Weiterhin ist für die einzelnen Abfallarten ihr jeweiliger Al-Gehalt abgeschätzt worden. Die ermittelten Massenströme und Frachten zeigt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 5-18: Aluminiumschrotte und Aluminiumfrachten aus der Abfallbehandlung

Material	Massenstrom [t]	Al-Gehalt [%]	Al-Fracht [t]	Quelle für Massen und Al-Gehalt
Al aus Abfällen in thermischen Abfallbehandlungsanlagen und Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung von Abfällen	46.101.000	Input: 0,37 Rückgeführt: 0,21	Input: 171.000 Output: 96.000	DESTATIS 2015; EdDE 2015
Al aus Verpackungsabfällen	66.200	67,5	44.700	DESTATIS 2015 und Erfahrungswert
Al aus Altfahrzeugen	491.000	7,9	38.800	BMUB(b) 2014; GDA 2012
Al aus der Elektroaufbereitung	687.000	1,25	8.600	BMUB(a) 2014; eigene Annahmen
Kabelabfälle	144.300	2,0	2.900	DESTATIS 2015 (Schlüsselnummer 170411); Erfahrungswert aus Untersuchungen
Aluminiumschrotte	291.800	85,0	248.000	DESTATIS 2015 (Schlüsselnummer 170402)
Schrotte aus der Abfallwirtschaft			439.000	

Abfälle, die in thermische Abfallbehandlungsanlagen und Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung von Abfällen behandelt werden, enthalten metallisches Aluminium in der Größenordnung von ca. 0,37 Ma-% (EdDE 2015). Unter derzeitigen Rahmenbedingungen wird davon ausgegangen, dass aus den Behandlungsanlagen 56 % des Inputs wiedergewonnen werden können.

In kurzlebigen Verpackungen werden jährlich ca. 100.000 t Aluminium eingesetzt (GDA 2014b). Laut (DESTATIS 2015) wurden 66.200 t aluminiumhaltige Verkaufsverpackungen bei privaten Endverbrauchern eingesammelt. Es wird davon ausgegangen, dass sie bei einem Störstoffanteil von 10% eine Aluminiumkonzentration von 75 % aufweist. Mithin ist hier eine Aluminiumfracht von etwa 44.700 t zu erwarten.

Der Aluminiumgehalt von europäischen Kraftfahrzeugen hat laut GDA im Jahr 2012 einen Wert von 140 kg erreicht, während er 1990 noch 50 kg ausmachte. Unter der Annahme eines linearen Anstieges und eines Fahrzeuggewichtes von 1.300 kg ergibt sich für ein 2003 gebautes Auto ein Aluminiumanteil von ca. 8 % (GDA 2012). Die entsprechende Aluminiumfracht ergibt sich aus den in Deutschland 2013 angefallenen Altfahrzeugen.

Die Werte für die Gewinnung von Aluminium aus Elektroschrotten, wie auch aus Kabeln, werden sehr konservativ geschätzt, da davon ausgegangen wird, dass die Materialien nach der primären Demontage als Aluminiumschrotte behandelt und gehandelt werden. Für diese Altschrotte ergibt sich aus den Mengenangaben des statistischen Bundesamtes unter der Annahme einer Aluminiumkonzentration von 85% ein

Stoffstrom von rund 248.000 t, der einen Massenanteil von über 50 % an den abfallbürtigen Al-Schrotten ausmacht.

Für Aluminiumschrotte aus anderen, nicht im Rahmen der Abfallbehandlung zu behandelnden Quellen wird eine Masse von 115.000 t angenommen. Die Masse ergibt sich vor dem Hintergrund der produzierten Menge an Sekundäraluminium (WVM 2014) und der exportbereinigten Prozessbilanzen für die Sekundäraluminiumgewinnung (Paulus 2005, IAI 2014).

Für die Stoffströme der Sekundäraluminiumherstellung werden folgende Annahmen getroffen:

Tabelle 5-19: Stoffströme der Sekundäraluminiumherstellung 2013

Material	Massenstrom [t]	Datenquelle
Al Schrotte (Alt- und Neuschrotte)	631.000	eigene Berechnung
Verluste (Abbrand)	34.000	Paulus 2005, IAI 2014
Produktion Sekundäraluminium	597.000	WVM 2014

Über die Stoffstrombilanz der Sekundäraluminiumherstellung in der obigen Tabelle lässt sich der Schrottin-put in die Umschmelzwerke mit 631.000 t abschätzen. Ein weiterer Schrott-Stoffstrom geht in den Außenhandel: die Außenhandelsbilanz für Sekundärrohstoffe aus Aluminium weist aus, dass 2013 einem Import von 561.000 t ein Export von 935.000 t gegenüberstand (Nettoexportüberschuss von 374.000 t). Dabei ist unklar, ob es sich bei den exportierten Mengen um Neu- oder aber Altschrotte handelt.

5.3.2.3 Produkt- und Halbzeugebene

In Deutschland sind 2013 rund 3 Mio. t Aluminium in Produkten auf den Markt gelangt. Hiervon sind 886.000 t Gussprodukte und 2,1 Mio. t Halbzeuge (WVM 2014), die neben Aluminium auch Legierungselemente enthalten.

Interne Kreislaufführung im Aluminiumguss

Im Aluminiumkreislauf findet eine interne Kreislaufführung statt. Für den Aluminiumguss wird davon ausgegangen, dass ca. 20 % der Produkte wieder eingeschmolzen werden, da sie den Qualitätsanforderungen nicht genügen. Für Österreich geben Buchner und Laner hier 22,7 % an (Bucher, Laner 2015). Damit ergibt sich eine interne Schmelzkreislaufrmenge von 177.000 t.

Interne Kreislaufführung von Knetlegierungen in der Halbzeugproduktion

Die Quantifizierung des internen Kreislaufs für die Halbzeugproduktion gestaltet sich schwieriger. Buchner und Laner geben für Österreich interne Rücklaufanteile von 7 % für Strangprodukte sowie 23 % für Wälzprodukte an. Die IAI meldet, dass ca. 32 % des Inputs als Fabrikationsschrotte anfallen, die allerdings auch gehandelte Neuschrotte beinhalten (IAI 2014).

Für die vorliegende Bilanz ergibt sich rechnerisch eine interne Kreislaufmenge von 615.000 t. Das entspricht einem Anteil von 24% vom Input und liegt im Vergleich zu den österreichischen Werten in einer plausiblen Größenordnung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird dieser Kreislauf nicht im Sankey-Diagramm dargestellt.

Einsatz von Neuschrotten in der Halbzeugproduktion

Es wird davon ausgegangen, dass ein Teil des Neuschrottes (zwischen 30 und 50 %) aus der Halbzeugverarbeitung (262.000 t) von so hoher Reinheit ist, dass er direkt in der Halbzeugproduktion eingesetzt wird.

Anfall von Neuschrotten in der Halbzeugproduktion

Weiterhin wird analog zur österreichischen Bilanz abgeschätzt, dass in der Halbzeugproduktion in Deutschland 2 % Neuschrott (51.000 t) anfallen, die aufgrund von Verunreinigungen nicht direkt im Kreislauf geführt werden können, sondern wie Altschrott in Refinern eingeschmolzen werden müssen (Buchner, Laner 2015).

Anfall von Neuschrott in der Halbzeugverarbeitung

Der in der Halbzeugverarbeitung anfallende Neuschrott beläuft sich nach Angaben des IAI auf rund 30% des Halbzeuginputs (IAI 2014). Hier wurden 662.000 t (30 % des Halbzeuginputs von 2.206.000 t) angenommen.

Verluste beim Metallguss und der Halbzeugfertigung

Beim Metallguss ist mit einem Materialverlust von ca. 1,9% des Inputs als Abbrand in Richtung Aluminiumoxid zu rechnen. Für das Direkteinschmelzen von Produkten in der Halbzeugfertigung wird von einem Abbrand von 1% ausgegangen (IAI 2014), so dass insgesamt Verluste von 43.000 t bilanziert werden.

Gesamtproduktion, Importe und Lagerveränderungen

Nach der Schätzung des GDA werden im deutschen Markt von 2.980.000 t Aluminium in Produkten verbraucht. Demgegenüber stehen eine produzierte Menge von 1.544.000 t Halbzeugprodukte aus der Halbzeugverarbeitung und 886.000 t Gussprodukte. Es wird davon ausgegangen, dass die Differenz von 550.000 t durch Nettoimporte und Lagerabbau abgedeckt wird.

5.3.2.4 Bilanzierung der Aluminiumverluste

In der Gesamtübersicht lassen sich folgende Verlustmengen an metallischem Aluminium quantifizieren:

Tabelle 5-20: Bei der Bilanzierung berücksichtigte Aluminiumverluste

Material	Al-Fracht [t]	Kommentar
Deponierung inklusive Untertage und Zement	75.000	In Restmüll und Ersatzbrennstoffen nicht erfasstes Al.
Abbrandverluste aus Metallschmelzen	103.000	Berechnet nach Angaben der IAI 2014
Dissipativer Einsatz in Stahlproduktion	180.000	GDA 2014a in WVM 2014
Summe der Verluste	358.000	

Mit 358.000 t liegen die überschlüssig quantifizierten Verluste an metallischem Aluminium in der Größenordnung von 73 % der deutschen Primärproduktion. Im Vergleich zu der in Deutschland in Verkehr gebrachten Aluminiummenge von 2.980.000 t machen die jährlichen Verluste rund 12 % aus.

Die in der Abfallbehandlung verlorenen Anteile machen knapp 21 % der Gesamtmenge aus. Weitere 29 % gehen im Rahmen der thermischen Prozesse als Abbrand verloren. Ca. 180.000 t pro Jahr Aluminiumrecycolat wird in der Stahlindustrie als Desoxidationsaluminium eingesetzt, um die Schmelzen zu reinigen.

5.3.3 Verwertungswege

In Deutschland wurde 2013 rund 597.000 t sekundäres Aluminium aus inländischen Abfällen produziert. Hinsichtlich der Sekundärproduktionskette kann zwischen zwei Verfahrenswegen unterschieden werden:

- ▶ Altschrotte werden in Refinern verwertet (Umschmelzwerke mit Zugabe von Salz)
- ▶ Saubere Neuschrotte mit geringen Verunreinigungen werden vielfach ohne Schmelzsatz in Umschmelzwerken (Remeltern) wiedergewonnen.
- ▶ Die bei der Produktherstellung aus Halbzeugen anfallenden Neuschrotte sind weniger definiert und werden daher zumindest anteilig wie Altschrotte in Refinern behandelt.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Primär- und Sekundär-Inputströme für die gesamt deutsche Aluminiumerzeugung bis hin zum Gussprodukt bzw. Halbzeug in Deutschland zusammen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Anteile der Alt- und Neuschrotte an der Verwertung, wobei der Neuschrottanteil etwas höher als der Altschrottanteil ist.

Tabelle 5-21: Sekundäraluminiumerzeugnisse in Deutschland aus inländischen Aluminiumschrotten und Substitutionsäquivalente

Herkunft	Input von Schrott [t]	Erzeugtes Sekundär-aluminium [t]	Produkt aus Sekundär-aluminium	Substitutions-äquivalent
Altschrotte und Neuschrotte mit nicht genau definierter Zusammensetzung	631.000	597.000	Sekundäraluminium aus Hütte	Primäres Hüttenaluminium (inkl. aller Vorketten)
Reine und definierte Neuschrotte	262.000	262.000	Sekundäraluminium aus Schmelze	Primäres Hüttenaluminium (inkl. aller Vorketten)
Summe	893.000	859.000		

Zusätzlich zu den in Deutschland verwerteten Aluminiumschrotten werden 374.000 t netto Alt- und Neuschrott exportiert. Auch für diese Schrotte ist von einer hochwertigen Verwertung auszugehen. Mit der Annahme von Umschmelzverlusten von rund 5 % ist davon auszugehen, dass aus den deutschen Nettoexporten rund 355.300 t Hüttenaluminium außerhalb Deutschlands produziert werden. Diese Mengen sind in der obigen Tabelle nicht enthalten.

5.3.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primäraluminiumproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Sekundäraluminiumproduktion wurde der europäische Mix abgebildet.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-22: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Aluminium, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Aluminium, primär	22,9	19.696
Aluminium aus der Raffination, sekundär	1,48	884
Aluminium aus Umschmelzbetrieben, sekundär	2,46	644
	DIERec	18.168

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-23: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Aluminium, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Aluminium, primär	10,5	9.045
Aluminium aus der Raffination, sekundär	1,48	884
Aluminium aus Umschmelzbetrieben, sekundär	2,46	644
	DERec	7.517

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-24: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Aluminium, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Aluminium, primär	197	173	169.179	148.985
Aluminium aus der Raffination, sekundär	7,65	6,82	4.569	4.075
Aluminium aus Umschmelzbetrieben, sekundär	7,59	6,54	1.988	1.714
		KEA-Saldo	162.622	143.196

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-25: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Aluminium, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Aluminium, primär	184	175	157.692	150.446
Aluminium aus der Raffination, sekundär	7,65	6,82	4.569	4.075
Aluminium aus Umschmelzbetrieben, sekundär	7,59	6,54	1.988	1.714
		KEA-Saldo	151.135	144.657

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.3.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.3.5.1 Verwertungsmengen

Die abgeschätzten Verwertungsmengen aus der Hütte sind von 2007 bis 2009 rückläufig (u. a. durch die Wirtschaftskrise), stabilisieren sich aber anschließend auf einem Niveau von ungefähr 600.000 t. Die Sekundärproduktion aus der Schmelze fluktuiert deutlicher, stabilisierte sich aber seit 2011 um eine Menge von 220.000 t (plus/minus 40.000 t).

Tabelle 5-26: Abschätzung der Sekundäraluminiumproduktion 2007 – 2015, in kt

Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundäraluminium aus Hütte	836	721	561	611	634	635	597	599	620
Sekundäraluminium aus Schmelze	219	292	448	309	227	186	262	218	263
Gesamt	1.055	1.013	1.009	920	861	821	859	817	883

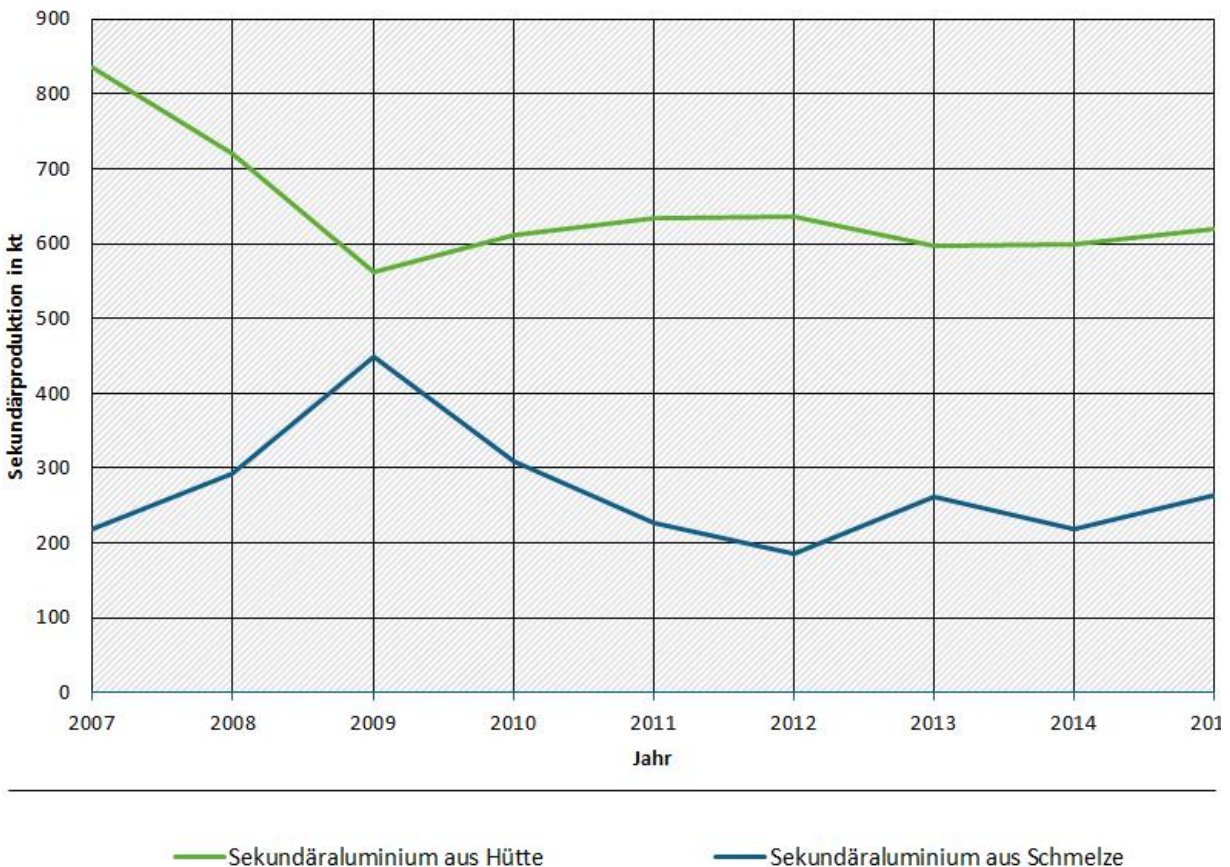
Quelle: eigene Berechnungen, DESTATIS 2009-2017, BMUB(a) 2008-2015, BMUB(b) 2008-2016, BGR 2008-2016

Die nachfolgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Summe der Sekundärproduktion in kt.

Abbildung 5-13: Zeitlicher Verlauf der Sekundäraluminiumproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Aluminium

Zeitliche Verlaufdarstellung 2007-2015



5.3.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-27: Indikatoren für Aluminium für 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	22.415	21.442	21.204	19.431	18.246	17.428	18.169	17.311	18.682
DERec	kt	9.333	8.882	7.070	8.023	7.570	7.248	7.517	7.180	7.734
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	199.721	191.776	191.029	174.172	174.999	155.424	162.622	154.669	167.165
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	185.613	178.229	177.536	161.869	151.485	144.445	151.135	143.743	155.357

5.4 Kupfer

Die elektrolytische Raffination ermöglicht für Kupfer echtes Recycling ohne Qualitätsverluste. Begünstigt wird das Recycling durch die chemische Eigenschaft der geringen Affinität zu Luftsauerstoff. In Verbindung mit dem vergleichsweise hohen Metallpreis ermöglicht dies auch die Wiedergewinnung von Elementarkupfer aus Abfällen mit geringem Cu-Gehalten sowie die Kupfer-Reduktion aus Verbindungen (Martens 2011, Seite 114).

Kupfer weist eine hohe Löslichkeit für andere Metalle auf, bietet aber aufgrund der geringen Sauerstoffaffinität die Möglichkeit, dass typische Legierungselemente wie Zink (Messing), Blei und Zinn (Bronzen) durch selektive Oxidation oder Verdampfung aus der Schmelze entfernt werden können. Das Normalpotenzial (+0,345 V) von Kupfer gegenüber Cu^{2+} ermöglicht eine abschließende elektrolytische Raffination als Kathodenkupfer (99,98 %) unter Abtrennung von Nickel, Selen und Edelmetallen, die ebenfalls zurückgewonnen werden können.

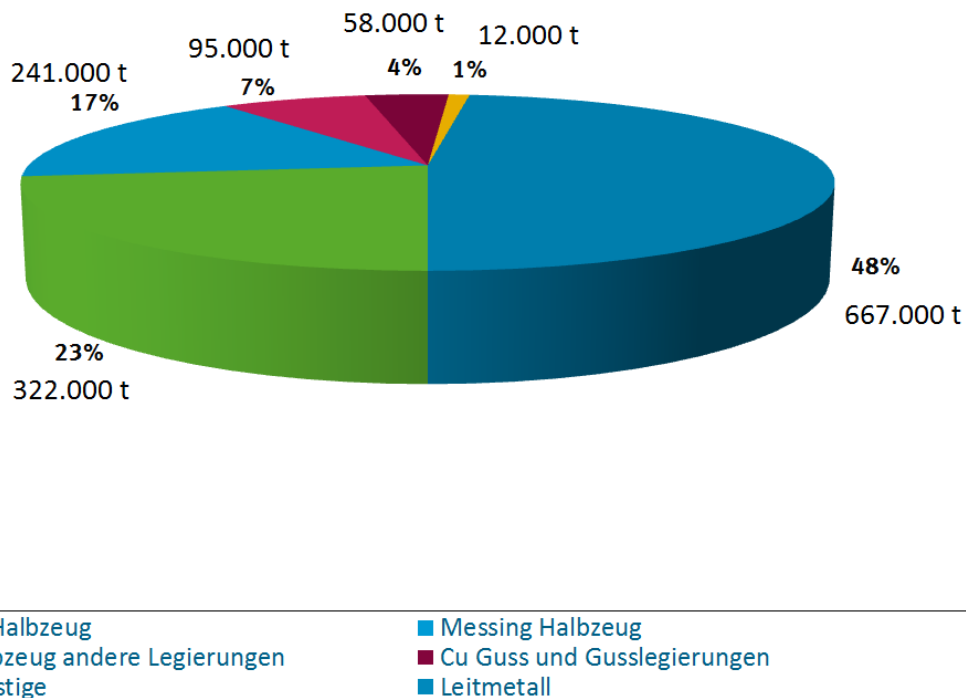
Das Recycling von Kupfer ermöglicht daher (Martens 2011, Seite 123):

- ▶ die Rückgewinnung des Metalls in Primärqualität,
- ▶ die Vorbereitung der Edelmetallrückgewinnung sowie
- ▶ die Überführung der Legierungselemente Zn, Sn und Pb in verwertbare Zwischenprodukte.

5.4.1 Materialeinsatz in Deutschland

Die Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVMetalle) macht für die Verwendungsbereiche von Kupfer folgende Angaben:

Abbildung 5-14: Hauptverwendungsgebiete von Kupfer in Deutschland, 2013



Quelle: Schätzung nach WVM 2014

Die in der Abbildung gezeigten Mengen beziehen sich auf die inländische Verwendung von Kupfer und umfassen damit auch die importierten Kupfermengen. Nach WVM (2014) kommen rund 40 % des in Deutschland verwendeten Kupfers aus inländischer Produktion.

Aufgrund der im Vergleich zu anderen Metallen außergewöhnlich hohen Leitfähigkeit für Wärme und Strom, die nur vom Silber übertroffen wird, liegen die heutigen Haupteinsatzgebiete vor allem in den Bereichen elektrische Leitung und Wärmeaustausch (Deutsches Kupferinstitut 2015).

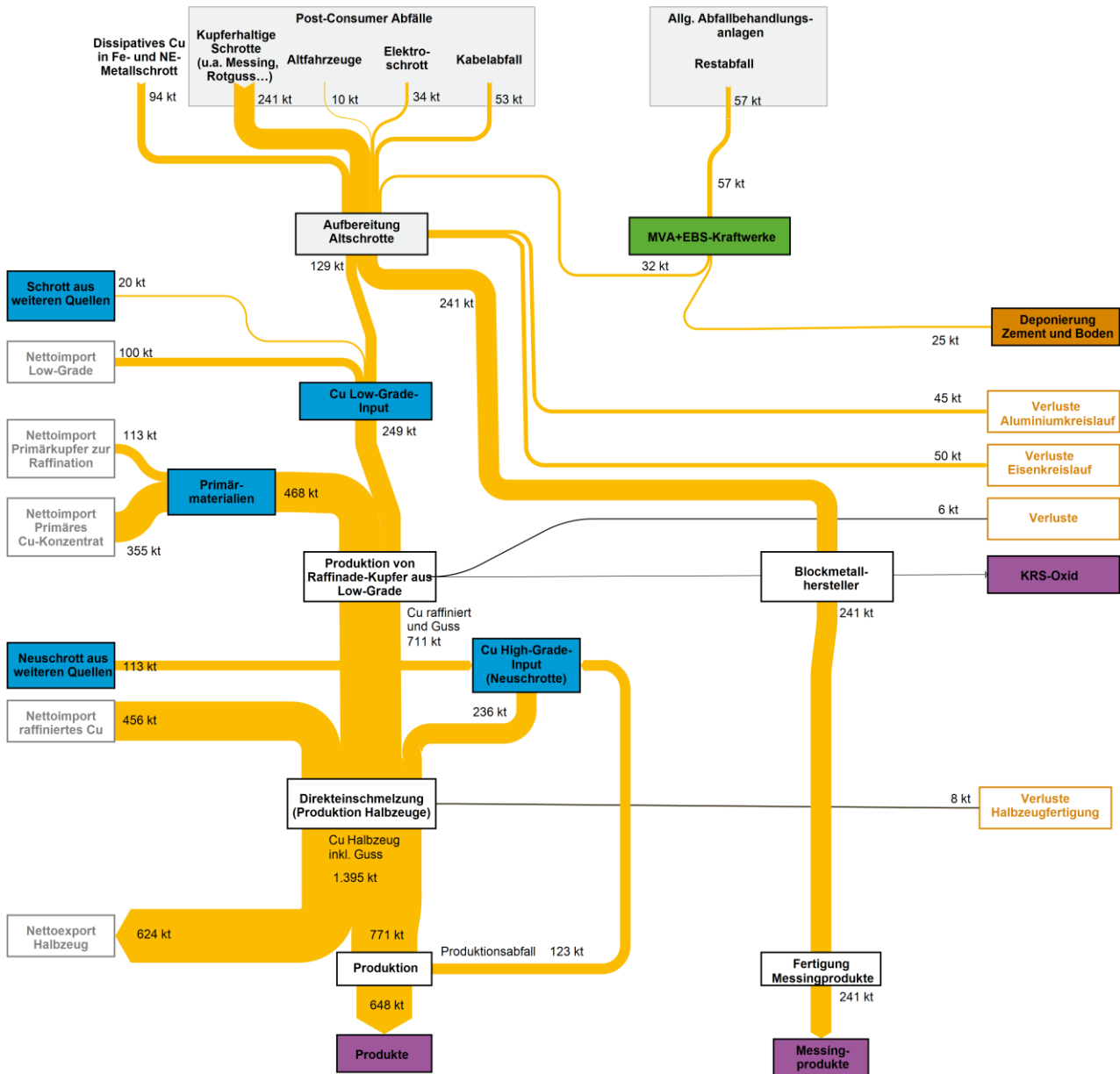
5.4.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Eine belastbare Abbildung der Stoffströme für Kupfer in Deutschland ist ausgesprochen schwierig, da die vorliegenden Daten unvollständig bzw. nicht transparent nachvollziehbar sind (vgl. Gößling-Reisemann et al. 2007). Um dennoch eine Abschätzung vornehmen zu können, ist wie folgt vorgegangen worden:

- ▶ Erstellung eines qualitativen Grundgerüsts für die deutsche Kupferproduktion auf Basis einer Herstellungsbilanz des European Copper Institutes (European Copper Institute 2012)
- ▶ Abgleich der Daten des European Copper Institute mit den Daten der Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM 2014) zu Produktionsmengen sowie zu Import- und Exportdaten
- ▶ Abschätzung der Konzentrationen und Stoffströme von metallischem Kupfer in den Sekundärrohstoffströmen
- ▶ Abschätzung von Sammelmengen für Sekundärrohstoffe außerhalb des Abfallregimes auf der Basis der Angaben zum Einsatz von Sekundärmaterial
- ▶ Abschätzung von dissipativen Verlusten an metallischem Kupfer in sonstigen Abfallströmen wie Restabfällen, Sekundärbrennstoffen und sonstigen metallischen Abfällen.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die mit diesem Vorgehen abgeschätzten Kupferstoffströme in Deutschland. Eine vertiefte Darstellung der Vorgehensweisen, der Datenquelle und der getroffenen Annahmen erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln:

Abbildung 5-15: Stoffströme Kupfer in Deutschland 2013



Quelle: eigene Berechnungen

Martens (2011) hat für typische Recyclingmaterialien des Kupfers eine Zusammenstellung zu Herkunft und Qualitäten vorgelegt, die einen guten Überblick über die Sekundärquellen liefert:

Tabelle 5-28: Typische Recyclingmaterialien und Aufbereitungsprodukte für Kupfer verändert

Sekundärmaterial	Cu Mittel [Masse%]	Begleitende Wertstoffe	Begleitende Störstoffe	Anfallort / Quelle	Lebensdauer [a]
Cu, z.T. legiert	98,5			Gießereien Halbzeugwerke	0,1

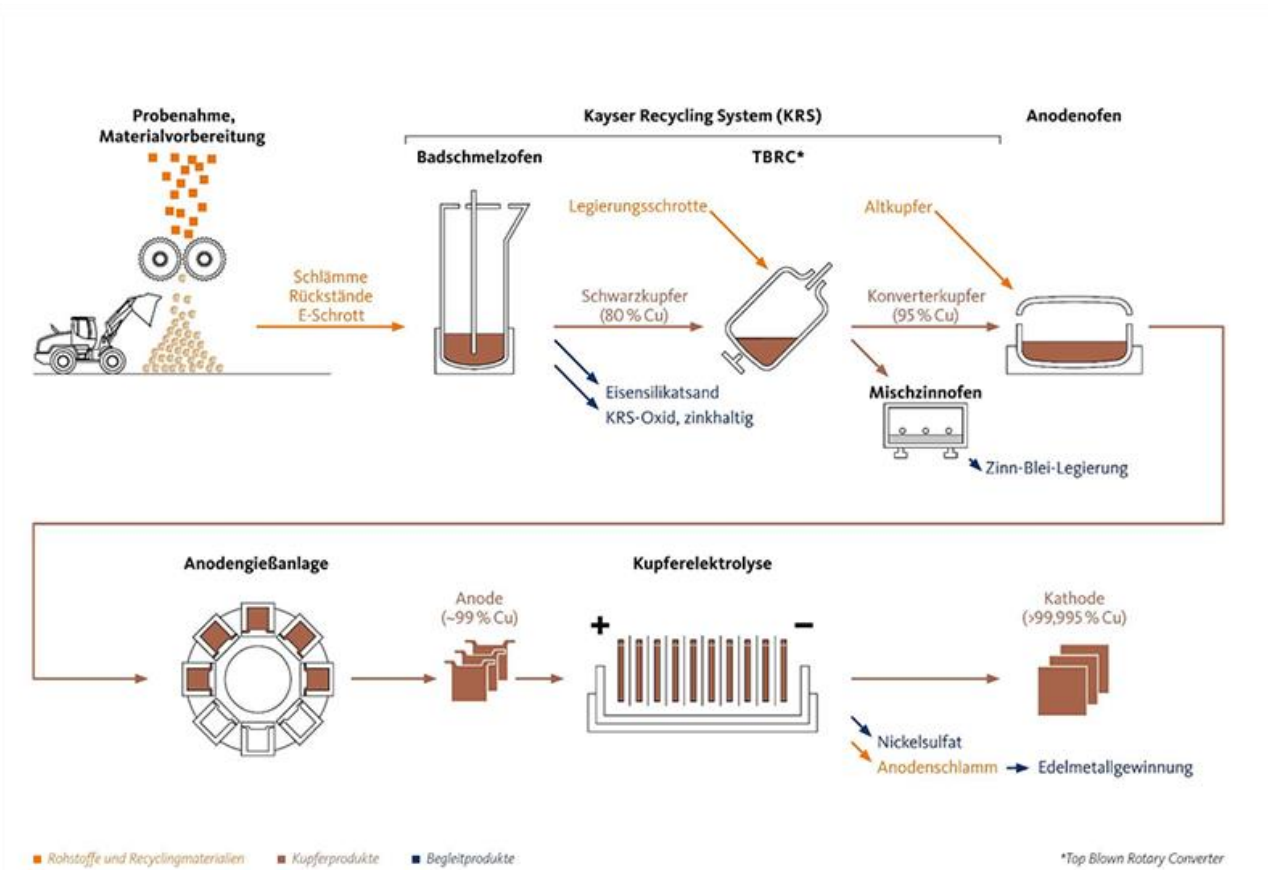
Messing, Bronze, Neusilber	72,5	Zn, Sn, Ni		Gießereien Halbzeugwerke	0,1
CuNi-Legierungen	72,5	Ni		Halbzeugwerke	0,1
Cu-Schwerschrotte	92,5			Stromschienen, Rohre	37,5
Cu-Leichtschrotte	90,0	Sn		Bleche, Rohre Wärmetauscher	32,5
Cu-Granulate	95,0			Kabelaufbereitung	27,5
Cu-Spulen Cu Draht	80,0		Fe	Transformatoren	45
Cu Kabel	37,0		PVC	Bausektor	35
Cu-Fe	20,0		Fe	Motoren, Generatoren	25
Cu-Fe	5,0		Fe	Kühlschränke, HH-Geräte	12,5
Cu-Fe	4,0		Fe, Min	Gebäudeabbruch	45
Elektronikschrott	47,0	Sn, Pb	Fe, PVC	Telefon, PC, Radio, TV	10,5
Kontakte	70,0	Sn, Au, Ag		Elektrotechnik	9
Altautos	90,0	Sn	Fe, PVC	Altauto	9
Messing und Bronze EOL	55,0	Sn, Zn, Pb, Ni		Armaturen, Kühler, Maschinen, Lager	27,5
Krätzen, Aschen, Schlacken	35,0	Zn, Sn, Pb	Min	Gießereien, Halbzeugwerke	0,5
Fällschlämme	6,0	Zn, Ni, Pb	Fe, S	Galvanik, Ätzprozesse	0,5
Cu-Salze	20,0	S, Cl		Diverse	0,5
Zementkupfer	80,0		Fe	Cu-Fällung mit Fe-Schrott	0,5
Lösungen von Cu-Salzen	25,5	Fe, Ni, Zn, NH3...	Cl, S	Ätz- und Laugenprozesse	0,5

Quelle: Martens 2011, Seite 116

Kupferhaltige Recyclingmaterialien gestalten sich nach Herkunft, Zusammensetzung und Begleitstoffen ausgesprochen heterogen. Aus der Lebensdauer der Materialien lässt sich eine Unterscheidung von Produktionsabfällen (< 1 a) und End-of-life-Produkten ableiten, die eine hohe Lebensdauer aufweisen können. Abfälle, in denen Kupfer nur in geringer Konzentration vorkommt, werden aufbereitet, um Störstoffe (Fe, Mineralik, Kunststoffe) abzutrennen und die Effektivität des anschließenden Schmelzprozesses zu erhöhen.

Je nach Kupferkonzentration und Oxidationsstufe werden Kupferabfälle auf verschiedenen Ebenen des Veredelungsprozesses eingesetzt. Eine Abbildung der Aurubis, dem mit Abstand größten Sekundärkupferaufbereiter in Deutschland, veranschaulicht die aus dem Kupfergehalt ableitbaren Qualitätsebenen des Kupfers.

Abbildung 5-16: Verfahrensschema vom Kupfer-Recyclingmaterial zur Kathode



Quelle: Aurubis 2015

Anders als Aluminium oder Stahl können beim Kupfer Schrotte sowohl direkt eingeschmolzen werden als auch nochmals neu raffiniert werden. Für kupferhaltige Abfälle wie Schlämme, Rückständen, Krätzen, Elektronikschrott und Metallschrotte sowie Kabelabfälle wird davon ausgegangen, dass sie als Low-Grade-Kupfer in der Raffination eingesetzt werden. Dieses Material kann je nach Reinheit und Definition zum einen Kupferkonzentrat in der Primärschmelze ersetzen, aber auch separat in einer Prozessfolge über Schachtofen, Konverter und Anodenofen eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu werden als High-Grade-Kupfer ausschließlich definierte Recyclate mit hoher Reinheit verstanden, die direkt in die Elektrolyse zur Kathodenproduktion bzw. Halbzeugproduktion einfließen können (European Copper Institute 2012) und raffiniertes Kupfer substituieren.

5.4.2.1 Bilanzierung der Produktion von Raffinadepkupfer (Anodenkupfer)

Für das Jahr 2013 gibt die Wirtschaftsvereinigung Metalle eine in Deutschland produzierte Raffinademenge von 711.000 t an. Es wird angenommen, dass 6.000 t Verluste bei der Produktion entstehen. Inputströme der Raffination sind zum einen Cu-Konzentrate aus der Primärherstellung und zum anderen Kupferabfälle mit geringeren Kupfergehalten (Low-Grade). Die außenhandelsbereinigte Kupfermenge im verarbeiteten Primärkonzentrat beträgt 354.550 t. Die aus dem Inland stammende Kupfermenge an Low-Grade-Material ergibt sich aus den Handelsbilanzen wie folgt:

Tabelle 5-29: Ermittlung von Inputströmen in der Kupferraffination (Verarbeitung von Low-Grade-Kupfer)

Sekundärmaterial	Massenstrom [t]	Quelle
Cu-Guss und -Raffinademenge 2013 (inkl. Verluste)	711.000	WVM 2014
Verluste	-6.000	ECI 2012
Cu aus Primärkonzentrat	355.000	BGR 2014
Importsaldo Cu zum Raffinieren inkl. Zementkupfer	113.000	WVM 2014
Importsaldo Sekundärrohstoffe	100.000	WVM 2014
Cu Low-Grade aus Sekundärrohstoffen aus Deutschland	149.000	errechnet

Nach dieser überschlägigen Betrachtung gehen ca. 21 % der Guss- und Raffinademenge auf Sekundärmaterial aus Deutschland zurück.

5.4.2.2 Bilanzierung der Sekundärströme zur Produktion von Raffinadekupfer und Guss

Um abzuschätzen, welcher Anteil der oben dargestellten Sekundärrohstoffmengen von 149.000 t Cu mit der Verwertung als Low-Grade Input auf kupferhaltige Abfälle entfällt, sind die Daten des statistischen Bundesamtes zu kupferrelevanten Abfallschlüsselnummern ausgewertet worden. Für die einzelnen Abfallarten ist ihr jeweiliger Cu-Gehalt abgeschätzt worden.

Tabelle 5-30: Abschätzung der Kupferschrottströme

Sekundärmaterial	Massenstrom Sekundärmaterial [t]	Cu-Gehalt [%]	Cu-Fracht [t]	Quelle für Cu-Gehalt
Kupfer aus Abfällen in thermischen Abfallbehandlungsanlagen und Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung von Abfällen	46.101.000	Input: 0,12 Rückgeführt: 0,07	Input: 57.000 Output: 32.000	DESTATIS 2015; Ed-DE 2015
Kupfer aus Altfahrzeugen	490.771	2,0	10.000	BMUB(b) 2014; Ladewig 2008, Seite 618
Kupfer aus der Elektroschrottaufbereitung	686.940	5,0	34.000	BMUB(a) 2014; Ma-Ress 2011, Seite 190
Messing- und andere Kupferschrotte zum Recycling	302.000	61,0	241.000	WVM 2014; Tikana 2016
Davon zur Raffination	93.000	61,0	57.000	Müller et al. 2017; Tikana 2016
Kabelabfälle	144.300	36,8	53.000	DESTATIS 2015; Erfahrungswert aus Untersuchungen
Cu-Schrott aus weiteren Quellen (Summe der Kupferströme, die nicht einzelnen Abfallarten zugeordnet werden können)			20.000	Aus Differenz berechnet
Cu-Gesamtschrottmenge			390.000	Berechnet
Cu Low-Grade in Raffination			149.000	Berechnet

Die Tabelle zeigt, dass ca. 38 % der Gesamtschrottmenge in die Raffination und 62 % direkt in die Herstellung von Messing geht.

5.4.2.3 Bilanzierung der Produktion von Kupferhalbzeugen

Für die Produktion von Kupferprodukten gibt die Wirtschaftsvereinigung Metalle für das Jahr 2013 eine Gesamtmasse von rund 1.395.000 t an (WVM 2014, Seite 7). Input für die Produktion der Halbzeuge sind raffiniertes Kupfer bzw. Kupferguss sowie High-Grade Abfälle aus der Produktion und sonstiges Sammlungen. Folgende Bilanz wurde unter der Verwendung von Produktionsdaten und Handelsbilanzen erstellt:

Tabelle 5-31: Bilanzierung der Produktion von Cu-Halbzeugen auf High-Grade Inputströmen

Sekundärmaterial	Massenstrom [t]
Outputströme:	
Kupfer in Guss- und Halbzeugprodukten	1.395.000
Materialverluste Guss- und Halbzeugproduktion	-8.000
Inputströme:	
Cu-Guss und Cu raffiniert (Inlandsproduktion)	711.000
Cu raffiniert, Nettoimporte	456.000
Rechnerische Differenz: Cu High Grade Sekundärinputströme	236.000

Quelle: nach Daten WVM 2014 und Transferkoeffizienten nach European Copper Institute 2012

5.4.2.4 Bilanzierung der Produktion von Kupferprodukten und der High-Grade-Abfälle

Die Handelsbilanz für Kupferhalbzeuge zeigt, dass ca. 45 % (624.000 t) der in Deutschland produzierten Halbzeuge exportiert werden. Für die Produktion in Deutschland stehen 771.000 t zur Verfügung. Das European Copper Institute geht davon aus, dass bei der Verarbeitung von Halbzeugen 16 % Metallmasse als hochwertige Metallabfälle anfallen (European Copper Institute 2012). Bezogen auf die in Deutschland exportbereinigt verarbeitete Kupfermasse von 771.000 t an Halbzeugen und Gussprodukten bedeutet dies einen Stoffstrom von etwa 123.000 t Produktionsabfällen. Damit ergibt sich für die Sekundärstoffströme der direkt eingeschmolzenen High-Grade-Qualitäten folgende Abschätzung:

Tabelle 5-32: Als High-Grade-Kupfer recycelte Mengenströme

Sekundärmaterial	Cu-Fracht [t]
Cu-Abfälle aus Produktion (High Grade)	123.000
Cu aus Sonstiger Sammlung (rechnerische Differenz)	113.000
Sekundärstoffströme High Grade gesamt nach Tabelle 5-31	236.000

Quelle: eigene Zuordnung auf der Basis von European Copper Institute 2012 und WVM 2014

Da zur Produktion von Cu-Halbzeug ausschließlich hochwertiger High-Grade-Input eingesetzt wird, kann davon ausgegangen werden, dass neben den Cu-Abfällen aus der Produktion die verbleibende Sekundärmenge von 113.000 t (Cu aus sonstiger Sammlung) aus reinen Abfallfraktionen aus höheren Verarbeitungsstufen z.B. dem Maschinenbau sowie dem Installationsgewerbe oder der Elektrobranche stammt.

5.4.2.5 Bilanzierung des Kupferanteils im Messing-Kreislauf

Messing ist eine Legierung die hauptsächlich aus Kupfer und Zink (Zinkanteil in der Regel 5 – 45 %) besteht und neben anderen Kupferlegierungen die Hauptlegierungsform von Kupfer darstellt. In Tabelle 5-30 sind

bereits die kupferhaltigen Schrottmengen (u.a. auch Messing) dargestellt, welche zur Herstellung von Messing genutzt werden. Ein Teil des Messings (57.000 t) gelangt auf Grund der Sortierung in die Raffination. Das im Messing enthaltene Zink wird hierbei im Flugstaub als KRS-Oxid (Kayser Recycling System) angereichert. Insgesamt gelangen 241.000 t Kupfer zu den Blockmetallherstellern, welche Messing und andere geeignete Kupferschrotte einschmelzen und an die Hersteller von Messingprodukten weitergeben.

5.4.2.6 Bilanzierung der Kupferverluste

Kupferverluste entstehen überall dort, wo kupferhaltige Materialien nicht erkannt oder nicht erfasst werden. Der Einsatz von Kupfer in chemischen Verbindungen ist gegenüber dem metallischen Einsatz von untergeordneter Bedeutung¹⁹. Gleiches gilt für die Kupfereinträge in Böden²⁰.

Um die Mengenströme an Kupferverlusten in Abfällen zu quantifizieren, wurde wie folgt vorgegangen:

- ▶ Abschätzung des Kupfergehaltes in Hausmüll, Sperrmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen
- ▶ Abschätzung der im Rahmen der Abfallbehandlung zurückgewonnen Kupfers (NE-Metalle)
- ▶ Abschätzung des aus Metallabfällen nicht zurückgewonnenen Kupfers (Fe- und NE-Metalle)
- ▶ Abschätzung der Kupferfrachten in den zu deponierenden Reststofffraktionen und Verifikation mit vorliegenden Daten der Abfalldatenbank Abanda.

Kupfergehalt in Restabfällen und Ersatzbrennstoffen

Der Metallgehalt in Abfällen, welche in thermischen Abfallbehandlungsanlagen und Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung behandelt werden, wird von (EdDE 2015) auf etwa 3 % geschätzt. Hiervon entfallen 4 % auf Kupfer, was einem Kupfergehalt von 0,12 % in diesen Abfällen entspricht. Das enthaltene Kupfer wird laut (EdDE 2015) zu 56 % zurückgewonnen. Dies bedeutet, dass von den 57.000 t Input in Restabfällen 25.000 t deponiert werden.

Kupferanteil in Fe- und NE-Metallen

Ein bis dato weitgehend unberücksichtigter Stoffstrom für Kupfer ist der dissipative Anfall in Metallen. Aufgrund des relativ edlen Charakters sowie der geringen Sauerstoffaffinität kann in Eisen und auch Aluminium enthaltene Kupfer, nicht aus den metallischen Produkten entfernt werden. Während das Kupfer im Aluminium als Legierungselement zur Veredelung beiträgt, werden beim Stahl die Verformungseigenschaften durch Kupfer merklich verschlechtert (Martens 2011, Seite 82). Für Stahlschrottsorten werden daher Höchstgehalte für Kupferanteile vorgegeben, die für verschiedene Schrottsorten in der Größenordnung von 0,25 bis 0,5 Masse% (Martens 2011, Seite 91) liegen. In Deutschland sind im Jahr 2013 insgesamt 42,6 Mio. t Rohstahl erzeugt worden. 58,2 % davon bzw. 24,8 Mio. t stammen aus dem Einsatz von Schrotten (BGR 2014, Seite 126).

Veranschlagt man für den Kupfergehalt in Stahlschrotten einen mittleren Gehalt von 0,2 Masse%, so ergibt sich daraus ein Stoffstrom von rund 49.600 t Kupfer pro Jahr, der über das Metallrecycling irreversibel in den Eisenkreislauf eingeschleust wird.

¹⁹ Erwähnenswert erscheint der Einsatz von Kupfer in Kupferphthalocyaninpigmenten, die in der Größenordnung von 80.000 t/a hergestellt werden und ca. 25% aller synthetischen organischen Pigmente ausmachen (Wöhrle et al. 2012). Allerdings liegt der Kupferanteil im Pigment in der Größenordnung von ca. 11%, so dass weltweit überschlägig ca. 9.000 t/a Kupfer zu Pigmenten verarbeitet werden. Das sind weniger als 0,05% der weltweiten Produktion an metallischem Kupfer. Ebenso wird die Verwendung von Kupfersulfat in der Beschichtungstechnik wie auch der Landwirtschaft als weniger bedeutsam eingeschätzt (MaRess 2011, Seite 177).

²⁰ Die Einträge von Kupfer in den Boden hat Hillebrandt abgeschätzt. Die Daten der Studie aus 2005 umfassen Einträge aus Wirtschaftsdünger, Klärschlamm, atmosphärischer Deposition, Pflanzenschutzmitteln, Kompost und Mineraldünger. Zusammenfassend wird von einem Massenstrom von 3600 t ausgegangen (Hillebrandt 2005, zitiert in Jänsch, Römbke 2009).

Ausgehend von einer mittleren Kupferkonzentration von 1,5 % in Aluminiumknetlegierungen sowie Gussprodukten ist davon auszugehen, dass vor dem Hintergrund einer Summe von jährlich 2.980.000 t Aluminiumprodukten eine Kupferfracht von rund 44.700 t in Aluminiumprodukten enthalten ist und innerhalb dieses Stoffstromes verbleibt (WVM 2014). Insgesamt sind ca. 94.000 t Kupfer Bestandteil anderer Eisen- und Aluminiumkreisläufe. Im Sankey-Diagramm handelt es sich um einen horizontal durch den Kasten „Aufbereitung Altschrotte“ durchlaufenden Posten. Das Kupfer ist in den recycelten Fe- bzw. NE-Metallen enthalten und kann nicht entfernt werden.

Überblick über die bilanzierten Kupferverluste

Die in anderen Abfällen enthaltenen Kupfermengen, die nicht erfasst und recycelt werden, gelangen letztendlich zur Deponierung. Je nachdem, ob die Abfälle aus der Metallproduktion, dem Baubereich oder der Abfallwirtschaft stammen, fallen sie unter verschiedenen Schlüsselnummern an. Im Rahmen der Bilanzierung für Deutschland wurden zusammenfassend folgende Kupfer-Senken erfasst und quantifiziert:

Tabelle 5-33: Bei der Bilanzierung berücksichtigte Kupferverluste, 2013

Material	Mengenstrom [t]	Cu-Konz. [Masse%]	Cu-Fracht [t]	Quelle
Deponierung inklusive Untertage und Zement	46.101.000	0,054	25.000	DESTATIS 2015; Cu-Gehalt errechnet
Dissipation in Fe-Kreislauf	24.808.000	0,20	49.600	eigene Abschätzung
Dissipation in Al-Kreislauf	2.980.000	1,5	44.700	eigene Abschätzung
Verluste in Raffination und Produktion			14.000	ECI 2012; European Copper Institute 2012
Summe der Verluste			133.300	

Mit 133.300 t machen die jährlichen Verluste rund 18,7 % der Guss- bzw. Raffinadeproduktion von 711.000 t aus.

5.4.3 Verwertungswege

Tabelle 5-34 zeigt die Verwertung des Sekundärkupfers. Altschrotte, einschließlich der Messingschrotte die zur Raffination gehen, werden nahezu vollständig zur Herstellung von Raffinadekupfer eingesetzt. Sie substituieren damit primär hergestelltes Raffinadekupfer. Neuschrotte werden direkt eingeschmolzen und zur Produktion von Halbzeugen eingesetzt. Sie substituieren damit zu 100 % primär hergestelltes Raffinadekupfer. Messingschrotte (bzw. der Kupferanteil darin) und andere Kupferschrotte, die in der Aufbereitung als reine Fraktion abgetrennt werden konnten, werden beim Blockmetallhersteller eingeschmolzen und substituieren so primäres Kupfer in Messing.

Tabelle 5-34: Sekundärkupferproduktion (inklusive Kupferanteil im Messing) in Deutschland aus inländischen Kupferschrotten und Substitutionsäquivalente

Herkunft	Erzeugtes Sekundärkupfer [t]	Produkt aus Sekundärkupfer	Substitutionsäquivalent
Kupfer aus der Aufbereitung von Altschrotten und weiteren Quellen	249.000	Raffinadekupfer aus Hütte	Primäres Raffinadekupfer (inkl. aller Vorketten)
davon Messingschrotte zur Raffination	(57.000)	Raffinadekupfer aus Hütte	Primäres Raffinadekupfer (inkl. aller Vorketten)
Kupfer aus der Verwertung Neuschrotten	236.000	Cu-Halbzeug aus Schmelze	Primäres Raffinadekupfer (inkl. aller Vorketten)
Messingschrotte zum Einschmelzen, sekundär - Kupferanteil	241.000	Messinghalbzeug aus Schmelze	Primäres Raffinadekupfer (inkl. aller Vorketten)
Summe	727.000		

5.4.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärkupferproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Sekundärkupferproduktion aus der Aufbereitung von Altschrotten wird der europäische Mix genutzt. Für die Sekundärkupferproduktion aus der Verwertung Neuschrotten wurden die Aufwendungen in einer Schmelze abgeschätzt. Messingschrott, welcher die gesamte Kupferraffination durchläuft, wird durch den europäischen Mix der Sekundärkupferproduktion abgebildet. Für Messingschrott, welcher über Blockmetallhersteller direkt eingeschmolzen wird, wurden die Aufwendungen einer Schmelze abgeschätzt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-35: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Kupfer, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Kupfer, primär	199	144.481
Raffinadekupfer, sekundär	9,05	1.739
Cu-Halbzeug, sekundär	0,2	46,4
Messing, Halbzeug, sekundär – Kupferanteil	0,16	119
Raffinadekupfer aus Messing, sekundär	9,1	516

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
	DIERec	142.060

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-36: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Kupfer, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Kupfer, primär	30,8	22.332
Raffinadekupfer, sekundär	9,05	46,4
Cu-Halbzeug, sekundär	0,2	119
Messing, Halbzeug, sekundär – Kupferanteil	0,16	516
Raffinadekupfer aus Messing, sekundär	9,1	1.739
	DERec	19.911

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-37: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Kupfer, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Kupfer, primär	65,4	52,8	47.513	38.327
Raffinadekupfer, sekundär	28,1	26,5	5.392	5.082
Cu-Halbzeug, sekundär	7,53	7,48	1.776	1.765
Messing, Halbzeug, sekundär – Kupferanteil	6,30	6,25	1.517	1.507
Raffinadekupfer aus Messing, sekundär	28,1	26,5	1.601	1.509
		KEA-Saldo	37.227	28.464

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-38: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Kupfer, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Kupfer, primär	27,2	21,98	19.780	15.956
Raffinadekupfer, sekundär	28,1	26,5	5.392	5.082
Cu-Halbzeug, sekundär	7,53	7,48	1.776	1.765
Messing, Halbzeug, sekundär – Kupferanteil	6,30	6,25	1.517	1.507
Raffinadekupfer aus Messing, sekundär	28,1	26,5	1.601	1.509

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
		KEA-Saldo	9.494	6.093

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.4.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.4.5.1 Verwertungsmengen

Die abgeschätzten Verwertungsmengen zeigen deutlich die Wirkung der Wirtschaftskrise, welche zu einem deutlichen Einbruch im Jahr 2009 und 2010 geführt hat. Die Sekundärproduktion hat sich im Anschluss stabilisiert und schwankt seitdem nur noch leicht.

Tabelle 5-39: Abschätzung der Sekundärkupferproduktion inklusive Messing 2007 – 2015, in kt

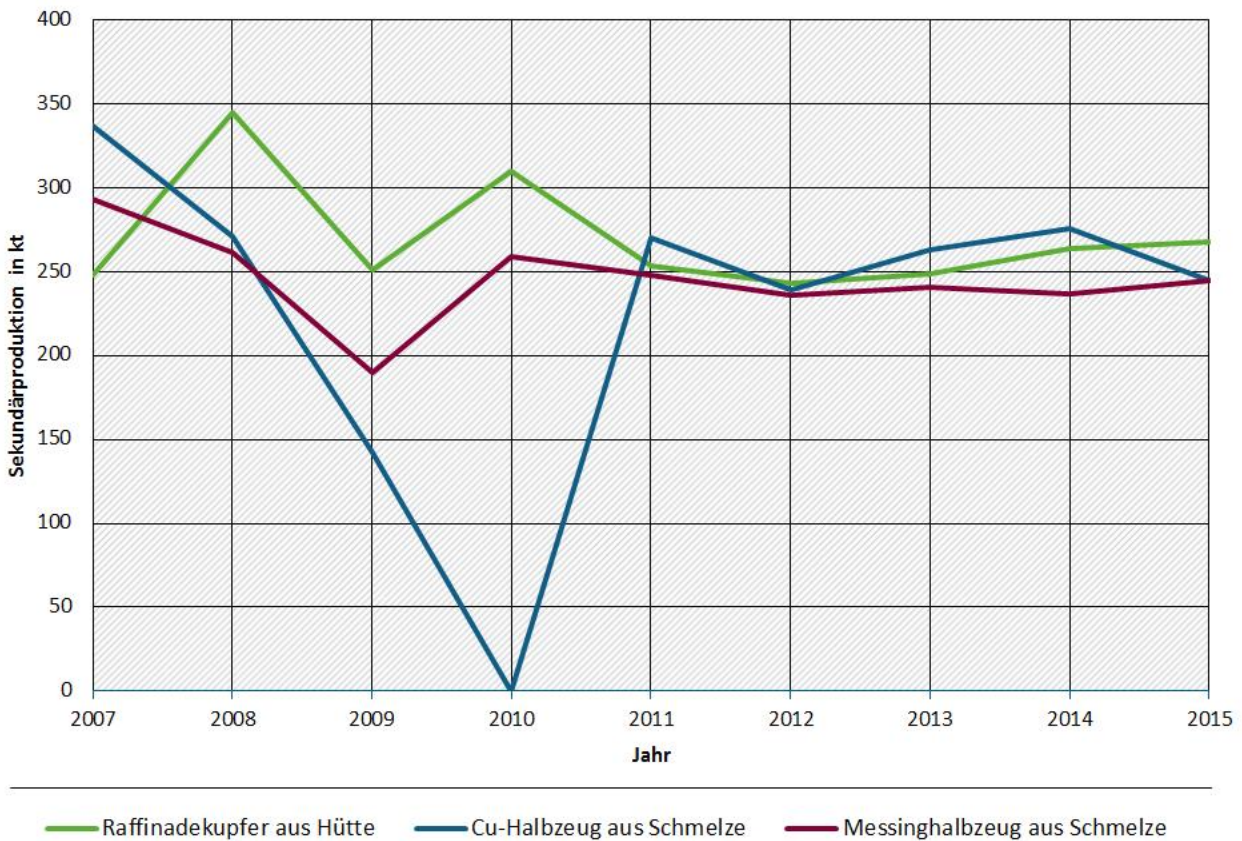
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Raffinadekupfer aus Hütte	248	345	251	310	253	243	249	264	268
davon aus Messing-schrotten	57	79	58	71	58	56	57	61	62
Cu-Halbzeug aus Schmelze	337	271	142	0	270	239	236	276	245
Messinghalbzeug aus Schmelze	293	261	190	259	248	236	241	237	245
Gesamt	878	876	583	569	771	718	727	777	758

Quelle: eigene Berechnungen, DESTATIS 2009-2017, BMUB(a) 2008-2015, BMUB(b) 2008-2016, BGR 2008-2016, WVM 2008-2016

Abbildung 5-17: Zeitlicher Verlauf der Sekundärkupferproduktion inklusive Messing in Deutschland von 2007-2015, in kt

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Kupfer*

Zeitliche Verlaufdarstellung 2007-2015



*inkl. Messing

5.4.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-40: Indikatoren für Kupfer inklusive Messing 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	172.273	171.209	113.625	110.335	150.965	140.523	142.060	152.057	148.249
DERec	kt	24.551	23.654	15.536	14.601	21.245	19.720	19.911	21.328	20.716
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	46.115	44.024	28.841	26.902	39.760	36.881	37.227	39.868	38.695
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	12.576	10.523	6.570	5.166	10.308	9.453	9.494	10.186	9.739

5.5 Zink

Zink ist bei Umgebungstemperatur spröde, kann jedoch im Temperaturbereich zwischen 100 und 150 °C zu Blechen ausgewalzt und zu Drähten gezogen werden. Es besitzt einen vergleichsweise niedrigen Schmelzpunkt von 419°C und ist in sauerstoffhaltiger Atmosphäre stets von einer inhibierenden oxidischen Schutzschicht überzogen. Haupteinsatzbereiche sind Stahlverzinkung, der Baubereich und Messing (GDB 2010).

Deutschland ist weltweit einer der größten Importeure von Feinzink und Zinkstaub, während es bei den sekundären Rohstoffen wie Abfällen, Schrotten und Aschen zu den weltweit größten Nettoexporteuren gehört. (Dorner 2015). Der weltweite Raffinadeverbrauch liegt in der Größenordnung von 13 Mio. t, von denen in Deutschland 2013 ca. 475.000 t (3,7 %) eingesetzt werden (BGR 2014).

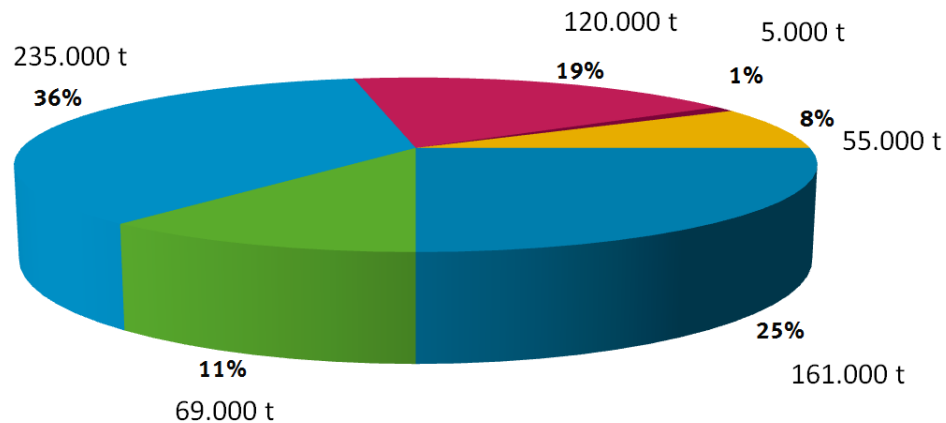
Zink wird in folgenden Qualitäten grenzüberschreitend gehandelt (BGR 2014):

- ▶ Zinkkonzentrat (aufbereitetes Erz mit ca. 55% Zn, aber auch Wälzoxid mit ca. 60 % Zn)
- ▶ Zinkoxid (80,3% Zn)
- ▶ Hartzink (Zn > 92% mit Fe legiert)
- ▶ Aschen und Rückstände (Zn ~ 30%)
- ▶ Fein- und Feinstzink (> 99% Zn)
- ▶ Hüttenezink (Zn ~ 98,5%)
- ▶ Zinkdruckguss (Zn ~ 95%)
- ▶ Messing (Zn < 40%), Behandlung und Recycling im Kupferkreislauf.

5.5.1 Materialeinsatz in Deutschland

Für die Verwendungsbereiche von Zink liegen folgende Angaben vor:

Abbildung 5-18: Verwendungsgebiete von Zink in Deutschland – 2013



■ Zinkverbindungen ■ Verzinkungen ■ Halbzeug ■ Sonstige ■ Zn-Druckguss ■ Messing

Quelle: Schätzung nach GDB 2014

Die in der Abbildung gezeigten Mengen beziehen sich auf die inländische Verwendung und umfassen damit auch die importierten Mengen. Die Verwendung übersteigt den Raffinadeverbrauch um 36 % und deutet auf große Importmengen hin.

5.5.2 Stoffströme in Deutschland 2013

5.5.2.1 Vorbemerkungen zu den Stoffströmen Zink

Analog zu anderen Metallen wird auch beim Recycling von Zink zwischen Altschrotten und Neuschrotten unterschieden. Während Neuschrotte als Abfälle in der industriellen Produktion anfallen, handelt es sich bei Altschrotten um Zinkprodukte, die mindestens eine Nutzungs- bzw. Gebrauchsphase hinter sich haben. Aufgrund der teilweise sehr langen Lebensdauer metallischer Zinkprodukte, können zwischen Produktion und Recycling unter Umständen Jahrzehnte liegen. Weltweit wird für die End-of-life-Recyclingrate von metallischen Zinkprodukten ein Wert von über 50 % angenommen (UNEP 2011). Für Europa wird mit rund 70 % eine Recyclingrate oberhalb des weltweiten Durchschnitts angenommen. Für den Baubereich wird sogar von einer Rate von 95 % ausgegangen (Initiative Zink ohne Datum). Weitergehende Angaben zu diesen Aussagen liegen jedoch nicht vor.

Aufgrund des unedleren Charakters, des geringeren Mengenanteils sowie des höheren monetären Wertes von Kupfer geht das in Messing enthaltene Zink den Weg des Kupferrecyclings. Dort wird es als Messing recycelt oder aber in der Schmelze verdampft und unter Luftinfluss oxidiert, so dass ein zinkhaltiger Staub anfällt. Exakte Zahlen über eingesetzte Mengen und Stoffströme beim Recycling von Messing liegen ebenfalls nicht vor.

Metallische Zinkschrotte werden in Deutschland zunächst möglichst sortenrein getrennt und dann in Sekundärschmelzwerken zu Sekundärzink und Zinklegierungen verarbeitet (Grund 2014). Allerdings wird ein nicht unerheblicher Mengenanteil von Zinkschrotten exportiert (Grund 2014).

Im Hinblick auf den Haupteinsatzbereich von Zink in der Stahlverzinkung fällt das in Altschrotten enthaltene Zink insbesondere als Staub in der Elektrostahlroute (EAF-Dust) an. Das Zink wird während des Schmelzprozesses verdampft und unter Sauerstoffeinfluss oxidiert, so dass es als ZnO im abgeschiedenen Staub anfällt. Vor dem Hintergrund einer Elektrostahlerzeugung von 13.500.000 t pro Jahr im Jahr 2013 (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2014) und einem Staubanfall von etwa 1,5 kg/t bis zu 2,5 kg/t Elektrostahl (Von Billerbeck 2014) ergibt sich bei einer mittleren Zn-Konzentration von im Mittel 24 % eine Zinkfracht von rund 50.000 bis 80.000 t in 200.000 bis 340.000 t EAF-Stäuben. Darüber hinaus fallen aufgrund des unedlen Charakters von Zink und dem geringen Siedepunkt auch in anderen metallurgischen Schmelzen zinkhaltige Stäube an. Ist die Zinkkonzentration dieser Stäube und Aschen hinreichend hoch, so wird sie in pyrometallurgischen Wälzprozess zu einem Wälzoxid angereichert, das eine Zn-Konzentration von > 60 % aufweist (Grund 2014).

Dieses Wälzoxid kann zumindest anteilig dem Röstgut aus Erzkonzentrat der Primärroute zugegeben werden. Die Zinkkonzentration liegt mit ca. 60 % sogar höher als die durchschnittliche Zinkkonzentration in eingesetztem Primärkonzentrat, für das im Mittel Zn-Gehalte von 55 % angegeben werden. Diese Rückführung bietet jedoch nicht die Vorteile der Energieeinsparung des metallischen Recyclings, da das Zink oxidiert vorliegt.

Die Handelsbilanz der Bundesrepublik Deutschland weist neben Konzentratimporten auch Exporte aus. Wir gehen davon aus, dass es sich bei diesen Exporten um Wälzoxid handelt, das aus Sekundärquellen aufkonzentriert worden ist.

Die Primärzinkgewinnung findet in Deutschland ausschließlich hydrometallurgisch und nur noch am Standort Nordenham statt. Pyrometallurgische Verfahren wie das Imperial Smelting Verfahren werden in Deutschland seit mehr als zehn Jahren nicht mehr eingesetzt. Es gibt aber nach wie vor Anlagen, die aus Hüttenzink und Sekundärmaterialien Zinkstaub und Zinkoxid für Zinkverbindungen herstellen (BGR 2014).

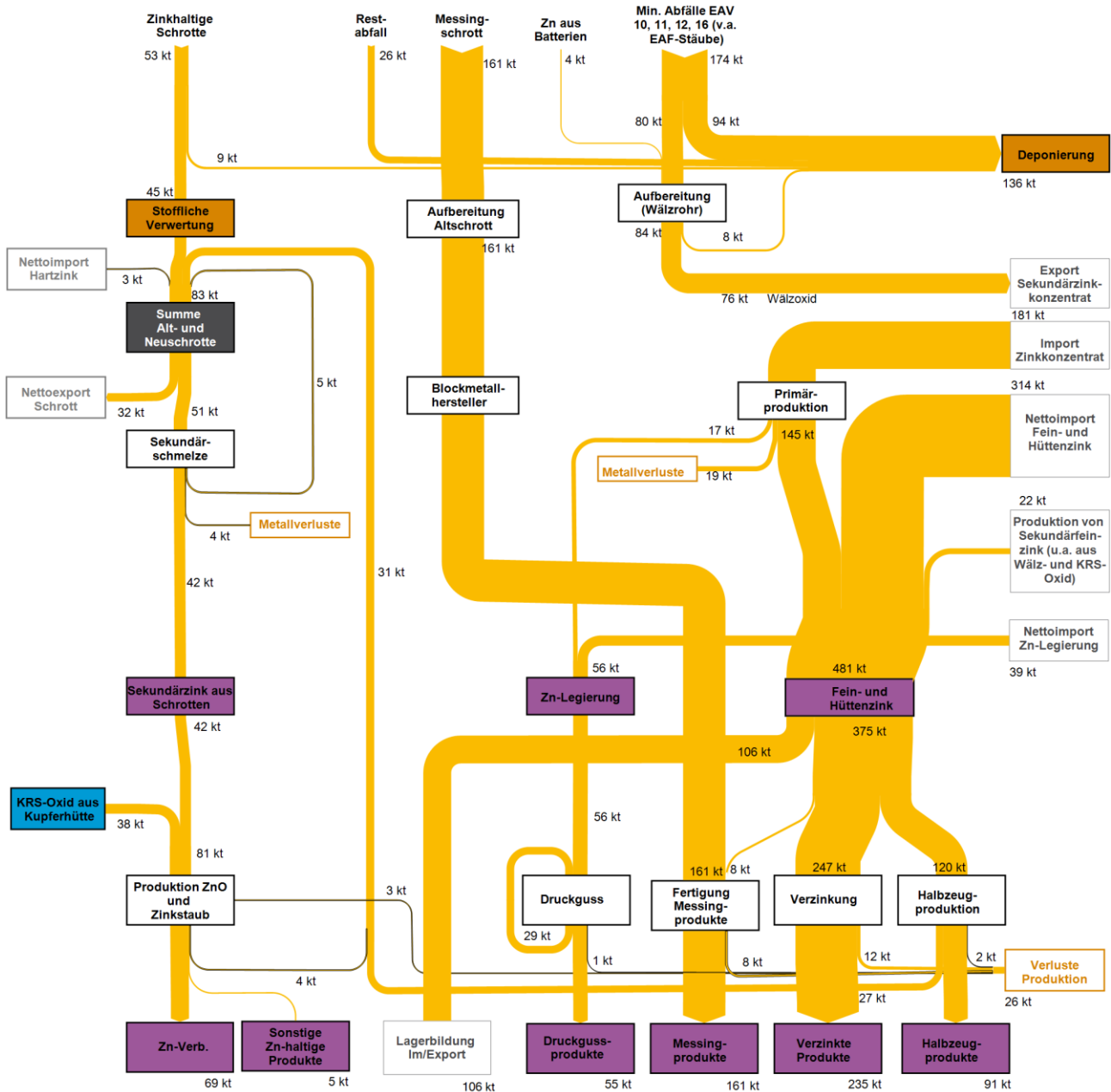
5.5.2.2 Zinkstoffströme in Deutschland 2013

Um eine Abschätzung der Stoffströme für Zink in Deutschland vorzunehmen, ist wie folgt vorgegangen worden:

- ▶ Erstellung eines quantitativen Grundgerüsts auf Basis und unter Abgleich vorliegender Produktions- und Handelsbilanzdaten (BGR 2014, BGR 2015, WVM 2014, Dorner 2015).
- ▶ Abgleich mit Bilanzdaten von Prozessen zur Zinkgewinnung und zum Zinkrecycling (Krüger 2002)
- ▶ Ergänzung von Daten aus (WVM 2014) zu Messing
- ▶ Abschätzung der Stoffströme von metallischem Zink in den Sekundärrohstoffströmen (DESTATIS 2015)
- ▶ Abschätzung von dissipativen Verlusten an metallischem Zink in Abfallströmen wie Restabfällen, Sekundärbrennstoffen und sonstigen Abfällen (DESTATIS 2015, Abanda 2016, Erfahrungswerte).

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die mit diesem Vorgehen abgeschätzten Zinkstoffströme in Deutschland.

Abbildung 5-19: Stoffströme Zink in Deutschland 2013



Quelle: eigene Abschätzungen

5.5.2.3 Verwertung und Entsorgung von mineralischen Zinkabfällen

Ca. 4.000 t Zn werden überschlägig aus Batterien zurückgewonnen (UBA 2011). Dieses Zink wird ebenso wie andere Aschen und Reststoffe in Wälzanlagen zu Wälzoxid mit einem Zinkgehalt von > 60 % aufkonzentriert. Unter der Annahme, dass es sich beim exportierten Zinkkonzentrat im Wesentlichen um Wälzoxid handelt, bedeutet dieser Stoffstrom eine Exportmenge von 58.000 t Zn. Unter der Annahme eines mittleren Verlustes von 7 % des Inputs an Zn (Von Billerbeck 2014) ergibt sich eine Inputmenge an Zink in Wälzanlagen von rund 62.000 t. Unter Berücksichtigung des aus dem Batterierecycling stammenden Mengenstromes von 4.000 t ergibt sich ein Mengenstrom aus mineralischen Zinkabfällen von ca. 58.000 t. Dieser Massenstrom korrespondiert mit einem Anfall von ca. 243.000 t an EAF-Stäuben, woraus sich eine realistische, im Stahlrecycling anfallende Staubmenge von 18 kg/t Elektrostaal ergibt (vgl. Von Billerbeck 2014).

Weiterhin ergeben sich aus der Auswertung der Daten zu Mengenströmen und Zusammensetzung von im Jahre 2013 deponierten Abfällen der Gruppen 10 bis 19 des Europäischen Abfallkataloges die nachfolgenden Mengenströme mit den resultierenden Zinkfrachten (DESTATIS 2016, Abanda 2016):

Tabelle 5-41: Deponierte Abfälle mit relevanten Zinkfrachten, 2013

	Material	Massenstrom [t]	mittlere angenommene Zn-Konzentration [%]	errechnete Zn-Fracht [t]
EAV-10	Abfälle aus thermischen Prozessen	11.672.000	0,8000	93.400
EAV-11	Abfälle aus der chemischen Oberflächenbearbeitung	204.200	3,6947	7.500
EAV-12	Abfälle aus Prozessen der mechanischen Formgebung	95.800	0,4150	400
EAV-16	Abfälle, nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt	235.900	0,0834	200
EAV-17	Bau- und Abbruchabfälle	22.137.000	0,0398	8.800
EAV-19	Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen u. a.	5.248.000	0,4866	25.500
Summe		39.592.900	0,343	135.800

Quellen: (DESTATIS 2015, Abanda 2014)

Der wesentliche Mengenstrom zinkhaltiger Abfälle kommt aus thermisch-metallurgischen Prozessen. Darüber hinaus sind die Bereiche Hausmüll sowie Bau- und Gewerbeabfälle (Zn-Verbindungen als Pigmente und Additive in Kunststoffen) zu beachten. Hinter der Schlüsselgruppe 11 stehen insbesondere Schlämme aus der Zink-Hydrometallurgie (EAV 110202*).

5.5.2.4 Bereitstellung von primärem Fein- und Feinstzink

In Deutschland gibt es mit der Nordenhamer Zinkhütte GmbH lediglich eine große Zinkhütte, die aus Primärkonzentrat Feinzink und Legierungen herstellt. Auch der Einsatz von Wälzoxiden und anderen Sekundärstoffen ist möglich. Nach Angaben des Unternehmens werden zu 87 % Feinzink- sowie zu 13 % Legierungen bzw. Zinkdruckgussprodukte gefertigt. Darüber hinaus fallen als Nebenprodukte der hydrometallurgischen Zinkgewinnung Schwefelsäure, ein Blei-Silber-Konzentrat, ein Kupferkonzentrat sowie Cadmium an (Nordenhamer Zinkhütte GmbH ohne Datum).

Die Abschätzung der produktionsseitig für Feinzink und Zinklegierungen zur Verfügung stehenden Mengenströme wird daher im ersten Ansatz ohne die Berücksichtigung von Sekundärquellen bilanziert:

Tabelle 5-42: Produktion und Handelsbilanzen Primärzink in Deutschland 2013

Material	Massenstrom Zn [t]
Import Primärkonzentrat	181.000
Verlust in Primärproduktion	19.000
Primärproduktion Gesamt	162.000
Primärproduktion Zn-Legierungen	17.000
Nettoimport Zn-Legierungen	39.000
Verfügbare Zn-Legierungen Gesamt	56.000
Primärproduktion Feinzink	145.000
Nettoimport Fein- und Hüttenzink	314.000
Verfügbares Feinzink Gesamt	459.000
Verfügbares Primärzink Gesamt (Feinzink und Zinklegierungen)	515.000

Quellen: WVM 2014, BGR 2014, BGR 2015, Dorner 2015 und eigene Abschätzungen

Es wird deutlich sichtbar, dass fast 70 % des in Deutschland verarbeiteten Zinks importiert werden. Zusätzlich zur dargestellten Menge kommt noch eine Sekundärproduktion von Hüttenzink in Höhe von 22.000 t aus Konzentrat-ähnlichen Vorstoffen wie Wälzoxid oder KRS-Oxid (BGR 2014) hinzu.

5.5.2.5 Bereitstellung von Sekundärzink aus Altschrotten

Das Sekundärzink in Deutschland geht vor allem in die Produktion von Zinkoxid und Zinkstaub. In Deutschland werden 74.000 t (WVM 2014) dieser Produkte hergestellt, wobei bei der Herstellung etwa 4,8 % (4.000 t) Neuschrotte entstehen (Metallische Reste mit hohem Zn-Anteil (nach Krüger 2001)). Es entstehen ebenfalls Verluste in Höhe von 4 % (3.000 t) (Aschen und andere Sekundärstoffe (nach Krüger 2001)). Aus der Raffination von Messing in Kupferhütten entsteht KRS-Oxid, welches direkt in der Produktion von Zinkoxid und Zinkstaub eingesetzt werden kann. Laut (Müller et al. 2017) waren dies 38.200 t. Somit müssen etwa 43.000 t Sekundärzink bereitgestellt werden.

In der folgenden Tabelle sind die bekannten In- und Outputströme dargestellt um zu berechnen, welche Menge an zusätzlichen Schrotten bereitgestellt werden muss, um die Sekundärzinkproduktion aus Schrotten abzudecken.

Tabelle 5-43: Abschätzung des Anfalls an Alt- und Neuschrotten aus Zink 2013

Material	Massenstrom [t]	Datenquelle
Altschrotte (170404)	49.900	DESTATIS 2016
Neuschrott aus Sekundärschmelze	5.000	Krüger 2001
Neuschrotte aus der Produktion von Halbzeug	27.000	Krüger 2001
Import Hartzink	3.200	BGR 2014
Neuschrotte aus der Produktion von Zn-Staub und Zn-Verbindungen	3.900	Krüger 2001
KRS-Oxid	38.200	Müller et al. 2017
Summe bekannter Quellen	127.200	
Verluste bei der Schrottaufbereitung	8.800	Eigene Abschätzung
Nettoexport von Schrotten	32.300	BGR 2014
Neuschrott aus Sekundärschmelze	5.000	Krüger 2001
Metallverluste Sekundärschmelze	3.700	Krüger 2001
Neuschrotte aus der Produktion von Zn-Staub und Zn-Verbindungen	3.900	Krüger 2001
Metallverluste bei Produktion von Zn-Staub und Zn-Verbindungen	3.200	Krüger 2001
Summe Verlust und Export	56.900	
Produktionsmenge Zn-Staub und Zn-Verbindungen	74.000	
Notwendige Schrottmenge zur Herstellung	130.900	
Differenz	3.700	

Nach Rundung ergibt sich eine notwendige Korrektur der Altschrottmenge von 3.000 t, welche dem Zinkschrott aus (DESTATIS 2015) zuaddiert werden muss.

5.5.2.6 Bereitstellung von Sekundärmessing

Messing ist eine Legierung die hauptsächlich aus Kupfer und Zink (in der Regel 5 – 45 %) besteht. Im Mittel enthält sie 39 % Zink. Die separierten Messingschrotte, welche wiedereingeschmolzen werden können, gelangen zu Blockmetallherstellern. Dort werden sie eingeschmolzen und an die MessingproduktHersteller weitergegeben. In Deutschland hat dieser Massenstrom ein Volumen von 161.000 t bezogen auf den Zinkanteil (WVM 2014).

5.5.2.7 Produkt- und Halbzeugebene

Zink-Druckguss

Die Herstellung von Bauteilen aus Zink-Druckguss basiert auf der Verwendung von Zinklegierungen und grenzt sich damit von der Feinzinkverwendung ab. Es ergibt sich ein separater Strang mit den nachfolgend zusammengefassten Stoffströmen:

Tabelle 5-44: Stoffströme der Herstellung von Bauteilen aus Zinkdruckguss

Material	Massenstrom [t]
Zn-Legierung aus Primär	17.000
Import Zn-Legierungen	39.000
Zn-Legierung verfügbar	56.000
Verluste	1.000
Kreislaufmaterial (intern)	29.000
Zn-Druckgussprodukte	55.000

Quelle: Krüger 2001

Nahezu die Hälfte der importierten Zinklegierungen stammt aus Belgien (Dorner 2015), wo mit Umicore ein bedeutender Sekundärmetallhersteller große Niederlassungen hat. Es ist demnach möglich, dass in den importierten Legierungen auch Rezyklate enthalten sind. Details zu den Mengenströmen sind nicht bekannt.

Zink-Verbindungen und Sonstiges

Unter Zinkverbindungen fallen alle Produkte, die Zink in einer Oxidationsstufe > 0 enthalten, also nicht metallisch sind. Sie werden als Pigment, in der Pharmaindustrie, in Zinksalben oder auch als Additiv in der Kunststoff- und Gummiproduktion eingesetzt. Oftmals erfordern die Einsatzzwecke eine hohe Reinheit, weshalb sich die Darstellung der Zinkverbindungen ähnlich aufwändig zeigt wie die Darstellung metallischen Zinks. Die Herstellung aus sekundärem Hüttenzink sowie Rohzink ist möglich, sofern dieser cadmiumfrei vorliegt (vgl. Krüger 2001). In der Kupferhütte fällt bei der Raffination des Kupfers aus Messing Zink in Form Flugstäuben an, welches in KRS-Oxid aufkonzentriert wird. Hierbei handelt es sich um 38.200 t, welche zur Herstellung von Zinkoxid genutzt werden (Müller et al. 2017).

Für die Darstellung in Deutschland werden für das Produktionsjahr 2013 folgende Stoffströme abgeleitet. Die „sonstige Verwendung von Zink“, die knapp 1 % der Verwendungsmenge bzw. 5.000 t ausmacht, ist hierbei ebenfalls berücksichtigt:

Tabelle 5-45: Abschätzung der Stoffströme zur Herstellung von Zinkverbindungen und sonstigem Zink in Deutschland, 2013

Material	Massenstrom [t]	Quelle
Sekundärzink aus Schrotten	42.400	berechnet
KRS-Oxid	38.200	Müller et al. 2017
Summe Input (gerundet)	81.000	
Verluste	3.200	Aschen und andere Sekundärstoffe (nach Krüger 2001)
Neuschrotte	3.900	Metallische Reste mit hohem Zn-Anteil (nach Krüger 2001)
Zn-Verbindungen	69.000	WVM 2014
Sonstige Zn-haltige Produkte	5.000	WVM 2014
Summe Output (gerundet)	81.000	

Messing, Verzinkung und Zn-Halbzeug

Für die Nutzung von Feinzink stehen folgende Mengenströme zur Verfügung:

Tabelle 5-46: Verwendung von Feinzink in Deutschland 2013

Material	Massenstrom Zn [t]	Bemerkung
Verfügbares Fein- und Hüttenzink Gesamt	481.000	Siehe Kapitel 5.5.2.4
Einsatz zur Verzinkung	247.000	WVM 2014
Einsatz in Halbzeugfertigung	120.000	WVM 2014
Einsatz in Messing	8.000	WVM 2014
Lagerbildung Im-/Export	106.000	Ergibt sich aus Differenz

Quellen: WVM 2014, BGR 2014, BGR 2015, Dorner 2015 und eigene Abschätzungen

Die Schätzung für die Einsatzmengen von Zink in den Anwendungen Verzinkung, Halbzeugfertigung und Messing liegen im Gegensatz zu Informationen zu den Handelsbilanzen der Zinkverwendungen vor. Aus der Differenz der Angaben kann daher lediglich abgeschätzt werden, welche Zinkmenge exportiert bzw. gelagert wird.

Für die Verarbeitung der Halbzeuge und Produkte werden folgende Stoffströme angenommen:

Tabelle 5-47: Abschätzungen der Stoffströme bei der Zink-Halbzeugverarbeitung in Deutschland 2013

Material	Massenstrom Zn [t]	Massenstrom Verluste Zn [t]	Massenstrom Neuschrott [t]	Bemerkung
Verzinkung	247.000	12.000		Krüger 2001
Zn-Halbzeugverarbeitung	120.000	2.000	27.000	Krüger 2001
Messingproduktion	169.000	8.000		Annahme 5% aufgrund Siedepunkt
Summe	536.000	22.000	27.000	

Quellen: Krüger 2001 sowie eigenen Berechnungen

5.5.3 Verwertungswege

In Deutschland wurden 2013 rund 42.000 t sekundäres Hüttenzink und 76.000 t Wälzoxid aus inländischen Abfällen produziert. Auf Grund von fehlenden Im- und Exportdaten zu Wälzoxid ist eine Zuordnung der 76.000 t zu den 22.000 t Sekundärzink aus der Hütte nicht möglich. Um hier keine Doppelzählung zu erhalten, werden nur die 76.000 t angerechnet. Zusätzlich werden aus dem KRS-Oxid der Kupferraffination rund 47.000 t Zinkoxid mit einem Zinkgehalt von 38.000 t hergestellt, welches primär aus Zinkkonzentrat gewonnen wird. Durch das direkte Recycling von Messing über Blockmetallhersteller werden 161.000 t Zink im Kreislauf geführt. Vor dem Hintergrund der Handelsbilanz kann keine Abschätzung zur Unterscheidung von Neu- und Altschrotten vorgenommen werden. Es gibt Hinweise darauf, dass im Rahmen importierter Zn-Legierungen auch Sekundärzink eingesetzt wird.

Die nachfolgende Tabelle beschränkt sich auf die Sekundärproduktion in Deutschland.

Tabelle 5-48: Sekundärzinkerzeugung (inklusive Zink im Messing) in Deutschland aus inländischen Zinkschrotten

Herkunft	Erzeugtes Sekundärzink [t]	Produkt aus Sekundärzink	Substitutionsäquivalent
Altschrotte und Neuschrotte mit nicht genau definierter Zusammensetzung	42.000	Sekundäres Hüttenzink	Primäres Hüttenzink (inkl. aller Vorketten)
Zink aus mineralischen Abfällen	76.000	Wälzoxid aus der Aufbereitung mittels Wälzrohr (Zinkanteil 58.000 t)	Zinkhaltiges Erzkonzentrat mit einem Zinkanteil von 58.000 t
Messing, Halbzeug, sekundär – Zinkanteil	161.000	Sekundärmessing aus Schmelze	Primäres Hüttenzink (inkl. aller Vorketten)
Zinkoxid aus der Aufbereitung von KRS-Oxiden (netto, Aufwand gleich 0 im Vergleich zu primär)	38.000	Zinkoxid aus KRS-Oxid	Zinkhaltiges Erzkonzentrat mit einem Zinkanteil von 36.000 t
Summe	317.000		

Zusätzlich zu den in Deutschland verwerteten Zinkschrotten werden 31.000 t netto Alt- und Neuschrott exportiert. Auch für diese Schrotte ist von einer hochwertigen Verwertung auszugehen. Mit der Annahme von Umschmelzverlusten von rund 7 % ist davon auszugehen, dass aus den deutschen Nettoexporten rund 29.000 t Hüttenzink außerhalb Deutschlands produziert werden.

5.5.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärzinkproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Die Sekundärzinkproduktion (aus Alt- und Neuschrotten) sowie Wälzoxid aus der Aufbereitung mittels Wälzrohr wurden selbst modelliert gemäß den Daten aus Krüger (2002).

Messingschrott, welcher die gesamte Kupferraffination durchläuft, erzeugt KRS-Oxid, welches zu Zinkoxid verarbeitet wird. Der Aufwand für die Herstellung wird durch die Raffination des Kupfers abgebildet. Für den Zinkanteil im KRS-Oxid wird eine Gutschrift in Höhe von Zinkkonzentrat, aus welchem Zinkoxid üblicherweise primär gewonnen wird, angesetzt. Für Messingschrott, welcher über Blockmetallhersteller direkt eingeschmolzen wird, werden die Aufwendungen einer Schmelze abgeschätzt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-49: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Zink, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Hüttenzink, primär	21,8	4.426
Zinkhaltiges Erzkonzentrat, primär	10,5	2.134
Hüttenzink, sekundär	0,12	5,16
Wälzoxid aus der Aufbereitung mittels Wälzrohr	6,02	818

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Messing, Halbzeug, sekundär – Zinkanteil	0,16	26,5
Zinkoxid aus der Aufbereitung von KRS-Oxiden ²¹	0	0
	DIERec	5.709

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-50: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Zink, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Hüttenzink, primär	4,98	1.011
Zinkhaltiges Erzkonzentrat, primär	10,5	204
Hüttenzink, sekundär	0,12	5,16
Wälzoxid aus der Aufbereitung mittels Wälzrohr	6,02	818
Messing, Halbzeug, sekundär – Zinkanteil	0,16	26,5
Zinkoxid aus der Aufbereitung von KRS-Oxiden ²¹	0	0
	DERec	365

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-51: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Zink, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Hüttenzink, primär	56,1	49,8	11.394	10.115
Zinkhaltiges Erzkonzentrat, primär	5,87	5,64	1.195	1.148
Hüttenzink, sekundär	3,20	3,13	135	132
Wälzoxid aus der Aufbereitung mittels Wälzrohr	82,2	76,2	11.161	10.347
Messing, Halbzeug, sekundär – Zinkanteil	6,30	6,25	1.014	1.007
Zinkoxid aus der Aufbereitung von KRS-Oxiden ²²	0	0	0	0
		KEA-Saldo	280	-222

Quelle: eigene Zusammenstellung

²¹ netto, Aufwand gleich 0 im Vergleich zu primär. Aufwand für KRS Oxide gleich 0 da Abfallprodukt der Kupferrückgewinnung aus Messing

²² netto, Aufwand gleich 0 im Vergleich zu primär. Aufwand für KRS Oxide gleich 0 da Abfallprodukt der Kupferrückgewinnung aus Messing.

Tabelle 5-52: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Zink, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Hüttenzink, primär	47,7	41,8	9.691	8.482
Zinkhaltiges Erzkonzentrat, primär	5,87	5,64	0	0
Hüttenzink, sekundär	3,20	3,13	135	132
Wälzoxid aus der Aufbereitung mittels Wälzrohr	82,2	76,2	11.161	10.347
Messing, Halbzeug, sekundär – Zinkanteil	6,30	6,25	1.014	1.007
Zinkoxid aus der Aufbereitung von KRS-Oxiden ²²	0	0	0	0
		KEA-Saldo	-2.618	-3.004

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.5.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.5.5.1 Verwertungsmengen

Die abgeschätzten Verwertungsmengen zeigen deutlich die Wirkung der Wirtschaftskrise, welche zu einem deutlichen Einbruch im Jahr 2009 geführt hat. Ansonsten sind die Mengen relativ stabil und pendeln um 300.000 t.

Tabelle 5-53: Abschätzung der Sekundärzinkproduktion 2007 – 2015

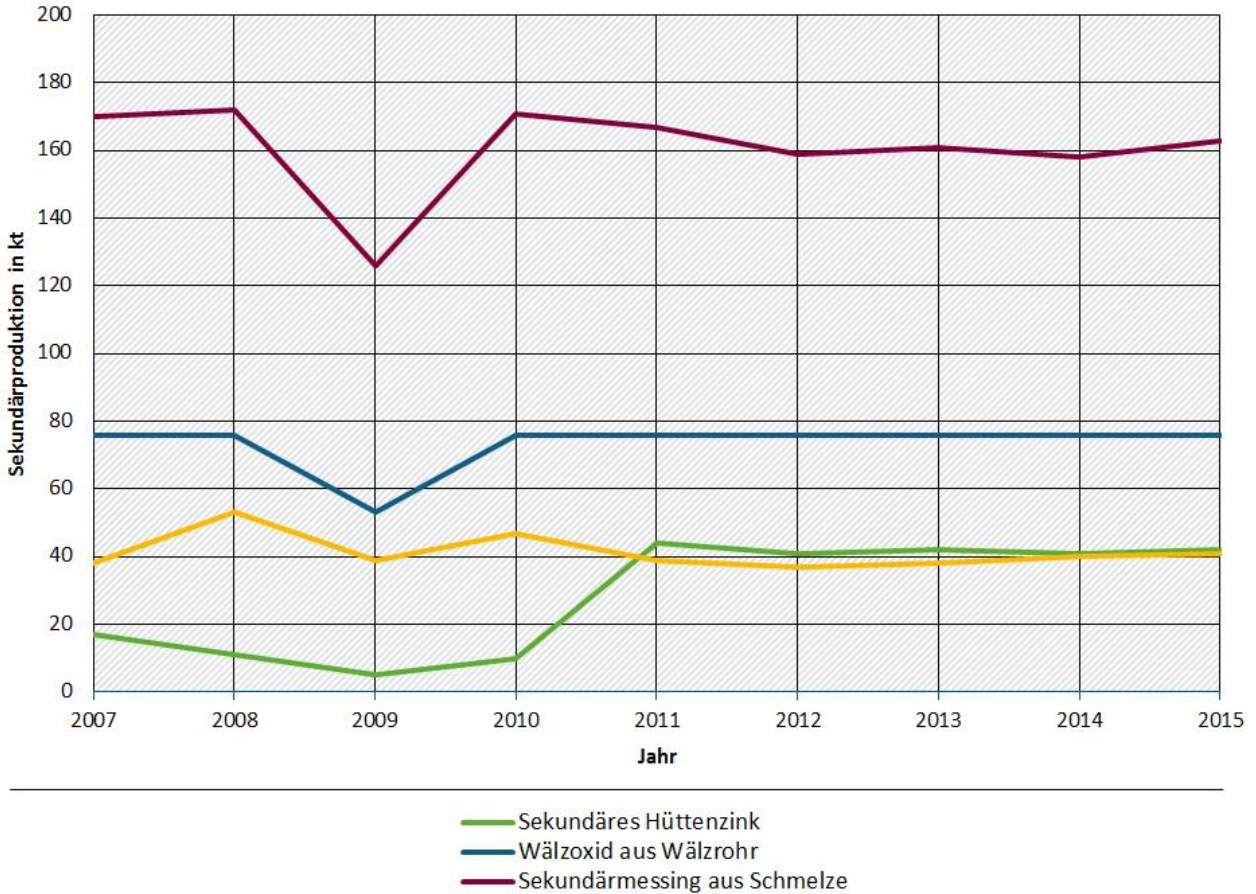
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundäres Hüttenzink	17	11	5	10	44	41	42	41	42
Wälzoxid aus Wälzrohr	76	76	53	76	76	76	76	76	76
Sekundärmessing aus Schmelze	170	172	126	171	167	159	161	158	163
Zinkoxid aus KRS-Oxid	38	53	39	47	39	37	38	40	41
Gesamt	301	312	223	304	325	314	318	316	323

Quelle: eigene Berechnungen, DESTATIS 2009-2017, BGR 2008-2016, WVM 2008-2016

Abbildung 5-20: Zeitlicher Verlauf der Sekundärzinkproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Zink

Zeitliche Verlaufdarstellung 2007-2015



5.5.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-54: Indikatoren für Zink inklusive Messing 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	5.362	5.556	3.986	5.400	5.901	5.626	5.709	5.660	5.809
DERec	kt	287	294	225	274	405	348	365	349	380
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	-595	-655	-275	-821	695	117	280	98	411
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	-3.358	-3.542	-2.338	-3.628	-2.280	-2.745	-2.618	-2.787	-2.535

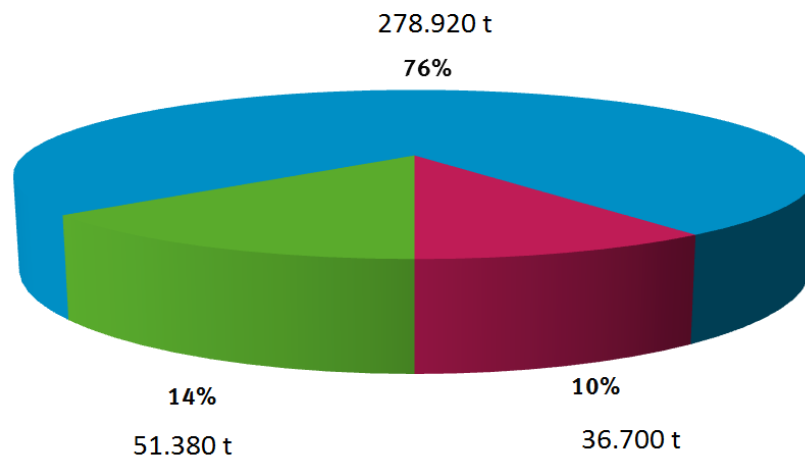
5.5.6 Blei

Blei ist ein toxisches Schwermetall. Dank seiner Biogsamkeit, Korrosionsbeständigkeit und hohen Dichte (u.a. Abschirmung vor Röntgenstrahlen, Radioaktivität, Lärm) wurde es in der Vergangenheit auf vielfältige Weise verwendet. Aufgrund seiner Giftigkeit und der Eigenschaft, dass es im Organismus angereichert wird, wird die Verwendung von Blei aber zunehmend vermieden (Enius 2016). In der so genannten RoHS (Restriction of Hazardous Substances = Richtlinie 2011/65/EU: Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten) werden daher Grenzwerte für den Einsatz von Blei in Elektro- und Elektronikgeräten vorgeschrieben. Dies betrifft vor allem die bleihaltigen Lote, die durch bleifreies Lötzinn ersetzt werden sollen. Es gibt einige Ausnahmen der RoHS - zu diesen zählen u.a. Blei als Legierungselement in Stahl, Aluminium, Kupfer-Legierungen, Blei in besonderen Lotanwendungen und die mengenmäßig größte Bleianwendung, die Starterbatterien (siehe RoHS 2011).

5.5.7 Materialeinsatz in Deutschland

Heute wird der Bleiverbrauch dominiert von dem Einsatzgebiet der Akkumulatoren mit einem Anteil von 76 %, gefolgt von 14% Halbzeug, Kabel, Sonstiges und 10 % Glasindustrie und Chemie wie in folgender Abbildung dargestellt. (GDB 2016). 2013 wurden in Deutschland 367.000 t Raffinadeblei verwendet (BGR 2014).

Abbildung 5-21: Deutscher Bleiverbrauch in in t, 2013



■ Halbzeug-/Kabelherstellung, Sonstiges ■ Akkumulatoren ■ Chemie, Glasindustrie

Quelle: GDB 2016

Blei wird in den Akkumulatoren verwendet, da diese vergleichsweise preiswert, robust, sehr einfach zu laden und vor allem auch bei deutlichen Minusgraden verwendbar sind. Trotz ihrer Nachteile (z.B. hohes Gewicht) werden daher im herkömmlichen Automobilbereich nach wie vor ausschließlich bleihaltige Starterakkus eingesetzt. Bei Hybridfahrzeugen werden aus Gewichts- und Platzgründen als Antriebsakkumulatoren vorzugsweise andere Akkutypen eingesetzt (Elektronikinfo 2016).

5.5.8 Stoffströme in Deutschland 2013

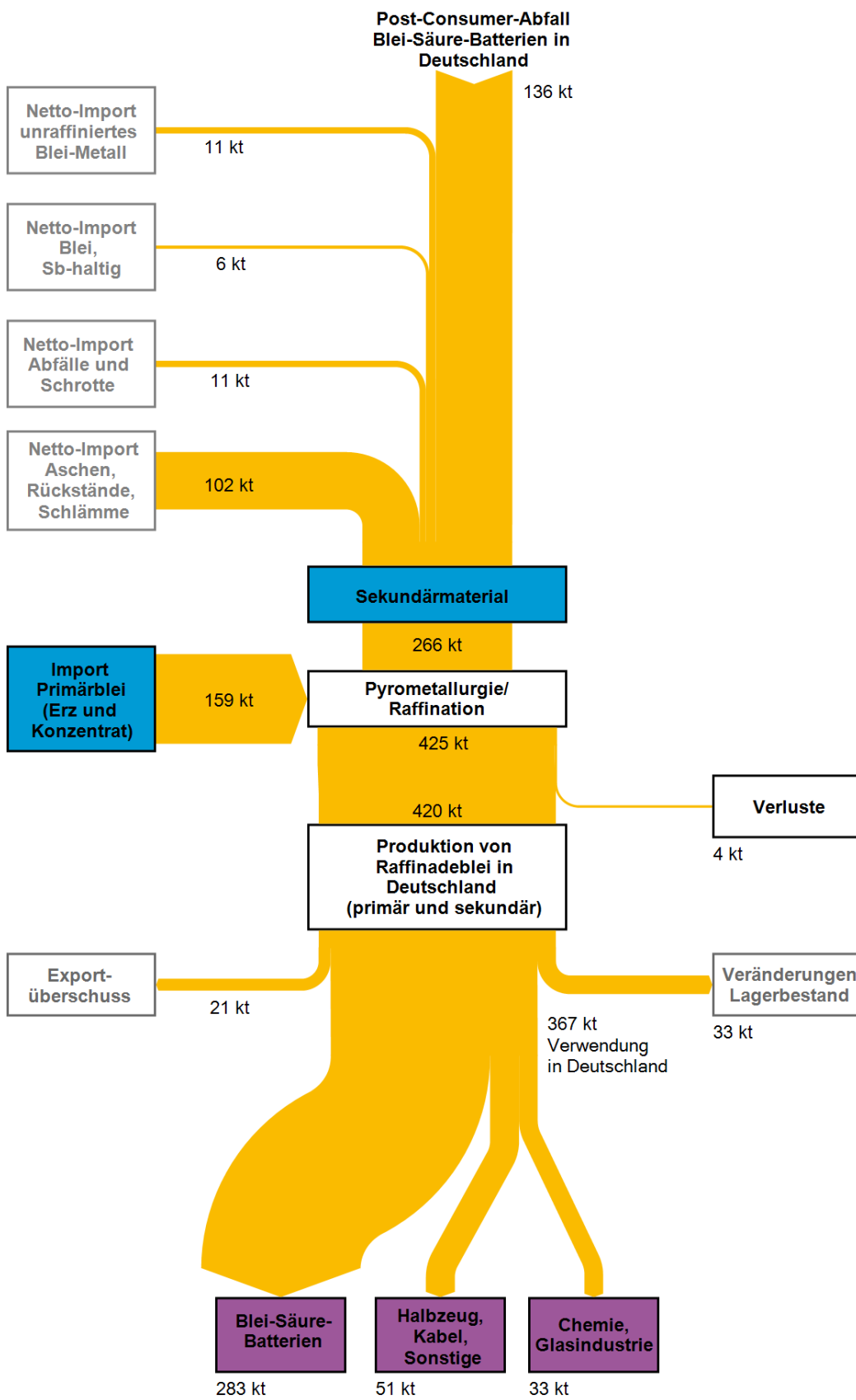
Ausführliche deutsche Produktions- und Handelsstatistiken von Blei und bleihaltigen Produkten liegen von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und der Wirtschaftsvereinigung Metalle vor.

Basierend auf den verfügbaren Daten und Experten-Interviews sowie eigenen Abschätzungen ergibt sich der Überblick des Stoffstroms Blei wie in Abbildung 2 dargestellt. Bezugsjahr für die Analyse ist das Jahr 2013 und der Bezugsraum ist Deutschland.

Blei weist beim Recycling keine Qualitätseinbußen auf und lässt sich somit unendlich oft wiederverwenden (RLG 2016). In Deutschland ist das Bleirecycling – v.a. das Bleirecycling aus Starterbatterien – ein eingespielter Stoffkreislauf, so dass für die deutsche Bleiproduktion mehr Sekundärmaterial eingesetzt wurde als Primärmaterial. Im Jahr 2013 stammten ca. 62% des in Deutschland produzierten Raffinadebleis aus Sekundärmaterial (BGR 2014).

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die abgeschätzten Bleistoffströme in Deutschland.

Abbildung 5-22: Stoffstrom von Blei in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Abschätzungen, Expertenabschätzungen

Bleiaufkommen aus Post-Consumer Abfällen

Bei der Hauptanwendung der Bleiakkumulatoren ist ein Sammelsystem der ausgedienten Blei-Säure-Batterien in Deutschland etabliert. Dieses wurde aufgrund der toxischen Eigenschaft von Blei sowie der in der Batterie enthaltenen Säure, die bei einem Defekt potentiell gefährlich und umweltbelastend ist, eingeführt (Elektroinfo 2016). Somit gehen nahezu 100 % der Blei-Säure-Batterien in die Recyclingroute. Im Jahr 2013 wurden nach (BMUB 2017) 208.929 t Blei-Säure-Batterien gesammelt. Der durchschnittliche Bleigehalt einer Blei-Säure-Batterie liegt bei ca. 67% (Buchholz 2016). Demnach gingen 135.804 t Blei aus den Blei-Säure-Batterien in den Recyclingprozess im Jahr 2013.

Über die Sammlung von weiteren Altprodukten wie bleihaltige Lote, Munition, bleihaltige Industrieabfälle und Produktionsrückstände, CRT-Glas, Bleigürtel, Bleischürzen aus dem medizinischen Bereich etc. und die mengenmäßige Einspeisung in den Recyclingprozess sind keine Angaben bekannt.

Bleiaufkommen aus Importen

Neben den gesammelten Altbatterien wurden auch importierte bleihaltige Produkte in den Verhüttungs- und Raffinationsprozess eingesetzt. Darunter fielen 2013:

- ▶ Bleihaltige Aschen, Rückstände, Schlämme: Der Netto-Import lag bei 137.229 t (BGR 2014). Bei einem durchschnittlichen Bleigehalt von 75 % (Buchholz 2016) gingen 101.549 t Blei in den Recyclingprozess ein.
- ▶ Antimon-haltiges Blei: Der Netto-Import lag bei 6.195 t (BGR 2014). Bei einem durchschnittlichen Bleigehalt von 94 % (nach Buchholz 2016 liegt die Spannbreite zwischen 92 % und 96 %) gingen 5.823 t Blei in den Recyclingprozess ein.
- ▶ Bleihaltige Abfälle und Schrotte: Der Netto-Import lag bei 15.565 t (BGR 2014). Bei einem durchschnittlichen Bleigehalt von 75 % (nach Buchholz 2016 liegt die Spannbreite zwischen 50% und 95%) gingen 11.285 t Blei in den Recyclingprozess ein.
- ▶ Unraffiniertes Blei: Der Netto-Import lag bei 12.164 t (BGR 2014). Bei einem durchschnittlichen Bleigehalt von 94 % (nach Buchholz 2016 liegt die Spannbreite zwischen 92 % und 96 %) gingen 11.434 t Blei in die Aufbereitung.
- ▶ Erz / Konzentrat (primäres Material): Im Jahr 2013 wurde 247.089 t Erz und Konzentrat für die Bleiproduktion importiert. Der durchschnittliche Bleigehalt liegt bei 67 % (Buchholz 2016), was zu einem Bleigehalt von 158.850 t führt.

Des Weiteren wird raffiniertes Blei im- und exportiert. Im Jahr 2013 lag der Netto-Export bei 21.106 t. Der durchschnittliche Bleigehalt ist hier mit 99,9 % anzunehmen, was zu einem exportierten Nettovolumen von 21.085 t führt.

Bleiraffination

Die größten Blei-Recycler in Deutschland sind die Berzelius-Gruppe, Weser-Metall GmbH und Johnson Controls. In folgender Tabelle werden diese Bleihütten kurz nach Art des Inputs (Primär- und/oder Sekundärmaterial), Technologie, Art der Endprodukte und Produktionsmengen zur Übersicht dargestellt.

Tabelle 5-55: Die größten Bleihütten in Deutschland

	Berzelius BBH Bleihütte Stol- berg	Berzelius BSB Recycling Brau- bach	Berzelius MRU Muldenhütten Freiberg	JCI Krautscheid	Weser-Metall Nordenham
Input	Primär + sekundär	Sekundär	Sekundär	Sekundär	Primär (30 %)+ sekundär (70 %)
Technologie	Verhüttung: Direktschmelz- verfahren QSL- Reaktor Raffination: 24 Kessel	Verhüttung: Kurtrommelöfen Raffination: 9 Kessel	Verhüttung: Kurtrommel- öfen Raffination: 13 Kessel	Verhüttung: Schachtofen- verfahren	Verhüttung: Badschmelzöfen
Produkt	Raffiniertes Blei und Bleilegie- rungen; Berzelit	Raffiniertes Blei und Bleilegie- rungen	Raffiniertes Blei und Bleilegie- rungen	Raffiniertes Blei	Raffiniertes Blei und Bleilegie- rungen
Produktion	155.000 t p.a. Blei und Bleile- gierungen	40.000 t p.a. Blei und Bleilegie- rungen	55.000 t p.a. Blei und Bleile- gierungen	60.000 t p.a. Blei	100.000 t p.a. Blei und Bleile- gierungen

Quellen: BBH 2016, BSB 2016, MRU 2016, JCI 2016, Weser-Metall 2016

In Deutschland wird neben Sekundärmaterial auch in zwei Anlagen primäres Bleierz und -konzentrat für die Bleiproduktion eingesetzt. Bei der Berzelius Bleihütte (BBH) Stolberg und der Weser-Metall GmbH Nordenham wird sowohl primäres als auch sekundäres Material gemeinsam verhüttet und raffiniert.

In dem Recyclingprozess der Blei-Säure-Batterien werden die ausgedienten Blei-Säure-Batterien zunächst mechanisch aufbereitet, indem die Bestandteile voneinander getrennt werden. Im nächsten Schritt - der Verhüttung - werden die aufbereiteten Komponenten der Starterbatterie in den Verhüttungsprozess eingespeist. Bei der Verhüttung wird zunächst Rohblei bzw. Werkblei gewonnen, welches noch Verunreinigungen von 2-6 % (z.B. Silber, Kupfer, Zinn, Arsen, Antimon) enthält (Buchholz 2016).

In der anschließenden pyrometallurgischen Raffination in einer Reihe von Kesseln (9-24 Kessel) werden diese Verunreinigungen abgeschieden. Als Endprodukt wird zum einen hochreines Raffinadeblei (>99,9 % Reinheit) z.B. in Barren hergestellt. Zum anderen können in dem Raffinationsprozess unter Zugabe von Zuschlagsstoffen Bleilegierung hergestellt werden. Die Rückgewinnungsrate in der Raffination liegt bei 99 %. Somit konnten 134.446 t Blei durch das Recycling von Blei-Säure-Batterien im Jahr 2013 zurückgewonnen werden. Das zurückgewonnene Blei kann anschließend erneut in Batterien verwendet werden.

Die anfallende Schlacke wird ebenfalls als Produkt vermarktet. Die Schlacke kann im Deponie- und Straßenbau eingesetzt werden, und der ebenfalls anfallende Kupfer-Bleistein wird an Kupferhütten verkauft. (BBH 2016) Eine detaillierte Mengenangabe der Schlacke und des Bleigehalts ist nicht bekannt. Der Bleigehalt ist nach (Buchholz 2016) vernachlässigbar gering. Der Bleistein, der ebenfalls bei der Bleiraffination gewonnen wird, wird anschließend in der Kupfermetallurgie eingesetzt. Es entstehen keine Verluste an Blei, da dieses in der Kupfermetallurgie wieder ausgebracht wird. Eine Abschätzung des Bleigehalts und des Bleivolumens liegt nicht vor (Buchholz 2016).

Wie in Abbildung 2 dargestellt, ergibt sich zwischen produziertem Raffinadeblei (420.000 t) - abzüglich des Exports von raffiniertem Blei (21.000t) - und der Verwendung von Blei (367.000 t) ein Delta in Höhe von 33.000 t. Der Verbleib konnte nicht identifiziert werden. Es wird eine Lagerbestandsveränderung angenommen.

5.5.9 Verwertungswege

2013 wurden in Deutschland 420.000 t primäres und sekundäres Raffinadeblei produziert²³. Davon stammen 134.446 t Sekundärblei aus inländischen Abfällen (Blei-Säure-Batterien), 128.791 t Sekundärblei aus Importen und 157.262 t aus importierten Primärprodukten (nur Bleigehalt).

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Bilanzierungsansätze für das Sekundärblei aus inländischen Abfällen. Da nahezu die Hälfte des global erzeugten Bleis Primärblei ist²⁴, kann Primärblei als Substitutionsäquivalent des erzeugten Sekundärbleis angesetzt werden.

Tabelle 5-56: In Deutschland erzeugtes Sekundärblei aus inländischen Abfällen und Nettoimporten und angenommenes Substitutionsäquivalent, 2013

Herkunft	Input Sekundärblei [t]	Erzeugtes Sekundärblei [t]	Produkt aus Sekundärblei	Substitutionsäquivalent
Blei aus in Deutschland anfallenden Blei-Säure-Batterien	135.804	134.446 ²⁵	Sekundärblei aus der Raffination mit vorgelagerter Aufbereitung der Blei-Säure-Batterien	Primäres metallisches Blei
Blei aus Nettoabfallimporten	130.092	128.791 ²⁵	Sekundärblei aus der Raffination	Primäres metallisches Blei
Summe	265.895	263.236		

Für 2013 ergeben sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ 63 % der deutschen Gesamtbleiproduktion (420.000 t) stammen aus der inländischen Sekundärproduktion.
- ▶ Die oben dargestellten Stoffströme beschränken sich für die inländischen Bleiabfälle auf Blei-Säure-Batterien, die annähernd vollständig verwertet werden. Zu dem Anteil der stofflichen Verwertungen von anderen Abfällen kann deshalb im Rahmen dieser Studie keine Verwertungsquote angegeben werden.

5.5.10 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärbleiproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Sekundärbleiproduktion wurde der europäische Mix abgebildet.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-57: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Blei, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Blei, primär	16	4.214

²³ Davon ca. 21.000 t exportiert.

²⁴ 2013 wurden weltweit 5,5 Mio. t Primärblei (USGS 2015) und 6,1 Mio. t Sekundärblei (ILA 2015) produziert.

²⁵ Rückgewinnungsrate von 99 %.

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Blei aus der Raffination mit vorgelagerter Aufbereitung der Blei-Säure-Batterien, sekundär	1,02	270
DIERec		3.944

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-58: Ergebnisse für den Indikator DIERec ohne ausländische Vorkette für Blei, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Blei, primär	3,52	927
Blei aus der Raffination mit vorgelagerter Aufbereitung der Blei-Säure-Batterien, sekundär	1,02	270
DERec		657

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-59: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Blei, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Blei, primär	18,8	17,4	4.943	4.590
Blei aus der Raffination mit vorgelagerter Aufbereitung der Blei-Säure-Batterien, sekundär	11,9	11,4	3.142	3.003
KEA-Saldo			1.801	1.587

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-60: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Blei, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Blei, primär	12,5	11,5	3.302	3.015
Blei aus der Raffination mit vorgelagerter Aufbereitung der Blei-Säure-Batterien, sekundär	11,9	11,4	3.142	3.003
KEA-Saldo			160	12

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.5.11 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

Die abgeschätzten Verwertungsmengen sind von 2007 bis 2015 rückläufig und proportional zur leicht gesunkenen deutschen Bleiproduktion (Primär- und Sekundärproduktion). In 2009 ist ein Anstieg der Sekundärbleiproduktion aus Blei-Säure-Batterien zu verzeichnen. Dies ist auf die Abwrackprämie in Deutschland zurückzuführen. Für die Abschätzung der Zeitreihen wurde dabei folgendermaßen vorgegangen:

- ▶ Der Bleigehalt der bleihaltigen importierten und exportierten Güter ist über den Betrachtungszeitraum 2007 bis 2015 gleichbleibend.
- ▶ Der Rückgewinnungsgrad der Raffination ist von 2007 bis 2015 gleichbleibend mit 99% angenommen.

Mit diesen Annahmen ergeben sich folgende Verwertungsmengen von 2007 bis 2015:

Tabelle 5-61: Abschätzung der Sekundärbleiproduktion 2007 – 2015

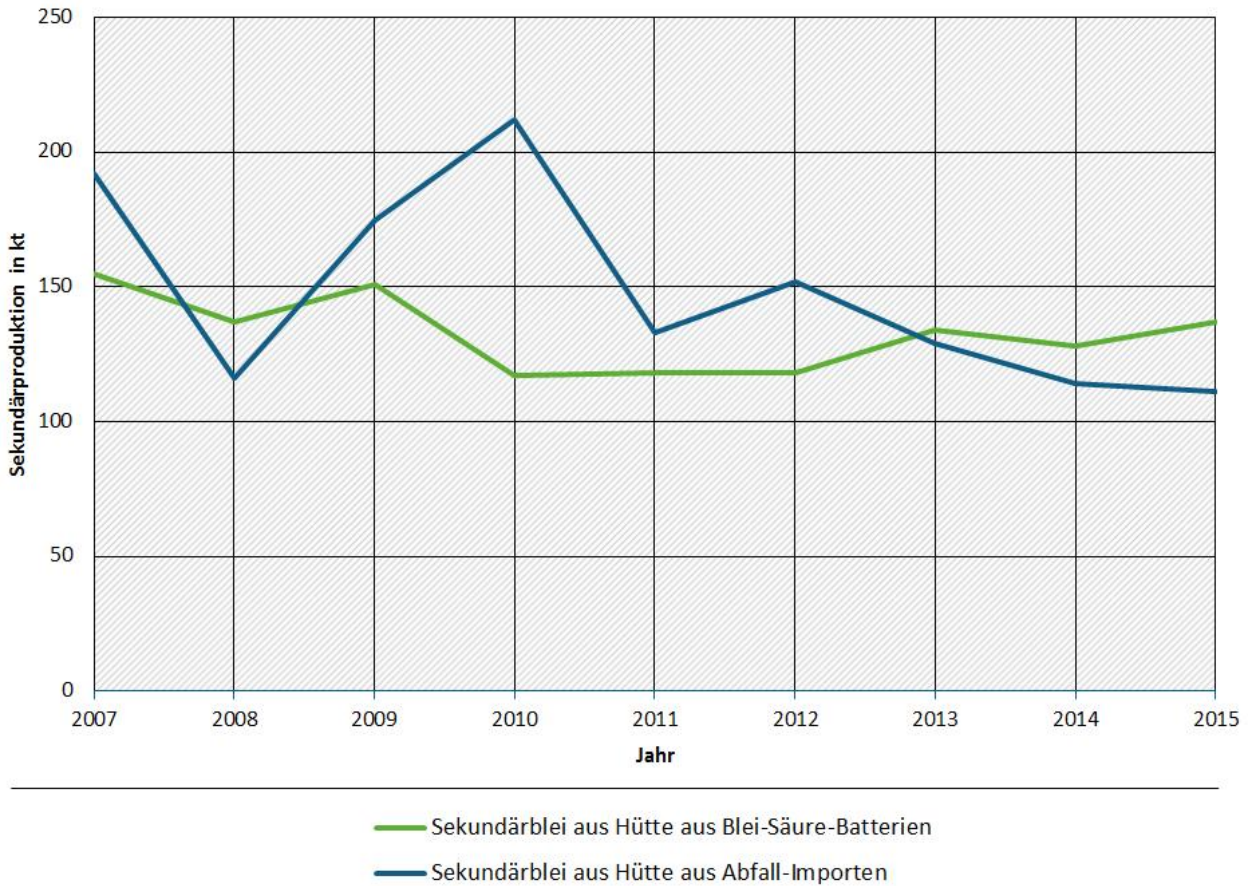
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundärblei aus Hütte aus Blei-Säure-Batterien	155	137	151	117	118	118	134	128	137
Sekundärblei aus Hütte aus Abfall-Importen	192	116	175	212	133	152	129	114	111
Gesamt	347	254	326	328	251	270	263	243	248

Quelle: eigene Berechnungen, BGR 2008-2016, WVM 2008-2016, Buchholz 2016, Buchholz 2017, BMUB 2017

Abbildung 5-23: Zeitlicher Verlauf der Sekundärbleiproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Blei

Zeitliche Verlaufdarstellung 2007-2015



5.5.11.1 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-62: Indikatoren für Blei 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	5.206	3.805	4.883	4.919	3.762	4.048	3.945	3.634	3.720
DERec	kt	867	634	813	819	627	674	657	605	619
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	2.377	1.737	2.229	2.246	1.718	1.848	1.801	1.659	1.698
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	211	154	198	199	153	164	160	147	151

5.6 Zinn

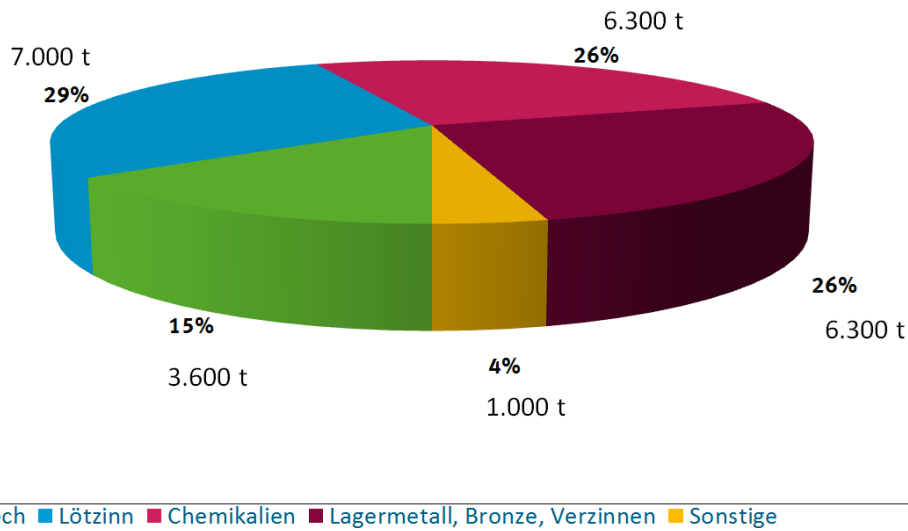
Zinn kommt in drei verschiedenen Kristallstrukturen mit unterschiedlichen Stoffdichten vor. Das metallische β -Zinn kann sich bei niedrigen Temperaturen ($< 13,2^\circ\text{C}$) in α -Zinn umwandeln, was zu einer unter dem Namen Zinnpest bekannten Materialzerstörung führt. Der Schmelzpunkt von Zinn liegt mit 232°C sehr niedrig. Dies begründet den Einsatz als Lot, für das insbesondere im Bereich der Elektrotechnik traditionell eine Legierung mit knapp etwa 38,5% Blei eingesetzt wurde. Im Zuge von RoHS 2 wird nun seit 2013 in kommerziellen Produkten größtenteils auf Blei verzichtet (RoHS 2011).

Die Stoffströme für Zinn werden in Deutschland im Gegensatz zu den Metallen Aluminium, Kupfer und Zink nicht von der Wirtschaftsvereinigung Metalle im Detail veröffentlicht, so dass die Datenlage sich im Vergleich deutlich schlechter darstellt. Es sind hier lediglich sporadische Angaben zu Halbzeugexporten verfügbar (WVM 2014; Seite 6). Mit den DERA Rohstoffinformationen „Zinn – Angebot und Nachfrage bis 2020“ (BGR 2014a) hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe die in der Fachöffentlichkeit verfügbaren Informationen sorgfältig zusammengestellt. Diese Arbeit bildet die Grundlage der hier abgeleiteten Stoffströme. Ergänzt und abgeglichen werden die Daten mit dem Rohstoffwirtschaftlichen Steckbrief Zinn (BGR 2014b) sowie mit den Berichten Deutschland – Rohstoffsituation 2013 (BGR 2014) und Rohstoffsituation 2014 (BGR 2015). Der Rohstoff Zinn ist gemäß den Explorationsförderrichtlinien der DERA als kritisch eingestuft (BGR 2014, Seite 24).

5.6.1 Materialeinsatz in Deutschland

In Deutschland findet seit 25 Jahren kein Abbau von Primärzinn mehr statt (BGR 2014a, Seite 57). Da auch keine Raffination von Primärkonzentraten mehr erfolgt, stammt sämtliches Primärzinn aus Importen. Für das Jahr 2013 weist die Handelsbilanz einen Importüberschuss von 18.200 t aus. Die Produktion von Sekundärzinn erfolgt in kleinen und mittelständischen Betrieben, so dass lediglich ein Schätzwert über eine jährliche Sekundärzinnproduktion von etwa 6.000 t verfügbar ist (BGR 2014a, Seite 58). Für die Einsatzgebiete der 2013 in Deutschland verarbeiteten Zinnmasse von insgesamt 24.200 t liegen folgende Angaben vor.

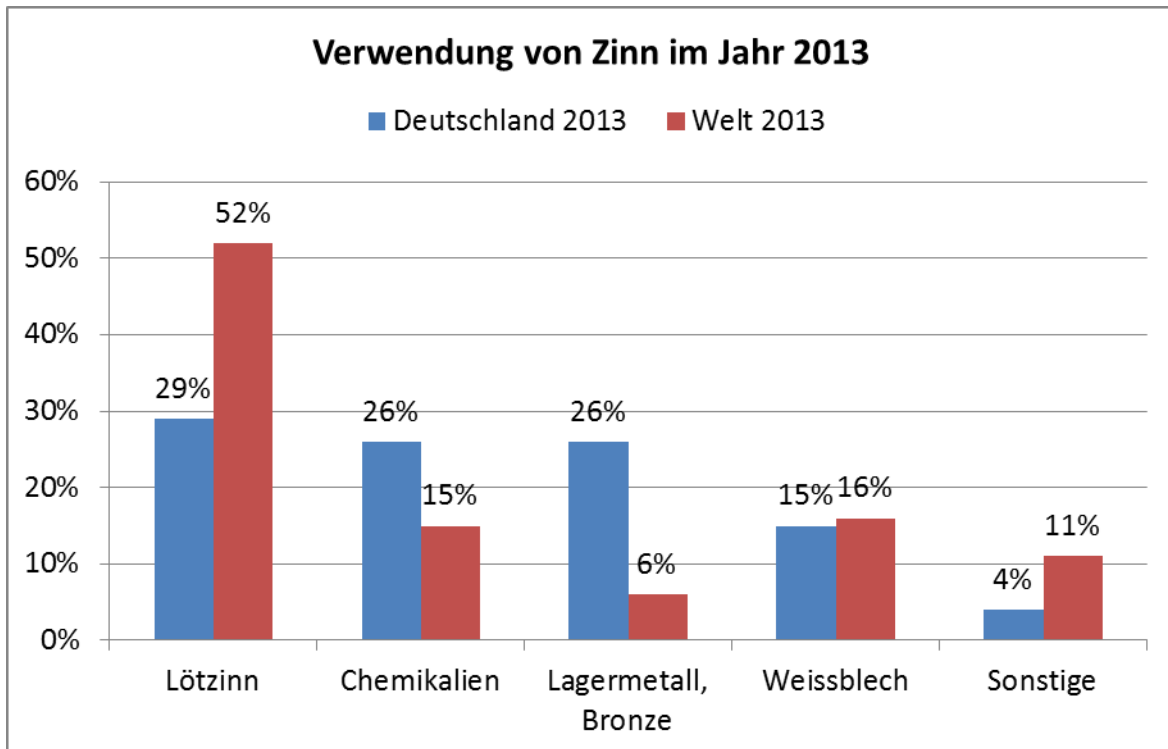
Abbildung 5-24: Verwendungsgebiete von Zinn in Deutschland 2013



Quelle: Schätzung nach (BGR 2014 a)

Mit diesen Einsatzgebieten unterscheidet sich die Bundesrepublik deutlich von der weltweiten Verwendung, wie die nachfolgende Abbildung illustriert.

Abbildung 5-25: Verwendung von Zinn im Jahr 2013 Deutschland und weltweit



Quelle: BGR 2014 a

Während in der weltweiten Betrachtung mehr als die Hälfte allen Zinns in die Herstellung von Loten fließt, sind es in Deutschland weniger als 30 %. In Deutschland wird Zinn vor allem für die Herstellung von Legie-

rungen für den Maschinenbau eingesetzt. Auch die Herstellung von zinn-(organischen) Chemikalien spielt in Deutschland eine weit bedeutendere Rolle als in anderen Ländern.

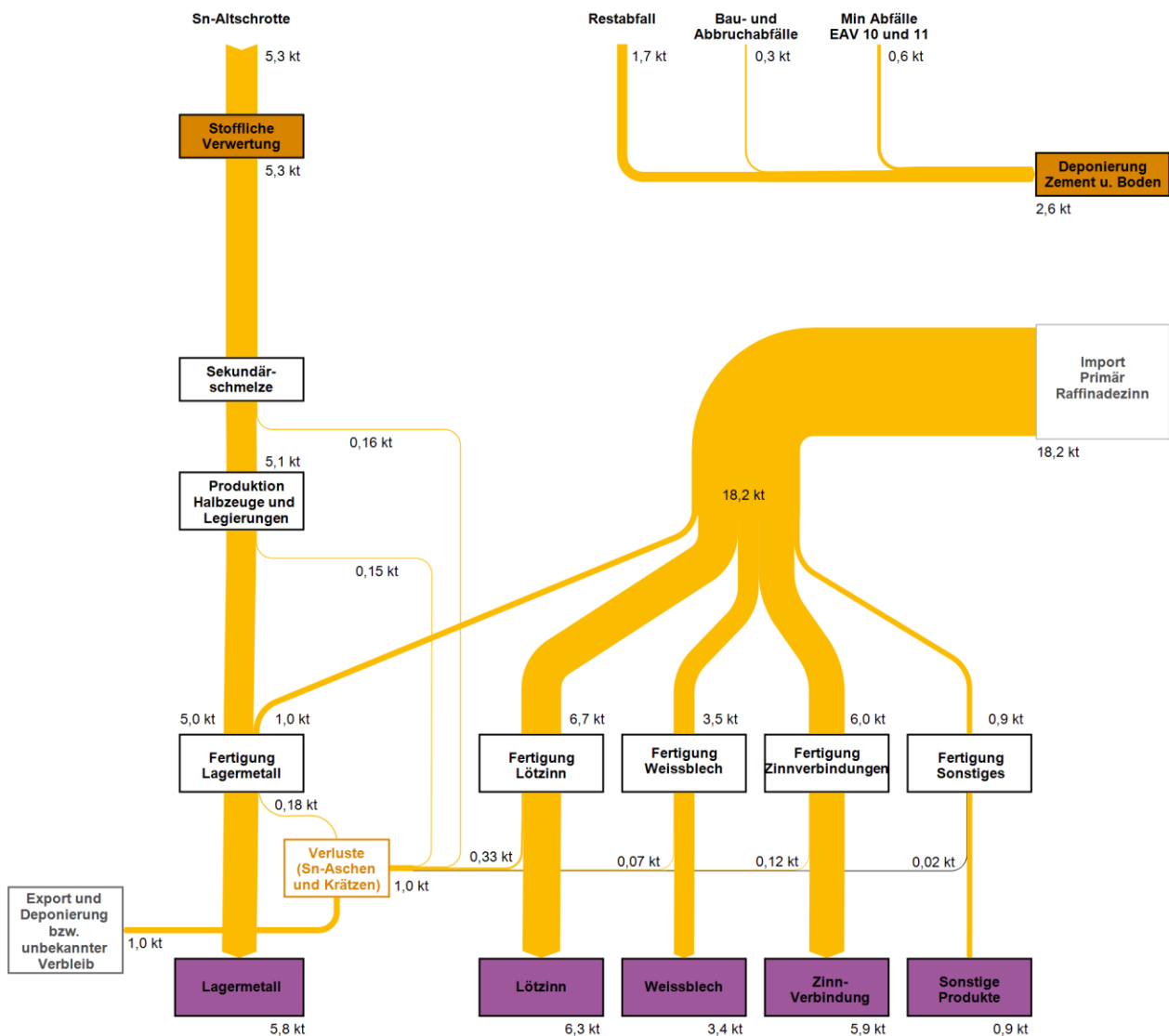
5.6.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Um eine Abschätzung der Stoffströme für Zinn in Deutschland vorzunehmen, ist wie folgt vorgegangen worden:

- ▶ Erstellung eines quantitativen Grundgerüsts auf Basis und unter Abgleich vorliegender Produktions- und Handelsbilanzdaten (BGR 2014, BGR 2014 a, BGR 2014 b)
- ▶ Ergänzung von Daten zu Altschrotten und deponierten Zinnmengen aus der Fachserie 19 Reihe 1 (DESTATIS 2015)
- ▶ Abgleich mit Bilanzdaten von Prozessen zur Metallgewinnung und zum Metallrecycling
- ▶ Abschätzung der Konzentrationen und Stoffströme von metallischem Zinn in den Sekundärrohstoffströmen (Abfall und sonstige Stoffströme aus diversen Quellen)
- ▶ Abschätzung von dissipativen Verlusten an metallischem Zinn in Abfallströmen wie Restabfällen, Sekundärbrennstoffen und sonstigen Abfällen.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die mit diesem Vorgehen abgeschätzten Zinnstoffströme in Deutschland.

Abbildung 5-26: Stoffströme Zinn in Deutschland 2013



Quelle: eigene Berechnungen

5.6.2.1 Vorbemerkungen

Wesentliche Mengenströme des in Deutschland eingesetzten Zinns gelangen in dissipative Produkte, die ein Recycling von metallischem Zinn erschweren oder sogar unrentabel machen. Als organische Zinnverbindungen und Zinnoxide entziehen sich die Zinnchemikalien einer Rückgewinnung als Metall.

Eine Rückgewinnung von Zinn aus Weißblech ist möglich, wird aber in Deutschland aufgrund des relativ hohen Aufwandes bei zunehmend geringer werdenden Zinnanteilen im Weißblech und starker Konkurrenz in den Nachbarländern Polen und Belgien nicht mehr praktiziert (BGR 2014 a, Seite 58). Aus Weißblechschrotten, die eine Müllverbrennungsanlage durchlaufen haben, ist keine Gewinnung von Zinn möglich, da die Verbrennungstemperaturen das Zinn verflüssigen (BGR 2014 a, Seite 26).

Das in Loten eingesetzte Zinn findet sich in Fraktionen aus Elektronikschrotten durchaus in Konzentrationen bis zu 2 Ma.-% wieder (Maurell-Lopez 2012, Seite 422), wird aber bis dato noch nicht systematisch zurückgewonnen (Rotter 2014, Seite 198). Teilmengen fallen als Nebenprodukt im Kupferrecycling an (Kawohl 2011). Eine Quantifizierung der aus dem Kupferrecycling stammenden Mengen ist nicht möglich.

Genaue Zahlen über den Anfall an metallischen Zinn-Neuschrotten lediglich aus der Verarbeitung an Zinnhalbzeugen und Zinnlegierungen sind nicht veröffentlicht, können aber aus den Erfahrungswerten für andere Metalle abgeschätzt werden.

Zinnstäube und Zinnaschen können ebenfalls hohe Zinnfrachten enthalten, die eine Wiedergewinnung ermöglichen. Es sind jedoch keine Details über Mengenströme ermittelbar, so dass eine Quantifizierung nur im Rahmen einer Abschätzung möglich ist.

5.6.2.2 Zinn in Abfällen

Aus der Auswertung der Daten zu Mengenströmen und zur Zusammensetzung der im Jahre 2013 deponierten Abfällen der Gruppen 10 bis 19 des Europäischen Abfallkataloges ergeben sich die nachfolgenden Mengenströme mit den resultierenden Zinnfrachten (DESTATIS 2016, Abanda 2016). Wir gehen davon aus, dass aus diesen Mengen wegen der sehr niedrigen Zinngehalte kein Zinnrecycling erfolgt. Die angegebenen Mengen beinhalten nicht die exportierten Aschen und Krätzen.

Tabelle 5-63: Deponierte Abfälle mit relevanten Zinnfrachten, 2013

Abfallsummennummer	Material	Massenstrom [t]	mittlere Sn Konz [%]	Sn Fracht [t]
EAV-10	Abfälle aus thermischen Prozessen in Deponie	11.672.400	0,0049	570
EAV-12	Abfälle aus Prozessen der mechanischen Formgebung in Deponie	95.800	0,0448	40
EAV-17	Abfälle aus Bau- und Abbruch ohne Abfallschlüsselnummer 170406 in Deponie	22.136.600	0,0013	290
EAV-19	Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen in Deponie	5.247.800	0,0325	1.710
Summe	EAV-10 bis EAV-19 ohne Metall	39.152.600	0,0067	2.610

Quellen: DESTATIS 2016, Abanda 2016

Der wesentliche Mengenstrom zinnhaltiger Abfälle kommt aus der Abfallbehandlung. Überschlägig ist demnach davon auszugehen, dass etwa 10% des in Verkehr gelangenden Zinns in mineralischer Form deponiert werden, da eine Aufkonzentration und Rückgewinnung nicht rentabel ist.

5.6.2.3 Verarbeitung von Primär- und Sekundärzinn in Deutschland

Da in Deutschland keine Raffination von Zinn mehr erfolgt, ist auch der Import von Konzentraten vernachlässigbar. Im Jahr 2013 wurden nach Angaben des Statistischen Bundesamtes gerade einmal 15 t Zinn in Form von Konzentraten importiert (BGR 2014, Seite 75).

Die handelsbilanzbereinigte Importmenge an Raffinadezinn beläuft sich auf rund 18.200 t. Das in Deutschland produzierte Sekundärzinn geht vollständig in die Erzeugung von Zinnlegierungen aller Art (BGR 2014 a, Seite 58).

Für das in Deutschland eingesetzte Primärzinn ist davon auszugehen, dass es vornehmlich in folgende Bereiche gelangt:

- ▶ Lötzinn
- ▶ Weißblech
- ▶ Zinnverbindungen (anorganisch) sowie
- ▶ sonstige Anwendungen.

Die übrige Menge geht zusammen mit dem Sekundärzinn in die Herstellung von Lagermetall. Eine Übersicht der Ströme des Primärzinn ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5-64: Verwendung von Primärzinn in Deutschland 2013

Material	Massenstrom Sn [t]	Anteil Primärzinn [%]	Sn-Verluste in Produktion [%]	Sn-Verluste in [t]
Importüberschuss Raffinade	18.160	100		
Einsatz für Lötzinn	6.710	37	5	350
Einsatz für Zinnverbindungen	6.020	33	2	130
Einsatz für Weißblech	3.470	19	2	70
Einsatz für sonstige Anwendungen	930	5	2	20
Einsatz in der Lagermetallherstellung	1.030 (+ 5.000 sekundär)	6	3	30 (+ 150 sekundär)
Summe	18.160	100		570

Quellen: BGR 2014, BGR 2014 a, BGR 2015 und eigene Abschätzungen

Bei einem Bedarf von ca. 17.100 t Primärzinn für die genannten Produktbereiche verbleiben rund 1000 t, die als Primärzinn in die Herstellung von Lagermetall fließen. Die bei der Produktion anfallenden Verluste sind abgeschätzt. Sie werden als Zinnaschen bzw. Krätzen angenommen.

Aus der Fachserie 19 Reihe 1 Schlüsselnummer 170406 (DESTATIS 2015) ergibt sich für 2013 eine Zinnschrottmenge von 5.300 t.

Ausgehend von den Erfahrungen aus den Metallschmelzen anderer Elemente wird hier davon ausgegangen, dass 3 % des Inputs (160 t) als Asche bzw. Krätze anfallen.

Für die Produktion von Halbzeugen und Legierungen aus Sekundärzinn wird ebenfalls von einem Verlust von ca. 3 Masse% des Inputs ausgegangen. Entsprechend stehen auf der Sekundärzinnschiene ca. 5.000 t für die Fertigung von Produkten zur Verfügung.

Tabelle 5-65: Verarbeitung von Sekundärzinn in Deutschland 2013

Material	Massenstrom Zinn [t]
Alt- und Neuschrott-Input in Sekundärschmelze	5.300
Verluste in Sekundärschmelze	160
Sekundärzinninput in Halbzeug- und Legierungsproduktion	5.140
Verluste in Guss- und Halbzeugfertigung	150
Produktion von Lagermetall auf Basis von Sekundärzinn	5.000

Quellen: BGR 2014, BGR 2014 a, BGR 2015 und eigene Abschätzungen

5.6.3 Verwertungswege

In Deutschland wurden im Jahr 2013 rund 5.100 t Sekundärzinn aus inländischen Abfällen produziert Ein Recycling aktuell produzierter Zinnmetalle bzw. des Zinns aus dem in der Elektrotechnik verwendeten Lot bzw. Weißblech findet in Deutschland nur in untergeordneter Größenordnung statt.

Für die Bilanzierung der Zinnverwertung fasst die nachfolgende Tabelle die Zahlen und Ansätze zusammen.

Tabelle 5-66: Sekundärzinnerzeugung in Deutschland aus inländischen Zinnschrotten, 2013

Herkunft	Input Sekundärzinn [t]	Erzeugtes Sekundärzinn [t]	Produkt aus Sekundärzinn	Substitutions-äquivalent
Altschrotte und Neuschrotte mit nicht genau definierter Zusammensetzung	5.300	5.140	Sekundäres Hüttenzinn für Halbzeug und Legierungen	Primäres Hüttenzinn

Zusätzlich zu den in Deutschland verwerteten Zinnschrotten ist davon auszugehen, dass im europäischen Ausland, insbesondere in Polen und in Belgien, Zinn recycelt wird.

5.6.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärzinnproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Sekundärzinnproduktion wurden die Aufwendungen in einer Schmelze abgeschätzt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-67: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Zinn, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Zinn, primär	1.184	6.040
Hüttenzinn für Halbzeug und Legierungen, sekundär	0,034	0,17
	DIERec	6.040

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-68: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Zinn, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Zinn, primär	1	5,1
Hüttenzinn für Halbzeug und Legierungen, sekundär	0,034	0,17
	DERec	4,93

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-69: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Zinn, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Zinn, primär	318	291	1.622	1.486
Hüttenzinn für Halbzeug und Legierungen, sekundär	1,30	1,29	6,6	6,6

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
KEA-Saldo			1.615	1.479

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-70: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Zinn, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Zinn, primär	0	0	0	0
Hüttenzinn für Halbzeug und Legierungen, sekundär	1,30	1,29	6,6	6,6
KEA-Saldo			-6,6	-6,6

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.6.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.6.5.1 Verwertungsmengen

Die abgeschätzten Verwertungsmengen weisen von 2007 bis 2015 in den Jahren 2008 und 2013 zwei deutliche Ausschläge auf. Die Statistik ist aber laut Aussage des Statistischen Bundesamtes korrekt. Der Ausschlag 2008 lässt sich noch über den Anstieg des Zinnpreises erklären, aber für 2013 ist der Kurs nicht gestiegen, sondern zur Mitte des Jahres eingebrochen.

Tabelle 5-71: Abschätzung der Sekundärzinnproduktion 2007 – 2015

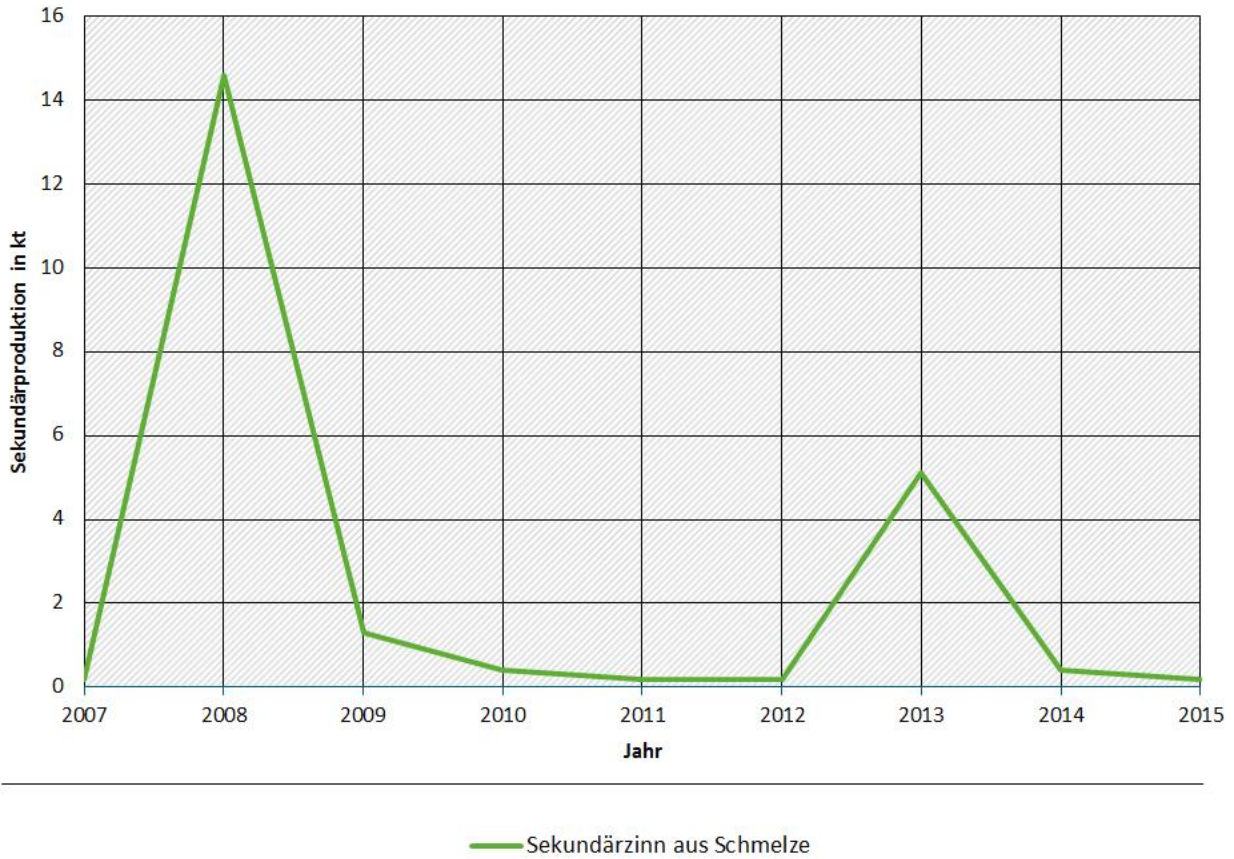
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundärzinn aus Schmelze	0,2	14,6	1,3	0,4	0,2	0,2	5,1	0,4	0,2

Quelle: eigene Annahmen und DESTATIS 2009-2017

Abbildung 5-27: Zeitlicher Verlauf der Sekundärzinnproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Zinn

Zeitliche Verlaufdarstellung 2007-2015



5.6.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-72: Indikatoren für Zinn 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	237	17.290	1.539	474	237	237	6.040	474	237
DERec	kt	0,19	14,11	1,26	0,39	0,19	0,19	4,93	0,39	0,19
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	63	4.624	412	127	63	63	1.615	127	63
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	0	-19	-2	-1	0	0	-7	-1	0

5.7 Silber

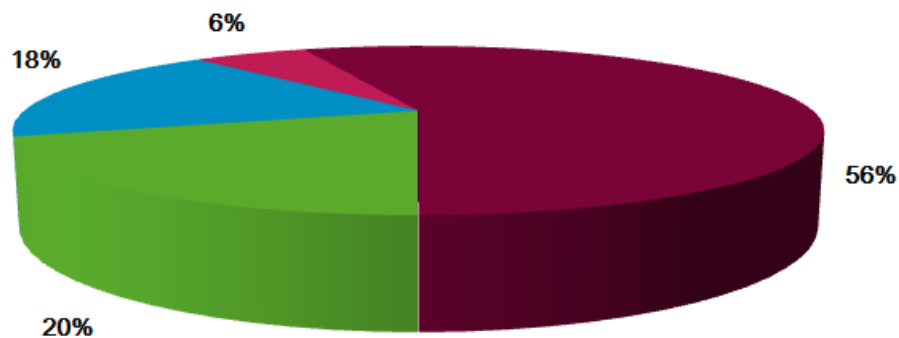
Silber ist ein weiches, silberglänzendes Edelmetall. Es ist an Luft und Wasser beständig und auch resistent gegenüber nicht oxidierenden Säuren und Alkalilaugen. Oxidierende Säuren zersetzen es jedoch. Silber ist sehr duktil und hat die beste elektrische und thermische Leitfähigkeit aller Metalle. Es ist eines der am längsten genutzten Metalle des Menschen und wurde traditionell als Schmuck- und Münzmetall eingesetzt (MaRes 2011).

5.7.1 Materialeinsatz in Deutschland

Silber hat verschiedene Einsatzgebiete (siehe Abbildung 1). Neben den klassischen Anwendungen als Schmuck (20 %), als Münz-/Barrenmaterial (18 %) und in Form von Silberwaren (6%) wird es vor allem in der Industrie eingesetzt. Hier teilt es sich auf die Gebiete Elektrik/Elektronik (25 %), Legierungen und Lote (6 %), Photovoltaik (6%), Fotografie (4 %) und andere Anwendungen (15 %), z.B. Katalysatoren, auf (Silver Institute 2015).

Abbildung 5-28: Internationaler Silberverbrauch in 2014

Silbereinsatz in Deutschland



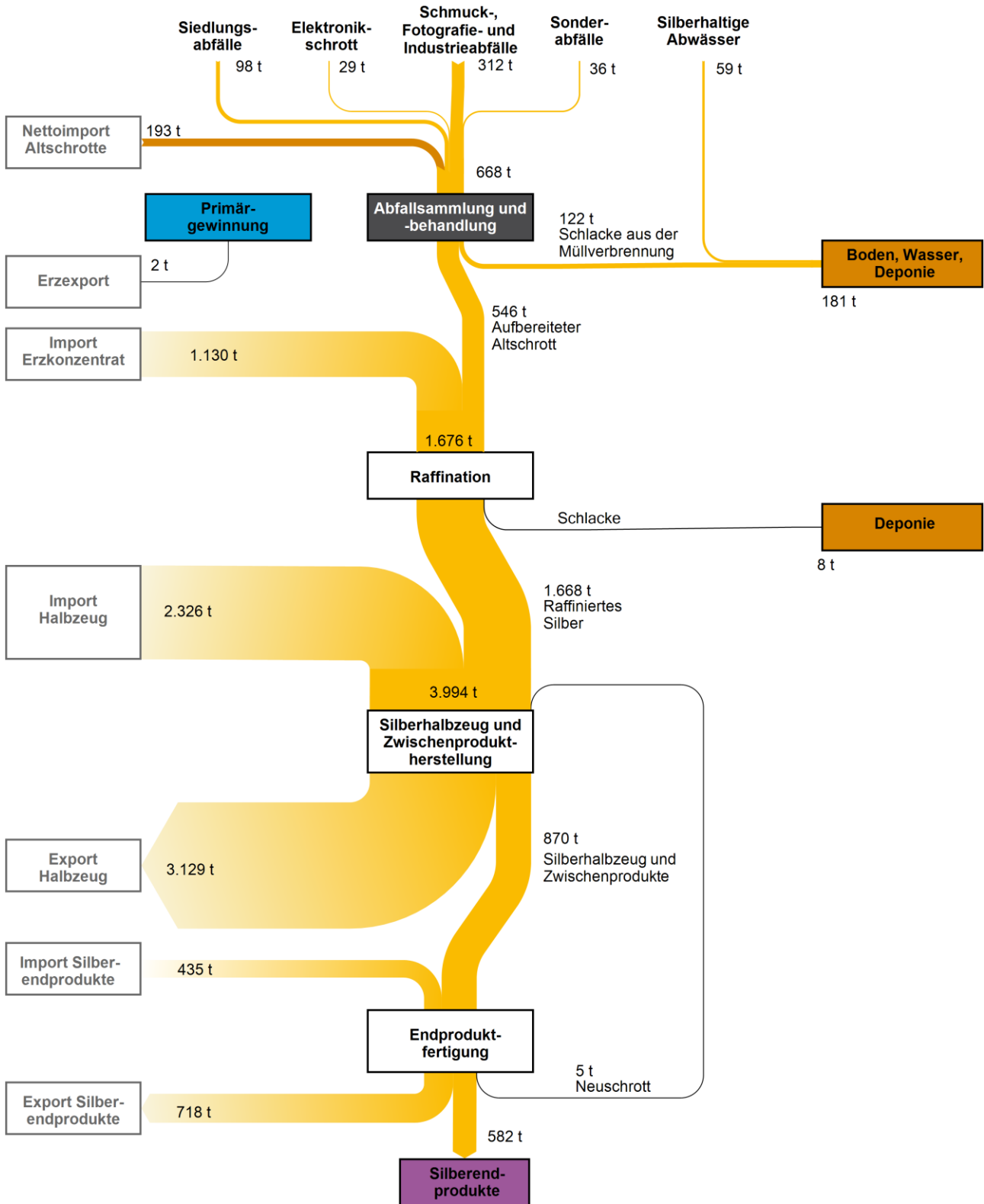
■ Schmuck ■ Münzen und Barren ■ Silberwaren ■ Industrielle Anwendungen

Quelle: Silver Institute 2015

5.7.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Die Stoffstrombilanz für Silber in Deutschland wurde in Anlehnung an die österreichische Stoffstrombilanz von (Gsodam 2014) abgeschätzt. Wo es möglich war, wurden Daten für das Jahr 2013 genutzt. In Abbildung 3 ist der Silberstoffstrom Deutschlands gezeigt.

Abbildung 5-29: Silberstoffströme in Deutschland 2013



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (Gsdam 2014)

Primärgewinnung

2 t Silber in Form von Erzen werden in der Grube Clara in Baden-Württemberg, Deutschlands letzter noch betriebener Lagerstätte, welche Silber im Erz beinhaltet, abgebaut und direkt exportiert (Sachtleben 2016).

Abfallsammlung und -behandlung

Der Abfallsammlung und -behandlung fließen 668 t Silber aus folgenden Abfallströmen zu: 98 t in Siedlungsabfällen (DESTATIS 2015) (Lanzano 2006), 29 t im Elektronikschrott (BMUB 2014) (Gsodam 2014), 36 t in Sonderabfällen (Batterien und Amalgam) (UBA 2012) (Recknagel 2007) (DESTATIS 2016a) (Gsodam 2014) und 312 t in Form von Industrieabfällen, zu denen Silber in Form von Katalysatoren, aber auch - mangels disaggregierter Daten - Schmuck oder Fotografieabfälle zählen (Silver Institute 2017). Hinzu kommen ebenfalls die Nettoimporte an Altschrotten (Gsodam 2014) (Eurostat 2016) (DESTATIS 2016a). Ein Verlust entsteht durch den Weg der Müllverbrennung (Schlacken), die zu Verlusten von 122 t führen (Gsodam 2014) (DESTATIS 2016b). Das übrige Silber wird wiedergewonnen und in den Strom des raffinierten Silbers eingespeist.

Zudem dissipieren etwa 59 t Silber (Daxbeck 2000) (DESTATIS 2016b) im Abwasser.

Raffination

Aurubis und Berzelius sind die beiden größten Primärsilberproduzenten Deutschlands, die Silber aus importierten Erzen extrahieren. Während Aurubis bei der Kupferproduktion 830 t (BGR 2014) (Aurubis 2016c) Primärsilber als Nebenprodukt gewinnt, fallen bei Berzelius 300 t Primärsilber (BGR 2014) bei der Bleiherstellung an. Zusammen mit dem Rückfluss von recyceltem Silber aus Altschrotten (546 t) (Silver Institute 2017) und dem Verlust von 8 t (Gsodam 2014) Silber in Form von Schlacken ergibt sich eine Gesamtmenge von 1.668 t raffiniertem Silber, welches in die Halbzeug- und Zwischenproduktherstellung geht.

Halbzeug- und Zwischenproduktherstellung

In den Pool der Halbzeuge und Zwischenprodukte gehen neben dem Fluss aus der Raffination auch Neuschrotte aus der Produktfertigung (5 t) (Silver Institute 2017) (Gsodam 2014) und Importe von 2326 t (DESTATIS 2016a). Ausgeführt werden 3129 t Halbzeuge und Zwischenprodukte (DESTATIS 2016a), wodurch eine Gesamtmenge von 870 t Silber in Form von Halbzeugen und Zwischenprodukten in die Endproduktfertigung geht.

Endproduktfertigung

In Endproduktfertigung werden die Produkte hergestellt, die in die Nutzungsphase übergehen. Neben dem Zufluss aus der Halbzeug- und Zwischenproduktherstellung entsteht ein Verlust von 5 t in Form von Neuschrott (Silver Institute 2017) (Gsodam 2014) aus der Produktion. 718 t (DESTATIS 2016a) Silber werden in Form von Produkten ex- und 435 t (DESTATIS 2016a) importiert. Hieraus gelangen 716 t Silber in Form von Produkten in die Nutzungsphase.

Für im Sankey-Diagramm gezeigte, aber nicht im Text erwähnten Ströme, finden sich weitere Informationen in folgender Tabelle. Dort sind zudem die Berechnungsgrundlagen und die Quellen aller Ströme näher erläutert.

Tabelle 5-73: Stoffströme und Berechnungsgrundlagen für das Sankeydiagramm zu Silber

Silberstrom	Silbermenge [t]	Quelle / Kommentar
Erz produziert	2	BGR 2014 (110 t Erz); Sachtleben 2016 (2 % Silbergehalt)
Erz exportiert	2	Sachtleben 2016 (Direktexport)

Silberstrom	Silbermenge [t]	Quelle / Kommentar
Erz importiert	1.130	BGR 2014 (300 t Berzelius); Aurubis 2016c (830 t Aurubis)
Schlacken in Deponie	8	Gsodam 2014 auf Deutschland skaliert (Faktor 10)
Raffiniertes Silber	1.668	Ergebnis der Bilanz
Halbzeuge und Zwischenprodukte importiert	2.326	DESTATIS 2016a (WA71061000, WA71069100, WA71069200, WA28432100 (63,5 % Silberinhalt), WA28432900 (57,4 % Silberinhalt))
Halbzeuge und Zwischenprodukte exportiert	3.129	
Silber in Halbzeug und Zwischenprodukten	870	Ergebnis der Bilanz
Endprodukte importiert	435	DESTATIS 2016a (WA71070000, WA71131100, WA71141100, WA85064000 (31 % Silberinhalt aus Recknagel 2007); Im- und Export Elektronikgeräte aus Gsodam 2014 auf Deutschland skaliert (Faktor 10)
Endprodukte exportiert	718	
Neuschrott	5	Silver Institute 2017 (18 t Silbermünzen); Gsodam 2014 (25 % Neuschrott aus Münzprägung)
Silber in Endprodukten	582	Ergebnis der Bilanz
Abwasser	59	Daxbeck 2000 (0,00073 kg Silber/Einwohner); DESTATIS 2016b (80767500 Einwohner)
Siedlungsabfälle	98	Lanzano 2006 (7,5 g Silber/t Abfall); DESTATIS 2015a (13.118.200 t Siedlungsabfälle)
Elektronikschrott	29	BMUB 2013 (286.010 t Unterhaltungselektronik-/IT-/TK-Schrott); Gsodam 2014 100 g Silber/t relevanter Elektronikschrott)
Industrieabfälle	312	Ergebnis aus der Bilanz aller Ströme, welche in und aus der Abfallsammlung und -behandlung fließen
Sonderabfälle	36	DESTATIS 2015a (75 t Amalgam); Gsodam 2015 (35 % Silbergehalt); UBA 2012 (30 t AgO-Batterien 2010); Recknagel 2007 (31 % Silbergehalt)
Altschrott importiert	593	Korreliert über das Verhältnis der Silberschrottimport- und -exporte in Eurostat 2016 und Gsodam 2014 für Deutschland und Österreich (Silbergehalt 1 %); Im-/Export 2013 aus DESTATIS 2016a (WA71129900)
Altschrott exportiert	400	
Nettoimport Altschrott	193	Differenz Im- und Export
Schrott in Verbrennung und Schlacken	122	Gsodam 2014 (0,0015 kg Silber/Einwohner); DESTATIS 2016b (80767500 Einwohner)
Aufbereiteter Altschrott (incl. 10 t Deponie)	546	Silver Institute 2017; Gsodam 2014
Schlacke in Deponie	8	Gsodam 2014 auf Deutschland skaliert (Faktor 10)

Silber kann, ebenso wie Gold und Kupfer, ohne Qualitätsverlust und unbegrenzt wiederholbar recycelt werden (Aurubis 2016a). Da Silber in verschiedenen Formen Anwendung findet, muss es auch über verschiedene Recyclingwege wiedergewonnen werden. Grundsätzlich gibt es für Silber drei Formen des Recyclings: Direktes Einschmelzen, Raffination über das Kupferrecycling, Elektrolyse.

Silber aus Schmuck, Barren, Silberwaren und Münzen liegt, wenn unlegiert, ohne Verunreinigungen vor und kann unter reduzierenden Bedingungen direkt wieder eingeschmolzen und so dem Herstellungsprozess wieder zugeführt werden. Gleiches gilt für die groben Produktionsabfälle dieser Produkte, z.B. Stanzreste bei der Münzprägung oder abgesägte Silberstücke bei der Schmuckherstellung. Bei legiertem Material erfolgt ein Auflösen und Elektrolysieren des Materials (Seuferling 1970). Dieser Recyclingweg findet klassischerweise in Scheideanstalten statt und wird heute noch wie in (Seuferling 1970) dargestellt ausgeführt.

Elektroschrott, vor allem in Form von Leiterplatten, aber auch Produkten die hochsilberhaltige Lote enthalten, werden über die Route des Kupfers recycelt. Zwei große Recyclingunternehmen, die deutschen Elektroschrott auf diesem Weg verarbeiten, sind Umicore und Aurubis (siehe Abbildung 5-16 im Kapitel zu Kupfer). Die Edelmetalle, zu denen auch Silber gehört, folgen bei diesem Verfahren der Kupferfraktion bis zum Gießen der Anoden. Bei der anschließend stattfindenden Elektrolyse fallen die Edelmetalle als Anodenschlamm an und werden über eine Kupellation weiter aufkonzentriert. Es folgt eine Edelmetallscheidung, die meist auf Lösen der Metalle und anschließender Elektrolyse basiert.

Silber in Abfällen der Fotoindustrie, z.B. Fixierbäder, Filme oder Röntgenbilder wird bei größeren Mengen über eine Elektrolyse wiedergewonnen und eingeschmolzen. Der größte Recycler für deutsche Abfälle dieser Art ist REMONDIS. Bei kleinen Mengen, die direkt vor Ort im Kreislauf geführt werden sollen, z.B. in kleinen Fotolabors, kann das Silber aus den Fotobädern direkt gefällt und weiterverarbeitet werden. Die erwähnten Verfahren werden in (Seuferling 1970) dargestellt und ihre chemischen und physikalischen Grundlagen erläutert.

Sammlung von Altprodukten und ihr Recycling:

Elektrogeräte enthalten Silber, welches über oben beschriebene Verfahren zurückgewonnen wird. In (Gso-dam 2014) werden 100 g Silber pro Tonne Unterhaltungselektronik angegeben, dieser Wert wird auf IT- und Telekommunikationsgeräte übertragen. Der Silbergehalt der übrigen Elektroaltgeräte, vor allem Haushaltsgroßgeräte welche den größten Massenanteil stellen, ist vernachlässigbar. Es resultiert eine Silbermenge von 29 t, die wiedergewonnen werden kann.

Tabelle 5-74: Berechnung der Silbermenge in Elektroschrott

	Elektrogeräte	Quelle / Kommentar
In Verkehr gebracht 2013	1.609.232 t	BMUB 2013
Gesammelt 2013	727.998 t	BMUB 2013
Davon Unterhaltungselektronik, IT- und Telekommunikations- geräte	286.010 t	BMUB 2013
Silbergehalt in g pro t	100 g	Gsodam 2014
Silbermenge in Elektroaltgeräten	29 t	Berechnet

Siedlungsabfälle zur energetischen Verwertung (Müllheizkraftwerk) enthalten ebenfalls 7,5 g Silber pro Tonne (Lanzano 2006). Die Gesamtmenge an Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen in Deutschland 2013 beträgt 13.118.200 t (DESTATIS 2015a). Dies ergibt eine Summe von 98 t Silber, die nicht wiedergewonnen werden und in der Schlacke der Müllheizkraftwerke für den Recyclingkreislauf verloren gehen.

Sonderabfälle enthalten als Silberträger Amalgam und Batterien. Die Abfallstatistik (DESTATIS 2015a) gibt eine Menge von 100 t an. Da diese Zahl gerundet ist und keine genaueren Angaben erhältlich sind, werden 75 t als Wert angenommen, da die Zahl in neueren Statistiken wohl unter 50 t gefallen ist und somit als 0 t ausgewiesen wird. Laut (Gsodam 2014) beinhalten Amalgamabfälle 35 % Silber, was einer Gesamtsilbermenge von 26 t entspricht. Im Jahr 2010 wurden laut Statistik (UBA 2012) 30 t AgO-Batterien in Umlauf gebracht. Der Ag-Gehalt beträgt laut Recknagel 2007 31 %, was einer Gesamtsilbermenge von 9 t entspricht. In Summe können aus den Sonderabfällen 36 t Silber extrahiert werden.

Industrieabfälle sind die letzte und größte Gruppe an Abfällen. Hier gibt es nur einzelne Ströme die abgebildet werden können. Der Gesamtstoffstrom kann allerdings über die Bilanz berechnet werden, da alle anderen ein und ausgehenden Ströme bekannt sind. Er beträgt 312 t. Die gesamten Silberabfälle verteilen sich auf europäischer Ebene wie folgt auf die einzelnen Gruppen auf: 28 % Silberwaren, 25 % Fotografie, 24 % Industrie, 12 % Münzen und 11 % Schmuck (Metal Focus 2015). Es sind zwar Zahlen für Industriekatalysatoren erhältlich, allerdings sind die Schmuck und Fotografieabfälle, die Abfälle der Industrieproduktionen (z.B. PV-Zellen oder Elektronikprodukte), Silber in Altautos oder die Menge der entsorgten Silberwaren nicht bekannt, weshalb hier keine weitere Differenzierung stattfindet.

5.7.3 Verwertungswege

Bei der Bilanzierung der Verwertungswege und der Substitutionsäquivalente wird bei Silber zwischen zwei Qualitäten unterschieden:

- ▶ Silberabfälle in Form von Schmuck, Münzen, Barren oder Silberwaren können über den einfachen Weg des Umschmelzens in Scheideanstalten recycelt werden, da sie in großen Stücken vorliegen.
- ▶ Silberabfälle in Elektro-/Elektronikschrott, aus der Photovoltaik, der Fotografie und andere Anwendungen z.B. als Katalysatoren liegen fein verteilt vor und müssen zur Verwertung angereichert und raffiniert werden. Dies geschieht über die beschriebenen Prozesse bei Recyclern wie Aurubis, Umico oder REMONDIS. Es wird angenommen, dass die Nettoimporte auch über diese Route verwertet werden.

Zur Berechnung der Anteile dieser zwei Verwertungswege für die inländischen Abfälle werden die europäischen Daten zu Silberabfällen aus (Metal Focus 2015) genutzt. Die Silberabfälle, die in Scheideanstalten recycelt werden, setzen sich aus den Sektoren Silberwaren (28 %), Münzen (12 %) und Schmuck (11 %) zusammen, was in Summe 51 % ergibt. Die fein verteilten Silberabfälle setzen sich aus den Sektoren Fotografie (25 %) und Industrie (24 %) zusammen, was in Summe 49 % ergibt. Zusätzlich wird angenommen, dass die Nettoimporte über Raffinerien recycelt werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die mit den beschriebenen Annahmen errechneten Anteile aus der Verwertung der zwei beschriebenen Qualitäten.

Tabelle 5-75: Deutsche Sekundärsilberproduktion aus inländischen Abfällen und Nettoabfallimporten und deren Substitutionsäquivalente (Abschätzung)

Herkunft	Erzeugtes Sekundärsilber [t]	Produkt aus Sekundärsilber	Substitutionsäquivalent
Stückige und relativ reine Abfälle aus Silberwaren, Münzen und Schmuck	169	Sekundärsilber aus Scheideanstalten	Primäres metallisches Silber
Heterogene silberhaltige Abfälle aus Fotografie und Industrie	176	Sekundärsilber aus der Raffination	Primäres metallisches Silber
Nettoimporte Altschrotte	193	Sekundärsilber aus der Raf-	Primäres metallisches

		Refinanzierung	Silber (inkl. aller Vorketten)
Summe	538		

5.7.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärsilberproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Sekundärsilberproduktion wurde der in Ecoinvent vorhandene Raffinationsprozess verwendet, der auf Daten aus Schweden basiert. Für die Sekundärsilberproduktion aus Scheideanstalten wurden die Aufwendungen in einer Schmelze abgeschätzt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-76: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Silber, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Silber, primär	6.651	3.579
Silber aus der Raffination, sekundär	29,3	10,8
Silber aus Scheideanstalten, sekundär	0,1	0,18
DIERec		3.568

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-77: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Silber, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Silber, primär	1	0
Silber aus der Raffination, sekundär	29,3	10,8
Silber aus Scheideanstalten, sekundär	0,1	0,18
DERec		-11,0

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-78: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Silber, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Silber, primär	5.913	5.229	3.182	2.813
Silber aus der Raffination, sekundär	128	121	47	45
Silber aus Scheideanstalten, sekundär	3,98	3,96	0,67	0,67
KEA-Saldo			3.134	2.767

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-79: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Silber, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Silber, primär	0	0	0	0
Silber aus der Raffination, sekundär	128	121	47,1	44,5
Silber aus Scheideanstalten, sekundär	3,98	3,96	0,67	0,67
		KEA-Saldo	47,8	-45,2

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.7.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.7.5.1 Verwertungsmengen

Die abgeschätzten Verwertungsmengen weisen von 2007 bis 2015 leichte Schwankungen auf. Die Wirtschaftskrise sorgte für geringere Verwertungsmengen in 2009. Die Ausschlag 2012 kann mit der Entwicklung des Silberpreises erklärt werden. Insgesamt ist aber zu sehen, dass die vorhandenen Recyclingkapazitäten durch Importe ausgelastet werden, wenn der heimische Markt nicht genug Abfälle zum Recycling aufweist und die Importe sinken, wenn am heimischen Markt ein Überangebot besteht.

Tabelle 5-80: Abschätzung der Sekundärsilberproduktion 2007 – 2015

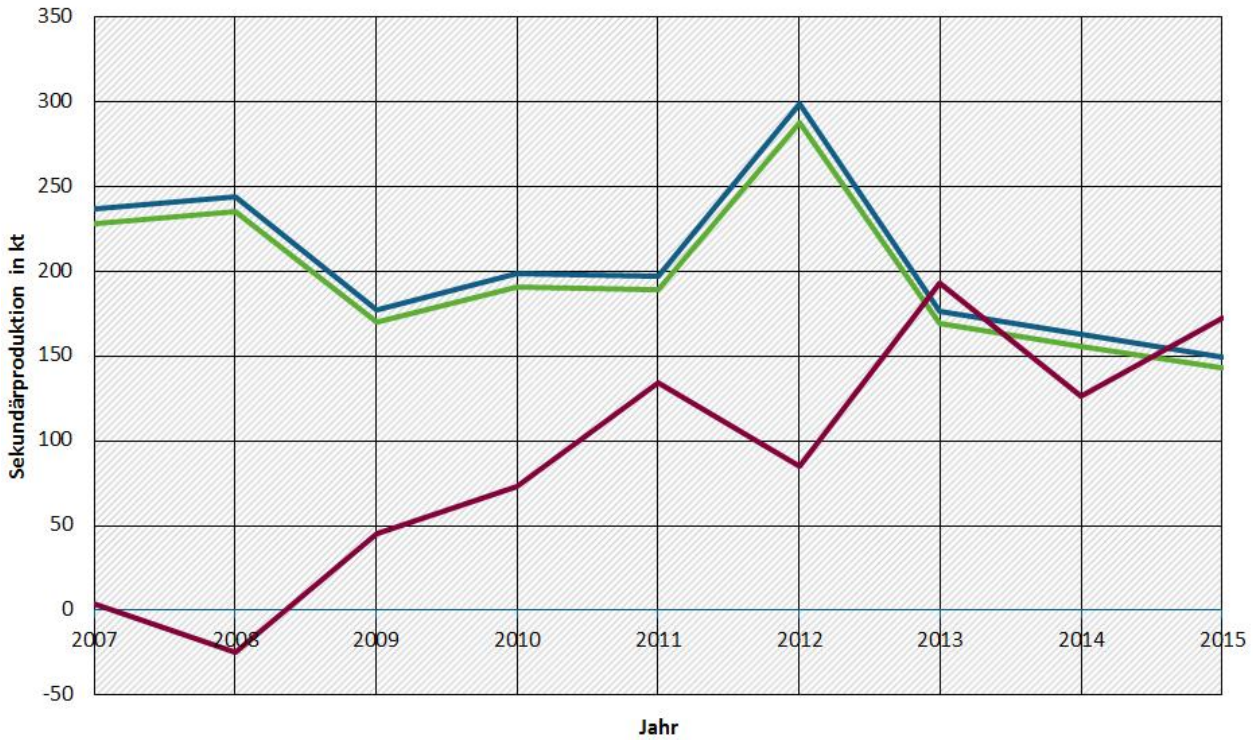
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundärsilber aus Scheideanstalten	228	235	170	191	189	288	169	156	143
Sekundärsilber aus der Raffination	237	244	177	199	197	299	176	163	149
Sekundärsilber aus der Raffination aus Importen	4	-25	45	73	134	85	193	126	172
Gesamt	470	454	392	463	519	672	538	445	463

Quelle: eigene Berechnungen, Silver Institute 2017, DESTATIS 2009-2017, BMUB 2008-2015, BGR 2008-2016

Abbildung 5-30: Zeitlicher Verlauf der Sekundärsilberproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kt

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Silber

Zeitliche Verlaufdarstellung 2007-2015



— Sekundärsilber aus Scheideanstalten — Sekundärsilber aus der Raffination
— Sekundärsilber aus der Raffination aus Importen

5.7.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-81: Indikatoren für Silber 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	3.116	3.014	2.600	3.074	3.445	4.457	3.568	2.950	3.073
DERec	kt	-7,10	-6,45	-6,52	-8,00	-9,71	-11,3	-10,8	-8,47	-9,41
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	2.745	2.656	2.288	2.705	3.029	3.922	3.134	2.593	2.699
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	-32	-29	-29	-36	-43	-50	-48	-37	-42

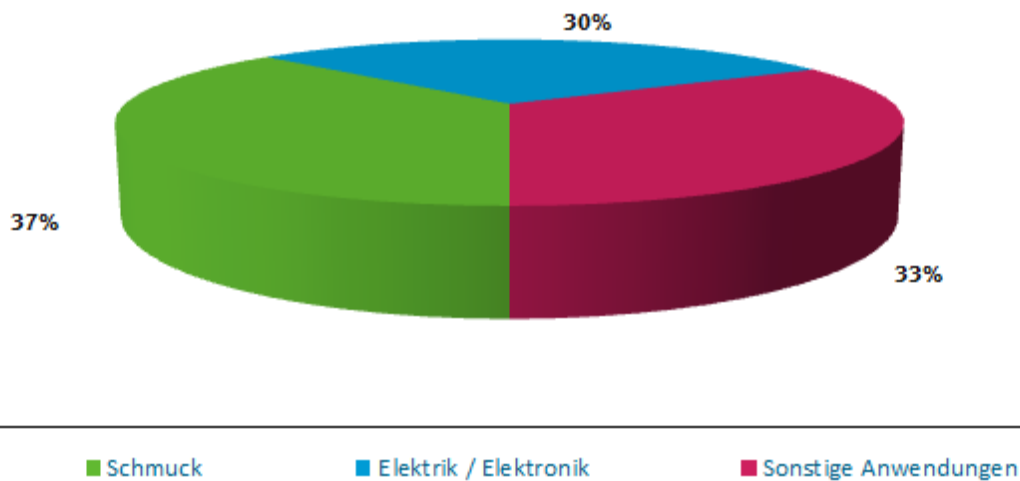
5.8 Gold

Gold ist ein Edelmetall. Es ist chemisch resistent gegenüber Säuren und Laugen und zudem beständig gegenüber Luft, Wasser, Sauerstoff und Schwefel. Darüber hinaus hat Gold eine hohe elektrische Leitfähigkeit und eine große Dehnbarkeit (MaRess 2011). Traditionell wird Gold als Schmuck und Anlagenmünzen verwendet. Aufgrund der oben genannten physikalischen und chemischen Eigenschaften wird Gold auch verstärkt in der Elektronik eingesetzt.

5.8.1 Materialeinsatz in Deutschland

Im Jahr 2013 wurden nach BGR 2014 knapp 40 t²⁶ Gold in Deutschland weiterverarbeitet (=inländische Nachfrage). Wie in der folgenden Abbildung dargestellt wurden 37% in der Schmuckwarenindustrie eingesetzt, 30% in Elektrik / Elektronik. Die restlichen 33% entfielen auf sonstige Anwendungen (Dental, Investment, industrielle und dekorative Anwendungen) (BGR 2014).

Abbildung 5-31: Verarbeitete Goldmenge in Deutschland, 2013



Quelle: BGR 2014

Die gesamte verarbeitete Goldmenge (primär und sekundär) betrug nach BGR 2014 im Jahr 2013 ca. 40 t. Abzüglich der Verluste gingen in die Produkte 2013 ca. 38 – 39,2 t Gold ein.

Neben der Verwendung in industriellen Gütern und dekorativen Anwendungen hat der Rohstoff eine besondere Bedeutung als Wertanlage in Form von Barren oder Münzen. Gold wird von vielen Zentralbanken der Welt als Währungsreserve eingelagert. Im Oktober 2015 veröffentlichte die Deutsche Bundesbank, dass rund 3.400 Tonnen Gold im Besitz der Bundesbank sind²⁷ (Deutsche Bundesbank 2015). Das ist das 85-fache der 2013 in Deutschland verarbeiteten Goldmenge. Rund die doppelte Menge von schätzungsweise 7.500 Tonnen Gold befand sich in 2010 im Besitz von Privatpersonen in Deutschland (Kleine Krautbauer 2010).

²⁶ GFMS 2015 gibt eine ähnliche Größenordnung der Goldproduktion in Deutschland an mit 37 t.

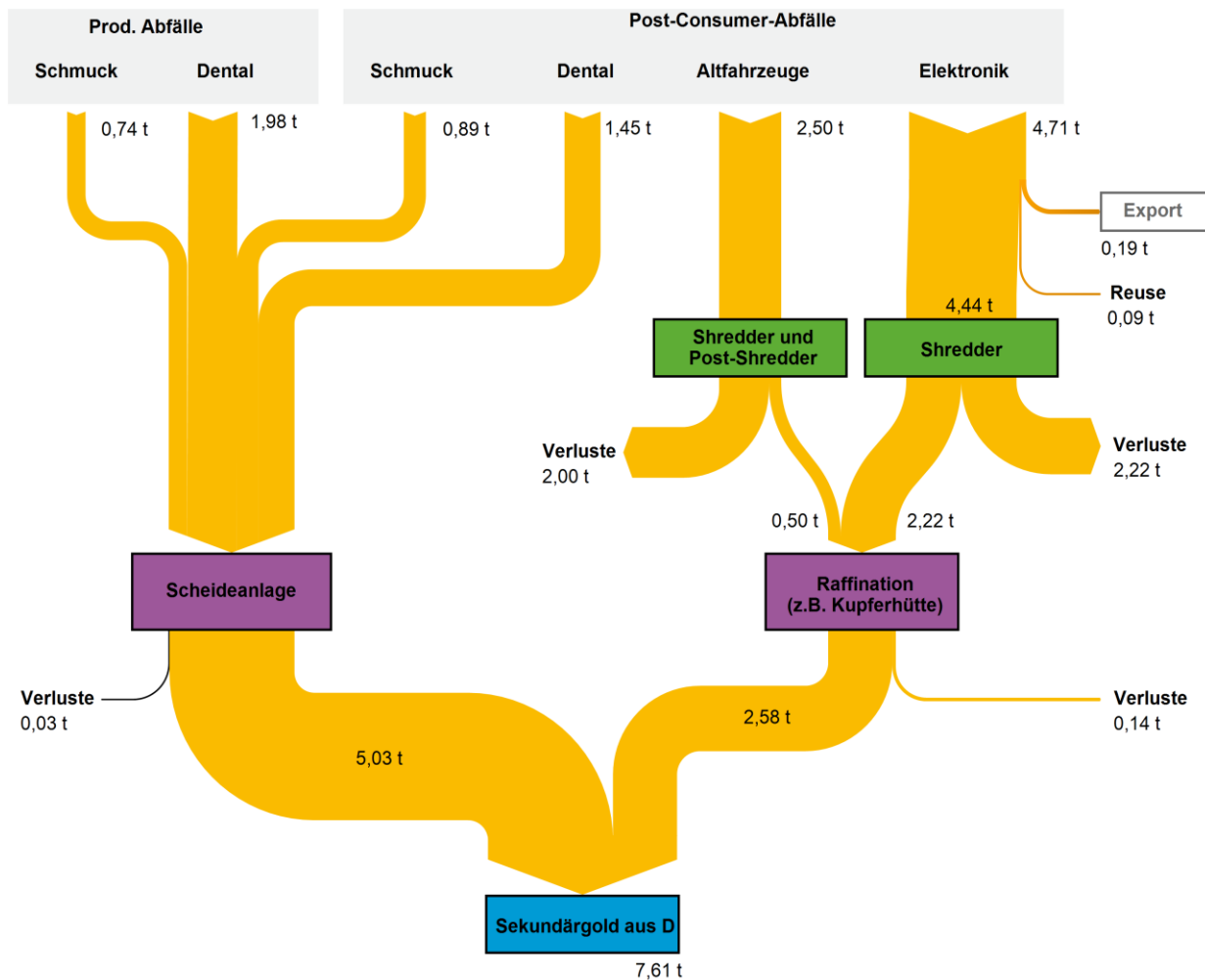
²⁷ Ende 2014 lagerten 35% der deutschen Goldreserven in Frankfurt am Main, 43% in New York, 13% in London, 9% in Paris (Deutsche Bundesbank 2015)

Die große Bedeutung des Finanzsektors für die globalen Goldströme zeigt auch die internationale Goldnachfragestatistik des World Gold Council (WGC 2016). So stammten in 2015 35 % der globalen Goldnachfrage aus dem Investmentsektor und nur 8 % aus dem Technologiesektor. Der Hauptanteil von 57 % entfiel auf den Schmucksektor.

5.8.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Einen Überblick über die Sekundärstoffströme gibt das nachfolgende Sankey-Diagramm:

Abbildung 5-32: Stoffströme der Verwertung der in Deutschland angefallenen Goldabfälle, 2013



Quelle: eigene Abschätzung; die detaillierte ELV-Angaben sind im Kapitel Platin dargestellt

Das Sankey-Diagramm enthält die abgeschätzten Sekundärgoldmengen aus der Verarbeitung von in Deutschland anfallenden Goldabfällen. Insgesamt wurde eine Menge von 7,6 t abgeschätzt. Die BGR (2014) weist hingegen für das Jahr 2013 eine deutlich größere Sekundärgoldmenge von 31 t aus. Diese Sekundärgoldmenge bezieht sich jedoch auf die Summe von Sekundärgold aus inländischen und importierten Quellen, so dass von relevanten Importen auszugehen ist. Detaillierte Daten zu den Nettoimporten und zur Goldproduktion von Agosi und Aurubis aus ausländischen Quellen liegen nicht vor²⁸.

²⁸ Die Daten zu den deutschen Import- und Exportströmen nach BGR 2014 weisen nicht den Goldgehalt von importierten Abfällen und importiertem Goldpulver aus. Denkbar ist auch, dass andere Quellen die Aurubis-Gold-Produktion aus

Im Folgenden werden die Annahmen zur quantitativen Abschätzung der Verwertungswege dargestellt.

- ▶ Im Schmuckbereich werden Post-Consumer-Abfälle und Produktionsabfälle gesammelt und über Goldschmiede oder Scheideanstalten recycelt. Analog zu den Platinstoffströmen in der Schmuckbranche wird angenommen, dass 6 % der verarbeiteten Goldmenge jährlich als Post-Consumer-Abfall anfallen. Die Produktionsabfälle werden nach (UBA 2012) und Expertenschätzungen auf 5 % geschätzt²⁹. Werden Inputgrößen, Verluste im Recyclingprozess sowie im Verarbeitungsprozess betrachtet (siehe auch Tabelle unten), liegt der Einsatz von Sekundärgold im Schmuckbereich bei ca. 1,6 t. Diese Größenordnung entspricht den Angaben der GFMS und Agosi. Nach GFMS 2015 wurden 3,1 t Goldschmuck durch Einsatz von Altgold (Post-Consumer-Abfälle) und Produktionsabfällen in Deutschland 2013 produziert. Bei Agosi stammen 45 % der edelmetallhaltigen Sekundärmaterialien aus Deutschland (Beuchle, 2016). Wird dieser Ansatz übernommen, liegt der Schmuck, der 2013 in Deutschland aus inländischem Sekundärmaterial produziert wurde, bei 1,4 t.

Tabelle 5-82: Abschätzung der Goldstoffströme in der deutschen Schmuckindustrie, 2013

	Goldmenge [t]	Quelle / Kommentar
Eingesetzt 2013	14,8	BGR 2014
Anfall Produktionsabfälle 2013	0,74	5 % (UBA 2012)
Anfall Post-Consumer Abfälle	0,89	6 %
Input Recycling gesamt	1,63	
Verluste Scheideanstalt	0,01	0,5 %
Sekundärgold aus Scheideanstalt	1,6	

- ▶ Der Anwendungsbereich „Dental, industrielle und dekorative Anwendungen“ verarbeitete 2013 ca. 13 t Gold. Wenn ebenso wie beim Platineinsatz im Dentalbereich auch für diesen Goldanwendungsbereich davon ausgegangen wird, dass der Post-Consumer-Abfall bei 11 % liegt und die Produktionsabfälle bei 15 % liegen, ergeben sich zu verwertende Goldmengen von 1,5 t aus dem Post-Consumer-Bereich und 2,0 t aus dem Produktionsbereich.
- ▶ Der Goldgehalt in Elektro- und Elektronik-Altgeräten wird mit Hilfe der BMUB-Veröffentlichung zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland (BMUB(a) 2014) abgeschätzt. (BMUB(a) 2014) gibt die Menge an gesammelten WEEE in Deutschland für das Jahr 2013 mit 727.998 t an. Davon wurden 694.976 t WEEE in Deutschland weiterbehandelt (>95 %). Die restlichen 4 % werden exportiert. 13.993 t WEEE werden aufbereitet und wiederverwendet (Reuse), ohne den Recyclingpfad zu durchlaufen. Es verbleiben 686.940 t WEEE, die in Deutschland gesammelt und dem Recycling zugeführt werden. Wrap 2012 untersuchte für Großbritannien den durchschnittlichen Goldgehalt in WEEE und beziffert diesen mit 6,45 Gramm Gold je Tonne WEEE. Da die anfallenden Elektro- und

goldhaltigen Kupfererzen als Sekundärgold ansehen. Aus Sicht der Autoren wäre diese Goldproduktion jedoch als Primärproduktion einzustufen.

²⁹ UBA (2012) beziffert die Verluste bei der Schmuckherstellung auf ca. 2-5 %. Dieser Verlust ist nach Expertenschätzung nicht weiter zu minimieren (UBA 2012) und wird daher auch für den Stoffstrom 2013 konservativ mit 5 % angenommen.

Elektronik-Altgeräten in UK mit denen in Deutschland vergleichbar sind, kann der Wert näherungsweise für Deutschland übernommen werden. Daraus ergibt sich aus dem Recyclingprozess von deutschen WEEE ein Goldpotential von 4,4 t. Im Anschluss an die Sammlung werden die Elektro- und Elektronikgeräte in den Schredderprozess eingeführt. In diesen Elektronik-Schredderanlagen wird eine durchschnittliche Rückgewinnungsrate von 50 % angenommen³⁰. In der anschließenden Raffination liegt die Rückgewinnungsrate bei ca. 95 %. Aus WEEE kann somit für 2013 die Gewinnung von sekundärem Gold in Höhe von 2,1 t angenommen werden.

Tabelle 5-83: Abschätzung der Goldstoffströme im Elektronikschrottrecycling in Deutschland, 2013

	Goldmenge [t]	Quelle / Kommentar
WEEE gesammelt 2013	4,7	BMUB(a) 2014; Wrap 2012 (6,45 Gramm je t WEEE)
Davon behandelt in D	4,5	BMUB(a) 2014 (Rest wird exportiert)
Davon geht in den Re-Use	0,1	Geht nicht in den weiteren Recyclingkreislauf
Input Elektro-Recycling	4,4	
Verluste Schredderanlage	2,2	eigene Abschätzung (50 %)
Input Raffination	2,2	
Verluste Raffination	0,1	5 % Verluste
Sekundärgold aus WEEE	2,1	

- Der Goldgehalt in Altfahrzeugen wird wie folgt beschrieben hergeleitet. Im Kapitel zu Platin und Palladium ist die Herleitung der angefallenen Altfahrzeuge in Deutschland detailliert beschrieben (500.322 Stück Pkw und Lkw im 2013) (BMUB(b) 2014). In einem Pkw befinden sich (inkl. Leiterplatten, Stecker etc.) etwa 5 Gramm Gold³¹ (Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 2015). Der Goldgehalt je Lkw wird dem Pkw-Goldgehalt mit 5 Gramm gleichgesetzt, da eine annähernd gleiche Fahrzeugelektronik angenommen wird. Demnach sind in den in Deutschland anfallenden Altfahrzeugen (Pkw + Lkw) rund 2,5 t Gold enthalten. Im Anschluss an die Demontage von Katalysator, Batterien, Öl, Reifen werden die Altfahrzeuge in Altfahrzeug-Schredderanlagen behandelt. Über die Route Autoschredder und Postschredder wird die mittlere Rückgewinnungsrate auf 20% geschätzt. Somit werden rund 500 kg Gold aus Altfahrzeugen über die Schredderroute gewonnen. In der anschließenden Raffination in der Metallhütte liegt die Rückgewinnungsrate bei ca. 95%. Somit wurden im Jahr 2013 ca. 475 kg Gold aus Altfahrzeugen gewonnen.

³⁰ Die Abschätzung von 50 % gilt für durchschnittliche Anlagen. Nach Expertenaussage ist mit Best-Available-Technology eine Rückgewinnungsrate bis 98 % möglich.

³¹ Konservativ geschätzt; Nach Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 2015 sind 5-7 Gramm Gold in einem Volvo-Pkw enthalten.

Tabelle 5-84: Abschätzung der Goldstoffströme im Altfahrzeugrecycling in Deutschland, 2013

	Altfahrzeuge	Quelle / Kommentar
Eingesetzt 2013	500.322 Pkw	(BMUB(b) 2014
Goldgehalt in Altfahrzeugen 2013	2,5 t	Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz 2015
Verluste Schredderanlage	80 %	Expertenschätzung
Input Raffination	0,5 t	
Verluste Raffination	5 %	
Sekundärgold aus Altfahrzeugen	0,475 t	

Gold kann ohne Qualitätsverlust und unbegrenzt wiederholt recycelt werden (Aurubis 2016a). Nach BGR 2014 und GFMS 2015 stammen in Deutschland über 77 % des eingesetzten Goldes aus dem Recycling (31,1 t).

In Deutschland wird Gold auf zwei unterschiedlichen Recyclingwegen wiedergewonnen.

Zum einen wird Gold aus den Anwendungen Schmuck und Zahntechnik (Dentalgold) in der klassischen **Scheideanstalt** recycelt. In Scheideanlagen wie z.B. der Agosi (Allgemeine Gold und Silberscheideanstalt AG) werden Gold in unterschiedlichster Qualität sowie andere Edelmetalle eingesetzt, von Verunreinigungen befreit und umgeschmolzen. Es werden ausschließlich sekundäre Metalle eingesetzt. Gold aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten geht ebenfalls nach vorheriger Aufbereitung in Scheideanlagen ein. Nur leicht verunreinigte Abfälle wie Schmuck, Dentalgold, Barren, Münzen, Elektronikschrott und Produktionsabfälle mit guter Reinheit werden hier direkt recycelt. Bei Legierungen wird durch den Scheideprozess der Feingoldanteil aus den Legierungen gelöst (G123 2016). Für Scheideanlagen wird eine sehr hohe Rückgewinnungsquote (99,5 %) angenommen.

Im Rahmen dieser Studie wird vereinfachend davon ausgegangen, dass kein Elektroschrott aus Post-Consumer Elektronik und Altfahrzeugen direkt in die Scheideanlagen eingeht, sondern mittels spezieller Aufbereitungsverfahren wiedergewonnen wird. Fraktionen aus zerkleinerten Elektroaltgeräten werden dabei pyrometallurgischen Prozessen zugeführt und die Edelmetalle im Kupfer aufkonzentriert. Hauptproduzent ist dabei die Aurubis AG, die nahezu den gesamten deutschen Goldbedarf von rund 40 t über die Kupferhütte produziert (2012/2013: 39 t Gold; 2013/2014: 43 t Gold) (BGR 2014; BGR 2015). Eingesetzt werden bei Aurubis nicht nur Sekundärmaterialien, sondern auch Primärrohstoffe (Aurubis 2014). Es ist davon auszugehen, dass hohe Goldanteile aus kupferhaltigen Erzen stammen³².

5.8.3 Verwertungswege und Verwertungsquoten

Bei der Bilanzierung der Verwertungswege und der Substitutionsäquivalente wird bei Gold zwischen zwei Qualitäten unterschieden:

- ▶ Goldabfälle im Schmuck- und Dentalbereich liegen überwiegend stückig und relativ rein vor. Sie werden im Recyclingprozess (Scheideanlagen) überwiegend nur umgeschmolzen.
- ▶ Goldabfälle aus Elektronik- /Elektroschrott liegen fein verteilt vor und müssen zur Verwertung angereichert und raffiniert werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Anteile aus der Verwertung dieser zwei unterschiedlichen Qualitäten.

³² Beispielsweise enthält 1 Tonne Kupferkonzentrat aus Indonesien ca. 1 Unze Gold (fcx 2016). 1 Unze = 28,349523125 Gramm (Unze 2016)

Tabelle 5-85: Sekundärgold aus in Deutschland aus inländischen Abfällen, 2013

Herkunft	Erzeugtes Sekundärgold [t]	Produkt aus Sekundärgold	Substitutionsäquivalent
Stückige und relativ reine Abfälle aus dem Schmuck- und Dentalbereich	5,03	Sekundärgold aus Scheideanstalten	Primäres metallisches Gold (inkl. aller Vorketten)
Heterogene goldhaltige Abfälle (Elektronikschrott)	2,58	Sekundärgold aus der Raffination	Primäres metallisches Gold (inkl. aller Vorketten)
Summe	7,61		

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ Die deutsche Gesamtgoldproduktion betrug 37 t (GMFS 2015). Davon stammen 20 % aus den inländischen Abfällen, die in den vorliegenden Unterkapiteln bilanziert wurden. Nach GMFS (2015) stammen insgesamt 85 % der Goldproduktion aus der Sekundärproduktion aus inländischen und importierten Abfällen.
- ▶ Da die vorliegende Untersuchung sowie die Daten von (GMFS 2015) nur die erfassten und verwerteten inländischen Abfälle enthalten, kann keine Aussage abgeleitet werden, welcher Anteil der gesamten goldhaltigen Abfälle einer stofflichen Verwertung zugeführt wurde.

5.8.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärgoldproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Sekundärgoldproduktion aus der Raffination wurde das schwedische Verfahren abgebildet. Für die Sekundärgoldproduktion aus Scheideanstalten wurden die Aufwendungen in einer Schmelze abgeschätzt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-86: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Gold, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Gold, primär	837.007	6.373
Gold aus der Raffination, sekundär	1.710	4,41
Gold aus Scheideanstalten, sekundär	0,06	0
	DIERec	6.369

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-87: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländischen Vorkette für Gold, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Gold, primär	1	0,01
Gold aus der Raffination, sekundär	1.710	4,41
Gold aus Scheideanstalten, sekundär	0,06	0
	DERec	-4,4

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-88: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Gold, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Gold, primär	240.485	223.125	1.831	1.699
Gold aus der Raffination, sekundär	7.453	7.041	19,2	18,2
Gold aus Scheideanstalten, sekundär	2,43	2,41	0	0
	KEA-Saldo		1.812	1.681

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-89: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Gold, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Gold, primär	0	0	0	0
Gold aus der Raffination, sekundär	7.453	7.041	19,2	18,2
Gold aus Scheideanstalten, sekundär	2,43	2,41	0,01	0,01
	KEA-Saldo		-19,2	-18,2

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.8.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

Die abgeschätzten Verwertungsmengen sind von 2007 bis 2015 deutlich rückläufig. Dabei ist eine deutliche Reduktion im Jahr 2011 festzustellen, was auf eine geänderte Methodik bei der statistischen Datenerfassung zurückzuführen ist. Das Niveau von 2011 bleibt bis 2015 in einer ähnlichen Größenordnung. Für die Abschätzung der Zeitreihen wurde dabei folgendermaßen vorgegangen:

- ▶ Schmuck: Der Anteil des Post-Consumer-Abfalls (6%) sowie der Produktionsabfälle (5%) wird für alle Jahre übernommen.
- ▶ Dental, industriell, dekorativ: Der Anteil des Post-Consumer-Abfalls (11%) sowie der Produktionsabfälle (15%) wird für alle Jahre übernommen.
- ▶ Elektro-Elektronik: Der Anteil von 4% Export an gesammelten WEEE aus dem Jahr 2013 wird für alle Jahre im Betrachtungszeitraum übernommen.
- ▶ Der Goldgehalt in WEEE ist über den Betrachtungszeitraum 2007 bis 2015 gleichbleibend (6,45 Gramm).
- ▶ Der Rückgewinnungsgrad der Raffination (95%), der Schredderanlage für WEEE (50%), Shredder und Postshredder für Altfahrzeuge (20%) sowie die Verluste in der Scheideanlage (0,5%) sind von 2007 bis 2015 gleichbleibend angenommen.

Mit diesen Annahmen ergeben sich folgende Verwertungsmengen von 2007 bis 2015:

Tabelle 5-90: Abschätzung der Sekundärgoldproduktion 2007 – 2015

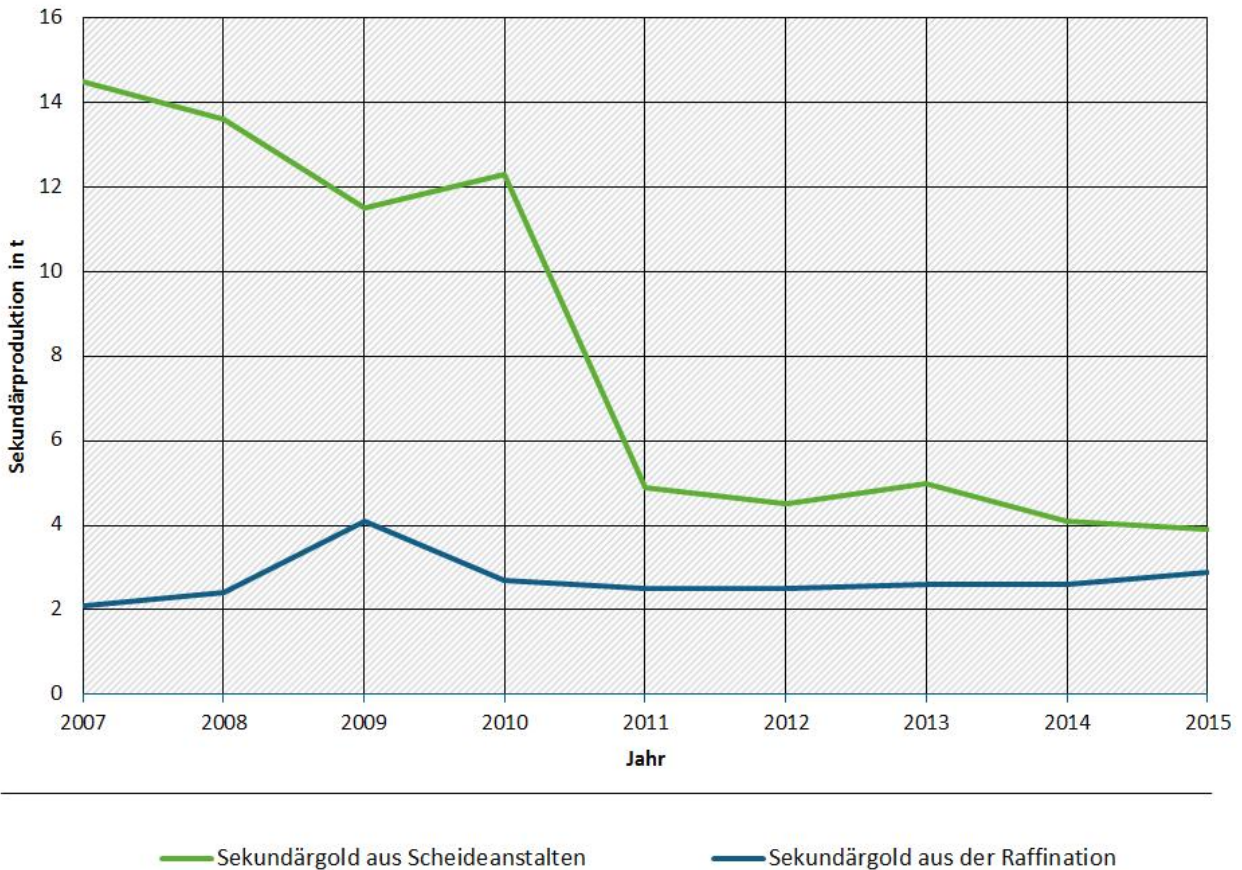
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in t								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundärgold aus Scheideanstalten	14,5	13,6	11,5	12,3	4,9	4,5	5,0	4,1	3,9
Sekundärgold aus der Raffination	2,1	2,4	4,1	2,7	2,5	2,5	2,6	2,6	2,9
Gesamt	16,6	16,0	15,5	15,0	7,4	6,9	7,6	6,7	6,8

Quelle: eigene Berechnungen, BGR 2008-2016, BMUB(a) 2008-2014; BMUB(b) 2008-2016

Abbildung 5-33: Zeitlicher Verlauf der Sekundärgoldproduktion in Deutschland von 2007-2015, in t

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Gold

Zeitliche Verlaufdarstellung 2007-2015



5.8.5.1 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-91: Indikatoren für Gold 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	13.866	13.368	13.004	12.547	6.159	5.810	6.369	5.624	5.680
DERec	kt	-3,60	-4,04	-6,94	-4,66	-4,28	-4,19	-4,41	-4,44	-4,90
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	3.969	3.824	3.708	3.586	1.752	1.652	1.812	1.598	1.612
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	-16	-18	-30	-20	-19	-18	-19	-19	-21

5.9 Platin und Palladium

Platin (Pt) und Palladium (Pd) sind Edelmetalle, die zu den Platingruppemetallen (PGM) zählen. Durch ihren hohen Wert, ihre Schönheit und wegen ihrer besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften spielen sie eine wichtige Rolle in der Industrie sowie in den Bereichen Schmuck und Investment. Wie andere Edelmetalle besitzen Pt und Pd eine geringe Elektronenaffinität, ein starkes positives Normalpotenzial gegenüber der Wasserstoffelektrode, eine hohe Korrosionsbeständigkeit und eine hohe Dichte (Hagelüken et al. 2005). In elementarer Form ist Platin ein grau-weiß glänzendes Metall, im Gegensatz dazu ist Palladium ein silber-weiß glänzendes Metall. Pd ist etwas härter und zäher als Platin, jedoch auch schmiede- bzw. schweißbar. Sowohl Schmelzpunkt (1.554 °C) als auch Siedepunkt (2.960 °C) sind etwas niedriger als bei Platin (Schmidt 2015).

In der Regel werden Platingruppenmetalle als Nebenprodukte aus der Edel- (Gold, Silber) und Nichtedelmetallraffination (Kupfer, Nickel) gewonnen. Da Deutschland selbst keine Primär-PGM-Metalle herstellt. Deutsche Unternehmen decken ihren Bedarf durch Importe sowie über das Recycling vorhandener Materialien.

5.9.1 Materialeinsatz in Deutschland

Aufgrund der besonderen Eigenschaften finden Platin und Palladium in unterschiedlichen Bereichen Anwendung. Beide werden in Automobil- und sonstigen Industriebereichen, sowie in den Bereichen Elektronik, Schmuck, Investment, Medizin- und Dentaltechnik eingesetzt.

Tabelle 5-92 zeigt den abgeschätzten Bedarf in kg pro Verwendungsgebiet in Deutschland 2013. Er ist definiert als die Summe des inländischen Gesamteinsatzes bzw. der Gesamtnachfrage.

Tabelle 5-92: Inländischer Bedarf von Platin und Palladium (Primär- und Sekundärmaterial) nach Verwendungsgebiet in Deutschland in kg, 2013

	Autoabgas-katalysatoren	Schmuck	Investment	Industrie-katalysatoren	Elektronik	Dental	Glasindustrie	Sonstige industrielle Anwendungen
Pt	4.630	3.711	1.190	3.386	137	485	3.167	858
Pd	10.945	349	117	5.027	1.130	1.750	-	85

Quelle: eigene Abschätzungen nach Hagelüken et al. 2005, JM 2016 und Eurostat 2016

Für Autoabgaskatalysatoren im Jahr 2013 wurde die Nachfrage von Platin und Palladium auf ca. 4.600 kg bzw. knapp 11.000 kg geschätzt. Dies entspricht dem Bedarf von 3 Mio. Pkw- und etwa 300.000 Lkw-Neuzulassungen und rund 300.000 Austausch-katalysatoren³³.

Der Platin- und Palladiumbedarf im Elektronikbereich in Deutschland im Jahr 2013 wurde nach JM (2016) und Eurostat (2016) abgeschätzt. Für den europäischen Platin- und Palladiumbedarf liegen sektorspezifische Daten von JM (2016) vor. Gemäß Eurostat (2016) wurden 22 % der in Europa in den Markt gebrachten Elektrogeräte³⁴ in Deutschland eingesetzt. Analog dazu wird auch der Anteil des deutschen PGM-Bedarfs mit 22 % des europäischen Gesamtbedarfs angenommen. Damit ergibt sich ein geschätzter Bedarf in Deutschland von Platin und Palladium im Jahr 2013 von ca. 140 kg bzw. 1.130 kg (Tabelle 5-92).

³³ Es wurde ein spezifischer Platin- bzw. Palladium-Bedarf von 1,1 g Platin und 2,6 g Palladium pro Pkw (Buchert et al. 2015) und 4,4 g von Platin und 10,4 g von Palladium pro Lkw angenommen.

³⁴ Die Eurostat-Statistik bezeichnet diese Menge als „Put on the market“ Eurostat (2016).

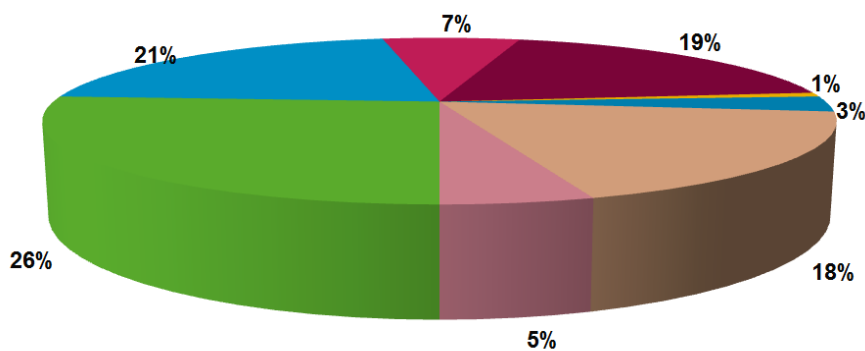
Für den Platin- und Palladiumbedarf der anderen Anwendungsfelder liegen ältere Daten für 2001 für Deutschland in Hagelüken et al. (2005) vor. Europäische jahresscharfe Daten für die Jahre 2001-2013 sind in JM (2016) veröffentlicht. Da keine aktuellen Daten für Deutschland vorliegen, wird im Rahmen dieser Studie angenommen, dass der deutsche Bedarf im gleichen Verhältnis wie der europäische Bedarf angestiegen ist.

Für die Glasindustrie liegen keine aktuellen Daten vor. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass der Bedarf überwiegend über interne Recyclingkreisläufe gedeckt wird, die in den Statistiken zum Einsatz von Primär-PGM nicht enthalten sind. In der vorliegenden Studie wird deshalb auf die Daten von Hagelüken et al. (2005) zurückgegriffen.

Da für den Investmentbereich keine deutschen Daten vorliegen, wird für diese Studie für Deutschland angenommen, dass die deutsche Nachfrage 5 % der globalen Nachfrage beträgt. Für die weltweite Nachfrage 2013 gibt es eine Abschätzung in JM (2016).

Ausgehend von der Tabelle 5-92 zeigen beiden folgenden Abbildungen die prozentualen Anteile der Verwendungsgebiete von Platin und Palladium in Deutschland 2013:

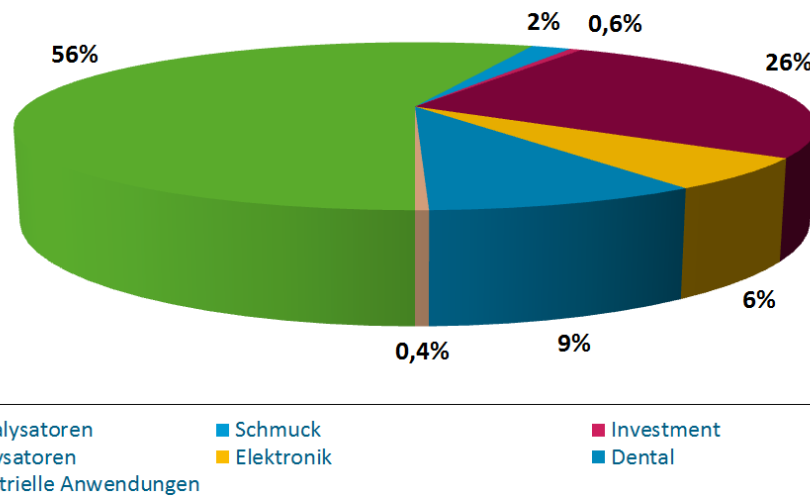
Abbildung 5-34: Anwendungsgebiete von Platin (in % des Gesamtbedarfs) in Deutschland, 2013



- Autoabgaskatalysatoren
- Schmuck
- Investment
- Industriekatalysatoren
- Elektronik
- Dental
- Glasindustrie
- Sonstige industrielle Anwendungen

Quellen: eigene Abschätzungen nach Hagelüken et al. 2005, JM 2016 und Eurostat 2016

Abbildung 5-35: Anwendungsgebiete von Palladium (in % des Gesamtbedarfs) in Deutschland, 2013



Quellen: eigene Abschätzungen nach Hagelüken et al. 2005, JM 2016 und Eurostat 2016

Die Abbildungen zeigen, dass der wichtigste Verwendungszweck von Platin und Palladium im Bereich der Katalysatoren (Industrie- und Autoabgaskatalysatoren) liegt. Weiterhin werden bedeutende Mengen Platin in der Glasindustrie sowie Palladium in der Dentaltechnik eingesetzt. Die Verwendung von Platin ist außerdem in der Schmuckindustrie relevant, wobei Palladium im Schmuckbereich nur eine untergeordnete Rolle spielt. Darüber hinaus hat die Elektronikbranche kleine Anteile.

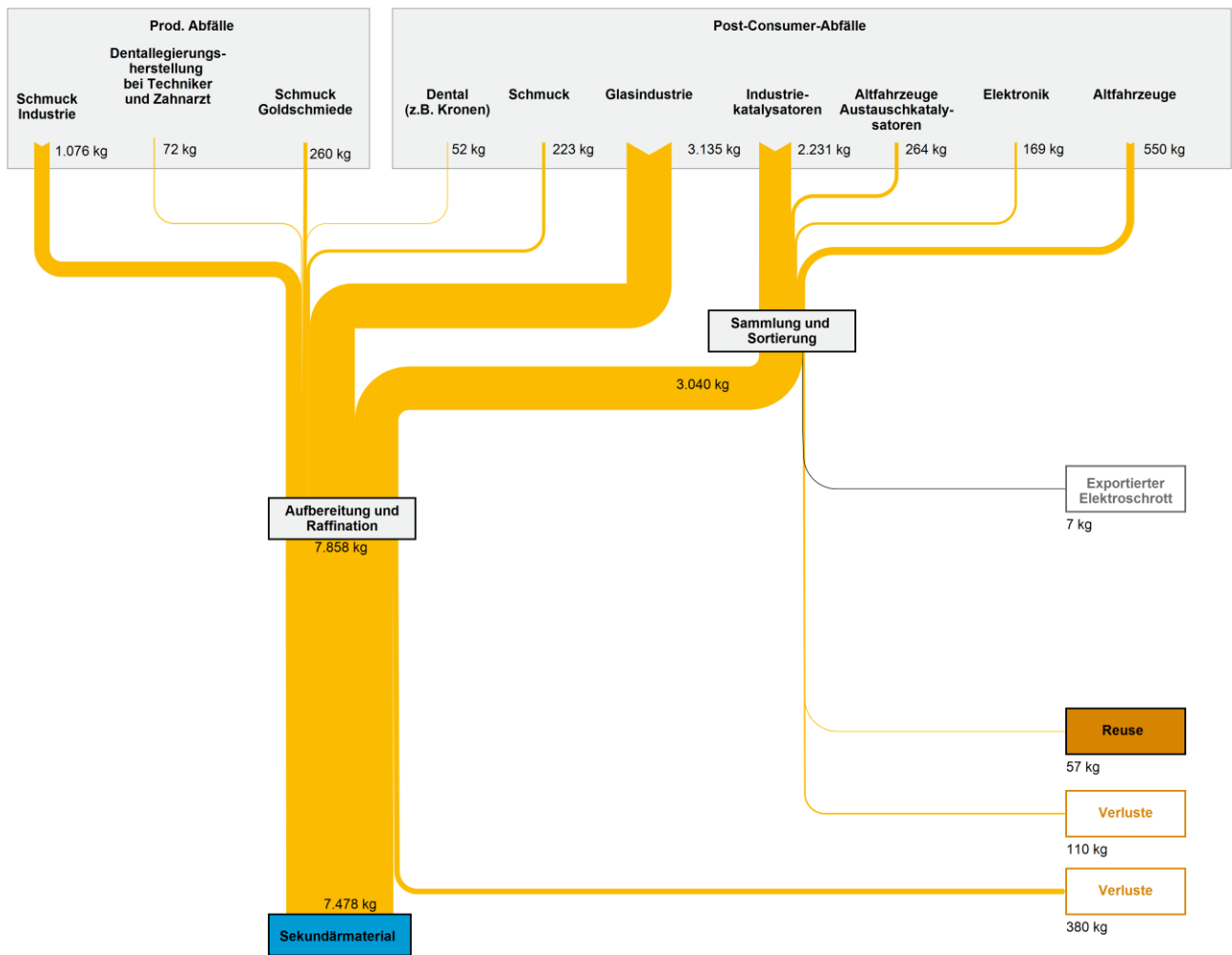
5.9.2 Stoffströme in Deutschland 2013

5.9.2.1 Überblick

Die nachfolgenden beiden Sankey-Diagramme geben einen Überblick über die Sekundärstoffströme von Platin und Palladium. Die Stoffströme beziehen sich auf die Verwertung von in Deutschland angefallenen Produktions- und Post-Consumer-Abfällen. Die Sammlung und überwiegend auch die Aufbereitung finden in Deutschland statt. Die Raffination findet größtenteils im deutschen und europäischen Raum in größeren und kleineren Anlagen statt. Häufig findet sie gemeinsam mit anderen Edelmetallen statt.

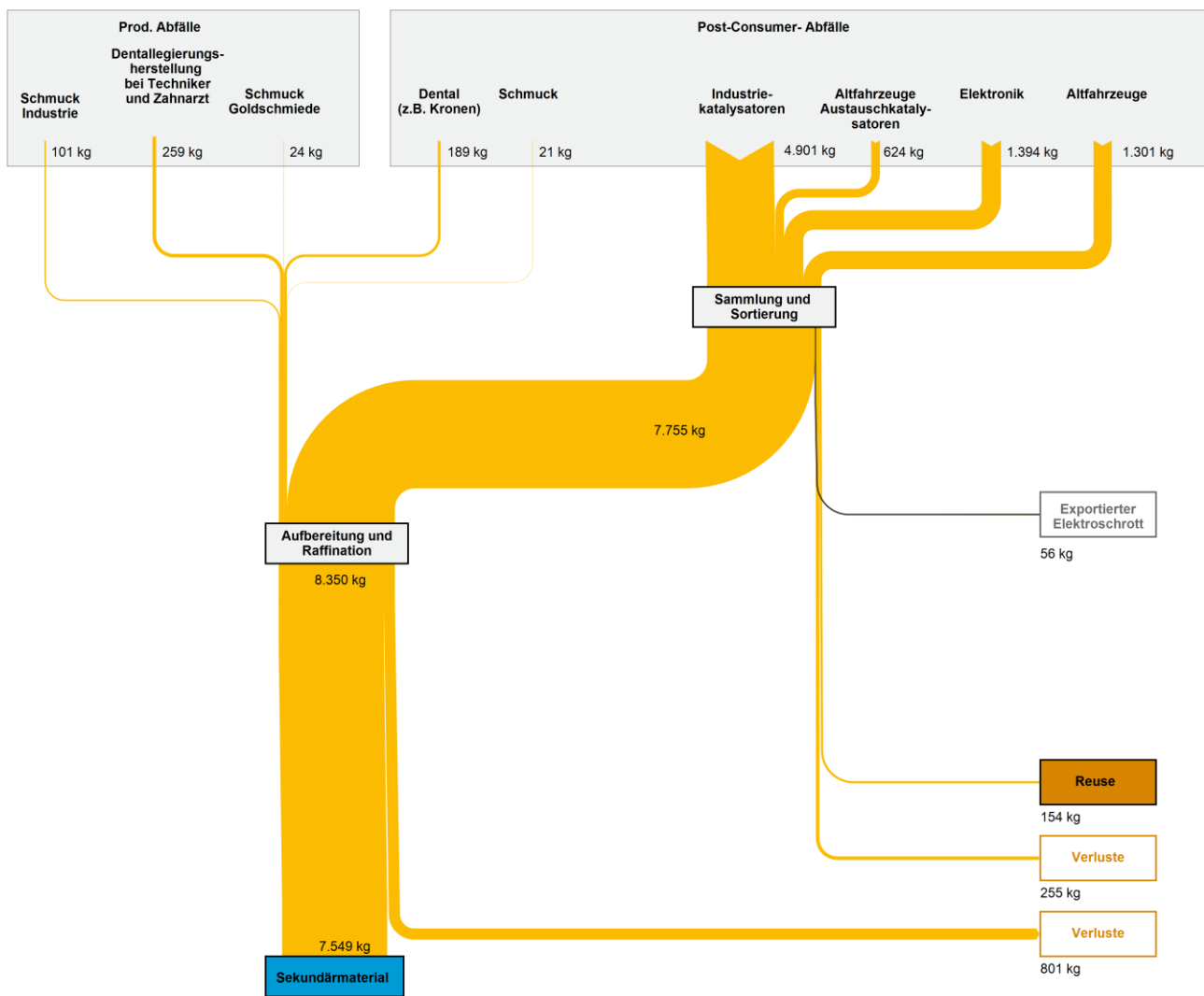
Nach den Überblicksgraphiken werden die Stoffströme im Bereich der Autokatalysatoren, Industriekatalysatoren, Glasindustrie, Elektronik, Dentaltechnik, Schmuck, Investments sowie der sonstigen industriellen Anwendungen in separaten Unterkapiteln näher erläutert. Anschließend folgen die zusammenfassende Darstellung der Verwertungswege und die Ermittlung des DIERec und DERec und der KEA-Salden.

Abbildung 5-36: Platin-Stoffströme in der Verwertung in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Darstellung der Ergebnisse

Abbildung 5-37: Palladium-Stoffströme in der Verwertung in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Darstellung der Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle fasst die abgeschätzten Sekundärrohstoffmengen zusammen, die 2013 bei der Verwertung der in Deutschland anfallenden Abfälle rückgewonnen wurden. Hinsichtlich des Abfallursprungs dominieren die Post-Consumer-Abfälle mit einem Anteil von 82 % bzw. 96 % für Platin bzw. Palladium.

Tabelle 5-93: Erzeugte Sekundärrohstoffe aus in Deutschland anfallenden Post-Consumer- und Produktionsabfällen, 2013

Sekundärstoffstrom	Erzeugte Sekundärrohstoffe	Anteil Post-Consumer-Abfälle	Anteil Produktionsabfälle
Platin	7.478	82 %	18 %
Palladium	7.549	96 %	4 %

5.9.2.2 Autokatalysatoren

Die zwei wesentlichen Quellen für Autokatalysatoren sind die Verwertung von Altfahrzeugen und defekte Austausch-katalysatoren. Der Austausch der defekten Autokatalysatoren fällt häufig im Zusammenhang mit der Abgasuntersuchung an.

Die Verwertungskette für Altkatalysatoren besteht aus mehreren Akteuren: Autoverwerter, Einsammler, Entmantler und Refiner (Rückgewinnung der PGM). Tabelle 5-94 enthält die Beschreibung der Hauptaufgaben jedes Akteurs und die wichtigsten Verluste, die in jedem Prozessschritt entstehenden:

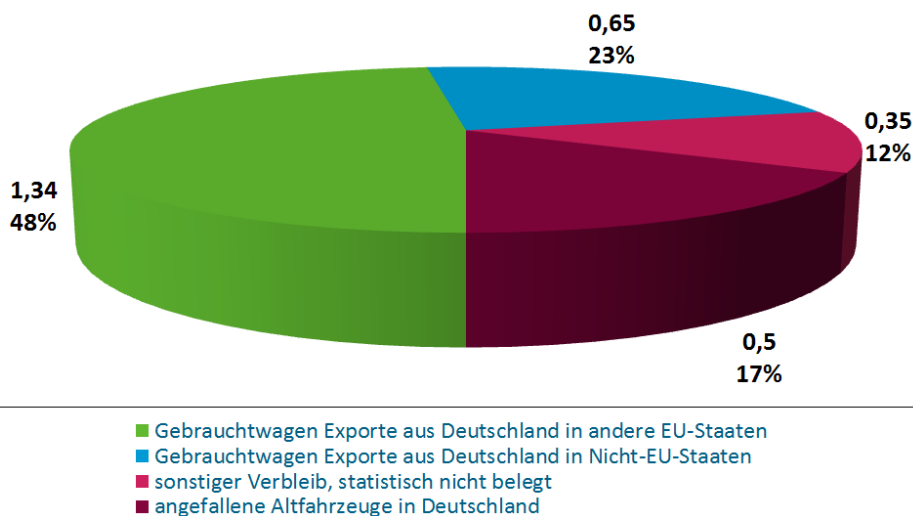
Tabelle 5-94: Verwertungskette von Altkaros

Akteur	Aufgabe	Verluste
Autoverwerter	Ausbau, Sammlung und Lagerung des Katalysators	Als Ersatzteil weiterverkauft Kein Ausbau aus dem Altkaros seitens des Schredderbetriebs falsche Sortierung (z.B. Einstufung als Metallschrott)
Einsammler	Umladung, Transport, Zwischenlager des Katalysators	Keramikstücke oder Staub, die aus dem Konvertergehäuse herausfallen
Entmantler	Zerlegung und Transport des Katalysators	Keine Installation von Staubabzügen, die den gesammelten Staub dem PGM-Recycling zuführen Verbleibung der Staubrückstände im Kat-Gehäuse und nachfolgende Verwertung als Eisen-Schrott

Quelle: eigene Abschätzungen nach Hagelüken et al. 2005

Abbildung 5-38 zeigt den Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Pkw und leichten Nutzfahrzeugen im Jahr 2013 (Pkw mit bis 8 Sitzen und Nutzfahrzeuge bis 3,5 t). Gemäß den Daten des BMUB((b) 2014) verbleiben nur 17 % der endgültig stillgelegten Fahrzeuge (Altfahrzeuge und Gebrauchtwagen) im Jahr 2013 in Deutschland. Ein Großteil der Fahrzeuge wird exportiert, ein weiterer großer Anteil fällt unter „Sonstiges“ (d. h. statistisch nicht erfasste Exporte, Diebstahl, Nutzung auf nicht-öffentlichem Gelände). Die Zahlen zum Verbleib der Pkws und Lkws und ihren Exporten und Gruppe „Sonstiges“ stammen aus BMUB((b) 2014). Wenn die legal und illegal exportierten Fahrzeuge bzw. Katalysatoren das Ende ihres Lebenszyklus erreichen, ist davon auszugehen, dass aufgrund des hohen monetären Werts ein Teil dieser Katalysatoren in europäischen Edelmetallraffinerien recycelt werden. Das hierbei gewonnene Platin und Palladium ist in der vorliegenden Stoffstrombilanz nicht enthalten.

Abbildung 5-38: Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge [Anzahl in Mio.], 2013



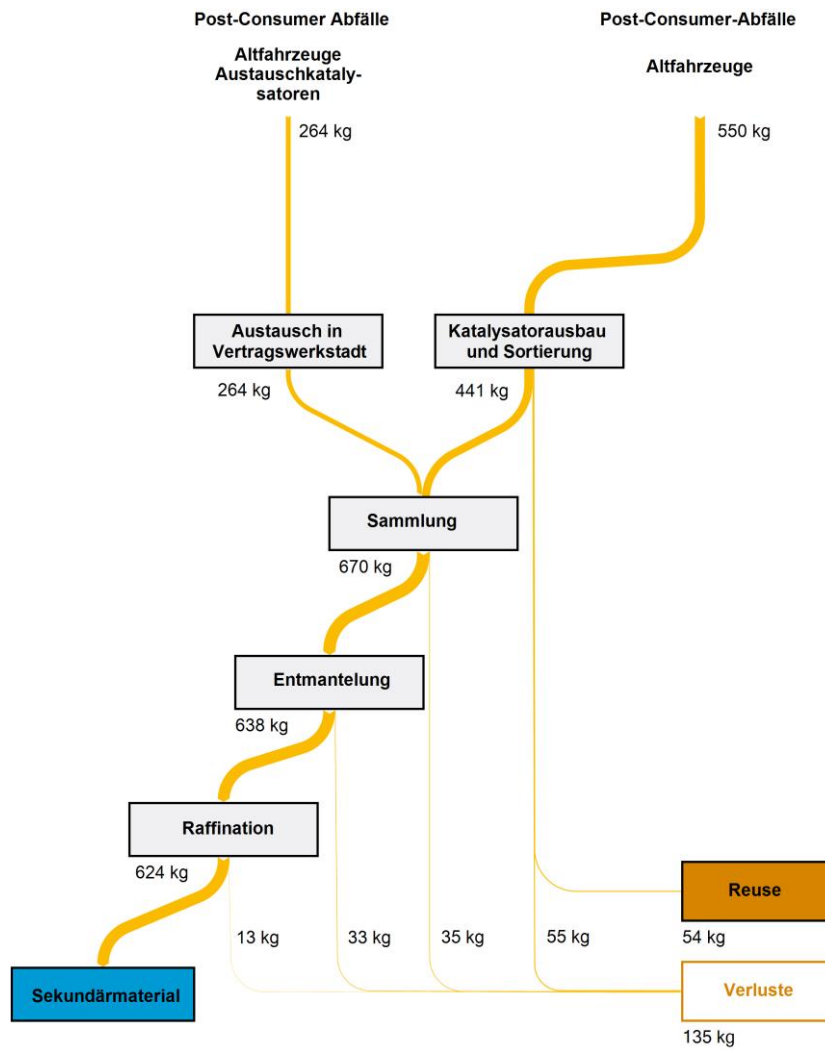
Quelle: BMUB(b) 2014

Gemäß Hagelüken et al. (2005) sollten bis 2010 annähernd 100 % des Fahrzeugbestands Kat-Fahrzeuge gewesen sein. Deswegen wird in der Studie davon ausgegangen, dass alle angefallenen Altfahrzeuge mit einem Katalysator ausgestattet sind. Lkw sind nicht in der Altfahrzeugstatistik enthalten, sind aber auf Grund ihrer geringen Anzahl vernachlässigbar.

Neben den Autokatalysatoren aus Altfahrzeugen sind die Austausch-katalysatoren die zweite wichtige Quelle für das PGM-Recycling. Gemäß BAST (2001) haben im Jahr 2000 1 bis 2 % der Fahrzeuge aufgrund von Katalysatordefekten die Abgasuntersuchungen nicht bestanden. Unter Berücksichtigung der gesetzlich erforderlichen Häufigkeit von Abgasuntersuchungen (2 oder 3 Jahre im Fall von Neufahrzeuge) und der Bestandszahlen von Pkws schätzte Hagelüken et al. (2005) eine Anzahl von jährlich 300.000-350.000 Austausch-katalysatoren in 2002. Da die Fahrzeugflotte in Deutschland zwischen 2002 und 2013 um ca. 2 % angewachsen ist, wird im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass die Nachfrage nach Austausch-katalysatoren 2013 auf dem Niveau von 2002 geblieben ist. Deshalb wird wie in Hagelüken et al. (2005) von 300.000 Austausch-katalysatoren ausgegangen. Ein Teil dieser Austausch-katalysatoren wird durch gebrauchte Katalysatoren gedeckt. Deren Anzahl wird auf Basis von Hagelüken et al. (2005) auf rund 60.000 im Jahr 2013 geschätzt. Die verbleibende Menge von 240.000 Austauschautokatalysatoren wird über Vertragswerkstätten abgewickelt, die die defekten Katalysatoren über die Kfz-Hersteller ins Recycling geben. Für die Berechnungen der Platin- und Palladium-Mengen, die aus dem Recyclingsystem in Deutschland anfallen, wurde von dem durchschnittlichen PGM-Gehalt je Pkw-Autoabgaskatalysator von 1,1 g Platin und 2,6 g Palladium Buchert et al. (2015) ausgegangen. Die Abschätzung der Verluste in der Entsorgungskette erfolgte nach Hagelüken et al. (2005).

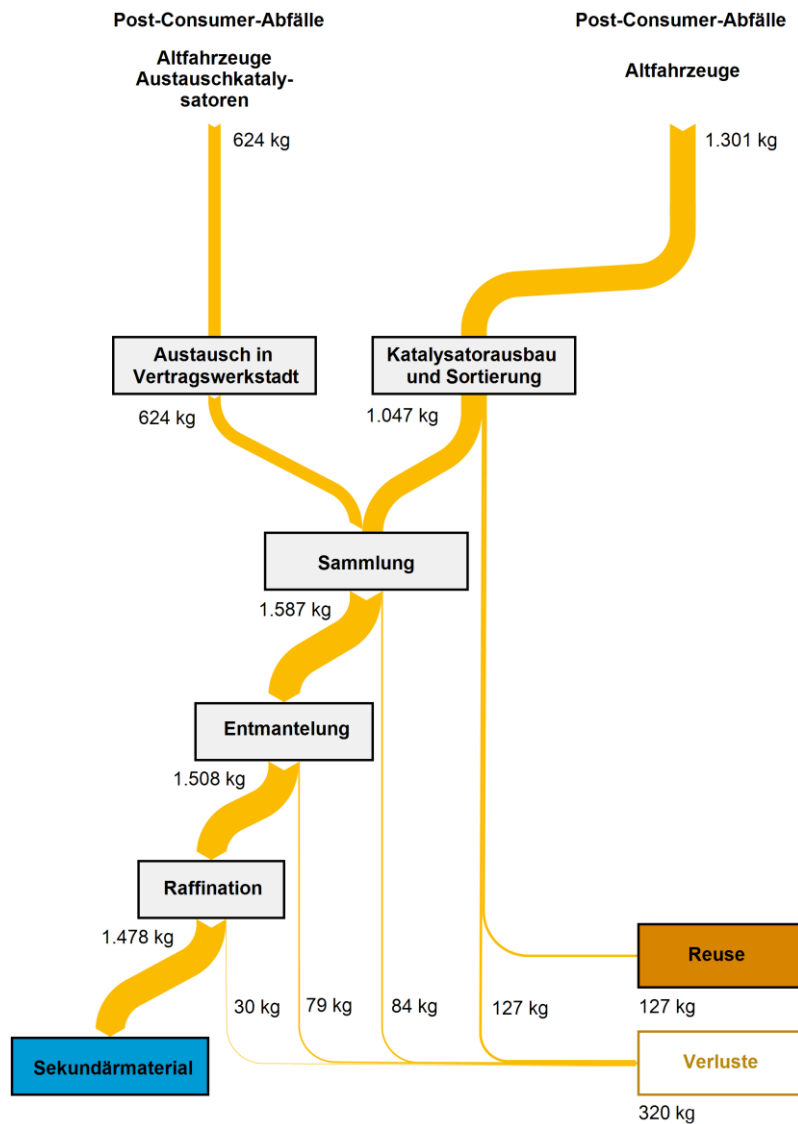
Die folgenden Abbildungen stellen die PGM-Ströme in der Verwertungskette der Autokatalysatoren aus Altautos und Austausch-katalysatoren für Platin (Abbildung 5-39) und Palladium (Abbildung 5-40) dar.

Abbildung 5-39: Platin-Sekundärstoffströme bei Anfall und Verwertung von in Deutschland anfallenden Autokatalysatoren (Altfahrzeuge und Austauschkatalysatoren) im Jahr 2013



Quelle: eigene Berechnungen nach BMUB(b) 2014, Hagelüken et al. 2005, und Buchert et al. 2015

Abbildung 5-40: Palladium-Sekundärstoffströme bei Anfall und Verwertung von in Deutschland anfallenden Autokatalysatoren (Altfahrzeuge und Austauschkatalsatoren) im Jahr 2013



Quelle: eigene Berechnungen nach BMUB(b) 2014, Hagelüken et al. 2005, und Buchert et al. 2015

5.9.2.3 Industriekatalysatoren

Das Recycling von edelmetallhaltigen Industriekatalysatoren findet auf einem sehr hohen Niveau statt. Die Gründe dafür sind die überschaubare Anzahl der Prozesse und Akteure sowie der bekannten Werthaltigkeit der Katalysatoren, sodass sich über viele Jahre die direkten und vertraglich geregelten Akteurskooperationen zwischen den Herstellern der Edelmetallkatalysatoren, den Betreibern (hier Raffinerien) und den Scheideanstalten zur Edelmetallrückgewinnung sowie den technisch ausgereiften Rückgewinnungsverfahren mit hohen Edelmetallausbauten entwickeln konnten Hagelüken et al. (2005).

Gemäß Hagelüken et al. (2005) liegen die Recyclingquoten³⁵ für das eingesetzte Platin und Palladium über den gesamten Lebenszyklus von Industriekatalysatoren in Deutschland bei durchschnittlich 65 %³⁶ und 92

³⁵ Hagelüken et al. (2005) definiert als (*statische*) *Recyclingquote* das Verhältnis von aktueller Recyclingmenge und Bruttoeinsatz (Primär- und Sekundäreinsatz) zu einem definierten Zeitpunkt. Es wird nicht der Einfluss der Produktlebensdauer berücksichtigt.

%. Die nachfolgende Tabelle 5-95 zeigt die Recyclingquoten differenziert nach Art der Katalysatoren. Weitgehend optimiert ist das PGM-Recycling aus Raffineriekatalysatoren, Pulverkatalysatoren in der Feinchemie, Fest- und Wirbelbettkatalysatoren in der chemischen Industrie sowie im Bereich der Blausäure- und Salpetersäureherstellung. Das größte Optimierungspotenzial gibt es nach Hagelüken et al. (2005) für Umweltkatalysatoren (Anwendungsfelder Blockheizkraftwerke und katalytische Nachverbrennung). Hier werden nur 10 % wiedergewonnen (aus Unwissenheit der Betreiber gelangen hohe Anteile in das Stahlschrottreycling). Außerdem könnte in der Homogenen Katalyse der Rücklauf des verbrauchten Katalysatormaterials zur Palladiumrückgewinnung optimiert werden (ReStra (2015)), um die Recyclingquote für Palladium auf bis zu 95 % zu steigern (statt 50 % in 2002) (Hagelüken et al. (2005)). Gemäß Hagelüken et al. (2005) können bei einer Modifizierung von Silanen und Siliconen zu Organosilanen, die für die homogene Katalyse verwendet werden, höhere Platin-Rückgewinnungsraten von bis zu 90 % statt bisher rund 20 % erreicht werden.

Aktuellere Daten zum Industriekatalysatorrecycling liegen nicht vor. Auch im unveröffentlichten Teilbericht von ReStra (2015) wird weitestgehend Bezug auf die Daten von Hagelüken et al. (2005) genommen und es wird nicht von signifikanten Veränderungen der Recyclingquoten von 2002 bis heute berichtet.

Die nachfolgende Tabelle zeigt neben den einzelnen Recyclingquoten für die verschiedenen Katalysatortypen auch die Abschätzung der prozentualen Verluste von Sammlung und Sortierung bzw. von Aufbereitung und Rückgewinnung nach Hagelüken et al. (2005):

³⁶ Diese vergleichsweise niedrige Recyclingquote begründet sich vor allem mit der geringen Recyclingrate von Platin bei homogenen Katalysatoren. Die Hauptursache ist, dass bei der Vernetzung von Silikonem der eingesetzte Platinkatalysator vollständig im Produkt verbleibt. Weiterhin ist die jährliche Bruttoeinsatzmenge von Platin für die homogene Katalyse relativ ist (rund 1,5 Tonnen, was ca. 40 % der gesamten Bruttoeinsatzmenge für Industriekatalysatoren entspricht) (Hagelüken et al. (2005)).

Tabelle 5-95: Verluste entlang der Entsorgungskette von in Deutschland eingesetzten PGM-haltigen Industriekatalysatoren

Katalysatorart	Recyclingquote	Verlust in Sammlung und Sortierung [%]	Verluste in Aufbereitung und Rückgewinnung [%]
Raffineriekatalysatoren	97 %	Vernachlässigbar	1,5 % (Pt und Pd)
Salpetersäureproduktion	94 % bei Pt 70 % bei Pd	Vernachlässigbar	Vernachlässigbar
Blausäureproduktion	90 %	Vernachlässigbar	Vernachlässigbar
Homogene Katalyse	20 % bei Pt 50 % bei Pd	Vernachlässigbar für Pt, 48 % für Pd	3,3 % Pt, 3,8 % Pd
Pulverkatalysatoren	95 %	Vernachlässigbar	2 % (Pt und Pd)
Fest- und Wirbelbettkatalysatoren	90 %	Vernachlässigbar	4,5 % (Pt und Pd)
Umweltkatalysatoren	~ 10 %	90 %	Vernachlässigbar

Quelle: Hagelüken et al. (2005) und ReStra (2015)

Die durchschnittliche Lebensdauer eines Industriekatalysators beträgt nur rund 4 Monate, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Produktionsabfälle näherungsweise dem PGM-Gesamtverbrauch in Katalysatoren abzüglich der PGM-Verluste während des Katalysatorbetriebs (z.B. in die Abluft oder die Chemieerzeugnisse) betragen. Die Nachfrage nach PGM für Industriekatalysatoren wurde in der Tabelle 5-92 dargestellt. Die Inputmengen in das Recycling betragen 66 % (Platin) bzw. 97,5 % (Palladium) der Nachfragemengen. Die 34 % bzw. 2,5 % sind die Verluste in Produkte. Die Verluste während des Katalysatorbetriebs und den einzelnen Entsorgungsschritten werden aus Hagelüken et al. (2005) übernommen. Die Recyclingraten aus Tabelle 5-95 lassen sich zusammenfassen zu knapp 1 % Verluste in der Sammlung und knapp 4 % Verluste in der Raffination.

5.9.2.4 Glasindustrie

In der Glasindustrie werden in einigen Hochtemperaturanwendungen Rührer, Auskleidungen und Bleche mit einer Legierung aus 95 % Platin und 5 % Rhodium eingesetzt Hagelüken et al. (2005). Dank direkten Produktrecyclings (Bsp.: Ausbau eines Rührers und der PGM-Rückgewinnung aus Ofenausmauerungen) gibt es in diesem Bereich eine sehr hohe Rückgewinnungsquote von rund 98 % bezogen auf die eingesetzten PGM-Mengen, sodass keine PGM-Recyclingpotenziale in der Glasindustrie brachliegen. Die Verluste bei der Rückgewinnung bei der Raffination liegen unter 1 % (Hagelüken et al. 2005) und betragen 2013 nur rund 31 kg.

Basierend auf Hagelüken et al. (2005) wird eine Gesamtnachfrage nach Platin seitens der Glasindustrie in Deutschland von 3.135 kg im Jahr 2013 und eine Sekundärplatinproduktion von rund 3.104 kg angenommen.

5.9.2.5 Elektronik

Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften werden die PGM-Metalle in der Elektronikindustrie eingesetzt, beispielsweise wird Palladium als Elektrodenmaterial in Keramiksichtkondensatoren benutzt (ReStra 2015). Obwohl es in den letzten Jahren zur Miniaturisierung der Kondensatoren gekommen ist, wodurch weniger Palladium benötigt wird, wird Palladium weiterhin in relevanten Mengen entweder als Legierung mit Kupfer oder Silber oder als Oberflächenbeschichtung für abriebfeste, elektrisch leitende Oberflächen verwendet (Lucas et al. 2011). Weiterhin hat Platin wegen seines hohen Schmelzpunktes eine große Bedeu-

tung im Bereich der Sensorik als Thermoelement (Lucas et al. 2011). Darüber hinaus ist, bedingt durch den Anstieg des Gold- und Silberpreises, die Nachfrage nach Palladium als Substitut für Gold und Silber gestiegen.

(Wrap 2012) gibt an, dass in einer Tonne Elektroschrott 2,14 g PGM zu finden sind. Die Verteilung dieser 2,14 g PGM auf Platin und Palladium wird über das Verhältnis der Nachfrage im Elektroniksektor berechnet (Hagelüken et al. 2005) (JM 2016). Auf Platin entfallen hierbei 0,23 g und auf Palladium 1,91 g pro Tonne Elektroschrott. 2013 wurden insgesamt 730.162 Tonnen Elektroschrott gesammelt (BMUB(a) 2014). Etwa 4 % hiervon werden exportiert und rund 2 % werden einer weiteren Nutzung zugeführt. Der genaue Verlust an PGM über nicht gesammelten Elektroschrott lässt sich auf Grund der unterschiedlichen Lebensdauern der Geräte nicht berechnen. Statistische Daten zu nicht gesammeltem Elektroschrott liegen nicht vor.

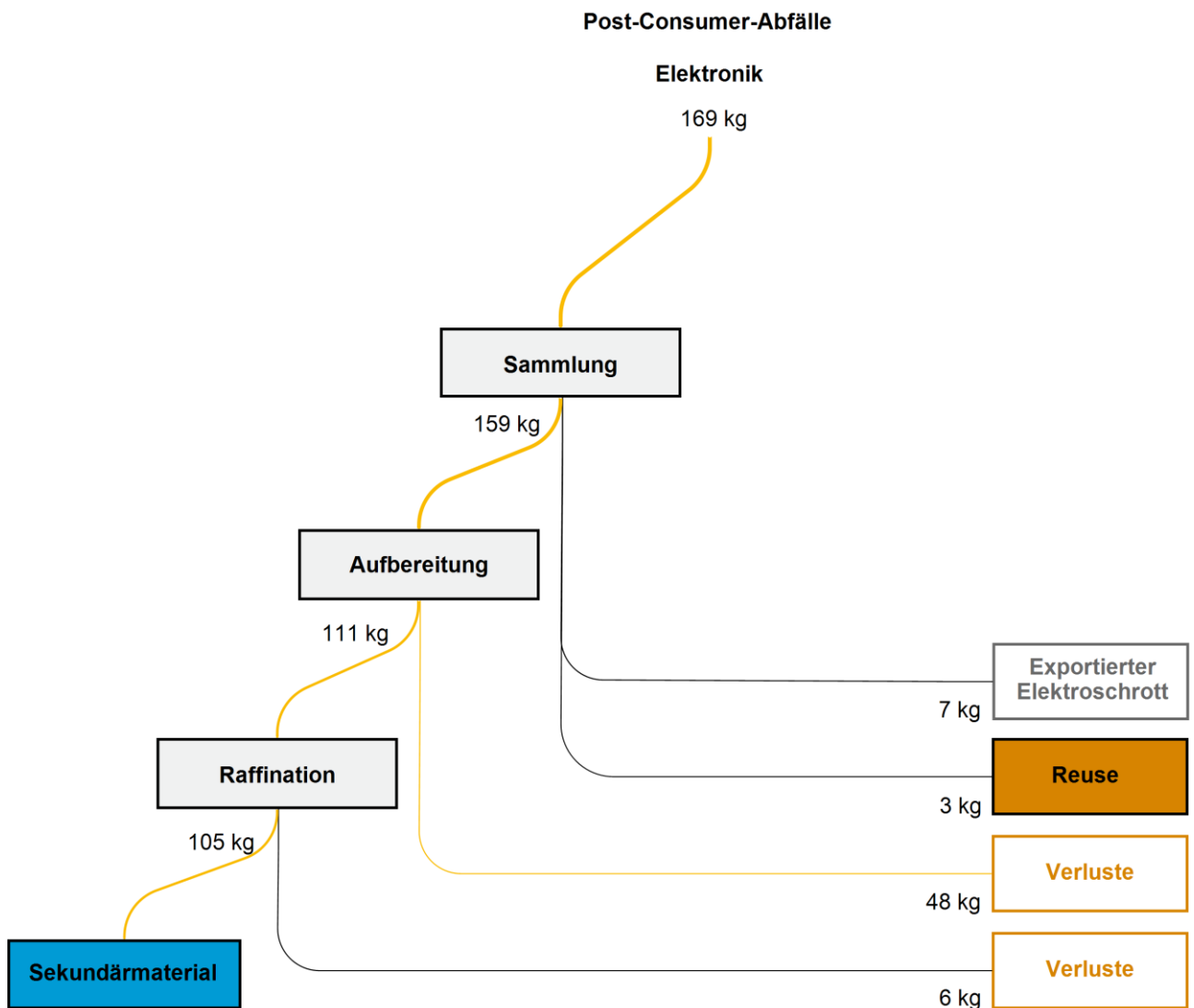
Ein wesentlicher Grund für den Geräteanteil, der keiner Sammlung zugeführt wird, ist v. a. die Entsorgung der Kleingeräte über den Hausmüll. Zusätzlich wird ein Teil der Altgeräte illegal als Gebrauchtgeräte in Nicht-EU-Länder exportiert und dort oftmals unsachgemäß entsorgt (Wittmer et al. 2011).

Die Elektroaltgeräte, die in Deutschland verbleiben, werden erst gesammelt und durchlaufen danach eine manuelle, teilautomatisierte und/oder vollautomatisierte Demontage (ReStra 2015). Bei der manuellen Zerlegung werden die schadstoffhaltigen Komponenten oder auch die wertvollen Bauteile wie z.B. Leiterplatten abgetrennt. Die Altgeräte werden auch teilweise in einem Schredder zerkleinert (mechanische Aufbereitung). Für die Wiedergewinnung von Kupfer und Edelmetallen aus Elektronikschrott wird das Sekundärmaterial in einem Hochofenprozess eingeschmolzen. In Deutschland werden die PGM überwiegend als wertvolle Co-Produkte aus der Sekundärkupferproduktion gewonnen (Buchert et al. 2012).

Je nach Vorbehandlungsverfahren unterscheiden sich die Rückgewinnungsraten von Edelmetallen deutlich. Nach ReStra (2015) kann die Rückgewinnungsrate in der Aufbereitung von Palladium zwischen 41 % (mechanische Aufbereitung) und 99 % (vertiefte Zerlegung) liegen. In dieser Studie wird von einer mittleren Zerlegungstiefe ausgegangen, mittels derer 70 % der PGM rückgewonnen und einer Hütte zugeführt werden. Gemäß Buchert et al. (2012) werden die Verluste bei der Endbehandlung (Cu-Hütte) mit 5 % angesetzt.

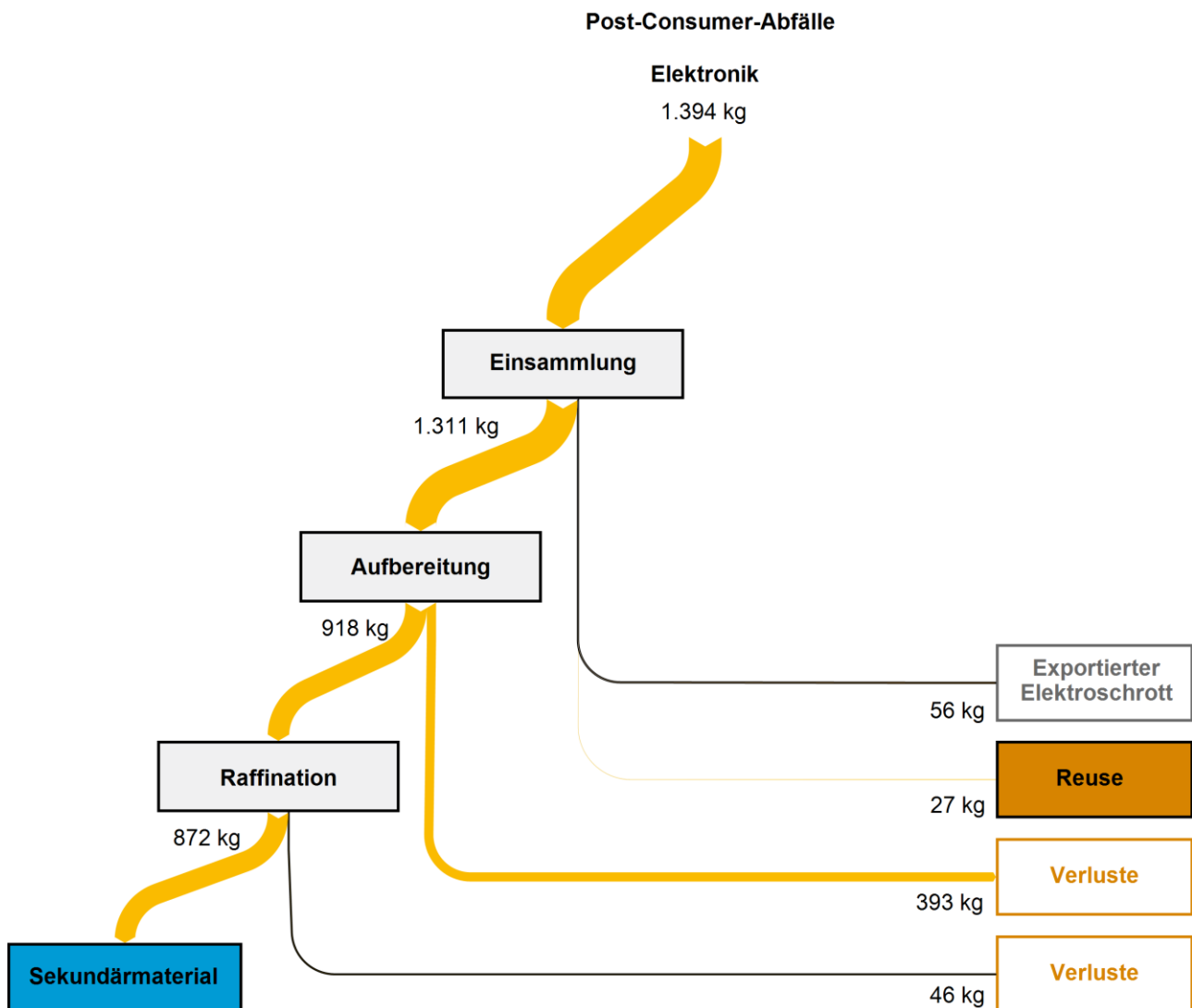
Mit den zuvor dargestellten Annahmen zu Elektroschrott ergibt sich die nachfolgende Abschätzung der Sekundärstoffströme von Platin und Palladium für das Jahr 2013:

Abbildung 5-41: Platin-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenem Elektroschrott, 2013



Quelle: eigene Berechnungen nach Wrap 2014, JM 2016, Hagelücken et al. 2005 und BMUB(a) 2014

Abbildung 5-42: Palladium-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenem Elektroschrott, 2013



Quelle: eigene Berechnungen nach Wrap 2014, JM 2016, Hagelüken et al. 2005 und BMUB(a) 2014

5.9.2.6 Dentaltechnik

In der Dentaltechnik kommt vor allem Palladium als Legierungsbestandteil von Zahnersatz (z. B. Kronen, Brücken) und als Füllungsmaterial zum Einsatz. Gemäß Hagelüken et al. (2005) sind die Recyclingkreisläufe in der Herstellung und Weiterverarbeitung der Dentallegierungen bereits zu einem großen Anteil geschlossen. Hingegen gibt es Verbesserungspotentiale bei der Rückgewinnung von Edelmetallen aus dem Schlamm der Amalgamabscheider, die in den Zahnarztpraxen eingesetzt werden, und bei der Rückführung ersetzter Zahnfüllungen sowie ausgetauschten Zahnersätzen (z. B. Altkronen und -brücken). Der Grund dafür ist die unterschätzte Bewertung der Alt-Dentallegierungen von vielen Patienten, sodass die Zahnersätze diese nicht dem Recycling zugeführt werden. Dieser Anteil wird auf rund 50 % geschätzt (Hagelüken et al. 2005).

Hagelüken et al. (2005) schätzt die Produktionsabfälle in der Legierungsherstellung, bei den Technikern und den Zahnarztpraxen auf rund 15 % der in der Dentaltechnik eingesetzten PGMs. Als Post-Consumer-Abfälle fallen nach Hagelüken et al. (2005) rund 11 % als Kronen u. ä. an. Für diese Studie werden die gleichen Prozentsätze angesetzt. Der angenommene deutsche Gesamtbedarf wird auf 485 kg Platin und 1.750 kg Palladium geschätzt (siehe Kapitel 5.9.1).

5.9.2.7 Schmuck

Ein wichtiges Nachfragesegment für Platin in Deutschland ist die Schmuckindustrie (siehe Abbildung 5-34). Platin wird hauptsächlich aufgrund seiner besonderen Eigenschaften (geringe Härte, gute Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Wärmedehnung) als Legierungskomponente verwendet. Für Palladium spielt dieser Bereich nur eine untergeordnete Rolle. Palladium wurde traditionell im Schmuckbereich nur für Weißgold-Legierungen eingesetzt (Lucas et al. 2011).

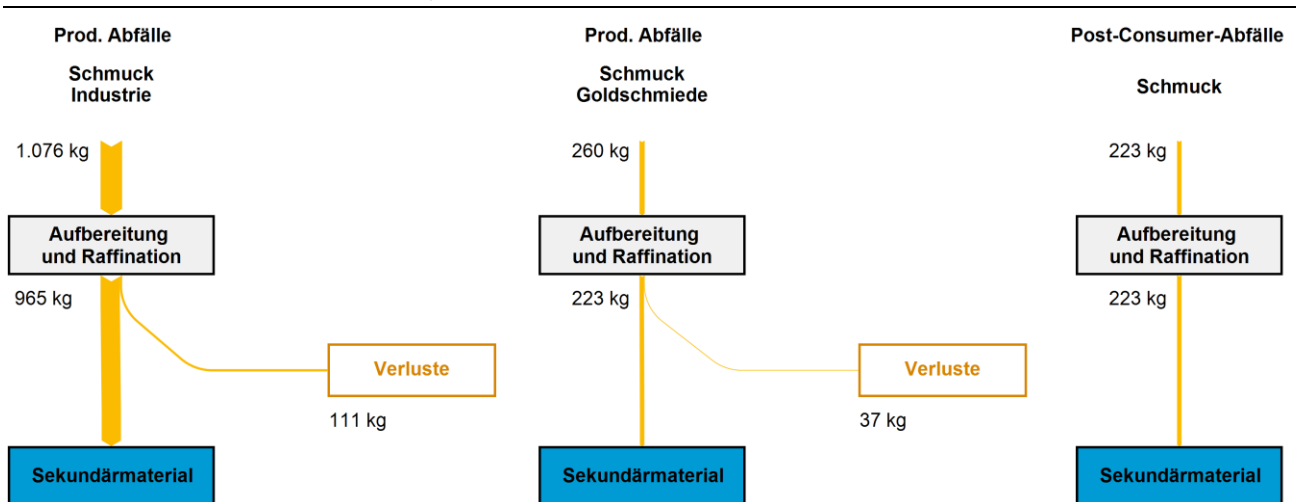
Man unterscheidet zwischen dem Einsatz von PGM in der industriellen Fertigung von Schmuck und der handwerklichen Fertigung eines Goldschmiedes. Die entstehenden Produktionsrückstände und Materialverluste werden gesammelt und entweder in den Betrieben selbst wieder eingeschmolzen oder an die Scheideanstalten geliefert. Nach Hagelüken et al. (2005) gehen bei der Verarbeitung der Goldschmiede rund 2 % und bei industrieller Fertigung rund 5 % der eingesetzten Edelmetallmengen verloren.

Neben den oben genannten Recyclingwegen hat der Post-Consumer-Rücklauf große Bedeutung: alter Schmuck wird entweder bei Goldschmieden oder Edelmetall-Ankäufern zur Wiederverwendung abgegeben (Hagelüken et al. 2005) und dann entweder direkt bei Goldschmieden wiederverwendet und/oder an Scheideanstalten geliefert. Gemäß Hagelüken et al. (2005) macht der Post-Consumer-Abfall 6 % des gesamten Zyklus des Schmuckes aus, was 239 kg von Platin und 22 kg von Palladium in Deutschland im Jahr 2013 entspricht. Aufgrund des hohen Wertes des Schmuckes sind besonders die Recyclingwege im Post-Consumer-Bereich weitestgehend erschlossen. Eventuelle geringe Verbesserungspotentiale beim Recycling der PGM im Schmuckbereich liegen im Bereich der Verarbeitung (Hagelüken et al. 2005).

Für diese Studie werden die gleichen Prozentsätze für den Anfall der Produktions- und Post-Consumer-Abfälle und die Verluste bei der Aufbereitung und Raffination wie in Hagelüken et al. (2005) angesetzt. Der angenommene deutsche Gesamtbedarf von 3.711 kg Platin und 349 kg Palladium ist in Kapitel 5.9.1 dargestellt.

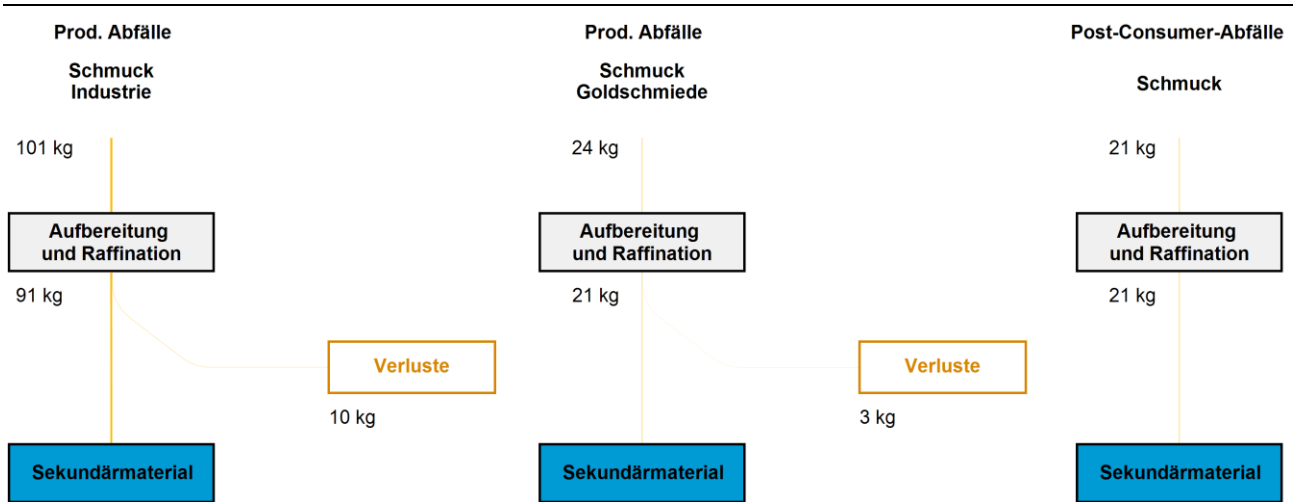
Abbildung 5-43 und Abbildung 5-44 stellen die Pt- und Pd-Stoffströme im Schmuckbereich dar:

Abbildung 5-43: Platin-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenen Abfällen im Schmuckbereich, 2013



Quelle: eigene Berechnungen nach JM 2016 und Hagelüken et al. 2005

Abbildung 5-44: Palladium-Stoffströme bei der Verwertung von in Deutschland angefallenen Abfällen im Schmuckbereich, 2013



Quelle: eigene Berechnungen nach JM 2016 und Hagelüken et al. 2005

5.9.2.8 Investments

In diesem Bereich wird den Bedarf an Platin und Palladium in Form von Münzen (d. h. Pt-Münzen) und Barren berücksichtigt. Da diese beiden Metalle vorrangig als Anlageprodukt nachgefragt werden, treten hier keine relevanten Abfallstoffströme auf (Hagelüken et al. 2005).

5.9.2.9 Sonstige industrielle Anwendungen

Für die Sekundär-PGM aus der Galvanik wurden in Hagelüken et al. (2005) nur sehr geringe Sekundärstoffströme von Platin (16 kg) und Palladium (2 kg) ermittelt, so dass sie im Rahmen dieser Studie vernachlässigt werden. Kleinere PGM-Mengen kommen auch in Lambda-Sonden und Zündkerzen vor (Hagelüken et al. 2005). Da aus technischen, logistischen und wirtschaftlichen Gründen auch hier kein nennenswertes Recycling stattfindet, wird auch dieser Bereich nicht betrachtet.

5.9.3 Verwertungswege und Verwertungsquoten

Bei der Bilanzierung der Verwertungswege und der Substitutionsäquivalente wird bei Platin und Palladium zwischen zwei Qualitäten unterschieden:

- ▶ Platinabfälle im Schmuck- und Dentalbereich liegen überwiegend stückig und relativ rein vor. Sie werden im Recyclingprozess überwiegend nur umgeschmolzen.
- ▶ Platinabfälle aus Industrie- und Autokatalysatoren, aus der Glasindustrie und aus Elektroschrott liegen fein verteilt vor und müssen zur Verwertung angereichert und raffiniert werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Anteile aus der Verwertung dieser zwei unterschiedlichen Qualitäten.

Tabelle 5-96: Sekundärplatin und -palladiumerzeugung aus inländischen Abfällen – Deutschland, 2013

Herkunft	Erzeugtes Sekundärplatin [kg/a]	Erzeugtes Sekundärpalladium [kg/a]	Substitutionsäquivalent
Stückige und relativ reine Abfälle aus dem Schmuck- und Dentalbereich	1.521	532	Primäres metallisches Platin bzw. Palladium (inkl. aller Vorketten)

Herkunft	Erzeugtes Sekundärplatin [kg/a]	Erzeugtes Sekundärpalladium [kg/a]	Substitutionsäquivalent
Heterogene, fein verteilte PGM-haltige Abfälle (Industrie- und Autokatalysatoren, Glasindustrie und Elektroschrott)	5.956	7.018	Primäres metallisches Platin bzw. Palladium (inkl. aller Vorketten)
Summe	7.477	7.550	

Für 2013 können keine Verwertungsquoten mit Bezug zur Gesamtproduktion angegeben werden, weil die deutsche Gesamtplatin- und -palladiumproduktion nicht bekannt ist. Da die vorliegende Untersuchung nur die erfassten und verwerteten Abfälle enthält, kann darüber hinaus keine Aussage abgeleitet werden, welcher Anteil der gesamten platin- und palladiumhaltigen Abfälle einer stofflichen Verwertung zugeführt wurde.

5.9.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärplatin- und Primärpalladiumproduktion wurde der Weltmix abgebildet. Für die Sekundärplatin- und Sekundärpalladiumproduktion aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott wurde der europäische Mix abgebildet. Für die Sekundärplatin- und Sekundärpalladiumproduktion aus dem Schmuck und Dentalbereich wurden die Aufwendungen in einer Schmelze abgeschätzt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 5-97: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Platin, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Platin, primär	328.264	2.454
Platin aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	801	4,77
Platin aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	0,11	0
	DIERec	2.450

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-98: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Platin, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Platin, primär	1	0,01
Platin aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	801	4,77
Platin aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	0,11	0
	DERec	-4,76

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-99: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Platin, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Platin, primär	369.736	358.696	2.764	2.682
Platin aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	14.241	13.452	84,8	80,1
Platin aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	4,19	4,16	0,01	0,01
KEA-Saldo			2.679	2.602

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-100: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Platin, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Platin, primär	0	0	0	0
Platin aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	14.241	13.452	84,8	80,1
Platin aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	4,19	4,16	0,01	0,01
KEA-Saldo			-84,8	-80,1

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-101: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Palladium, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Palladium, primär	56.468	426
Palladium aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	801	0,43
Palladium aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	0,17	0,001
DIERec		426

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-102: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Palladium, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Palladium, primär	1	0,01
Palladium aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	801	0,43
Palladium aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	0,17	0,001
	DERec	-0,42

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-103: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Palladium, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Palladium, primär	83.414	80.542	630	608
Palladium aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	14.244	13.455	8	7
Palladium aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	6,60	6,56	0,05	0,05
		KEA-Saldo	622	601

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 5-104: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Palladium, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Palladium, primär	0	0	0	0
Palladium aus Industrie- und Autokatalysatoren, der Glasindustrie und Elektroschrott, sekundär	14.244	13.455	7,57	7,15
Palladium aus dem Schmuck und Dentalbereich, sekundär	6,60	6,56	0,05	0,05
		KEA-Saldo	-7,62	-7,2

Quelle: eigene Zusammenstellung

5.9.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

5.9.5.1 Verwertungsmengen

Die abgeschätzten Verwertungsmengen weisen von 2007 bis 2015 Schwankungen auf. Diese können über die Preisentwicklung der beiden Metalle erklärt werden.

Tabelle 5-105: Abschätzung der Sekundärplatinproduktion 2007 – 2015

Verwertungsort und –art	Sekundärproduktion in kg								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundärplatin aus Scheideanstalten	1.436	1.508	1.384	1.261	1.261	1.282	1.521	1.417	1.412
Sekundärplatin aus der Raffination	10.841	2.996	6.401	7.799	17.286	4.664	5.956	7.659	7.716
Gesamt	12.277	4.504	7.785	9.059	18.546	5.946	7.477	9.076	9.128

Quelle: eigene Berechnungen, UBA 2008-2016, BMUB(a) 2008-2014; BMUB(b)

Abbildung 5-45: Zeitlicher Verlauf der Sekundärplatinproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kg

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Platin

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007-2015

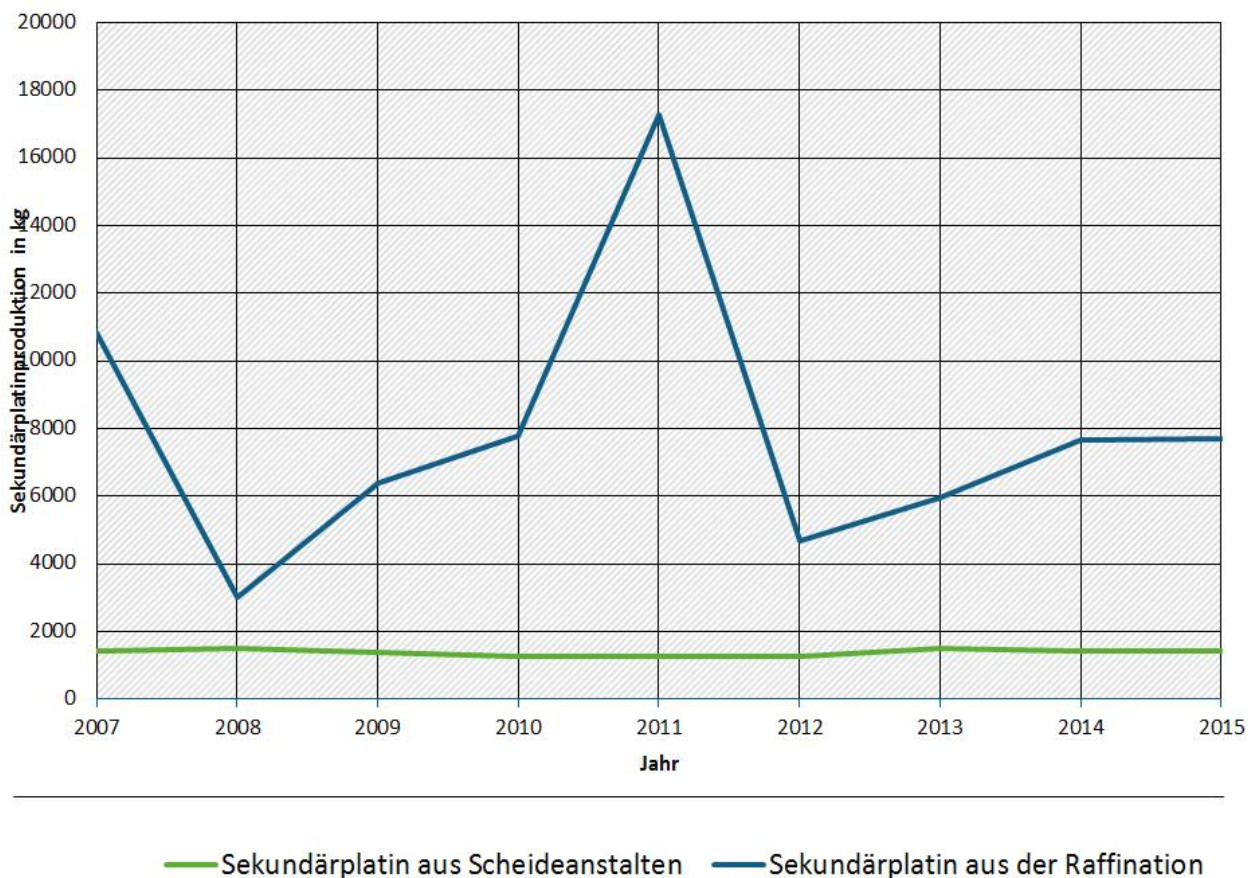


Tabelle 5-106: Abschätzung der Sekundärpalladiumproduktion 2007 – 2015

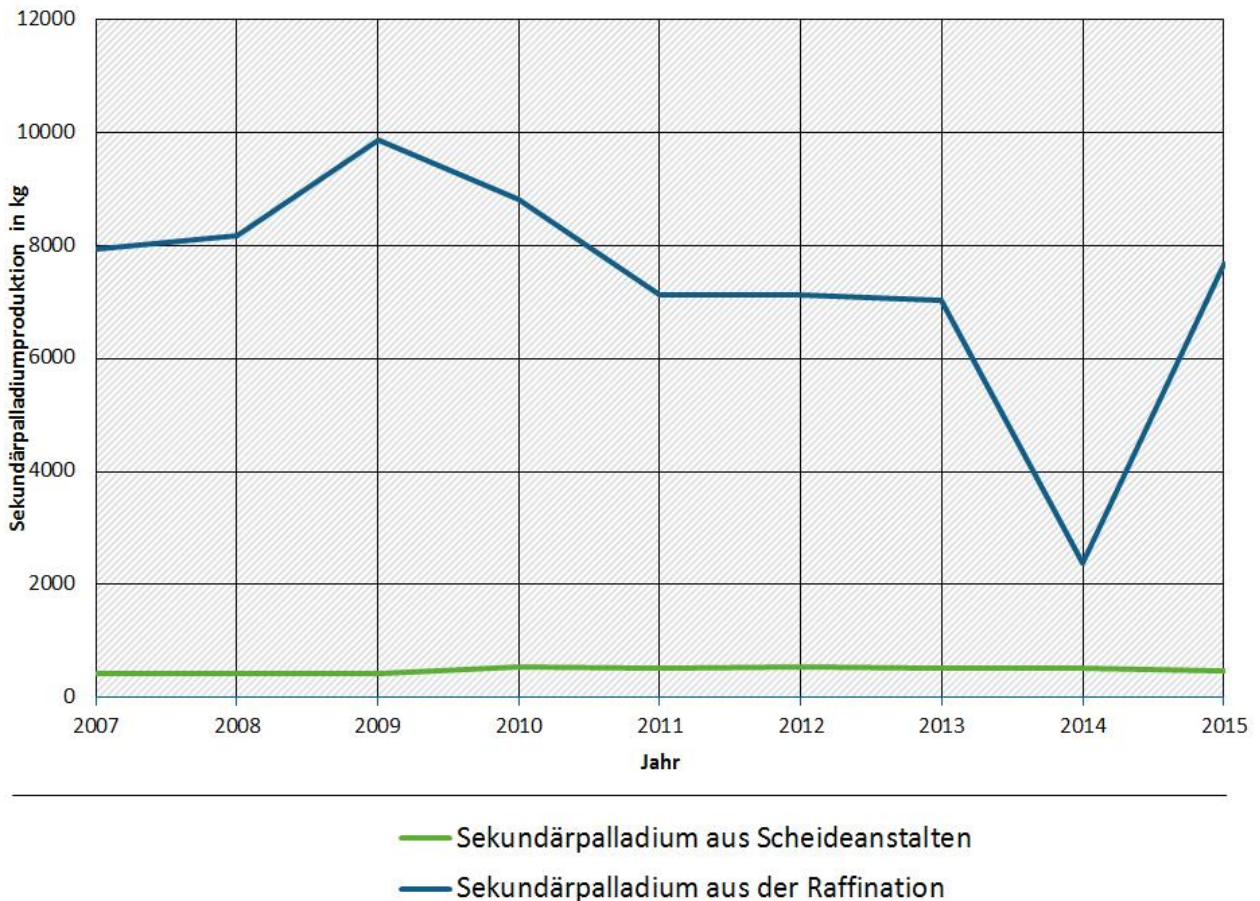
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kg								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sekundärpalladium aus Scheideanstalten	435	417	431	539	532	539	532	516	477
Sekundärpalladium aus der Raffination	7.926	8.171	9.867	8.826	7.128	7.121	7.018	2.370	7.678
Gesamt	8.361	8.588	10.297	9.365	7.660	7.660	7.550	2.885	8.155

Quelle: eigene Berechnungen, UBA 2008-2016, BMUB(a) 2008-2014; BMUB(b)

Abbildung 5-46: Zeitlicher Verlauf der Sekundärpalladiumproduktion in Deutschland von 2007-2015, in kg

In Deutschland erzeugte Sekundärproduktion insgesamt an Palladium

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007-2015



5.9.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo.

Tabelle 5-107: Indikatoren für Platin 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	4.021	1.476	2.550	2.968	6.074	1.948	2.450	2.973	2.990
DERec	kt	-8,68	-2,40	-5,12	-6,24	-13,84	-3,73	-4.767	-6,13	-6,18
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	4.385	1.623	2.787	3.239	6.611	2.132	2.680	3.247	3.265
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	-154	-43	-91	-111	-246	-66	-85	-109	-110

Tabelle 5-108: Indikatoren für Palladium 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	472	485	581	528	432	432	426	163	460
DERec	kt	-0,34	-0,33	-0,34	-0,42	-0,42	-0,43	-0,42	-0,41	-0,38
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	691	710	853	773	631	631	622	233	673
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	-6	-6	-6	-8	-8	-8	-8	-7	-7

6 Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege der mineralischen Rohstoffe

6.1 Recycling-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen

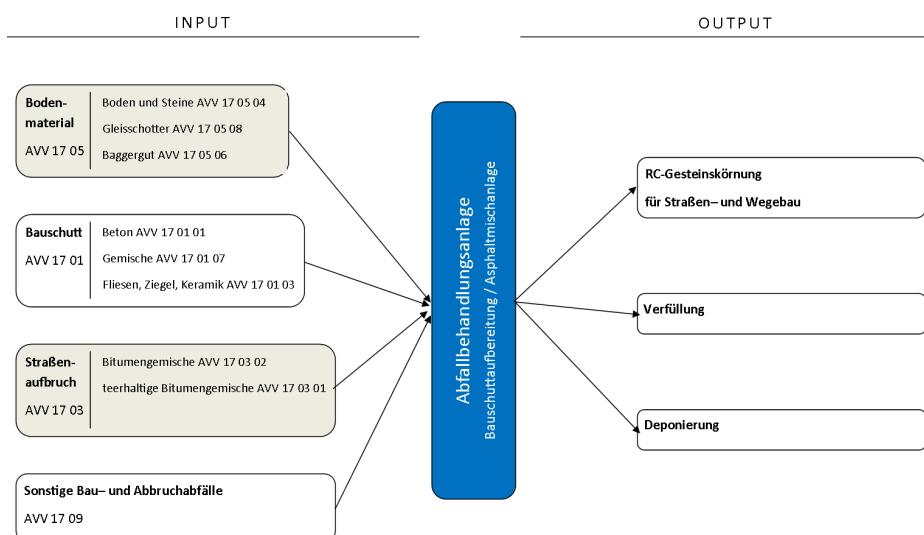
Aufgrund der rechtlichen Vorgabe durch das Umweltstatistikgesetz (UStatG) werden vom Statistischen Bundesamt regelmäßige Erhebungen zum Abfallaufkommen, -behandlung und -verbleib von Abfällen durchgeführt. Nach UStatG § 5 „Erhebung der Entsorgung bestimmter Abfälle“ Abs. 1 werden Bau- und Abbruchabfälle separat erhoben und ausgewiesen. Die erforderlichen Informationen werden von Betreibern von Abfallbehandlungsanlagen, Deponiebetreibern, Produzenten von industriellen Nebenprodukten wie z.B. Stahlwerksschlacken oder Behörden eingeholt, die Umgang mit nachweispflichtigen gefährlichen Abfällen haben. Die Erhebung erfolgt alle zwei Jahre und umfasst Angaben zur:

- ▶ Art und Menge der von Behandlungsanlagen angenommenen mineralischen Abfällen
- ▶ Art und Menge der daraus gewonnenen Erzeugnisse sowie entstandener nicht verwertbarer Abfälle
- ▶ die Anzahl, Art und Ort der Anlagen sowie deren Kapazität.

Auf der Inputseite einer Behandlungsanlage werden Bau- und Abbruchabfälle gemäß den Abfallschlüsseln des Europäischen Abfallverzeichnisses (EAV) des Abfallkapitels 17 „Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten)“ ermittelt (Statistisches Bundesamt 2016). Zu dieser Abfallart gehören: Boden (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten), Steine und Baggergut (EAV-Schlüssel 1705), Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik (EAV-Schlüssel 1701), Bitumengemische, Kohlenteer und teerhaltige Produkte (EAV-Schlüssel 1703) und Übrige Bau- und Abbruchabfälle wie Baustoffe auf Gipsbasis, Holz, Glas und Kunststoffe (EAV-Schlüssel 1702, 1704, 1706, 1708, 1709). Auf der Outputseite wird statistisch lediglich die für das Output-Erzeugnis geeignete Verwendungsmöglichkeit erfasst.

Die folgende Abbildung zeigt schematisch, welche Aspekte durch die Statistik ermittelt werden. Auf der Inputseite einer Behandlungsanlage wurden bewusst nur die relevantesten Abfälle dargestellt.

Abbildung 6-1: Übersicht über die relevantesten Abfallgruppen im Bau- und Straßenbau



Quelle: eigene Darstellung

In diesem Kapitel wird auf die Verwendungsoption Recycling-Gesteinskörnungen als mineralischer Ersatzbaustoff³⁷ fokussiert, und es werden daher nicht alle obengenannten Abfallarten der Inputseite näher betrachtet.

Metalle, Bitumengemische, gipshaltige Abfälle sowie Kunststoffe und Holz aus Bau- und Abbruchabfällen werden nicht in diesem Kapitel betrachtet, sondern in den folgenden Kapiteln „Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege der metallische Materialien“ (Kapitel 5), „Asphaltgranulat“ (Kapitel 6.2), „Kraftwerksnebenprodukte“ (Kapitel 6.4), „Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege von Kunststoffen“ (Kapitel 7) und „Altholz“ (Kapitel 8.1).

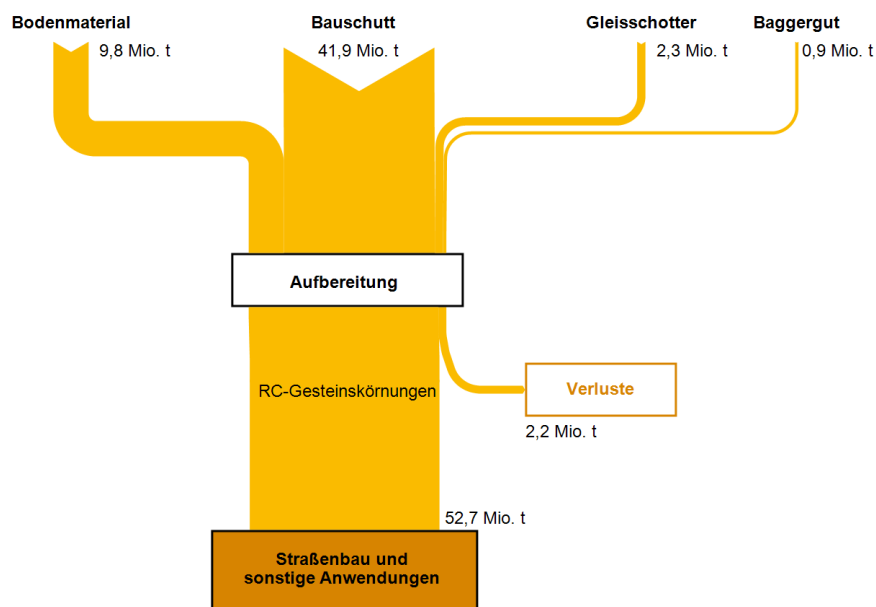
6.1.1 Materialeinsatz in Deutschland

Recycling-Gesteinskörnungen (RC-Gesteinskörnungen) werden vor allem im Straßen- und Wegebau (Frost- und Schottertragschicht) sowie im Erdbau (Verfüllung der Leitungsgewebe, Lärmschutzwälle) eingesetzt, um primäre Rohstoffe zu ersetzen (Knappe et al. 2015, Bleher et al. 2017). Es können prinzipiell auch Recyclinggesteinskörnungen gewonnen werden, die gleichwertig wieder im konstruktiven Bau als Betonzuschlag eingesetzt werden können. Sie weisen analoge bautechnische Eigenschaften zu Kiesen und gebrochenen Natursteinen auf und können dazu beitragen, diese wertvollen Rohstoffvorkommen zu schonen. Auch wenn dieses Einsatzfeld im Wachsen begriffen ist und von der Öffentlichen Hand unterstützt wird, sind die Einsatzmengen im Vergleich zum Straßen- und Wegebau noch sehr gering (Müller et al. 2017).

6.1.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die Stoffströme von RC-Gesteinskörnungen aus Bau und Abbruchabfällen zur Verwertung. Die Stoffströme beziehen sich auf die Verwendung von in Deutschland angefallenem Abfallaufkommen.

Abbildung 6-2: RC-Gesteinskörnungen-Stoffströme und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2013, in Mio. t



Quelle: Bleher et al. (2017)

³⁷ Mineralische Ersatzbaustoffe nach Neuverordnung Ersatzbaustoffverordnung (EBV) entstehen aus z.B.: Bodenmaterial, Baggergut, Gleisschotter.

Daten zum Aufkommen und Verbleib von RC-Gesteinskörnungen in Deutschland für das Jahr 2013 stammen aus der Studie „Planspiel Mantelverordnung (Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes) - Planspiel mit dem Ziel einer Gesetzesfolgenabschätzung zu den Auswirkungen der Mantelverordnung“ (Bleher et al. 2017). In der obengenannten Studie wurden Aufkommen und Verbleibe der in Deutschland entstehenden mineralischen Ersatzbaustoffe wie Bauschutt, Straßenaufbruch, Bodenmaterial, Gleisschotter und Baggergut abgebildet.

In der Abbildung 6-2 wurden ausschließlich die Mengen an RC-Material dargestellt, die nach der Aufbereitung zur Verwertung im Straßen und Wegebau sowie im Erdbau verwertet werden. Für den Verwendungspfad als Gesteinskörnung für Betonanwendungen im Hochbau liegen keine statistischen Daten vor. Das Umweltbundesamt schätzt das Volumen derzeit auf 0,5 bis 1 Mio. t. Diese werden aufgrund der großen Unsicherheiten nicht gesondert abgebildet. Bei der Zerkleinerung von gesammelten Materialien zur Produktion von RC-Gesteinskörnungen wurden Verluste von 4 % angenommen.

6.1.3 Verwertungswege

Tabelle 6-1 stellt die Verwendungsmenge von RC-Gesteinskörnungen und deren Substitutionsäquivalente abschließend zusammen dar:

Tabelle 6-1: Sekundäre Produkte aus der Verwertung von in Deutschland anfallenden RC-Gesteinskörnungen und deren Substitutionsäquivalente

Erzeugtes Sekundärprodukt	Erzeugte RC-Gesteinskörnungen [Mio. t]	Einsatzbereich	Substitutionsäquivalent
RC-Gesteinskörnungen	52,7	Straßenbau, sonstige Anwendungen	natürliche Gesteinskörnungen

Quelle: Bleher et al. (2017)

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ Die gesamte Produktion von Gesteinskörnungen betrug 497 Mio. t³⁸. Davon stammen 11 % aus Bauschutt, Gleisschotter, Baggergut und Boden.
- ▶ Da die vorliegende Untersuchung nur die als RC-Gesteinskörnungen aufbereiteten Bau- und Abbruchabfälle im Fokus hat, kann in diesem Kapitel keine Aussage abgeleitet werden, welcher Anteil des gesamten Bau- und Abbruchabfallaufkommens einer stofflichen Verwertung zugeführt wurde.

6.1.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Produktion der natürlichen Gesteinskörnungen wurde von Anteilen von 50 % Kies und 50 % Schotter ausgegangen. Für die Aufbereitung der Abfälle zu Sekundärmaterial (Ersatz natürlicher Gesteinskörnungen) wurde das Brechen der Steine abgebildet. Da die Primär- und Sekundärgesteinskörnungen nahezu ausschließlich inländisch gewonnen werden, sind DIERec und DERec sowie die KEA Salden inklusive und ohne ausländische Vorketten identisch.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

³⁸ 228 Mio. t Primärproduktion von Bausand, Kies u.a.; 211 Mio. t Primärproduktion von gebrochenem Naturstein, 53 Mio. t RC-Gesteinskörnung aus Bauabfällen, Gleisschotter, Baggergut, Bodenmaterial; 1 Mio. t RC-Gesteinskörnung aus Ausbauphosphat; 4 Mio. t Gesteinskörnung aus Stahlwerksschlacken

Tabelle 6-2: Ergebnisse für die Indikatoren DIERec (inkl. der ausländischen Vorkette) und DERec (ohne ausländische Vorkette) für RC-Gesteinskörnungen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Natürliche Gesteinskörnungen, primär	1,05	55.086
RC-Gesteinskörnung, sekundär	0,00038	20
DIERec und DERec		55.066

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-3: KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorkette für RC-Gesteinskörnungen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Natürliche Gesteinskörnungen, primär	0,07	0,06	3.735	3.339
RC-Gesteinskörnung, sekundär	0,008	0,007	433	389
KEA-Saldo			3.302	2.951

Quelle: eigene Zusammenstellung

6.1.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

6.1.5.1 Verwertungsmengen

Die abgeschätzten Verwertungsmengen variieren in der Zeitspanne von 2007 bis 2014 nur leicht (maximal 7 %). Als Datenquelle wurden die alle zwei Jahre erscheinenden Berichte „Mineralische Bauabfälle – Monitoring“ (Kreislaufwirtschaft Bau 2011 a, 2011 b, 2013, 2015, 2017) verwendet. Die fehlenden Daten für die Zwischenjahre 2007, 2009, 2011 und 2013 wurden mithilfe der vorhergehenden und nachfolgenden Jahre linear interpoliert. Für 2015 liegen noch keine Daten vor.

Mit diesen Annahmen ergeben sich folgende Verwertungsmengen von 2007 bis 2014:

Tabelle 6-4: Abschätzung der Produktion von RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen, ohne Straßenaufbruch, 2007 – 2014

Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in Mio. t							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
RC-Gesteinskörnung zur Verwertung im Straßen- und Wegebau und Tiefbau	51,45	52,15	50,49	48,83	48,96	49,10	52,70	54,80

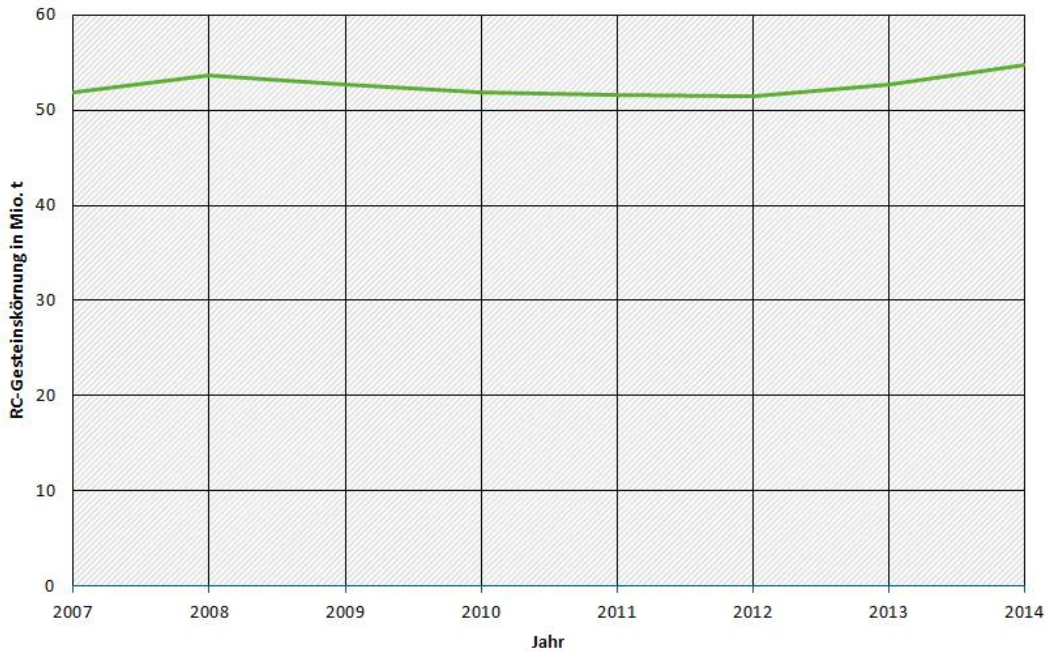
Quelle: Bleher et al. (2017), Kreislaufwirtschaft Bau (2011 a, 2011 b, 2013, 2015, 2017), eigene Berechnungen

Die nachfolgende Abbildung zeigt den sehr gleichförmigen zeitlichen Verlauf der Summe der Sekundärproduktion von RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen in Mio. t.

Abbildung 6-3: Zeitlicher Verlauf der Sekundärproduktion von RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen in Deutschland von 2007-2014, in Mio. t

In Deutschland erzeugte Mengen insgesamt an RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2014



— Gesteinskörnung

Quelle: Bleher et al. (2017), Kreislaufwirtschaft Bau (2011 a, 2011 b, 2013, 2015, 2017), eigene Berechnungen

6.1.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den abgeschätzten Verwertungsmengen ergeben sich folgende Zeitreihen für die Indikatoren DIERec, DERec und KEA-Saldo. Da die Primär- und Sekundärgesteinskörnungen nahezu ausschließlich inländisch gewonnen werden, sind DIERec und DERec identisch.

Tabelle 6-5: Indikatoren für RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec und DERec	kt	54.234	56.010	55.070	54.129	53.920	53.711	55.070	57.264	57.264
KEA-Saldo	TJ	3.224	3.268	3.164	3.059	3.068	3.077	3.302	3.434	3.434

Im Anhang sind die Indikatoren differenziert nach den vier Materialkategorien mineralisch-Metalle, mineralisch-nichtmetallisch, Energierohstoffe nicht erneuerbar und biotische Rohstoffe differenziert aufgeteilt.

6.2 Asphaltgranulat

Als Altasphalt bzw. Ausbaupasphalt werden bitumen- und teerhaltige Materialien aus Straßendecken und Dichtungsschichten bezeichnet, die durch Fräsen oder Aufbrechen stückig oder in Schollen gewonnen werden. Nach einer anschließenden Zerkleinerung spricht man von Asphaltgranulat. Die Klassifizierung von Asphaltgranulat erfolgt nach den TL AG StB anhand von Kennwerten für die einzelnen Eigenschaften und Merkmalsgrößen des Asphaltgranulates und seiner Bestandteile (DAV Wiederverwendung 2014).

6.2.1 Materialeinsatz in Deutschland

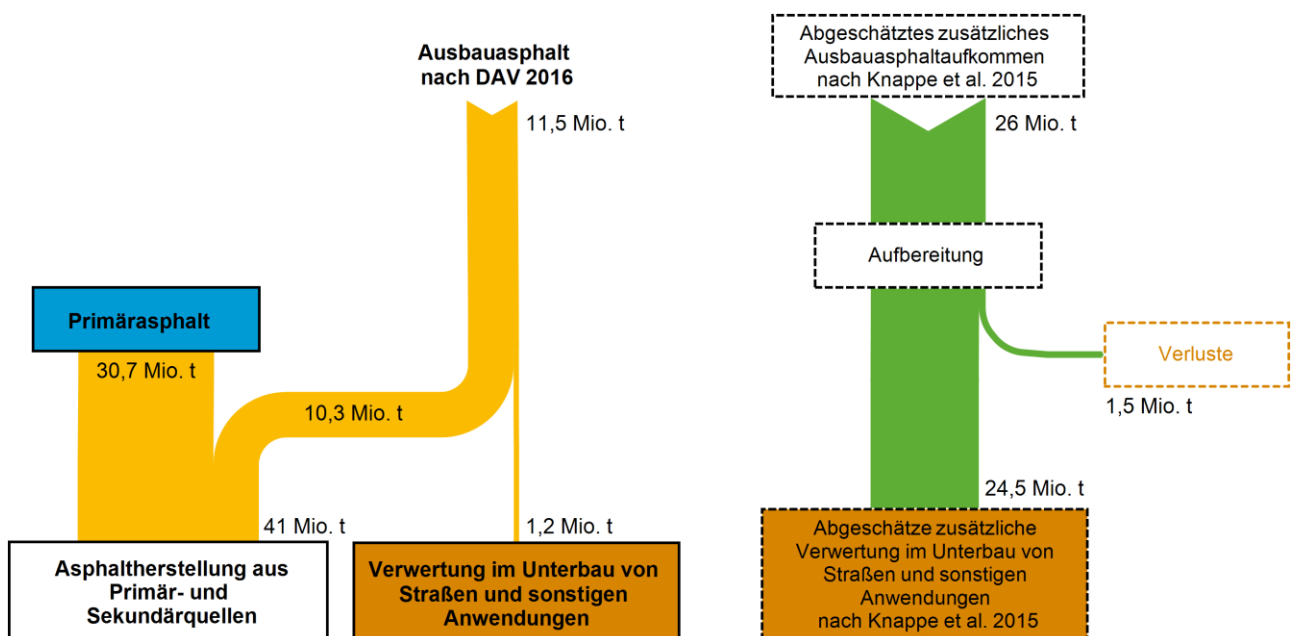
Bei einer hochwertigen Verwertung wird das Asphaltgranulat durch Zugabe zu einem Asphaltmischgut zur Herstellung von Asphalttschichten eingesetzt. Die maximal mögliche Zugabemenge von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut richtet sich nach der Eignung des Asphaltgranulats für das vorgesehene Asphaltmischgut (Mix Design), der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates und den maschinentechnischen Voraussetzungen der jeweiligen Asphaltmischanlage, wobei der kleinste der drei Werte für die Zugabemenge zugrunde zu legen ist (DAV Wiederverwendung 2014).

Bei einem Teil des anfallenden Asphaltgranulats erfolgt jedoch ein Downcycling im Straßenunterbau und ähnlichen Anwendungen. Hierbei wird es gemäß DAV Wiederverwendung (2014) bei der Herstellung von Schichten ohne Bindemittel, Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln oder bitumengebundenen Tragschichten in Kaltaufbereitung verwendet, wenn die in diesen Regelwerken festgelegten Anforderungen an die Baustoffgemische eingehalten werden.

6.2.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die Stoffströme von Asphaltgranulat. Die Stoffströme beziehen sich auf die Verwendung von in Deutschland angefallenem Asphaltgranulat.

Abbildung 6-4: Asphaltgranulat-Stoffströme und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2013, in Mio. t



Quelle: eigene Schätzung nach Deutscher Asphaltverband e.V. (2016) und Knappe et al. (2015)

Nach dem Deutschen Asphaltverband e.V. (2016) liegt das Aufkommen für das Jahr 2013 bei 11,5 Mio. t. Dabei wurden im Jahr 2013 10,3 Mio. t Sekundärmaterial in der Asphalttherstellung eingesetzt. In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass diese Zahl der Menge von aufbereitetem Altasphalt zum

Einsatz in der Asphaltherstellung entspricht. Weiterhin wurden nach Deutschen Asphaltverband e.V. (2016) 1,2 Mio. t zur Verwertung im Unterbau von Straßen und sonstigen Anwendungen verwendet.

Im Sankey-Diagramm sind die Zahlen des DAV mit durchgezogenen Linien dargestellt. Im Gegensatz zu diesen Verbandszahlen zeigt das Sankey-Diagramm – mit gestrichelten Linien dargestellt – weitere Verwertungspfade basierend auf den Abschätzungen aus dem UBA-Projekt „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub“ (Knappe et al. 2015). Dort werden Mittelwerte zum Altasphaltaufkommen basierend auf Prognosen zur Bautätigkeit bis 2030 abgeschätzt. Das Referenzszenario bildet dabei die wahrscheinlichste Entwicklung bis 2030 ab und schätzt ein mittleres Aufkommen von 37,5 Mio. t/a Altasphalt. Diese Menge liegt deutlich höher als die Mengen, die derzeit vom Deutschen Asphaltverband (DAV) berichtet wurden.

Im entsprechenden UBA-Bericht wird die Abweichung folgendermaßen begründet: „Dies lässt sich dadurch erklären, dass viel Asphaltaufkommen auch aus Kleinbaustellen entstammt und als Gemisch anders deklariert in Bauschuttrecyclinganlagen gelangt. Hier ist es durchaus üblich, einen Altasphaltanteil in den ungebundenen Schichten für den Straßenbau von bis zu 10 % zu verwenden (zugelassen sind 30 %). Darüber hinaus werden einige Mengen auch in situ recycelt, die möglicherweise nicht in der Form in diesen Statistiken enthalten sind.“ (Knappe et al. 2015).

Für die Verwertung im Straßenunterbau und sonstigen Anwendungen nach Knappe et al. (2015) wird das geschätzte Aufkommen von 37,5 Mio. t Altasphalt abzüglich der in der Asphaltherstellung verwerteten Menge (10,3 Mio. t) und der Aufbereitungsverluste dargestellt. Diese Menge von 27,2 Mio. t stellt eine Maximalabschätzung dar, da es auch denkbar ist, dass Teilmengen keiner Verwertung zugeführt wurden. Sie ist um 26 Mio. t höher als in den DAV-Statistiken ausgewiesen (im Sankey-Diagramm als gestrichelte Linie). Bei der Zerkleinerung von Altasphalt zu Asphaltgranulat werden Verluste von 4 % eingerechnet. Mit diesen Annahmen errechnet sich schließlich eine denkbare zusätzliche Verwertung von 24,5 Mio. t Asphaltgranulat im Straßenunterbau und sonstigen Anwendungen (gestrichelte Linie).

6.2.3 Verwertungswege

Die folgenden Berechnungen beruhen auf den Daten nach Deutscher Asphaltverband e.V. (2016). Tabelle 6-6 stellt die Verwendungsmengen von Asphaltgranulat und deren Substitutionsäquivalente abschließend zusammen dar:

Tabelle 6-6: Sekundäre Produkte aus der Verwertung von in Deutschland anfallenden Asphaltgranulaten und deren Substitutionsäquivalente, 2013

Erzeugtes Sekundärprodukt	Menge [Mio. t]	Einsatzbereich	Substitutionsäquivalent
Asphaltgranulat zur Zugabe zu Asphaltmischgut	10,3	Asphaltherstellung	Primärasphalt
Gesteinskörnung	1,2	Straßenunterbau, sonstige Anwendungen	natürliche Gesteinskörnungen
Summe	11,5		

Quelle: DAV (2016)

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ 2013 wurden nach Deutscher Asphaltverband e.V. (2016) in Deutschland 41 Mio. t Asphalt produziert. Bei einem Einsatz von 10,3 Mio. t Asphaltgranulat ergibt sich ein Sekundärmaterialanteil von 25 %.

- ▶ 2013 betrug die gesamte Produktion von Gesteinskörnungen 497 Mio. t³⁹. Davon stammen 0,2 % aus sekundärem Asphaltgranulat.

6.2.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Primärasphaltproduktion wurde der Weltmix abgebildet.

Für die Produktion der natürlichen Gesteinskörnungen wurde von Anteilen von 50 % Kies und 50 % Schotter ausgegangen. Für die Aufbereitung der Abfälle zu Sekundärmaterial (Ersatz natürlicher Gesteinskörnungen) wurde das Brechen der Steine abgebildet.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 6-7: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Asphaltgranulat, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Asphalt, primär	1,06	10.888
Natürliche Gesteinskörnungen, primär	1,05	1.254
Asphaltgranulat in Asphaltmischgut, sekundär	0	3,9
Asphaltgranulat als Gesteinskörnung, sekundär	0	0,46
	DIERec	12.138

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-8: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Asphaltgranulat, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Asphalt, primär	1,06	10.888
Natürliche Gesteinskörnungen, primär	1,05	1.254
Asphaltgranulat in Asphaltmischgut, sekundär	0	3,9
Asphaltgranulat als Gesteinskörnung, sekundär	0	0,46
	DERec	12.138

Quelle: eigene Zusammenstellung

³⁹ 228 Mio. t Primärproduktion von Bausand, Kies u.a.; 211 Mio. t Primärproduktion von gebrochenem Naturstein, 53 Mio. t RC-Gesteinskörnung aus Bodenmaterial, Bauabfällen, Gleisschotter, Baggergut; 1 Mio. t Gesteinskörnung aus Ausbauasphalt; 4 Mio. t Gesteinskörnung aus Stahlwerksschlacken

Tabelle 6-9: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Asphaltgranulat, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Asphalt, primär	1,66	1,60	17.054	16.497
Natürliche Gesteinskörnungen, primär	0,07	0,06	85	76
Asphaltgranulat in Asphaltmischgut, sekundär	0,008	0,007	85	76
Asphaltgranulat als Gesteinskörnung, sekundär	0,008	0,007	10	9
KEA-Saldo			17.045	16.488

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-10: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Asphaltgranulat, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Asphalt, primär	1,66	1,60	17.054	16.497
Natürliche Gesteinskörnungen, primär	0,07	0,06	85	76
Asphaltgranulat in Asphaltmischgut, sekundär	0,008	0,007	85	76
Asphaltgranulat als Gesteinskörnung, sekundär	0,008	0,007	10	9
KEA-Saldo			17.045	16.488

Quelle: eigene Zusammenstellung

6.2.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

6.2.5.1 Verwertungsmengen

Aus den jährlichen Veröffentlichungen des Deutschen Asphaltverbands (2016 und frühere Jahrgänge) können die in Deutschland erzeugten Verwertungsmengen von Asphaltgranulat sowie deren Nutzung in Deutschland ermittelt werden. Die folgenden Zahlen für die Verwertung als Gesteinskörnung beziehen sich ausschließlich auf die veröffentlichten Zahlen des DAV. Wie in Kap. 6.2.2 erläutert, ist jedoch davon auszugehen, dass für den Zeitraum von 2007-2015 höhere Mengen verwertet wurden. Die Schätzung von Knappe et al. (2015), dass jährlich im Durchschnitt rund 37 Mio. t Straßenaufbruch anfallen, kann auf die gesamte Zeitreihe übertragen werden, da sich der Bestand an älteren und Straßen über den betrachteten Zeitraum nicht wesentlich verändert hat.

Tabelle 6-11: Abschätzung der Verwertungsmengen von Asphaltgranulat 2007 – 2015

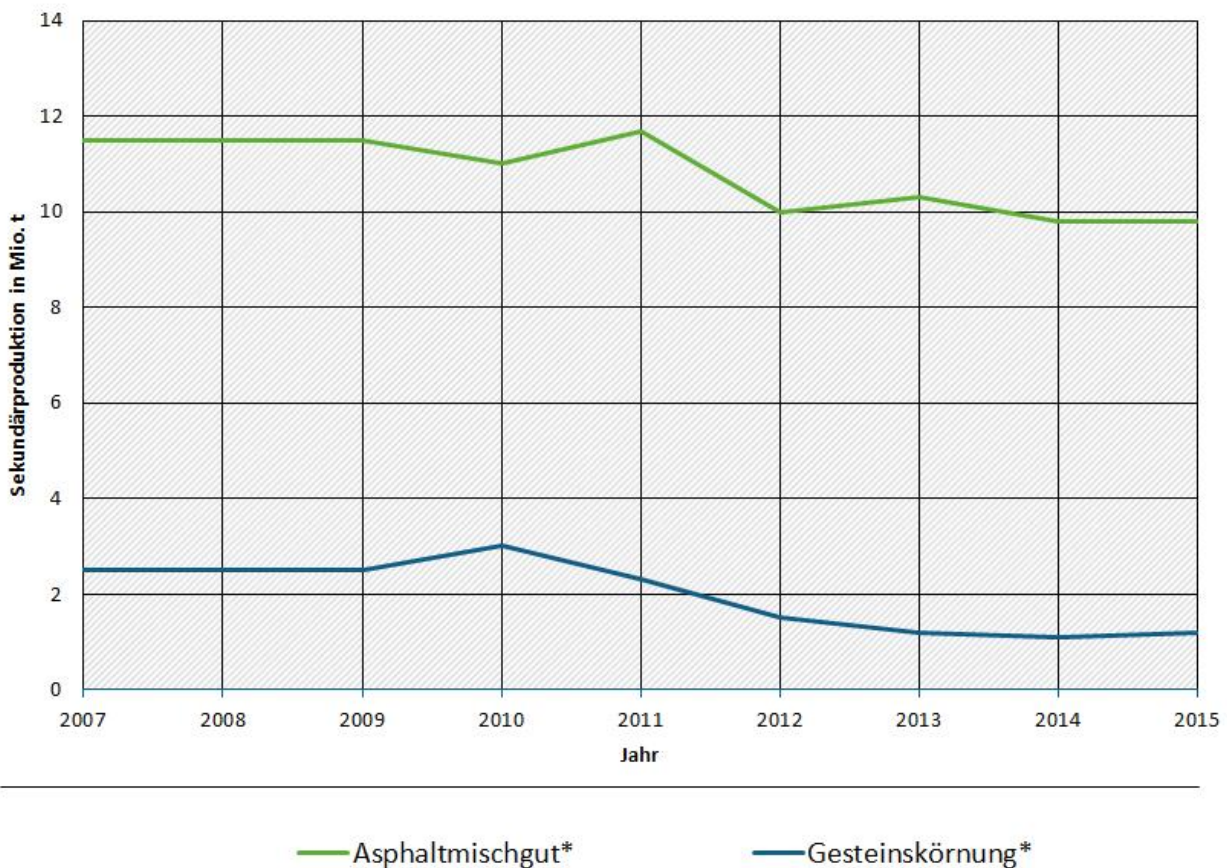
Verwertungsort und –art	Sekundärproduktion in Mio. t								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Asphaltgranulat als Gesteinskörnung	2,5	2,5	2,5	3	2,3	1,5	1,2	1,1	1,2
Asphaltgranulat in Asphaltmischgut	11,5	11,5	11,5	11	11,7	10	10,3	9,8	9,8
Summe	14	14	14	14	14	11,5	11,5	10,9	11

Die nachfolgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Summe der Sekundärproduktion in Mio. t. Auffallend ist ein Mengenrückgang für die hochwertige Verwertung in Asphaltmischgut von rund 10 % in den Jahren nach 2011. Im gleichen Zeitraum ist die Asphaltmischgutproduktion (primär und sekundär) mit rund 20 % noch stärker zurückgegangen, so dass der Sekundäranteil im Mischasphalt von 2011 bis 2015 von 84 % auf 90 % angestiegen ist (DAV 2016).

Abbildung 6-5: Zeitlicher Verlauf der Verwertung von Asphaltgranulat in Deutschland von 2007-2015, in Mio. t

In Deutschland verwertete Mengen von Asphaltgranulat

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2015



*nach DAV-Daten

Quelle: Jährliche Veröffentlichung des FEHS-Instituts und eigene Berechnungen

6.2.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Die prinzipiellen Substitutionswege verändern sich im Betrachtungszeitraum nicht. Aus den in Tabelle 6-24 dokumentierten Verwertungsmengen ergeben sich folgende DIERec- und DERec-Indikatoren sowie KEA-Salden für die Jahre 2007 bis 2015. Da angenommen wird, dass keine nennenswerten ausländischen Vorketten abgeschnitten werden müssen, ist der DERec gleich dem DIERec und die KEA-Salden sind identisch.

Tabelle 6-12: Indikatoren für Asphaltgranulat für 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec und DERec	1.000 t	14.765	14.765	14.765	14.759	14.767	12.135	12.138	11.505	11.610
KEA-Saldo	TJ	19.103	19.103	19.103	18.311	19.420	16.569	17.045	16.215	16.221

Im Anhang sind die Indikatoren differenziert nach den vier Materialkategorien mineralisch-Metalle, mineralisch-nichtmetallisch, Energierohstoffe nicht erneuerbar und biotische Rohstoffe differenziert aufgeteilt.

6.3 Schlacken und Hüttensande aus der Eisen- und Stahlerzeugung

Hochofen- und Stahlwerksschlacken entstehen während der Eisen- bzw. Stahlerzeugung als nichtmetallische Schmelzen. Sie bestehen zu einem Großteil aus Kalk (CaO), Tonerde (Al₂O₃) und Siliziumdioxid (SiO₂). Die Aufgabe der Hochofenschlacken ist die Bindung von Verunreinigungen des Eisenerzes (vorwiegend Tonerde und Sand) sowie der Kokskohle. Stahlwerksschlacken sollen wiederum Verunreinigungen des Roh Eisens wie Phosphor und Silicium abbinden und aufnehmen. Nach ihrer Abkühlung an der Luft liegen sie als künstliches, kristallines Gestein vor (FehS-Institut 2016b). Ihre Entstehung entspricht somit demjenigen natürlicher vulkanischer Gesteine wie Basalt. Einige Eisenhüttenschlacken sind für ihre baustofftechnischen Eigenschaften (i. W. Festigkeit, Frostsicherheit) bekannt, bei denen sie Naturgesteinen teilweise deutlich überlegen sind (Schüler et al. 2014).

Die Eigenschaften der Schlacken können durch gesteuerte Abkühlungs- und gezielte Nachbehandlungsprozesse anwendungsbezogen beeinflusst werden (Stoll et al. 2013). Durch die langsame Abkühlung der aus dem Roheisenerstellungsprozess entstehenden Schmelzen werden Hochofenstückschlacken gebildet. Wird die Schmelze in einem speziellen Verfahren mit Wasser schnell abgekühlt, entsteht glasiger Hüttensand. Hochofenstückschlacke und Hüttensand zählen zu den Hochofenschlacken. Stahlwerksschlacken hingegen gliedern sich in LD-Schlacken aus dem Sauerstoffblasverfahren und den Elektroofenschlacken aus dem Elektrolichtbogenofen und sekundärmetallurgische Schlacken aus dem Pffannenofen (FehS-Institut 2016c).

6.3.1 Materialeinsatz in Deutschland

Die Hochofen- und Stahlwerksschlacken werden umfangreich im Erd-, Straßen-, Wege-, Wasser- und Gleisbau sowie in der Zementindustrie eingesetzt. Geringere Mengen werden auch als Düngemittel verwendet. Tabelle 6-13 stellt die Verwendungsmengen in den unterschiedlichen Bereichen im Jahr 2013 dar.

Tabelle 6-13: Verwendung von Eisenhüttenschlacken in Deutschland in Mio. t, 2013

	Hochofenschlacke (ohne Hütten- sand)	Hüttensand	Stahlwerksschlacke	Summe (Eisenhüttenschlacken)
Zementindustrie		6,12	-	6,12
Baubereich	0,75	0,17	2,96	3,88
Düngemittel	-		0,51	0,51
sonstiges			0,38	0,38
Summe	0,75	6,29	3,85	10,89

Quelle: eigene Darstellung nach Merkel (2014) und Bialucha et al. (2014).

Zementindustrie

Hüttensande werden auf Grund ihrer latent-hydraulischen Eigenschaften und ihres bereits in kalzinierter Form enthaltenden Kalksteins als Klinkerersatz in der Zementherstellung eingesetzt. Die Motivation zur Nutzung von Sekundärrohstoffen in der Zementherstellung liegt somit vor allem in der Reduzierung des Brennstoffeinsatzes und den damit verbundenen CO₂-Emissionen bei der Klinkerherstellung. Zudem werden in geringerem Umfang auch Sekundärrohstoffe direkt in der Klinkerproduktion eingesetzt. Diese sind aber vor allem Gießereialtsande, Flugaschen oder Klärschlämme.

Im Jahr 2013 wurden in Deutschland 26,5 Mio. t Zement verbraucht. Davon wurden 24,7 Mio. t durch den Inlandsversand, d.h. durch die Produktion einheimischer Zementwerke abgedeckt. Hüttensande werden vor allem in den beiden Zementsorten „Hochofenzement“ (CEM III) und „Portlandhüttenzement“ (CEM II/S) eingesetzt. Der Anteil dieser beiden Zementsorten am Inlandsversand betrug im Jahr 2013 zusammen

39,3 %, bzw. 9,7 Mio. t. Zur Herstellung dieser Zementsorten wurden im Jahr 2013 6,12 Mio. t Hüttensand als ein relevanter Ausgangsstoff verwendet (Merkel 2013). Über die Zusammensetzung der Im- und Exporte nach Zementarten liegen keine Daten vor. Der Klinkeranteil der deutschen Zementindustrie ist im internationalen Vergleich jedoch geringer (VDZ 2015), so dass sowohl die Importe als auch die Exporte vor allem aus Portlandzement bestehen dürften, da der Marktanteil und die Nachfrage nach klinkerarmen Zementsorten außerhalb Deutschlands geringer ist.

Auch wenn unterschiedliche Zementsorten auf Grund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften nicht immer vollständig substituierbar sind, kann argumentiert werden, dass Portlandhüttenzement und Hochofenzement in der Regel durch Portlandzement ersetzt werden kann⁴⁰, wenn Hüttensande nicht mehr zur Verfügung stehen würden⁴¹. In diesem Fall hätten die im Jahr 2013 eingesetzten 6,12 Mio. t Hüttensand durch entsprechende Mengen an Zementklinker ersetzt werden müssen. Für die Herstellung von 1 t Zementklinker sind rund 1,55 t Rohstoffe (Kalkstein, Mergel, Korrekturstoffe) sowie 0,12 t Steinkohle als Brennstoff notwendig (Achternbosch/Bräutigam 2000). Allerdings wird der Brennstoffbedarf in der deutschen Zementindustrie zu mehr als 60 % durch Ersatzbrennstoffe gedeckt (62,6 % im Jahr 2013). Die restlichen fossilen Brennstoffe setzen sich zu 82 % aus Braunkohle, 11 % aus Steinkohle, 5 % Petrolkoks sowie geringe Mengen an Heizöl zur Anfeuerung der Öfen zusammen (VDZ 2015).

Baubereich

Die aus Eisen- und Stahlwerksschlacken industriell hergestellten Gesteinskörnungen werden im Straßen- und Wegebau als Schotter, Splitte, Brechsande oder Mineralstoffgemische insbesondere zur Herstellung von Tragschichten eingesetzt (Dehoust et al. 2008). Auch im Gleisbau sowie im Wasserbau für Kornfilter unterhalb des Deckwerks werden Gesteinskörnungsgemische aus Schlacke verwendet (FEhS 2016d, 2016e).

Darüber hinaus ist auch die kristalline Hochofenstückschlacke als Zuschlag mit Kornklasse 16/32 für Beton gut geeignet (Wendehorst 1994). Zudem wird Stahlwerksschlacke als Gesteinskörnung für Betonsteinpflaster erfolgreich eingesetzt (Verkehrswege 2004).

Düngemittel

Im Jahr 2013 wurden kalkhaltige Düngemittel aus Stahlwerksschlacken in relevanten Mengen eingesetzt. Das Düngemittel wurde aus Konverterschlacke hergestellt. Diese Schlacke liefert die kalksilikatischen Bestandteile und auch essenzielle Spurenelemente für die Pflanzenernährung. Das Düngemittel enthält hohe Anteile an Kalk, Magnesium und Kieselsäure sowie die Spurenelemente Mangan, Phosphat, Bor, Zink, Molybdän und Kupfer⁴² (AG Hüttenkalk 2016; Rheinkalk KDI 2016).

6.3.2 Stoffströme in Deutschland 2013

In Deutschland wurden im Jahr 2013 etwa 13,11 Mio. t Hochofen- und Stahlwerksschlacke produziert. Ein kleiner Teil (etwa 0,72 Mio. t) wurde als Kalk- und Eisenträger in die Eisen- und Stahlerzeugung zurückgeführt. Der überwiegende Anteil von knapp 90 % der in Deutschland angefallenen Eisenhüttenschlacken wurde direkt im selben Jahr verwertet. Ca. 6 % konnten nicht vollständig am Markt platziert werden, weshalb diese Menge im Jahr 2013 zwischengelagert⁴³ wurde. Der Rest von den im Jahr 2013 angefallenen Eisenhüttenschlacken wurde deponiert (5 %). Deponiert wurden vor allem feinkörnige Schlacken und

⁴⁰ Eine umgekehrte Substitution von Portlandzement durch andere Zementsorten mit geringerem Klinkeranteil ist aufgrund bautechnischer Anforderungen häufig nicht möglich. Dagegen kann Portlandzement problemlos durch Hochofenzement oder Portlandhüttenzement ersetzen werden.

⁴¹ Falls möglicherweise in Zukunft die Roheisenproduktion in Deutschland beendet werden würde.

⁴² Kalk und Magnesium (Gehalt zwischen 41-50 %, davon 1-10 % Magnesium), Kieselsäure (Gehalt zwischen 9-12 %), Spurenelemente (Mangan: 0,5-2 %, sowie Phosphat, Bor, Zink, Molybdän und Kupfer in löslicher Form)

⁴³ Die Zahlen aus dem Jahr 2014 zeigen den Abbau des Lagers (Merkel 2015).

Schlacken mit unzureichender Raumbeständigkeit sowie ein Teil der Schlacken aus der Erzeugung hochlegierter Stähle, für die entsprechende Anwendungsgebiete bisher fehlen (Merkel 2014) bzw. die aufgrund der Schadstoffgehalte die zulässigen Grenzwerte für potentielle Anwendungsgebiete überschreiten.

Das Aufkommen und der Verbleib von Eisenhüttenschlacken im Jahr 2013 in Deutschland ist in Tabelle 6-14 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

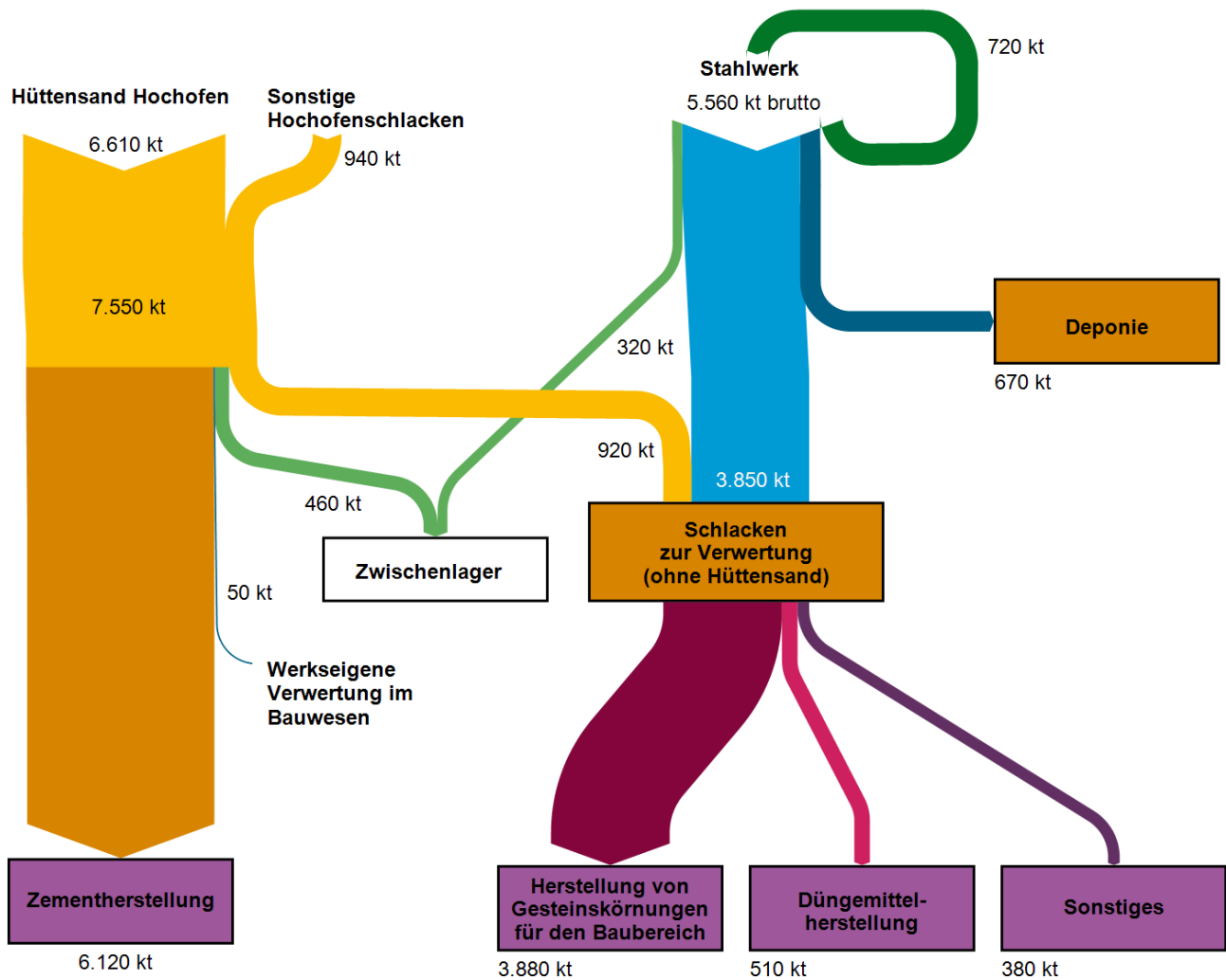
Tabelle 6-14: Aufkommen und Verbleib von Eisenhüttenschlacken in Deutschland in Mio. t, 2013

	Aufkommen	Prozess-rückführung	Verwertung	Zwischenlager	Deponie
Hochofenschlacke	7,55		7,09	0,46	-
davon Hüttensand	6,61		6,29		
Stahlwerksschlacke	5,56	0,72	3,85	0,32	0,67
Summe	13,11	0,77	10,89	0,78	0,67

Quelle: eigene Darstellung nach Merkel (2014) und Bialucha et al. (2014)

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die Stoffströme von Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung (einschließlich Hüttensand). Die Stoffströme beziehen sich auf die Verwendung, Zwischenlagerung und Deponierung von in Deutschland aufgekomenen Eisenhüttenschlacken. In der Bilanz werden keine internen Kreisläufe abgebildet, da im Projektrahmen nur die Massenströme der erzeugten und außerhalb der Stahlwerke verwerteten Nebenprodukte berücksichtigt werden.

Abbildung 6-6: Vereinfachte Darstellung der Schlackenströme aus der Eisen- und Stahlerzeugung (einschließlich Hüttensand) und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2013, in kt



Quelle: eigene Darstellung nach Merkel (2014) und Bialucha et al. (2014)

6.3.3 Verwertungswege

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Mengen der in Deutschland aufgekommenen Eisenhüttenschlacken und deren Substitutionsäquivalente.

Tabelle 6-15: Verwertete Hochofen- und Stahlwerksschlacken und deren Substitutionsäquivalente in Deutschland, 2013

Einsatzbereich	Verwertete Eisenhüttenschlacken [Mio. t]	Erzeugtes Sekundärprodukt Bezeichnung	Erzeugtes Sekundärprodukt [Mio. t]	Substitutionsäquivalent
Zementindustrie	6,12	Zement	6,12	9,45 Mio. t Klinkerrohstoffe, 0,73 Mio. t Steinkohle

Baubereich	3,88	Gesteinskörnung	3,72 ⁴⁴	3,93 Mio. t natürliche Gesteinskörnungen
Düngemittel	0,51	Konverterkalk mit 40 % Kalk (CaO), 10 % Magnesium (MgO) und 1 % Phosphat (P ₂ O ₅)	Dünger 0,49 ⁴⁴	0,2 Mio. t CaO, 0,05 Mio. t MgO, 0,005 Mio. t Phosphor
sonstige	0,38	vermutlich Verfüllung		
Summe	10,89		10,71	

Quelle: eigene Darstellung nach Merkel (2014) und Bialucha et al. (2014)

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ Es wurden 31,3 Mio. t Zement in Deutschland produziert. Aus der Verwertung von Hüttensand flossen rund 6 Mio. t als Klinker-Substitute in die Produktion ein. Dies entspricht einer Quote von 20 %.
- ▶ Die gesamte Produktion von Gesteinskörnungen betrug 497 Mio. t⁴⁵. Davon stammen 0,8 % aus Stahlwerksschlacken.

6.3.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Produktion natürlichen Gesteinskörnungen wurde 50 % des Kieses und 50 % des Schotters aus der Schweiz angenommen. Für die Düngerproduktion wurde die Zusammensetzung der Kalkdünger (CaO, MgO, P) abgebildet. Für die Aufbereitung der Schlacken als Sekundärmaterial (Ersatz von natürliche Gesteinskörnungen und Dünger) wurde der Aufwand für das Brechen von Steinen einberechnet.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Kenngrößen:

Tabelle 6-16: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: natürliche Gesteinskörnungen, primär	1,05	3.893
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: Dünger, primär	2,15 / 4,03 / 13,7 für CaO/MgO / P	685
Schlacken als Gesteinskörnung, sekundär	0	0,4
Schlacken als Dünger, sekundär	0	0,4
	DIERec	4.577

Quelle: eigene Zusammenstellung

⁴⁴ Es wurde angenommen, dass bei der Zerkleinerung der Schlacken 4 % Verluste auftreten. Die Annahme wurde gemäß ecoinvent „crushed gravel“ Datensatz getroffen.

⁴⁵ 228 Mio. t Primärproduktion von Bausand, Kies u.a.; 211 Mio. t Primärproduktion von gebrochenem Naturstein, 53 Mio. t RC-Gesteinskörnung aus Bodenmaterial, Bauabfällen, Gleisschotter, Baggergut; 1 Mio. t Gesteinskörnung aus Ausbauphalt; 4 Mio. t Gesteinskörnung aus Stahlwerksschlacken

Tabelle 6-17: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: natürliche Gesteinskörnungen, primär	1,05	3.893
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: Dünger, primär	2,15 / 4,03 / 13,7 für CaO/MgO / P	685
Schlacken als Gesteinskörnung, sekundär	0	0,4
Schlacken als Dünger, sekundär	0	0,4
DERec		4.577

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-18: KEA-Saldo inkl. der ausländischen Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: natürliche Gesteinskörnungen, primär	0,07	0,06	264	236
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: Dünger, primär	2,10	1,78	523	445
Schlacken als Gesteinskörnung, sekundär	0,008	0,007	32	29
Schlacken als Dünger, sekundär	0,008	0,007	2	2
KEA-Saldo			753	753

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-19: KEA-Saldo ohne ausländische Vorkette für Schlackenverwertung als Gesteinskörnung und Dünger, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: natürliche Gesteinskörnungen, primär	0,07	0,06	264	236
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung: Dünger, primär	2,10	1,78	523	445
Schlacken als Gesteinskörnung, sekundär	0,008	0,007	32	29
Schlacken als Dünger, sekundär	0,008	0,007	2	2
KEA-Saldo			753	753

Quelle: eigene Zusammenstellung

Untenstehend sind in den Tabellen die Ergebnisse für Hüttensand dargestellt.

Tabelle 6-20: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Hüttensand: Klinker, primär	1,81	11.081
Hüttensand Aufbereitung, sekundär	0	2,36
	DIERec	11.078

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-21: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Hüttensand: Klinker, primär	1,81	11.081
Hüttensand Aufbereitung, sekundär	0	2,36
	DERec	11.078

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-22: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Hüttensand: Klinker, primär	3,83	3,65	23.462	22.356
Hüttensand Aufbereitung, sekundär	0,008	0,007	50	45
	KEA-Saldo		23.412	22.311

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-23: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die substituierten Materialien durch Hüttensand, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Hüttensand: Klinker, primär	3,83	3,65	23.462	22.356
Hüttensand Aufbereitung, sekundär	0,008	0,007	50	45

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht- erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht- erneuerbar [TJ]
		KEA-Saldo	23.412	22.311

Quelle: eigene Zusammenstellung

6.3.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

6.3.5.1 Verwertungsmengen

Aus den jährlichen Veröffentlichungen des FEHS-Instituts für Baustoff-Forschung (Merkel, verschiedene Jahrgänge) können die in Deutschland erzeugten Mengen an Hochofen- und Stahlwerksschlacken sowie deren Nutzung in Deutschland ermittelt werden. Diese Daten berücksichtigen die Im- und Exporte von Hochofen- und Stahlwerksschlacken, weisen diese aber nicht explizit aus und unterscheiden sich in ihren Angaben daher leicht von den Zahlen in SST/DIW (2016), die diese Exporte herausrechnen.

Tabelle 6-24: Abschätzung der Verwertungsmengen von Hochofen- und Stahlwerksschlacken 2007 – 2015

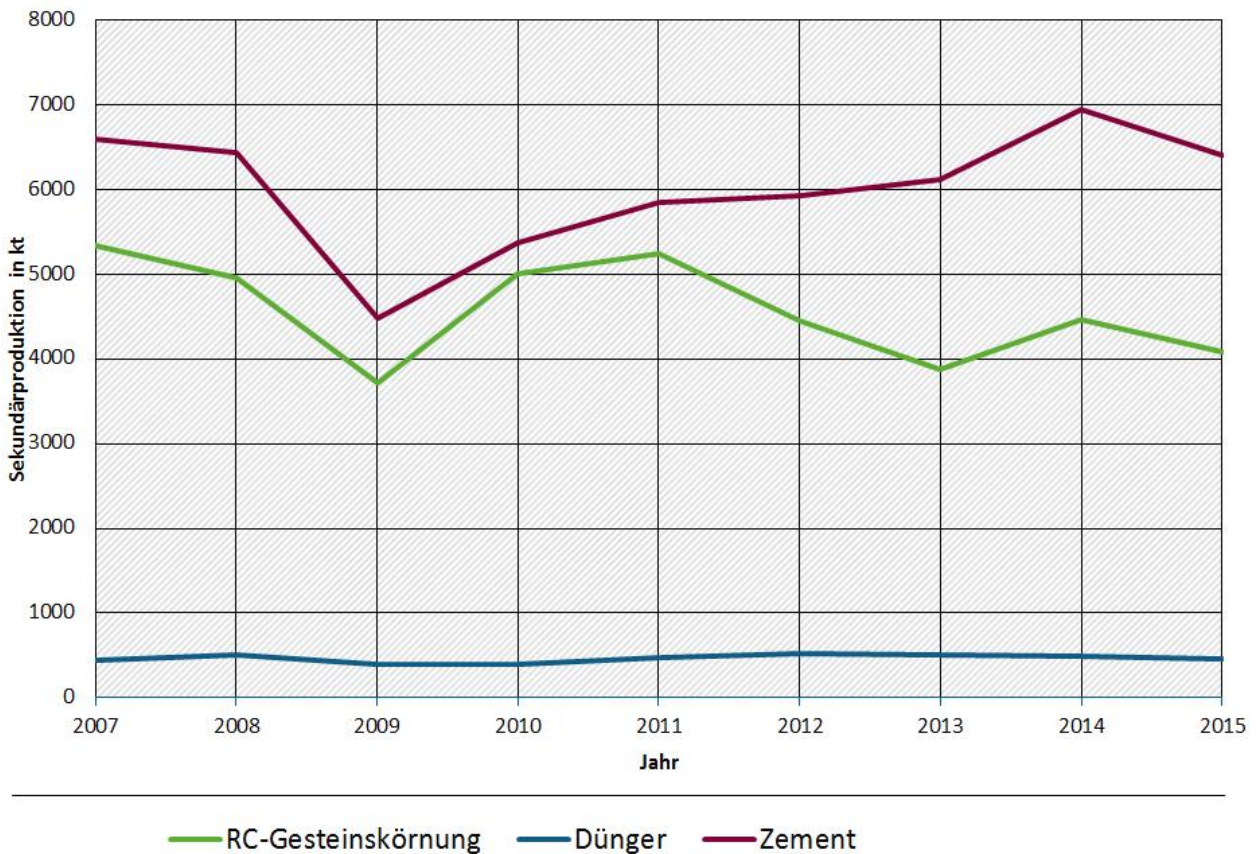
Verwertungsort und -art	Sekundärproduktion in kt								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Natürliche Gesteinskörnungen aus Schlacken	5.340	4.960	3.710	5.000	5.240	4.450	3.880	4.470	4.080
Düngemittel aus Schlacken	440	510	400	400	480	520	510	490	460
Klinikersubstitution durch Hüttensand	6.600	6.430	4.480	5.370	5.840	5.930	6.120	6.950	6.400
Summe	12.380	11.900	8.590	10.770	11.560	10.900	10.510	11.910	10.940

Die nachfolgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Summe der Sekundärproduktion in kt.

Abbildung 6-7: Zeitlicher Verlauf der Sekundärproduktion aus Hochofen- und Stahlwerksschlacken in Deutschland von 2007-2015, in kt

In Deutschland erzeugte Mengen insgesamt an Hochofen- und Stahlwerksschlacken

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2015



Quelle: Jährliche Veröffentlichung des FEHS-Instituts und eigene Berechnungen

Auffällig an den Verwertungsmengen ist die einmalig deutlich abnehmende Sekundärproduktion in 2009 als Folge der Wirtschaftskrise 2009. Weiterhin führt ab 2011 ein Rückgang des Anfalls von Stahlwerksschlacken auch zu einem Rückgang des Einsatzes als Gesteinskörnungen. Weitere Schwankungen der Produktionsmengen ergeben sich aus dem Zu- bzw. Abbau von Lagerbeständen und der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Großbaumaßnahmen (Merkel 2016).

6.3.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Die prinzipiellen Substitutionswege verändern sich im Betrachtungszeitraum nicht. Aus den in Tabelle 6-24 dokumentierten Verwertungsmengen ergeben sich folgende DIERec- und DERec-Indikatoren sowie KEA-Salden für die Jahre 2007 bis 2015. Wir gehen davon aus, dass keine nennenswerten ausländischen Vorketten abgeschnitten werden müssen. Daher ist der DERec gleich dem DIERec und auch die KEA-Salden sind identisch.

Tabelle 6-25: Indikatoren für Hochofen- und Stahlwerksschlacken für 2007 – 2015 in kt

Indikator	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec und DERec									
Klinkersubstitution durch Hüttensand	11.938	11.631	8.104	9.713	10.563	10.726	11.070	12.581	11.585
Gesteinskörnungen und Düngemittel aus Schlacken	5.949	5.661	4.259	5.553	5.902	5.164	4.578	5.144	4.712
Summe	17.887	17.292	12.363	15.266	16.465	15.890	15.648	17.725	16.297
KEA-Saldo									
Klinkersubstitution durch Hüttensand	25.248	24.598	17.138	20.543	22.341	22.685	23.412	26.587	24.483
Gesteinskörnungen und Düngemittel aus Schlacken	769	818	631	708	804	797	753	768	714
Summe	26.017	25.416	17.769	21.251	23.145	23.482	24.165	27.355	25.197

Im Anhang sind die Indikatoren differenziert nach den vier Materialkategorien mineralisch-Metalle, mineralisch-nichtmetallisch, Energierohstoffe nicht erneuerbar und biotische Rohstoffe differenziert aufgeteilt.

6.4 Kraftwerksnebenprodukte

6.4.1 Materialeinsatz in Deutschland

Bei der Verfeuerung von Stein- und Braunkohle in Kraftwerken fallen große Mengen sogenannter Kraftwerksnebenprodukten an. Neben Flugaschen sind dies in erster Linie Schmelzkammergranulate und Kesselasche/-sande und REA-Gips. Flugaschen und Kesselsande/Schmelzkammergranulate sind die mineralischen Bestandteile, die im Verbrennungsprozess des Kohlenstoffbestandteils übrigbleiben und entweder direkt aus dem Kesselraum abgeschieden werden (Kesselsande/Schmelzkammergranulat) oder aus dem Rauchgas gefiltert werden (Flugaschen/REA-Gips).

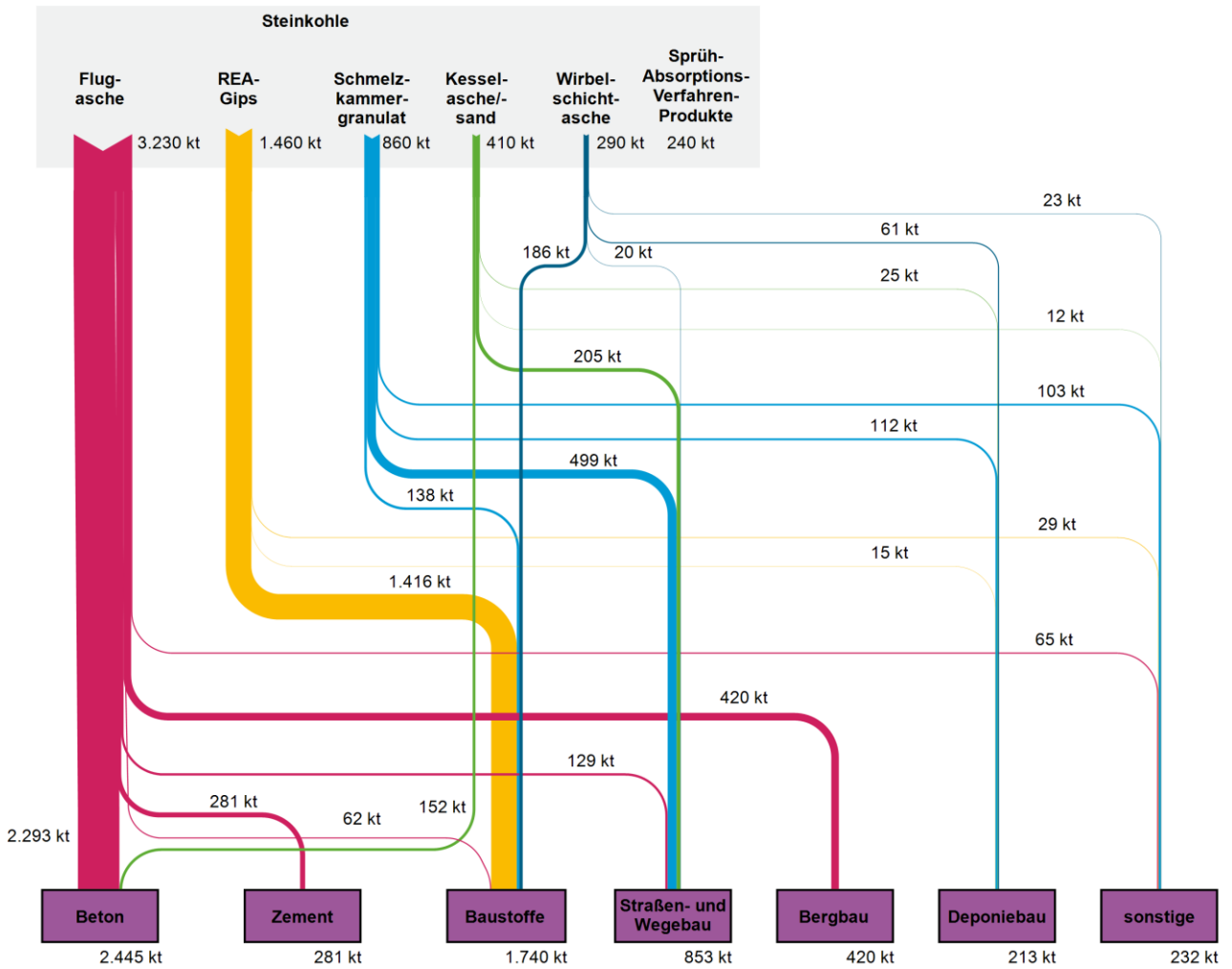
Steinkohleflugasche (SK-Flugasche) ist ein feinkörniger Staub, der hauptsächlich aus glasigen Partikeln besteht. Hauptbestandteile sind Siliziumdioxid (SiO_2) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) (Schießl 1990, Stock et al. 2013). Aufgrund dieser Zusammensetzung haben Steinkohleflugaschen puzzolanische Eigenschaften, die sie für die Zement- und Betonindustrie als Ersatzmaterial für Klinker bzw. Zement interessant machen. Braunkohleflugaschen werden demgegenüber entweder im Straßen- und Wegebau oder zur Verfüllung von Tagbauflächen verwendet. Der hohe Sulfat- und Freikalk-Gehalt, sowie die unterschiedlichen Qualitäten der Braunkohleflugaschen verhindern den Einsatz als Zuschlagstoff im Zement bzw. Beton (Briese et al. 2014).

REA-Gips (Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen) entsteht, wenn Rauchgas mit Hilfe von flüssiger Kalkmilch besprüht wird und so das Schwefeldioxid bindet. Anschließend wird Luft zugeführt, damit durch Oxidation Gips entsteht. Im folgenden Arbeitsschritt wird mit Hilfe des Hydrozyklonverfahrens das Wasser vom Gipsschlamm getrennt und der feuchte Gipsschlamm wird weiter entwässert und getrocknet. Dieser „künstliche“ Gips ist qualitativ vergleichbar mit Gips, der aus natürlichem Gipsstein oder Anhydrit hergestellt wurde.

6.4.2 Stoffströme in Deutschland

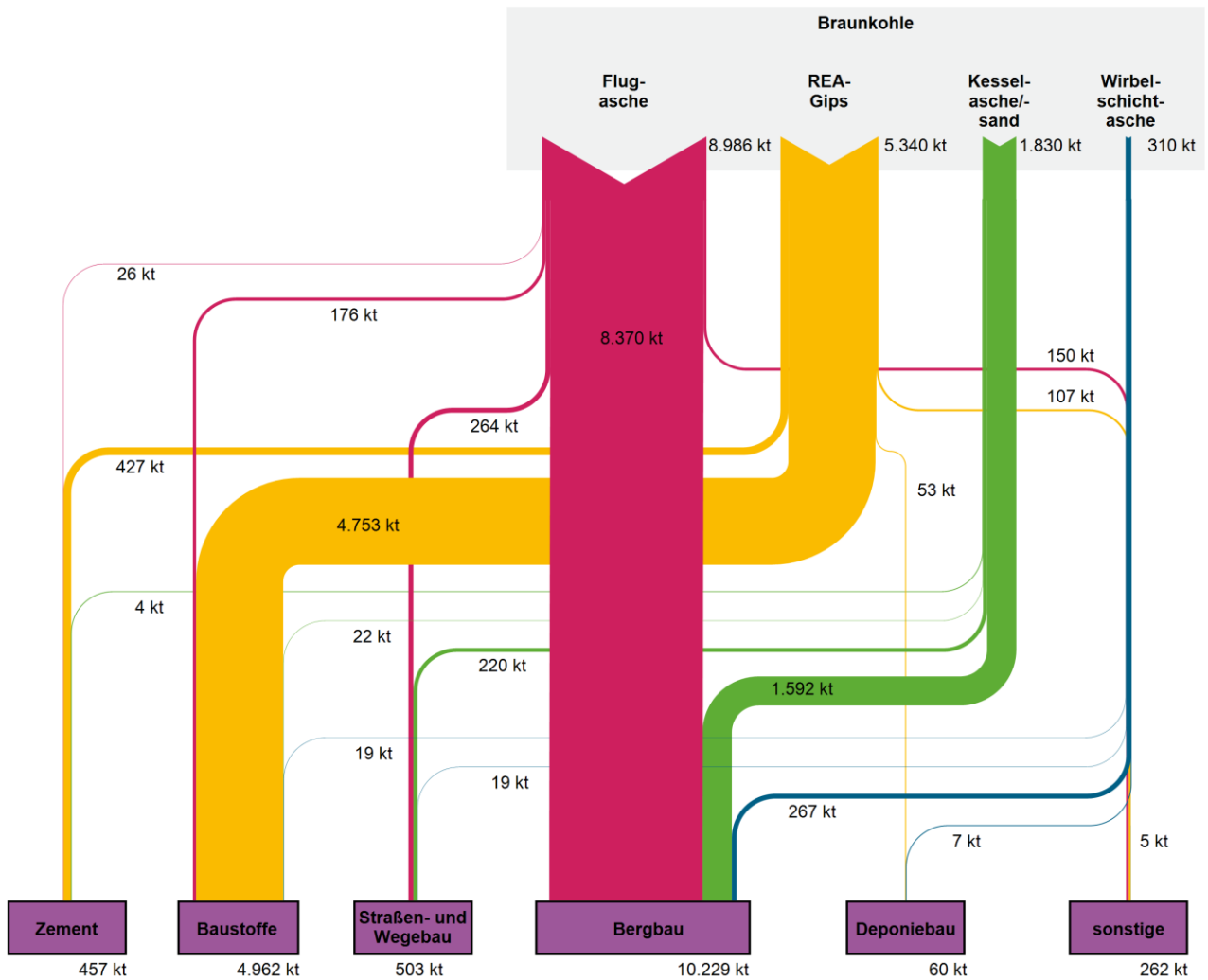
Die nachfolgenden beiden Sankey-Diagramme geben einen Überblick über die Stoffströme von Kraftwerksnebenprodukten, unterschieden nach Braun- und Steinkohlekraftwerken. Die Stoffströme beziehen sich jedoch auf die Erzeugung und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten in Deutschland im Jahr 2011, da für dieses Jahr noch detaillierte Daten vorlagen als für das Jahr 2013. Für die Berechnung der Indikatoren im nachfolgenden Kapitel 6.4.4 wurden jedoch die Daten des Jahres 2013 verwendet. Bis auf REA-Gips spielt der Außenhandel bei der Verwertung von Kraftwerksnebenprodukten keine Rolle. Daher ist der Außenhandel nicht mit abgebildet und für REA-Gips sind die in Deutschland verwendeten Mengen (also minus der Exporte und Zwischenlagerung) dargestellt.

Abbildung 6-8: Steinkohlekraftwerksnebenprodukte und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2011, in Mio. t



Quelle: eigene Darstellung nach VGB Powertech (2016)

Abbildung 6-9: Braunkohlekraftwerksnebenprodukte und deren Nutzung in Deutschland im Jahr 2011, in Mio. t



Quelle: eigene Darstellung nach VGB Powertech (2016)

In Deutschland wurden im Jahr 2011 etwa 44 Mio. t Steinkohle und 163 Mio. t Braunkohle in Kohlekraftwerken verfeuert. Bei diesen Verbrennungsprozessen entstanden 6,5 Mio. t Kraftwerksnebenprodukte im Bereich der Steinkohlekraftwerke und 16,3 Mio. t Kraftwerksnebenprodukte in Braunkohlekraftwerke. Flugaschen und REA-Gips sind dabei jeweils die relevanten Nebenprodukte.

Mit Ausnahme des REA-Gipses werden die Kraftwerksnebenprodukte aus der Braunkohleverbrennung fast ausschließlich zur Verfüllung in Tagebaugruben verwendet. Schmelzkammergranulate und Kesselaschen/Kesselsande werden zum Teil auch im Straßen- und Wegebau verwendet. Im Jahr 2011 wurden in den deutschen Kraftwerken rund 6,8 Mio. t REA-Gips produziert. Die Inlandsnachfrage nach REA-Gips ist jedoch geringer und liegt etwa bei 5 Mio. t. REA-Gips aus Steinkohlekraftwerken wird nahezu vollständig inländisch verwertet. Die unterschiedliche Produktqualität der Braunkohle-REA-Gips sorgt zum einen für höhere Anteile bei der Zwischenlagerung (rund 15 % der anfallenden Menge) (Briese et al. 2014). Die in Deutschland verbleibende Menge wird fast ausschließlich für Gipsprodukte oder als Zuschlagstoffe im Zement (ca. 0,3 Mio. t) verwendet. In geringen Mengen kommt der REA-Gips auch als Düngemittel oder für den Deponiebau zur Anwendung.

Kesselaschen/-sande und Schmelzkammergranulat aus der Steinkohlenverbrennung wird zur Hälfte im Straßen- und Wegebau eingesetzt, weitere relevante Einsatzgebiete sind der Deponiebau, die Funktion als Zuschlagsstoff in der Betonindustrie und zur Herstellung von Baustoffen.

Für REA-Gips und Steinkohlenflugaschen liegen mit der vor kurzem veröffentlichten Aktualisierung (SST/DIW 2016) der Ergebnisse von SST/DIW (2012) Zahlen über Entstehung und Verwendung für das Jahr 2013 vor. Demnach fielen in Deutschland 3,2 Mio. t Steinkohleflugaschen an. Der Zusammenschluss bayrischer Recycling-Unternehmen unter dem Namen Recycling Technologies Bayern (<https://www.recycling-technologies-bayern.de/index.php/rtb/Recycling-Loesungen/Aschen-und-Staeube/Flugasche>) veröffentlicht hingegen eine Produktionsmenge von 3,6 Mio. t für Steinkohleflugasche und knapp 9 Mio. t an Braunkohleflugaschen. Laut SST/DIW (2016) wurden im Jahr 2013 mit Hilfe der Rauchgasreinigung im Kalkwaschverfahren in Kraftwerken 7,2 Mio. t REA-Gips produziert. Rund 75 % dieser Produktionsmenge stammt dabei aus Braunkohlekraftwerken. 26,7 % des REA-Gips (oder 1,92 Mio. t) wurden exportiert (SST/DIW 2016), ein großer Teil davon nach Polen, woher wiederum der notwendige Kalkstein zur Rauchgasentschwefelung bezogen wurde (Hamm et al. 2004). Die Zahlen von SST/DIW unterscheiden sich von denen, die der Verband der Großkraftwerksbetreiber (VGB PowerTech, persönliche Kommunikation 2017) veröffentlicht, die nur die deutschen Produktionszahlen und ihre Verwendung betrachten. Mit Blick auf die Untersuchungen zu den Veränderungen im Zeitraum 2007 bis 2014 wurde zur Berechnung der Indikatoren nur die vorliegenden VGB Powertech-Zahlen der Jahre 2007-2014 verwendet, um eine einheitliche Datenbasis über alle Jahre zu nutzen und die Daten aus SST/DIW lediglich zum Abgleich der prozentualen Einsatzgebiete hinzugezogen.

Steinkohleflugaschen werden zu großen Teilen in der Betonherstellung als Zuschlagsstoff verwendet, zu geringen Teilen auch in der Zementindustrie oder als Verfüllungsstoff in Tagebaugruben. Braunkohleflugaschen werden im Normalfall nicht als Baustoffe verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Aschen aus den einzelnen Kraftwerken und Fördergebieten wäre der Aufwand für die notwendige Homogenisierung und Aufbereitung mit anderen Stoffen zu groß. Daher werden Braunkohleflugaschen fast vollständig zur Verfüllung von Tagebaugruben verwendet.

Die Kraftwerksnebenprodukte, die Primärmaterialien substituieren, werden an den Kraftwerksstandorten oder in der Nähe aufbereitet und zu einheitlichen und dauerhaften Qualität gemischt, die anschließend unter eigenen Produktbezeichnung verkauft werden. Über Verluste im Rahmen dieser Mischung und Homogenisierungsprozesse liegen keine Angaben vor.

Tabelle 6-26: Aufkommen und Verwertung von Kraftwerksnebenprodukten in Deutschland in Mio. t, 2011

Einsatzbereich	Aufkommen (in Mio. t)	Beton	Zement	Baustoffe	Straßen- und Wegebau	Bergbau	Deponiebau	Sonstige
Steinkohle	6,75							
Flugaschen	3,17	71%	8,7%		4%	13%		2%
REA-Gips	1,78			97%			1%	2%
Schmelzkammergranulat	0,86			16%	58%		13%	12%
Kesselasche/ Kesselsand	0,41	37%			50%		6%	3%
Wirbel-	0,29			64%	7%		21%	8%

Einsatzbereich	Aufkommen (in Mio. t)	Beton	Zement	Baustoffe	Straßen- und Wegebau	Bergbau	Deponiebau	Sonstige
schichtasche SAV-Produkt	0,24							
Braunkohle	16,33							
Flugaschen	8,81		0,3%	2%	3%	93%		1,7%
REA-Gips ⁴⁶	5,38		8%	89%			1%	2%
Kesselasche/ Kesselsand	1,83		0,2%	0,8%	12%	87%		
Wirbel- schichtasche	0,31			3,4%	6,1%	86%	2,3%	2,3%
Summe	23,08							

Quelle: eigene Darstellung nach Dehoust et al. 2008, VGB Powertech 2016, SST/DIW 2012, Briese et al. 2014.

6.4.3 Verwertungswege

Steinkohleflugasche ersetzt in der Betonindustrie einen Teil des Zements in der Betonmischung. Die Flugaschen wirken im Frischbeton zum einen wie ein Verflüssiger, der für eine bessere Verarbeitung von Transportbeton beiträgt. Andererseits erhöht Flugasche die Druckfestigkeit des Betons, weil die feinen Flugaschepartikel als Füllstoff die Dichte der Betonmischung erhöhen und zugleich aufgrund ihrer puzzolantischen Eigenschaften hydraulisch mit dem Zementleim reagieren.

Tabelle 6-27 stellt die Verwertungswege und Substitutionspotentiale von Steinkohleflugaschen in unterschiedlichen Bereichen im Jahr 2013 dar. Die Zahlen basieren auf Angaben des VGB Powertech und unterscheiden sich leicht von den Zahlen in SST/DIW (2016), die etwas höher sind. Laut VGB Powertech (verschiedenen Jahrgänge, persönlicher Kommunikation 2017) erzeugten die deutschen Kraftwerke im Rahmen der Verstromung von Kohle im Jahr 2013 3,17 Mio. t Steinkohleflugaschen. Davon wurden 2,25 Mio. t im Bereich der Betonherstellung verwendet, zumeist im Transportbeton. Ca. 275.800 t fanden Verwendung als Zuschlagsstoff in der Zementherstellung, üblicherweise in sogenanntem Portlandkompositzement (CEM II/-M). Im Straßen- und Wegebau wurden 126.800 t als Substitut für natürliche Gesteinskörnungen verwendet, sowie geringe Mengen von rund 63.400 t in verschiedenen Mörtel- und Estrichprodukten zugesetzt. Weitere 412.100 t der Steinkohleflugaschen wurden vor allem als Verfüllstoff im Tagebau verwendet.

Tabelle 6-27: Steinkohleflugaschen und deren Substitutionsäquivalente in Deutschland, 2013

Einsatzbereich	Verwertete Steinkohlenflugaschen [Mio. t]	Erzeugtes Sekundärprodukt Bezeichnung	Erzeugtes Sekundärprodukt [Mio. t]	Substitutionsäquivalent
Zementindustrie	0,28	Portlandkompositzement	0,28	0,43 Mio. t. Klinkerrohstoffe, 0,03 Mio. t fossile Brennstoffe

⁴⁶ Menge ist inkl. Exporte und Zwischenlager. Prozentuale Verwertung bezieht sich dagegen auf die inländische Verwertung (rund 3,5 Mio. t REA-Gips aus der Braunkohleverbrennung).

Einsatzbereich	Verwertete Steinkohlenflugaschen [Mio. t]	Erzeugtes Sekundärprodukt Bezeichnung	Erzeugtes Sekundärprodukt [Mio. t]	Substitutionsäquivalent
Transportbeton	2,25	Verschieden Handelsnamen, ersetzt Zement	2,25	3,49 Mio. t. Klinkerrohstoffe, 0,27 Mio. t fossile Brennstoffe
Straßen- und Wegebau	0,13	Gesteinskörnung	0,13	0,13 Mio. t natürliche Gesteinskörnung
sonstige	0,06		0,06	Nur als Eigengewicht
Summe	2,72			

Quelle: eigene Darstellung nach VGB Powertech

REA-Gips ersetzt natürlichen Gips. Die inländische Gesamtnachfrage nach Gips für Gipsplatten, Gipsverkleidung, Fließestrich oder Zuschlagstoffe in der Zementindustrie beträgt knapp unter 10 Mio. t, Diese wird mit 4,1 Mio. t aus natürlichem Gips gedeckt (SST/DIW 2016). In Abstimmung der Kraftwerksbetreiber und Gipsproduzenten hat sich die Qualität des REA-Gipses so stark verbessert, dass er mittlerweile qualitativ nahezu identisch ist mit natürlichem Gips. Laut VGB Powertech fielen im Jahr 2013 7,16 Mio. t REA Gips in Deutschland an. Davon wurden 10 % im Tagebau verfüllt, so dass ca. 6,6 Mio. t REA Gips stofflich verwertet wurden. Dabei fällt mit 97 % die Verwendung als Baustoff und dabei wiederum der größte Anteil (90 %, oder 5,83 Mio. t) als Ersatz für natürlichen Gips ins Gewicht. Weitere Einsatzgebiete sind als Zuschlagstoff in der Zementindustrie (0,6 Mio. t) und sonstige, nicht näher spezifizierte Einsatzbereiche mit 0,16 Mio. t. Weitere 46.000 t REA-Gips wurden nicht genutzt und erhöhten die Lagerbestände.

Tabelle 6-28: REA-Gips und dessen Substitutionsäquivalente in Deutschland 2013

Einsatzbereich	Verwertet REA-Gips [Mio. t]	Erzeugtes Sekundärprodukt Bezeichnung	Erzeugtes Sekundärprodukt [Mio. t]	Substitutionsäquivalent
Baustoffe	5,83	Gipserzeugnisse	5,83	Natürliche Gipsstein und Anhydrit
Zementherstellung	0,59	Zuschlagstoff	0,59	Zuschlagstoffe
Sonstige Sektoren	0,15	??	??	Nur Eigengewicht
Summe	6,62			

Quelle: eigene Darstellung nach VGB Powertech

6.4.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Zur Berechnung der Indikatoren werden die oben genannten Substitutionswege für Steinkohleflugaschen und REA-Gips dargestellt. Für den Aufwand der Aufbereitung von Flugaschen wird der gleiche Mahlprozess verwendet wie bei den anderen untersuchten mineralischen Materialien. Für REA-Gips wurden die Annahmen aus dem UBA-Projekt „Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten“ (Buchert et al. 2017) übernommen, die letztlich den Aufwand für Strom und Wärme zur Reduktion der Restfeuchte des Gipses darstellen, den die Kraftwerken an die verschiedenen Abnehmer liefert. Der sich daraus ergebende KRA bzw. KEA muss dem Einsparpotential der Substitution gegengerechnet werden. Der nicht weiter zu

spezifizierende Einsatz von REA-Gips in sonstigen Sektoren wurde nur mit seinem Eigengewicht ohne Substitutionsäquivalente gerechnet.

Tabelle 6-29: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Steinkohleflugaschen als Ersatz Klinker, primär	1,81	499
Steinkohleflugaschen als Ersatz Zement, primär	1,65	3.721
Steinkohleflugaschen als Ersatz natürliches Gestein, primär	1,05	134
Steinkohleflugaschen Aufbereitung, sekundär	0	1,05
	DIERec	4.353

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-30: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Steinkohleflugaschen als Ersatz Klinker, primär	1,81	499
Steinkohleflugaschen als Ersatz Zement, primär	1,65	3.721
Steinkohleflugaschen als Ersatz natürliches Gestein, primär	1,05	134
Steinkohleflugaschen Aufbereitung, sekundär	0	1,05
	DERec	4.353

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-31: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Steinkohleflugaschen als Ersatz Klinker, primär	3,83	3,65	1.057	1.007
Steinkohleflugaschen als Ersatz Zement, primär	3,55	3,25	7.990	7.311
Steinkohleflugaschen als Ersatz natürliches Gestein, primär	0,07	0,06	9	8
Steinkohleflugaschen Aufbereitung, sekundär	0,008	0,007	22	20
		KEA-Saldo	9.034	8.307

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-32: Saldo KEA ohne die ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Steinkohleflugaschen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Steinkohleflugaschen als Ersatz Klinker, primär	3,83	3,65	1.057	1.007
Steinkohleflugaschen als Ersatz Zement, primär	3,55	3,25	7.990	7.311
Steinkohleflugaschen als Ersatz natürliches Gestein, primär	0,07	0,06	9	8
Steinkohleflugaschen Aufbereitung, sekundär	0,008	0,007	22	20
		KEA-Saldo	9.034	8.307

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-33: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
REA-Gips als Ersatz für natürliches Gipsgestein, primär	1,01	5.840
REA-Gips als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung, primär	1,06	628
REA-Gips sonstige Sektoren, Eigengewicht	1	152
REA-Gips, Reduzierung Restfeuchte	0,06	414
	DIERec	6.206

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-34: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
REA-Gips als Ersatz für natürliches Gipsgestein, primär	1,01	5.840
REA-Gips als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung, primär	1,06	628
REA-Gips sonstige Sektoren, Eigengewicht	1	152
REA-Gips, Reduzierung Restfeuchte	0,22	414
	DERec	6.206

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-35: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
REA-Gips als Ersatz für natürliches Gipsgestein, primär	0,04	0,04	230	218
REA-Gips als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung, primär	0,07	0,06	42	38
REA-Gips sonstige Sektoren, Eigengewicht				
REA-Gips, Reduzierung Restfeuchte	0,32	0,29	2.126	1.933
		KEA-Saldo	- 1.854	- 1.678

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-36: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die substituierten Materialien durch REA-Gips, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [PJ]	KEA nicht-erneuerbar [PJ]
REA-Gips als Ersatz für natürliches Gipsgestein, primär	0,04	0,04	230	218
REA-Gips als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung, primär	0,07	0,06	42	38
REA-Gips sonstige Sektoren, Eigengewicht				
REA-Gips, Reduzierung Restfeuchte	0,32	0,29	2.126	1.933
		KEA-Saldo	- 1.854	- 1.678

Quelle: eigene Zusammenstellung

6.4.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

6.4.5.1 Verwertungsmengen

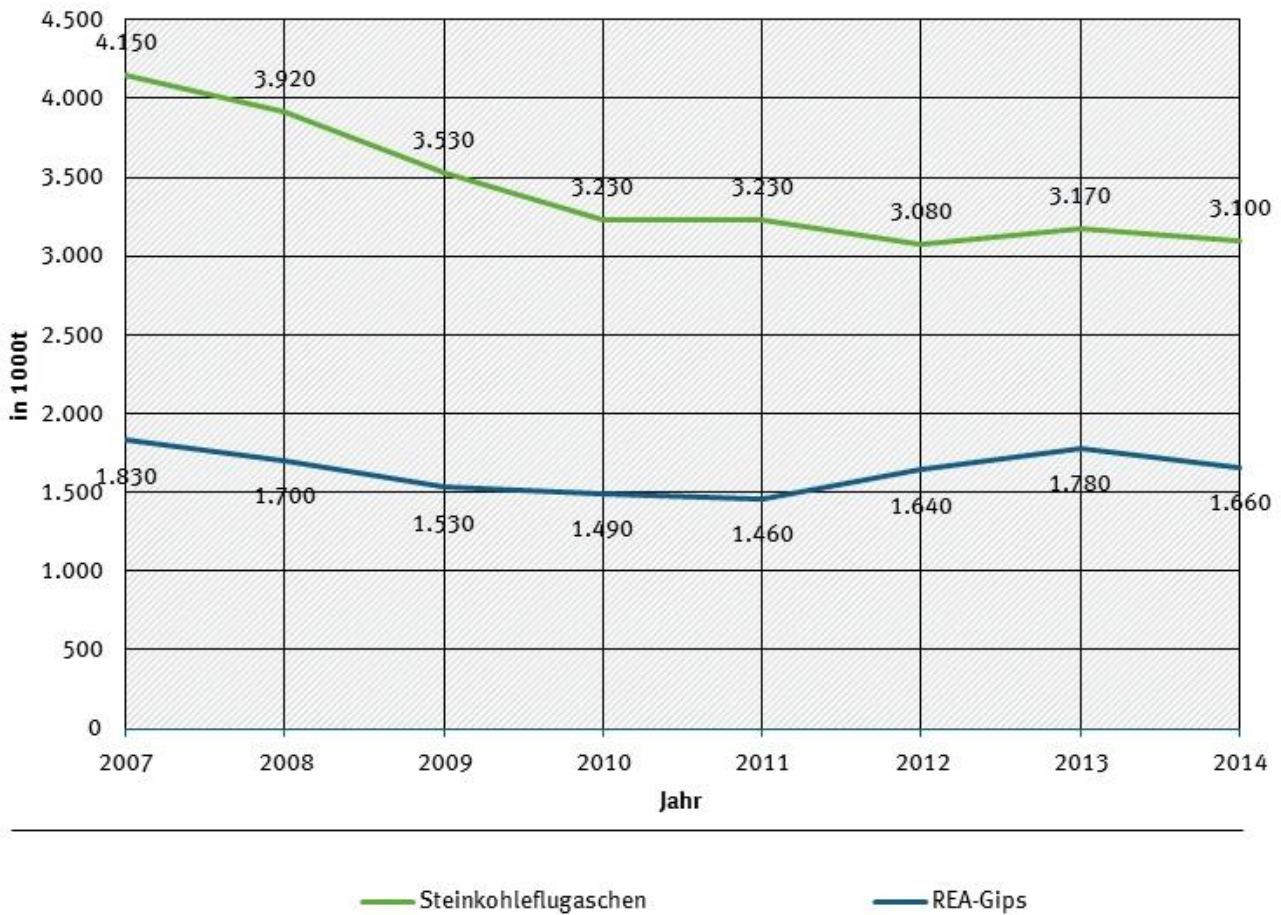
Aus den Daten über die Erzeugung und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten, die die VGB Power-tech jährlich erheben, wird ersichtlich, dass die erzeugte Menge an Steinkohleflugaschen mit dem Wandel der Energieversorgung in Deutschland kontinuierlich sank. Fielen im Jahr 2007 noch 4,1 Mio. t Steinkohleflugaschen an, reduzierte sich diese Menge bis 2013 auf 3,17 Mio. t und sank im Jahr 2014 weiter auf dann 3,1 Mio. t. Da die Energieversorgung durch Braunkohlekraftwerken nicht im gleichen Maße sank, ist das Aufkommen an Braunkohleflugaschen im Jahr 2014 mit 9,08 Mio. t sogar höher als im Jahr 2007 (8,9 Mio. t). Im Betrachtungszeitraum ist die Produktion von REA-Gips relativ stabil geblieben.: Im Jahr 2007 betrug die erzeugte Menge 7,1 Mio. t. Sie ist damit nahezu identisch zur Menge des Jahres 2013 (7,16 Mio. t) (siehe Abbildung 6-10). Bis auf den Rückgang in den Jahren 2009/2010 auf 6,6 Mio. t bzw. 6,32 Mio. t, bewegt

sich die erzeugte Menge an REA-Gips im Zeitraum 2007-2014 in einem Korridor zw. 6,8 Mio. t und 7,16 Mio. t.

Abbildung 6-10: Erzeugung von Steinkohleflugaschen und REA-Gips in Deutschland, 2007-2014

In Deutschland erzeugte Mengen insgesamt an REA-Gips und Steinkohleflugaschen

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2014



Quelle:

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von VGB Powertech

Über die Verteilung der Verwendung von Steinkohleflugaschen und REA-Gips liefern die Zahlen des VGB Powertech nur wenige Information, die vor allem den Mengenanteil durch Verfüllung im Tagebau sowie der Höhe des Zwischenlagers betreffen. Daher wurden zusätzlich zu diesen Informationen die prozentuale Verteilung der verschiedenen Verwendungsarten im Jahr 2014, wie sie aus den Daten der SST/DIW-Studie (2016) entnommen werden auf alle Jahre angewandt. Entsprechend verlaufen die Daten zu den einzelnen Verwendungsarten parallel zu den Daten der Erzeugung von Steinkohleflugaschen und REA-Gips.

Tabelle 6-37: Abschätzung der Verwertungsmengen von Steinkohleflugaschen 2007 – 2014

Verwertungsort	Sekundärproduktion in kt							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Steinkohleflugaschen als Ersatz	361	341	307	281	281	268	276	270

Verwertungsort	Sekundärproduktion in kt							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Klinker, primär								
Steinkohleflugaschen als Ersatz Zement, primär	2.946	2.783	2.506	2.293	2.293	2.187	2.251	2.201
Steinkohleflugaschen als Ersatz natürliches Gestein, primär	166	157	141	129	129	123	127	124
Steinkohleflugaschen Aufbereitung, sekundär	3.557	3.359	3.025	2.768	2.768	2.640	2.717	2.657

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von VGB Powertech

Tabelle 6-38: Abschätzung der Verwertungsmengen von REA-Gips 2007 – 2014

Verwertungsort	Sekundärproduktion in kt							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
REA-Gips als Ersatz für natürliches Gipsstein, primär	5.880	5.480	5.633	5.352	5.799	5.857	5.830	5.497
REA-Gips als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung, primär	598	557	573	544	590	596	593	559
REA-Gips sonstige Sektoren, Eigengewicht	193	180	160	154	176	170	152	155
REA-Gips, Reduzierung Restfeuchte	6.671	6.217	6.365	6.050	6.565	6.623	6.576	6.211

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von VGB Powertech

6.4.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Die Substitutionswege für Steinkohleflugaschen und REA-Gips verändern sich im Betrachtungszeitraum nicht. Aus den in den Tabellen Tabelle 6-37 und Tabelle 6-38 dokumentierten Verwertungsmengen von Steinkohleflugaschen und REA-Gips in den verschiedenen Einsatzbereichen ergeben sich folgenden DIERec- und DERec-Indikatoren sowie die KEA-Salden für die Jahre 2007 bis 2014. Wir gehen davon aus, dass keine nennenswerten ausländischen Vorketten abgeschnitten werden müssen. Daher ist der DERec gleich dem DIERec und die KEA-Salden sind identisch.

Tabelle 6-39: Indikatoren für Steinkohleflugaschen für 2007 – 2014

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
DIERec und DERec	kt	5.696	5.381	4.845	4.433	4.433	4.228	4.351	4.257
KEA-Saldo	TJ	11.826	11.171	10.059	9.205	9.205	8.777	9.034	8.834

Tabelle 6-40: Indikatoren für REA-Gips für 2007 – 2014

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
DIERec und DERec	kt	6.295	5.867	6.007	5.709	6.195	6.250	6.207	5.861
KEA-Saldo	TJ	-1.883	-1.755	-1.795	-1.706	-1.852	-1.868	-1.854	-1.752

Quelle: eigene Darstellung

6.5 Verpackungsglas

6.5.1 Materialeinsatz in Deutschland

Glas ist eine erstarrte Schmelze verschiedener Rohstoffe, die durch die schnelle Abkühlung kaum eine kristalline Struktur bilden konnte. Die Ausgangsrohstoffe des Glases sind im Wesentlichen die vier Grundstoffe Quarzsand (60 %), Soda (18 %), Kalk (15 %), Feldspat (6 %) sowie in geringeren Mengen weitere Grundstoffe wie Dolomit und Pottasche (Kaßmann 2014). Quarzsand dient dabei als Strukturgeber. Soda hat verschiedene Aufgaben: Zum einen senkt Soda den Schmelzpunkt in der Glasherstellung, dient als Flussmittel und als Läutermittel, d.h. das freiwerdende CO₂ hilft dabei, Luftblasen im Schmelzgut an die Oberfläche zu transportieren. Kalk, Dolomit und Feldspat liefern Calciumoxid, das in der Auskühlphase das Glas erhärtet und chemische Beständigkeit erhöht. Für die spezifische Farbe des Glases sind unterschiedliche Zusatzstoffe (z.B. Chrom(III)-oxide oder Eisen(II)-sulfide) verantwortlich (Lange, 1993). Glas ist geschmacks- und geruchsneutral und eignet sich daher besonders gut als Verpackungsmaterial.

Behälterglas wird heutzutage zu großen Teilen aus Altglas hergestellt. Je nach Glasfarbe ist der Anteil des Altglases unterschiedlich und reicht von rund 66 % bei Weißglas bis 86 % für Grünglas (Flinke et al. 2000)

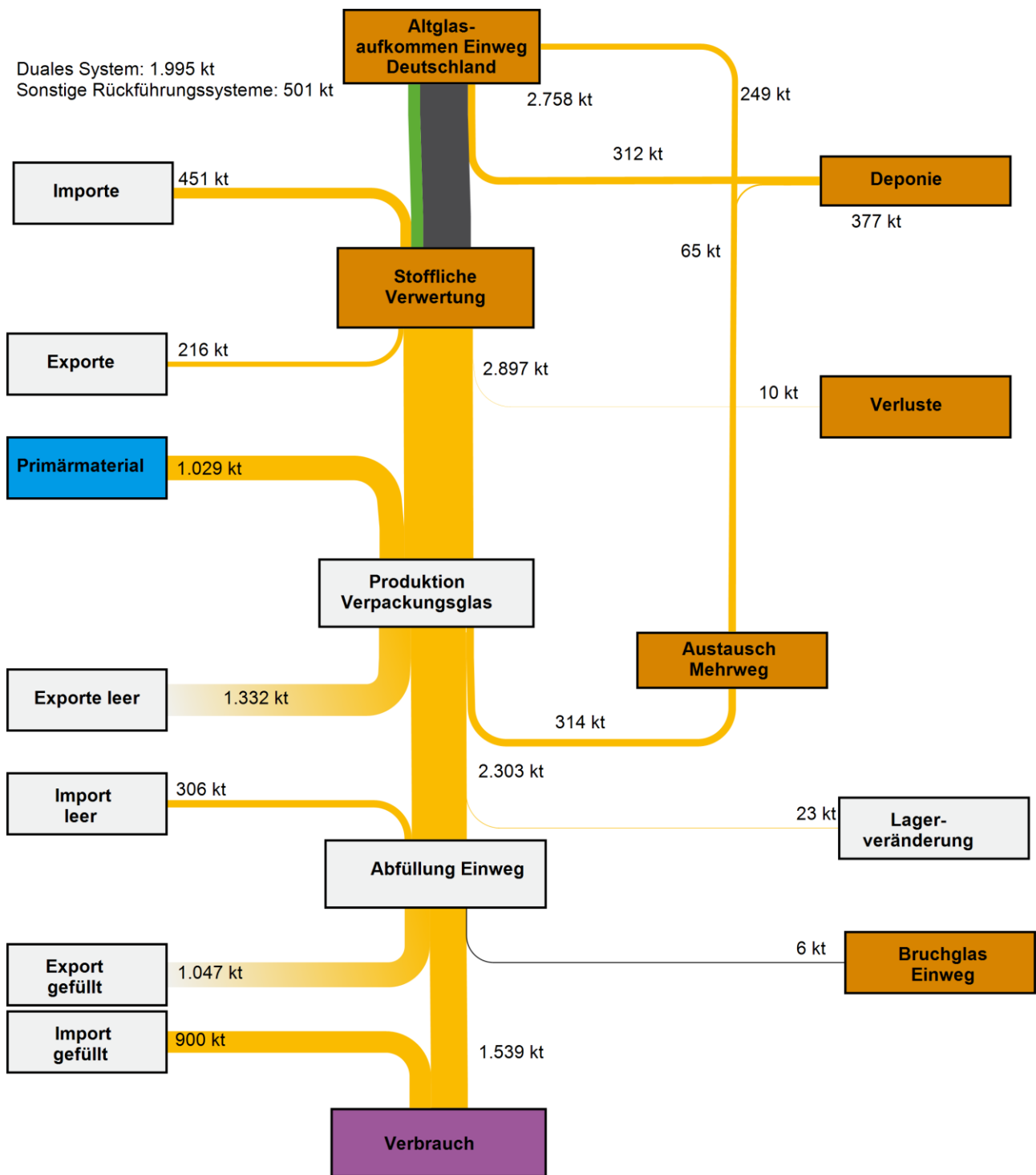
6.5.2 Stoffströme in Deutschland 2013

2013 wurden in Deutschland 7,3 Mio. t Glaswaren und Mineralfasern hergestellt. Davon waren 3,9 Mio. t (oder 54 % der Gesamtproduktion) Behälterglas, um die es im weiteren Verlauf dieses Kapitels gehen wird. Gleichzeitig wurden laut Angaben des Bundesverbandes der deutschen Glasindustrie im Jahr 2013 ca. 278.000 t leeres Behälterglas importiert und 1,23 Mio. t leeres Behälterglas exportiert. Der Exportüberschuss betrug somit knapp 1 Mio. t an nicht gefülltem Behälterglas. Die UBA-Untersuchung zu Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2013 (Schüler 2015c) kommt zu leicht höheren Zahlen (Importe: 306.300 t, Exporte: 1.33 Mio. t). Im Folgenden wird auf die UBA-Zahlen Bezug genommen.

Altglas wird nach der Sammlung nach Farbe sortiert, im Brecher zu Altglasscherben zermahlen und in mehreren mechanischen und technischen Kontrollschritten von Fremdkörpern wie Metallen oder Keramik getrennt. Die Altglasscherben werden gemeinsam mit den Primärrohstoffen, die zuvor in der Gemengeanlage gemischt wurden, in der Schmelzwanne aufgeschmolzen. Der niedrigere Schmelzpunkt der Altglasscherben im Vergleich zu Quarzsand erklärt die hohe Energieeinsparung, die durch den Einsatz von Altglas erreicht werden kann (25-30 % weniger Energie) (BUWAL 2015). In der Schmelzkammer werden die verschiedenen Rohstoffe und Altglasscherben erhitzt und verschmelzen in diesem Prozess langsam zu einer Glasmasse. Die Rohstoffe geben dabei verschieden Reaktionsgase ab, was eine Läuterung der Glasmasse erforderlich macht. Unter Läuterung versteht man die Beseitigung der Blasen in der zähen Glasmasse mittels chemischen Läutermitteln, dem Einblasen zusätzlicher Gase und/oder einer Homogenisierung durch Vermischen oder Rühren. Anschließend werden Glastropfen portioniert und mit Druckluft und Blasen zunächst zu Hohlglaskörpern und anschließend in die eigentliche Form gebracht. Nach der Abkühlungsphase erfolgt noch eine Qualitätskontrolle, bei der schadhafte Glasverpackungen aussortiert werden, die als Rohstoff wieder im Brecher zu Scherben zerkleinert werden. BUWAL (1995) beziffert diesen Ausschuss in Höhe von 12,5–14,5 % der Produktionsmenge. Die UBA-Studie „Ökobilanz für Getränkeverpackungen II“ (Flinke et al. 2000) geht dagegen nur von einem Anteil von 6 % Eigenscherben aus.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm gibt einen Überblick über die Stoffströme von Glas und Altglas. Die Stoffströme beziehen sich auf die Verwendung von in Deutschland produzierten Mengen an Verpackungsglas und die Mengen an Verpackungsabfällen aus Glas. Nicht enthalten sind die Bestände an Glas-Mehrwegflaschen die sich im Umlauf befinden und daher keine Verpackungsabfälle darstellen und in den entsprechenden Daten nicht erfasst werden. Allerdings sind Mehrwegflaschen, die von den Abfüllbetrieben aussortiert und durch neue Mehrwegflaschen ersetzt werden, enthalten.

Abbildung 6-11: Ströme von Verpackungsglas und Altglas in Deutschland im Jahr 2013, in Mio. t



Quelle: eigene Darstellung nach Schüler (2015c), BUWAL (1995) und Flinke et al. (2000)

Nach den Daten in Schüler (2015c) betrug das Altglasaufkommen im Jahr 2013 knapp 2,8 Mio. t. Der überwiegende Teil mit knapp 2 Mio. t stammte dabei aus den Sammelcontainern für Einwegglas. 2,7 Mio. t wurde stofflich verwertet. Ein kleiner Anteil des Altglasaufkommens wurde direkt exportiert. Ein weiterer Teil der Altglaserfassungsmengen besteht aus anderen Materialien wie z.B. Keramik aus Fehlwürfen im Altglascontainer oder Grus, der nicht verwertet werden kann und deponiert wird. Im Jahr 2013 wurden 4,3 Mio. t Verpackungsglas produziert bzw. importiert. Ein Großteil der in Deutschland produzierten Menge

an Verpackungsglas (also minus der Importe) konnte aus Altglasscherben produziert werden. Knapp ein Drittel der produzierten Menge an Verpackungsglas wird exportiert, der Rest wird an Abfüllbetrieben der Getränke- und Nahrungsmittelindustrie sowie den restlichen Abnehmern von Verpackungsglas (Chemische Industrie, Kosmetik) geliefert. Der Außenhandel mit befülltem Verpackungsglas ist recht ausgeglichen, ein Teil der Mehrwegflaschen wird in den Abfüllbetrieben ausgewechselt und durch neue Mehrwegflaschen ersetzt. Der Großteil der aussortierten Mehrwegflaschen wird ebenfalls stofflich verwertet.

6.5.3 Verwertungswege

Wie in Abbildung 6-11 gezeigt, wird Altglas in Deutschland stofflich verwertet und zur Herstellung von Verpackungsglas eingesetzt. Im Rahmen der Sammlung und Aufbereitung des Altglases geht Schüler (2015c) von ca. 10 % Verlust aus. Tabelle 6-41 stellt die Verwendungsmengen im Jahr 2013 dar. Bei der Bestimmung der Substitutionspotentiale wird von keinen weiteren Verlusten im Rahmen der stofflichen Verwertung ausgegangen. Eine Tonne Altglas ersetzt somit die Menge an Primärrohstoffen, die notwendig wären um 1 Tonne an Verpackungsglas herzustellen. Weiterhin findet durch den Einsatz von Altglas eine Substitution von energetischen Rohstoffen statt, da die Herstellung von Verpackungsglas aus Altglas 25-30 % weniger Energie benötigt als die Herstellung von Glas aus Primärrohstoffen.

Tabelle 6-41: Verwendung von Altglas in Deutschland in Mio. t, 2013

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Produkt	Substitutions-äquivalent
Glasindustrie	Altglas	2,47	Verpackungsglas	Primärrohstoffe für Glas

Quelle: eigene Darstellung nach Daten in (Schüler 2015c)

6.5.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Berechnung der DIERec und DERec-Indikatoren sowie der KEA-Salden wurden die Prozessdaten von grünem Behälterglas mit hohem Altglasanteil den Prozessdaten für Flachglas mit nur geringem Altglasanteil gegengerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass der stoffliche Input aus inländischer Entnahme von Rohstoffen gedeckt wird.

Tabelle 6-42: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Altglas, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Flachglas, primär (15% Altglasanteil)	2,27	5.597
Behälterglas, sekundär (85% Altglasanteil)	0,72	1.767
	DIERec	3.830

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-43: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette der substituierten Materialien durch Altglas, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Flachglas, primär (15% Altglasanteil)	2,27	5.597

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Behälterglas, sekundär (85% Altglasanteil)	0,72	1.767
	DERec	3.830

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-44: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette der substituierten Materialien durch Altglas, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Flachglas, primär (15% Altglasanteil)	18,64	16,71	46.039	41.272
Behälterglas, sekundär (85% Altglasanteil)	9,61	8,15	23.747	20.141
		KEA-Saldo	22.293	21.131

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 6-45: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die substituierten Materialien durch Altglas, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Flachglas, primär (15% Altglasanteil)	18,64	16,71	46.039	41.272
Behälterglas, sekundär (85% Altglasanteil)	9,61	8,15	23.747	20.141
		KEA-Saldo	22.293	21.131

Quelle: eigene Zusammenstellung

6.5.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

Sowohl die Menge an anfallendem Verpackungsglas als auch der Anteil an der werkstofflichen Verwertung ist über den Zeitraum 2007 bis 2014 sehr stabil mit nur geringen Veränderungen. Die Verwertungsquote (werkstoffliche Verwertung von Verpackungsglas/angefallen Menge an Verpackungsglasabfällen) ist dabei im Zeitverlauf von 82-83 % auf 88-89 % gestiegen.

Tabelle 6-46: Abschätzung der Verwertungsmengen von Verpackungsglas 2007 – 2014

Verwertungsort	Sekundärproduktion in kt							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Produktion von Verpackungsglas	4098,6	4120,3	3801,4	3855,9	4086,5	4007,4	3926,4	4000,4
Angefallene Menge an Verpackungsglasabfällen	2.825	2.869	2.857	2.712	2.670	2.807	2.758	2.748

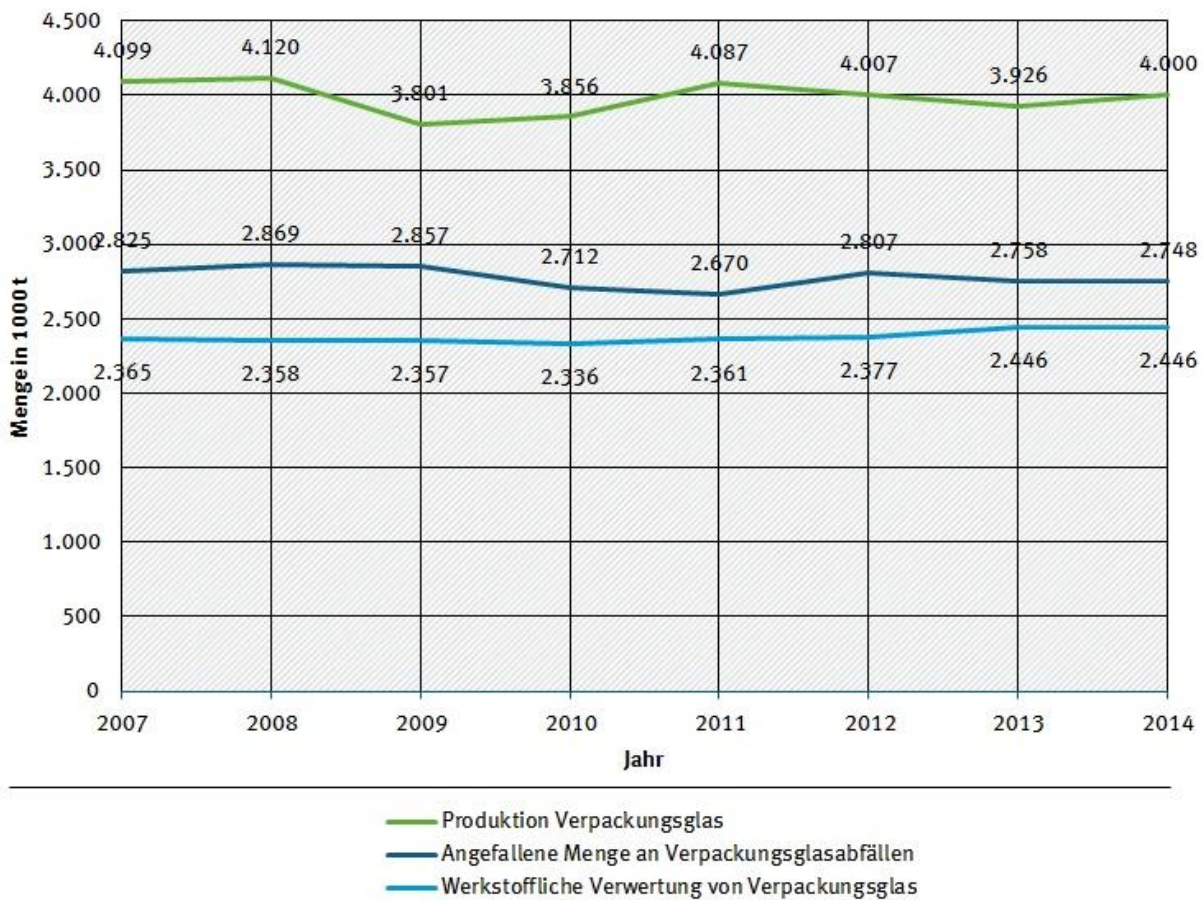
Verwertungsort	Sekundärproduktion in kt							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Werkstoffliche Verwertung von Verpackungsglas	2.365	2.358	2.357	2.336	2.361	2.377	2.446	2.446

Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Schüler verschiedene Jahrgänge

Abbildung 6-12: Stoffliche Verwertung von Verpackungsglas in Deutschland 2007 - 2014

Stoffl. Verwertung von Verpackungsglas in Deutschland

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2014



Quelle: UBA: Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen, verschiedene Jahrgänge

Tabelle 6-47: Indikatoren für Verpackungsglas für 2007 – 2014

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
DIERec und DERec	kt	3.830	5.381	4.845	4.433	4.433	4.228	4.351	4.257
KEA-Saldo	TJ	11.826	11.171	10.059	9.205	9.205	8.777	9.034	8.834

7 Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege von Kunststoffen

7.1 Materialeinsatz in Deutschland

Im Jahr 2013 wurden in Deutschland 19,8 Mio. t an Polymeren, Grundbausteine aller Kunststoffprodukte, hergestellt. Dies geht aus der Veröffentlichung der Consultic GmbH „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2013“ (Consultic 2014a) hervor, die regelmäßig alle zwei Jahre erscheint.

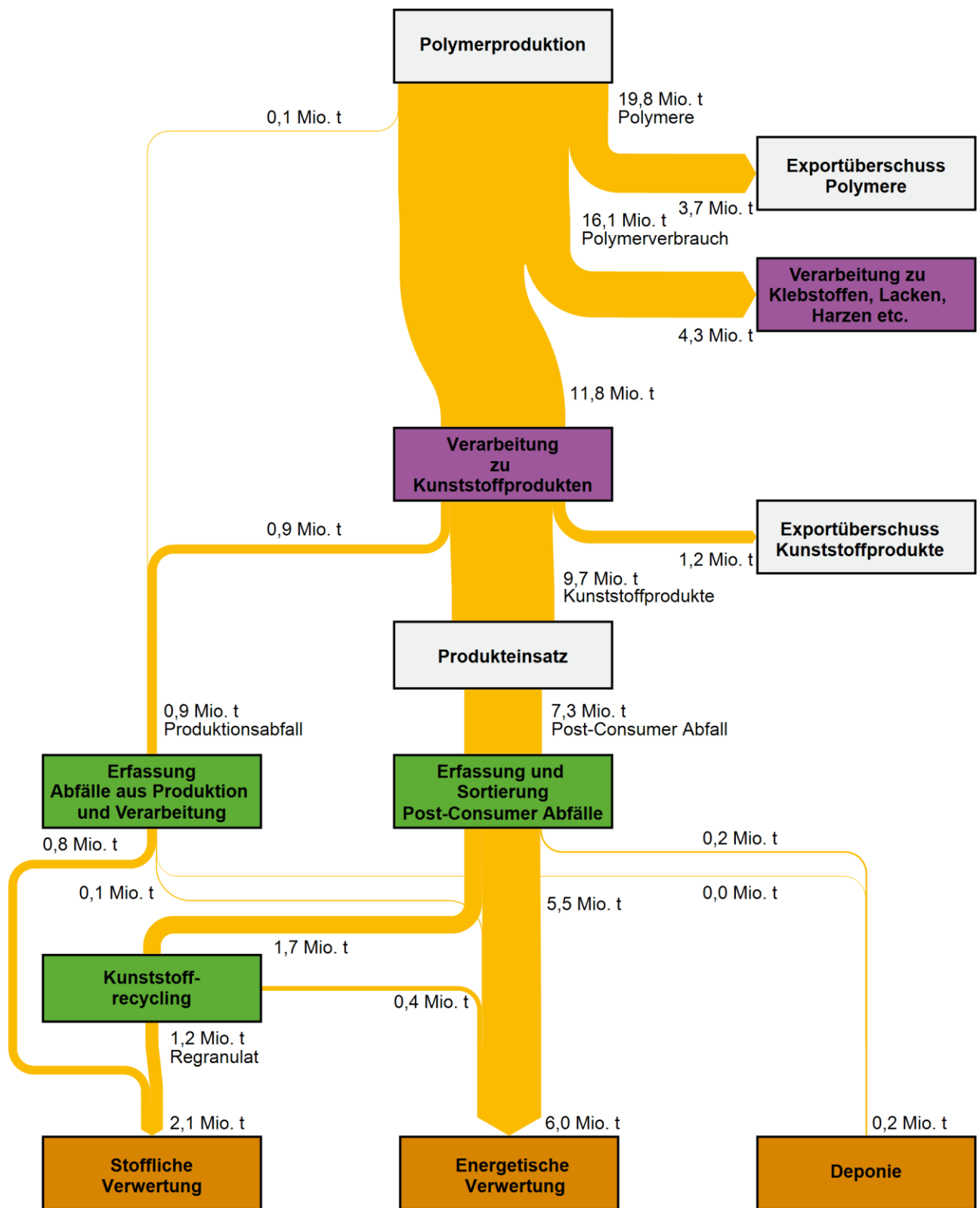
Den nachfolgenden Darstellungen von Stoffströmen der ressourcenrelevanten Kunststoffsorten

- ▶ Polyethylen (PE-LD und PE-HD),
- ▶ Polypropylen (PP),
- ▶ Polyethylenterephthalat (PET),
- ▶ Polystyrol (PS) und
- ▶ Polyvinylchlorid (PVC)

liegen die Ergebnisse dieser, sich intensiv mit der kunststoffproduzierenden- und -verarbeitenden Industrie befassenden Studie, in großen Teilen zugrunde. Abweichend hiervon werden jedoch bezüglich des inländischen Aufkommens an Kunststoffabfällen aus dem Post-Consumer-Bereich die Ergebnisse einer eigenständigen Stoffstrommodellierung auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 herangezogen (Details siehe Kapitel 3.4).

Den Betrachtungen der einzelnen Kunststoffsorten und deren Bedeutung als Sekundärrohstoffen werden mit Abbildung 7-1 die insgesamt in Deutschland produzierten und als Abfälle anfallenden Kunststoffmengen des Jahres 2013 vorangestellt.

Abbildung 7-1: Stoffströme der Kunststoffherzeugung in Deutschland und Altkunststoffverwertung im In- und Ausland im Jahr 2013



Quelle: Consultic (2014a) und eigene Stoffstrommodellierung

Gemäß Consultic (2014a) kamen in Deutschland im Jahr 2013 rund 9,7 Mio. t Kunststoffe als Produkte zum Einsatz. Dass zugleich nur rund 7,3 Mio. t als Post-Consumer Abfälle erfasst wurden, weist auf den zwischenzeitlichen Verbleib der jeweiligen Produkte im anthropogenen Lager hin.

Die Bestimmung der 7,3 Mio. t Post-Consumer Abfälle wurde in differenzierender Betrachtung der Entsorgungswege stoffliche Verwertung, energetische Verwertung und Deponierung vorgenommen. Die dargestellten Kunststoffmengen zur energetischen Verwertung gehen gemäß der angewandten Methodik in Kapitel 3.4 auf die laut Fachserie 19 Reihe 1 an thermischen Abfallbehandlungsanlagen und Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung registrierten Abfallmengen aus dem Inland und die hierin enthaltenen Kunststoffgehalte zurück. Die Aufschlüsselung in die einzelnen Kunststoffsorten erfolgt entsprechend der in Consultic (2014a) genannten Anteile. Selbiges Vorgehen liegt der auf Deponien abgelagerten Kunststoffmenge zugrunde.

Die Kunststoffmengen zur stofflichen Verwertung werden abweichend hiervon ermittelt. Aufgrund qualitativer Anforderungen der Kunststoffindustrie an das Sekundärmaterial stammt der Großteil der beim Recycling einsetzbaren Kunststoffabfälle aus getrennten Erfassungssystemen. Insbesondere Kunststoffverpackungen, die über die Dualen Systeme, Branchenlösungen oder sonstige gewerbliche Sammelsysteme erfasst werden, sind für ein Recycling geeignet. Hierunter befinden sich u.a. Rücknahmesysteme, wie das für Einweg-Pfandflaschen aus PET, welche zu einem nahezu sortenreinen Kunststoffabfall führen.

Die Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung hat sich u.a. im Zuge mehrerer Forschungsprojekte im Auftrag des UBA intensiv mit Verpackungsabfällen aus privaten und gewerblichen Bereichen auseinandergesetzt. In Erweiterung der statistisch erfassten und in der Fachserie 19 Reihe 1 veröffentlichten Mengen der Systembetreiber und einzelner Branchenlösungen werden in GVM (2015c) auch Rücklaufmengen an Mehrwegverpackungen, bepfandeten Einwegverpackungen und direktentsorgten Handelsverpackungen abgeschätzt. Von den in Tabelle 7-1 genannten rund 1,7 Mio. t an Kunststoffabfällen zur stofflichen Verwertung entfallen demnach ca. 1,4 Mio. t auf Kunststoffverpackungen. Die verbleibende Differenzmenge bilden Kunststoffabfälle aus der Baubranche⁴⁷ (hpts. PVC-Kunststoffe), die über Rücknahmesysteme wie Rewindo, RoofCollect und den Kunststoffrohrverband erfasst werden (PVC plus (2011)), und aus der Sortierung von Siedlungsabfälle.

Tabelle 7-1: Erfassungsmengen Kunststoffabfälle zur stofflichen Verwertung im Jahr 2013

Erfassung	Erfassungsmenge	Quelle	Kunststoffsorte
Duale Systeme	449.200 t	GVM 2015c	Kunststoffgemisch
Branchenlösungen, sonstige Rücknahmesysteme, Eigenrücknahmen	238.500 t	GVM 2015c	Kunststoffgemisch
Sonstige Siedlungsabfälle (gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle, Wertstoffhöfe)	115.500 t	eigene Berechnung	Kunststoffgemisch
Einweg-Pfandflaschen	427.600 t	GVM 2015c	vorwiegend PET
Mehrweg-Verpackungen (Verschlüsse, Kästen, Flaschen etc.)	120.400 t	GVM 2015c	vorwiegend HDPE
Direktentsorgung Handel, Großgewerbe	168.200 t	GVM 2015c	Kunststoffgemisch

⁴⁷ Hierbei handelt es sich insbesondere um Fenster, Türen, Rollläden, Rohre, Bodenbeläge und Dachbahnen aus PVC.

Erfassung	Erfassungsmenge	Quelle	Kunststoffsorte
Direktentsorgung Baubranche	139.500 t	PVC plus 2011 Consultic 2014b	PVC
Summe	1.658.900 t		

Während die Qualität des Hausmülls keine mengenrelevante Sortierung einzelner Kunststoffsorten zulässt, können bei der Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle recycelfähige Kunststoffe gewonnen werden. Gemäß der Untersuchung von Dehne (2015) im Auftrag des UBA werden gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle insbesondere unter den Abfallschlüsseln 20030100 und 20030102, jedoch auch unter den Verpackungsgemischen AS 15010600 erfasst. Die Abschätzung der für das Recycling aussortierten Kunststoffmengen basiert auf den statistisch erfassten Abfallmengen der genannten Abfallschlüssel, deren Kunststoffanteile (siehe Anhang II) sowie Sortierquote (9 Ma.-%) und Störstoffgehalt (18 Ma.-%), wie sie gemäß Bilanzierung verschiedener Sortieranlagen in Dehne (2015) ermittelt wurden. Da hinsichtlich der Zusammensetzung und Qualität der unter AS 200139 vornehmlich an Wertstoffhöfen getrennt erfassten Kunststoffmengen keine Untersuchungen vorliegen, wird deren Anteil zur stofflichen Verwertung mit 50 Ma.-% abgeschätzt⁴⁸.

Dem in Abbildung 7-1 auf dem Weg der stofflichen Verwertung abschließend dargestellten Umwandlungsschritt der Kunststoffaufbereitung liegen entsprechend ihrer Massenanteile die kunststoffspezifischen Aufbereitungsverluste bei der Erzeugung des Regranulats zugrunde, wie sie in den nachfolgenden Kapiteln ausgewiesen werden.

Entscheidend für den Anteil eingesetzter Sekundärkunststoffe bei Herstellungsprozessen sind die Qualitätsanforderungen der Produkte. Aus den hier geforderten Materialeigenschaften resultieren die Vorgaben an Reinheitsgrad bzw. Störstoffanteil der bei der Kunststoffherstellung eingesetzten Sekundärmaterialien respektive Altkunststoffe. Die durch die Produkteigenschaften festgesetzten Reinheitsanforderungen betragen i.d.R. zwischen 90 und 96 % (Dehoust 2012).

Während sortenreine Kunststoffabfälle (Abfälle der Kunststoffproduktion /-verarbeitung) in den Verfahren der Kunststoffproduktion (Spritzgießverfahren, unterschiedliche Extrusionsverfahren) mit geringem Aufbereitungsaufwand direkt verwertet werden können, sind in Abfallgemischen enthaltene Altkunststoffe zunächst aufwändig durch mechanische Sortieranlagen in die jeweiligen Kunststoffsorten zu separieren. In aller Regel besteht der zur Anwendung kommende Verfahrensablauf hinsichtlich der Vorbereitung auf eine werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen mindestens aus den Stufen Zerkleinerung, Siebklassierung, Windsichtung, Magnetscheidung, Wirbelstromscheidung und sensorgestützter Sortierung.

Die so gewonnenen, nach wie vor mit Störstoffen und Verunreinigungen belasteten Kunststofffraktionen werden anschließend einem kunststoffspezifischen Recyclingverfahren zugeführt. Diese maßgeblich trocken-/nassmechanischen Aufbereitungsverfahren bestehen mindestens aus den Verfahrensstufen Vorzerkleinerung und -reinigung, nassmechanische Trennung (u.a. Schwimm-Sink-Verfahren, Hydrozyklon), Trocknung sowie ggf. Extrusion und Granulierung. Am Ende der Prozesskette fällt ein in der Kunststoffproduktion als Sekundärrohstoff einsetzbares Regranulat oder Mahlgut an.

7.1.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen weist eine gegenüber anderen Kunststoffen hohe chemische, jedoch mechanisch niedrige Beständigkeit aus. Während Wasserdampf Polyethylen kaum durchdringt, ist die Gasdurchlässigkeit bei be-

⁴⁸ In Anlehnung an GVM (2015a), die für die Sortierung von LVP-Abfällen eine Verteilung von rund 50 Ma.-% stoffliche und 50 Ma.-% energetische Verwertung ausweisen.

stimmten Gasen (u.a. Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Geruchs-/Aromastoffe) größer als bei vielen anderen Kunststoffen. Wie bei allen Thermoplasten besteht Polyethylen aus wenig verzweigten Kohlenstoffketten woraus die Eignung für ein werkstoffliches Recycling resultiert.

Ein hoher Anteil an schwach verzweigten Polymerketten führt bei Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) zu einer starken Zusammenlagerung von Polymeren und damit zu der gegenüber Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) erhöhten Dichte. Aus der verstärkt kristallinen Form resultierten bei PE-HD eine höhere Stabilität und die zu beobachtende geringere Transparenz.

Die genannten Eigenschaften führen dazu, dass PE-HD vorwiegend im Verpackungs- und Baubereich zur Herstellung von Hohlkörpern (Behälter, Kanister etc.) und Rohren eingesetzt wird. Folien, die der Anforderung einer hohen chemischen Beständigkeit genügen müssen (z.B. im Deponie- oder Wasserbau), werden ebenfalls aus PE-HD hergestellt (Tabelle 7-2). Aufgrund der Gasdurchlässigkeit erweist es sich jedoch für den Transport von kohlenstoffhaltigen und aromatisierten Getränken gegenüber PET als weniger geeignet. Insbesondere die hohe Lichtdurchlässigkeit, bedingt durch die gegenüber PE-HD niedrigere Kristallisation, führt zu der bevorzugten Eignung von PE-LD im Verpackungsbereich.

Mit einem innerdeutschen Materialeinsatz von rund 1,2 Mio. t rangiert PE-HD zwar knapp hinter dem Einsatz von PE-LD (1,4 Mio. t), bildet gemeinsam mit diesem jedoch die mengenmäßig bedeutendste Kunststoffart.

Tabelle 7-2: Anwendung und Materialeinsatz von PE in Deutschland 2013

Material	Hauptanwendungen	Anteil an der Verarbeitung (Consultic 2014)	Materialeinsatz in Deutschland nach Im-/Export
Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	Verpackungen (Getränkekästen, Hohlkörper)	58 Ma.-%	1.158.000 t
	Bau (Spritzgussteile, Rohre für Wasserbau)	26 Ma.-%	
	Sonstiges (Folien für Deponiebau)	16 Ma.-%	
Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)	Verpackungen (Verpackungsfolien, Müllsäcke)	74 Ma.-%	1.381.000 t
	Sonstiges (Landwirtschaftsfolien)	26 Ma.-%	

7.1.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen ist ein teilkristalliner Thermoplast, der der Kunststoffsorte Polyethylen chemisch relativ ähnlich ist. Aus der zusätzlich vorhandenen Methylgruppe resultieren gegenüber PE jedoch die Eigenschaften deutlich härter, fester und thermisch höher belastbar zu sein. Die chemische Beständigkeit gegenüber starken Säuren und Oxidationsmitteln ist dagegen geringer.

Durch Wahl der Polymerisationsbedingungen lassen sich neben isotaktischen und syndiotaktischen auch ataktische Polymerisate erhalten. Dies ermöglicht eine große Vielfalt verfügbarer Polypropylen-Typen und somit einen breiten Einsatz dieses Kunststoffes (siehe Tabelle 7-3).

Die meisten Polymerisate sind isotaktisch aufgebaut. Ihr gleichmäßiger Aufbau ist Ursache für den hohen Kristallisationsgrad und damit für die im Vergleich zu PE-HD höhere Festigkeit und Steifigkeit sowie Schmelz- und Gebrauchstemperaturbereiche. Die Methyl-Seitengruppen verhindern eine enge Zusammenlagerung wie bei PE, daher hat isotaktisches Polypropylen (PP-I) auch eine etwas geringere Dichte.

Hinsichtlich des innerdeutschen Materialeinsatzes steht die Kunststoffsorte PP mit rund 1,6 Mio. t nach PE an zweiter Stelle.

Tabelle 7-3: Anwendung und Materialeinsatz von PP in Deutschland 2013

Material	Hauptanwendungen	Anteil an der Verarbeitung (Consultic 2014)	Materialeinsatz in Deutschland nach Im-/Export
Polypropylen (PP)	Verpackungen (Flaschenverschlüsse, Becher, Behälter)	43 Ma.-%	1.615.000 t
	Fahrzeuge (Armaturen Bretter, Batteriegehäuse, Crashabsorber)	16 Ma.-%	
	Bau (Armaturen, Rohrleitungen)	9 Ma.-%	
	Sonstiges (Teppiche)	32 Ma.-%	

7.1.3 Polyethylenterephthalat (PET)

Polyethylenterephthalat ist ein thermoplastischer Kunststoff, der zu der Gruppe der Polyester gehört. PET weist Polarität auf und zeichnet sich durch seine Beständigkeit gegenüber verdünnten Säuren, aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen sowie Ölen und Alkoholen aus. Gegenüber heißem Wasser und alkalischen Lösungen erweist sich PET jedoch als unbeständig.

Amorph verarbeitetes PET ist farblos und Lichtdurchlässig und bietet sich daher als Verpackungsmaterial für Lebensmittel an. Durch die geringe Durchlässigkeit für Sauerstoff und Kohlendioxid eignet sich PET sehr gut für den Einsatz in Form von Flaschen für kohlenensäurehaltige Getränke (Tabelle 7-4). Des Weiteren wird PET aufgrund seiner Eigenschaften als Textilfaser eingesetzt - es erweist sich als kaum dehnbar und somit formbeständig sowie reiẞfest und knitterfrei. PET weist weiterhin eine hohe Gewebeverträglichkeit auf, weshalb es auch für Gefäßprothesen genutzt wird.

Tabelle 7-4: Anwendung und Materialeinsatz von PET in Deutschland 2013

Material	Hauptanwendungen	Anteil an der Verarbeitung (Consultic 2014)	Materialeinsatz in Deutschland nach Im-/Export
Polyethylenterephthalat (PET)	Verpackungen (Flaschen, Lebensmittelverpackungen)	97 Ma.-%	468.000 t
	Sonstiges (Textilien, Fleecestoffe, Folien)	3 Ma.-%	

7.1.4 Polystyrol (PS)

Polystyrol ist ein transparenter, amorpher oder teilkristalliner Thermoplast, der entweder als thermoplastisch verarbeiteter Werkstoff oder als Schaumstoff eingesetzt wird.

Polystyrol ist gegen wässrige Laugen und Mineralsäuren gut beständig, jedoch unbeständig gegenüber unpolaren Lösungsmitteln wie Benzin und länger-kettigen Ketonen und Aldehyden. Ferner zeigt sich eine hohe UV-Empfindlichkeit. Während festes amorphes Polystyrol farblos, hart und spröde ist, weist geschäumtes Polystyrol demgegenüber eine geringere mechanische Festigkeit und Elastizität auf. Die geringe Wärmeleit-

fähigkeit von geschäumtem PS führt zu dessen verbreitetem Einsatz als Dämmstoff im Bauwesen. Aufgrund seiner guten Isolationseigenschaften wird es zudem in der Elektrotechnik verwendet (Tabelle 7-5).

Tabelle 7-5: Anwendung und Materialeinsatz von PS in Deutschland 2013

Material	Hauptanwendungen	Anteil an der Verarbeitung (Consultic 2014)	Materialeinsatz in Deutschland nach Im-/Export
Polystyrol (PS)	Verpackungen (Lebensmittelverpackung)	35 Ma.-%	304.000 t
	Elektro/Elektronik (Isolation von Kabeln)	15 Ma.-%	
	Bau (Dämmstoffe, Schallschutzplatten)	20 Ma.-%	
	Sonstiges (Modell- und Kulissenbau)	30 Ma.-%	

7.1.5 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid ist ein amorpher thermoplastischer Kunststoff, der sich als hart und spröde auszeichnet. Eine Eignung für technische Anwendungen wird erst durch die Zugabe von Additiven erreicht. Weichmacher lassen PVC flexibel, dehnbar und formstabil werden. Die Verwendung von Stabilisatoren gewährleistet eine ausreichende Hitzestabilität von PVC während der Verarbeitung und schützt das Endprodukt vor Veränderungen durch Wärme, UV-Licht oder Sauerstoff. Die Eigenschaften von PVC hängen folglich stark von der Art und Menge der zugesetzten Additive ab und ermöglichen ein breites Anwendungsspektrum (siehe Tabelle 7-6).

PVC ist chemisch sehr beständig und schwer entflammbar. So wird PVC u.a. von Säuren und Laugen, nicht polaren Lösemitteln und Mineralölen nicht angegriffen. Gegenüber polaren Lösemitteln wie z.B. aromatischen Kohlenwasserstoffen ist PVC dagegen unbeständig. Mit Chlorgas bildet sich eine resistente Schicht mit hohem Chlorgehalt an der Oberfläche.

Durch die Beständigkeit gegenüber einer Vielzahl chemischer Einflüsse ist PVC der beliebteste Kunststoff des Bausektors - einer Branche, die auf die Langlebigkeit ihrer Einsatzmaterialien angewiesen ist. Hierin begründet sich der hohe inländische Materialeinsatz von rund 1,2 Mio. t.

Tabelle 7-6: Anwendung und Materialeinsatz von PVC in Deutschland 2013

Material	Hauptanwendungen	Anteil an der Verarbeitung (Consultic 2014)	Materialeinsatz in Deutschland nach Im-/Export
Polyvinylchlorid (PVC)	Bau (Fußbodenbeläge, Fensterprofile, Rohre)	73 Ma.-%	1.237.000 t
	Verpackungen (Transportbehälter, Tablettenblister, Folien)	12 Ma.-%	
	Sonstiges (Kunstleder, Blutbeutel, Schlauchsysteme, Kabel, Kabelkanäle, Gehäuse)	15 Ma.-%	

7.2 Stoffströme in Deutschland 2013

7.2.1 Polyethylen (PE)

Die für Polyethylen aufgezeigte Methodik gilt für die nachfolgenden Kunststoffsorten gleichermaßen. Die Bedeutung der Altkunststoffe im Verwertungs-/Produktionskreislauf der Kunststoffsorte Polyethylen hoher Dichte verdeutlicht Abbildung 7-2. Demnach wurden im Jahr 2013 durch die in Deutschland bestehenden Abfallerfassungssysteme rund 382.000 t an PE-HD Abfällen für eine stoffliche Verwertung gewonnen, wovon mit rund 276.000 t der Großteil aus der Behandlung und Aufbereitung von Post-Consumer-Abfällen stammt.

Hierzu zählen zum einen die über Sammelsysteme für Verpackungsabfälle erfassten PE-HD Kunststoffe zur stofflichen Verwertung, abgeschätzt über den PE-HD Anteil auf Basis vorliegender Sortieranalysen. Zum anderen sind die im Zuge der Versorgungskette bei Abfüllern etc. anfallenden Mehrwegverpackungen (Verschlüsse, Kästen etc.) enthalten. Da diese Mehrwegverpackungen hauptsächlich aus PE-HD bestehen und aufgrund ihrer hohen Sortenreinheit i.d.R. ebenfalls werkstofflich verwertet werden, finden die für das Jahr 2013 von der GVM geschätzten 120.400 t an dieser Stelle ihre Berücksichtigung (GVM 2015c). Ihre Erfassung erfolgt über eigenständige, in der Abfallstatistik nicht enthaltene Rücklaufsysteme.

Anhand des Warenverzeichnisses der Außenhandelsstatistik ist ein deutlicher Exportüberschuss der stofflich verwertbaren PE-Kunststoffe festzustellen, nur ein geringer Anteil wird im Inland recycelt. Da gemäß Außenhandelsstatistik bei der statistischen Erhebung nicht nach PE-HD und PE-LD unterschieden wird, erfolgt die Abgrenzung der Im- und Exportmengen von PE-Abfällen (WA39151000) entsprechend des abschätzbaren Verhältnisses am Materialeinsatz der Kunststoffe (PE-HD (47 Ma.-%) und PE-LD (53 Ma.-%) gem. Consultic 2014). Aufgrund der nicht differenzierenden Datenerhebung der Außenhandelsstatistik kann über die Präferenzen der Auslandsnachfrage nach Post-Consumer-Kunststoffabfällen und Kunststoffabfällen aus Produktion und Verarbeitung keine Aussage getroffen werden.

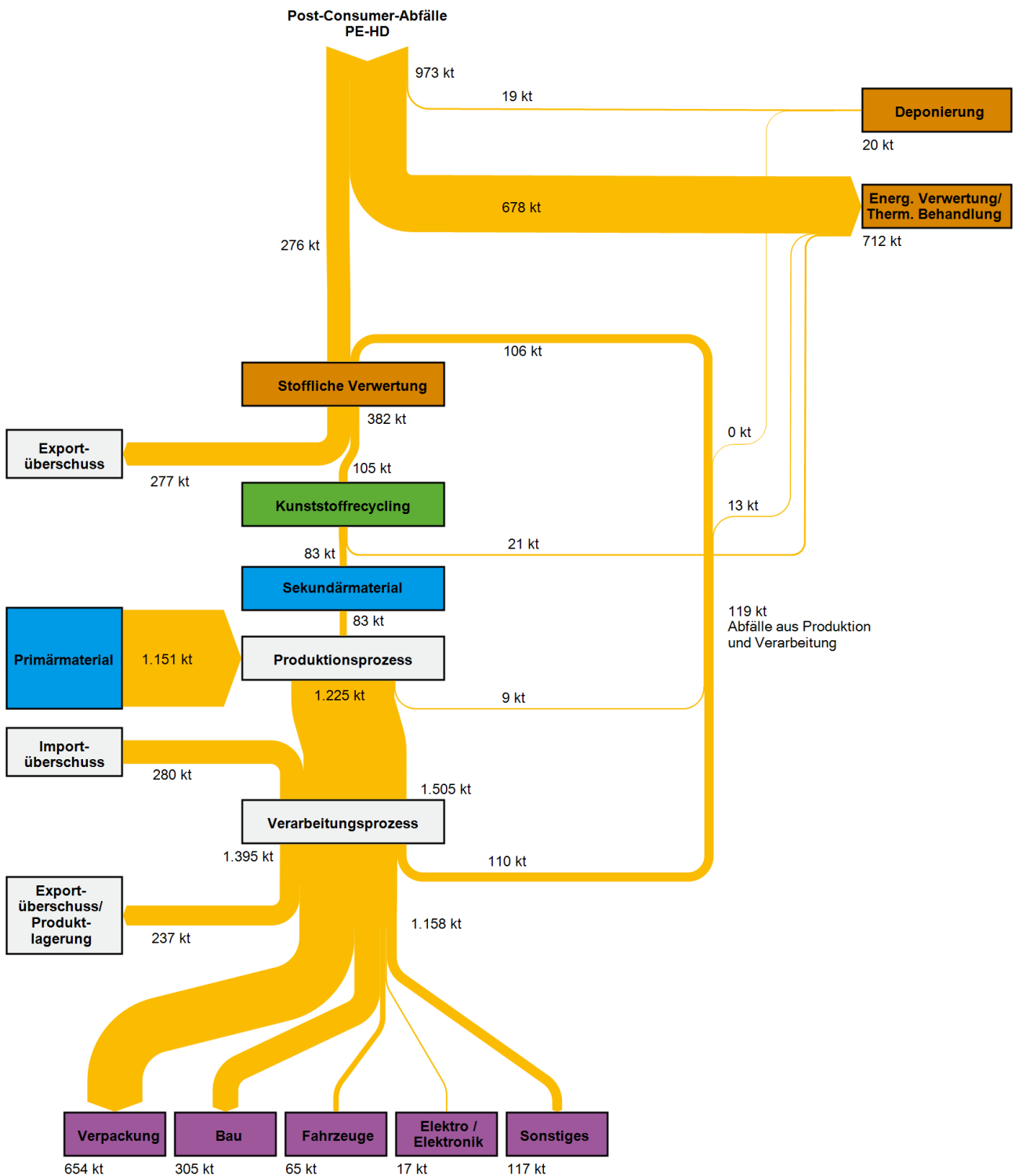
Den Übergang vom Altkunststoff zum Sekundärrohstoff bilden bei Kunststoffen die Recyclingverfahren, an deren Ende ein sortenreines Regranulat für den primäräquivalenten Einsatz in der Kunststoffproduktion bereitsteht. Den Ausführungen des Umweltforschungsplanes „Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe“ ist zu entnehmen, dass am Ende der Aufbereitungskette von Post-Consumer-Kunststoffen nach der Extrusion für Polyethylen eine Regranulatausbeute von ca. 72 % verbleibt (Dehoust 2012). Saubere und sortenreine Kunststoffabfälle aus der Kunststoffproduktion und -verarbeitung können dagegen ohne nennenswerte Aufbereitungsverluste erneut in den Verfahren der Kunststoffproduktion (Spritzgießverfahren, Extrusionsverfahren u.a.) eingesetzt werden.

Den Aufbereitungsverlust der Post-Consumer-Kunststoffe berücksichtigend, betrug die in innerdeutschen Produktionsanlagen im Jahr 2013 eingesetzte Menge an sekundärem PE-HD rund 83.000 t. Die Genauigkeit der in Deutschland recycelten PE-Kunststoffmenge, sowohl für PE-HD als auch PE-LD, ist aufgrund der fehlenden Abgrenzung in der Außenhandelsstatistik dabei nur begrenzt darstellbar.

Generell ist festzuhalten, dass die Abgrenzung der Verwertungsmengen zwischen In- und Ausland bei allen Kunststoffsorten Ungenauigkeiten verursacht. Hierfür verantwortlich sind u.a. die unter der Warennummer einer „sortenreinen“ Kunststoffsorte enthaltenen Fremdstoffe bzw. andere Kunststoffsorten und lagerhaltungsbedingte Mengenverschiebungen an Jahresübergängen.

Der innerdeutsche Materialeinsatz an PE-HD, in Folge der Produktions-, Verarbeitungs- sowie Im- / Exportmengen von Kunststoffrohmaterialien und Zwischen- bzw. Endprodukten, beträgt rund 1,2 Mio. t. Die dominierenden Anwendungsfelder sind die Verpackungs- und Baubranche. Die genannten Mengen aus Produktion, Verarbeitung und Verbrauch gehen unmittelbar auf die Veröffentlichungen in Consultic (2014a) zurück. Die Verteilung des Kunststoffeinsatzes auf die jeweiligen Branchen basiert auf einer Abschätzung aus der Verbrauchsmenge an Kunststoffen insgesamt und dem Anteil der Kunststoffsorte an der insgesamt verarbeiteten Kunststoffmenge je Branche.

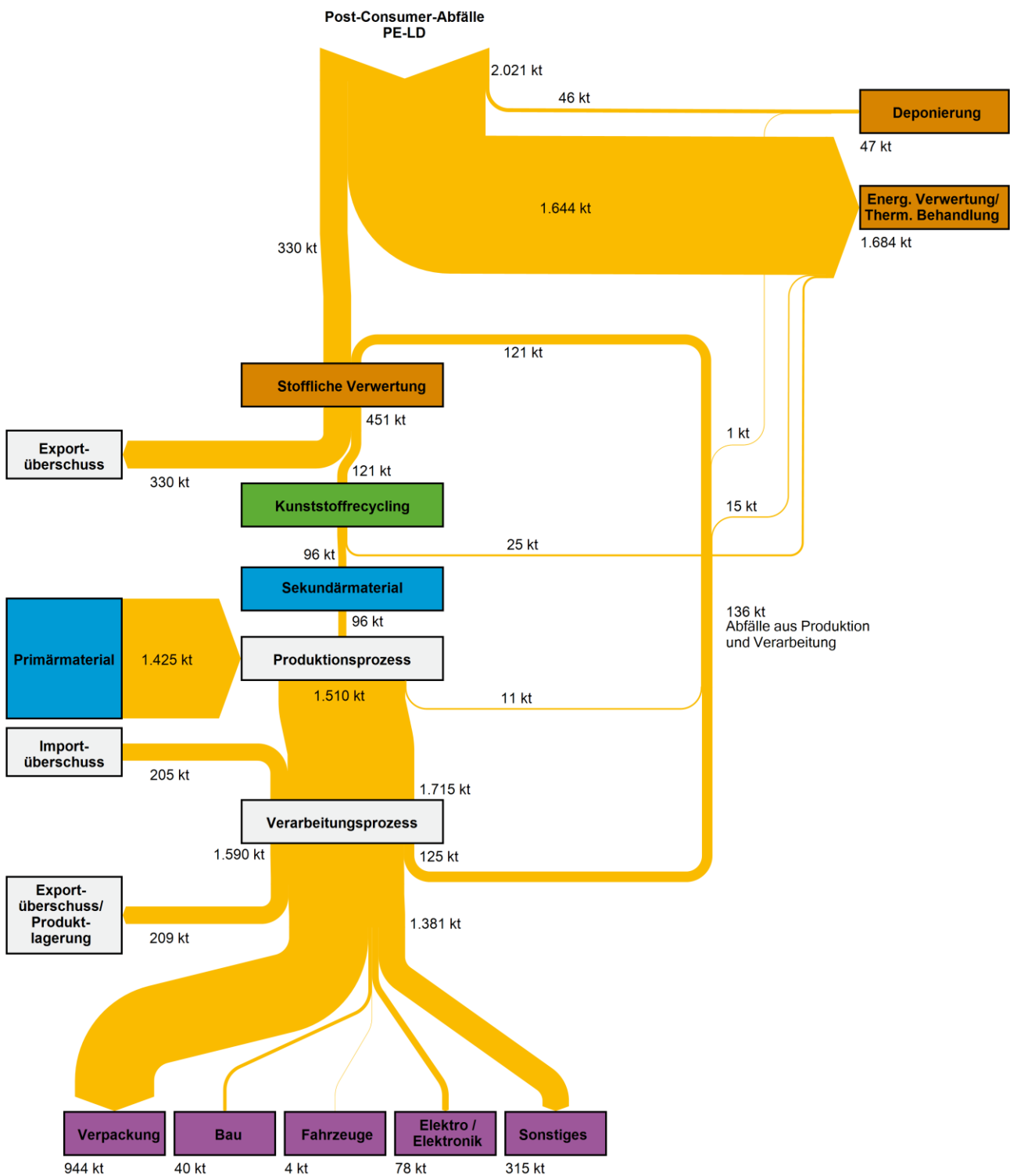
Abbildung 7-2: Stoffströme der Kunststoffsorte Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

Der in Abbildung 7-3 dargestellte Verwertungs-/Produktionskreislauf von Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) weist eine Einsatzmenge an Sekundärmaterial an der innerdeutschen Kunststoffproduktion in Höhe von rund 96.000 t aus und liegt damit in ähnlicher Größenordnung wie PE-HD.

Abbildung 7-3: Stoffströme der Kunststoffsorte Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

7.2.2 Polypropylen (PP)

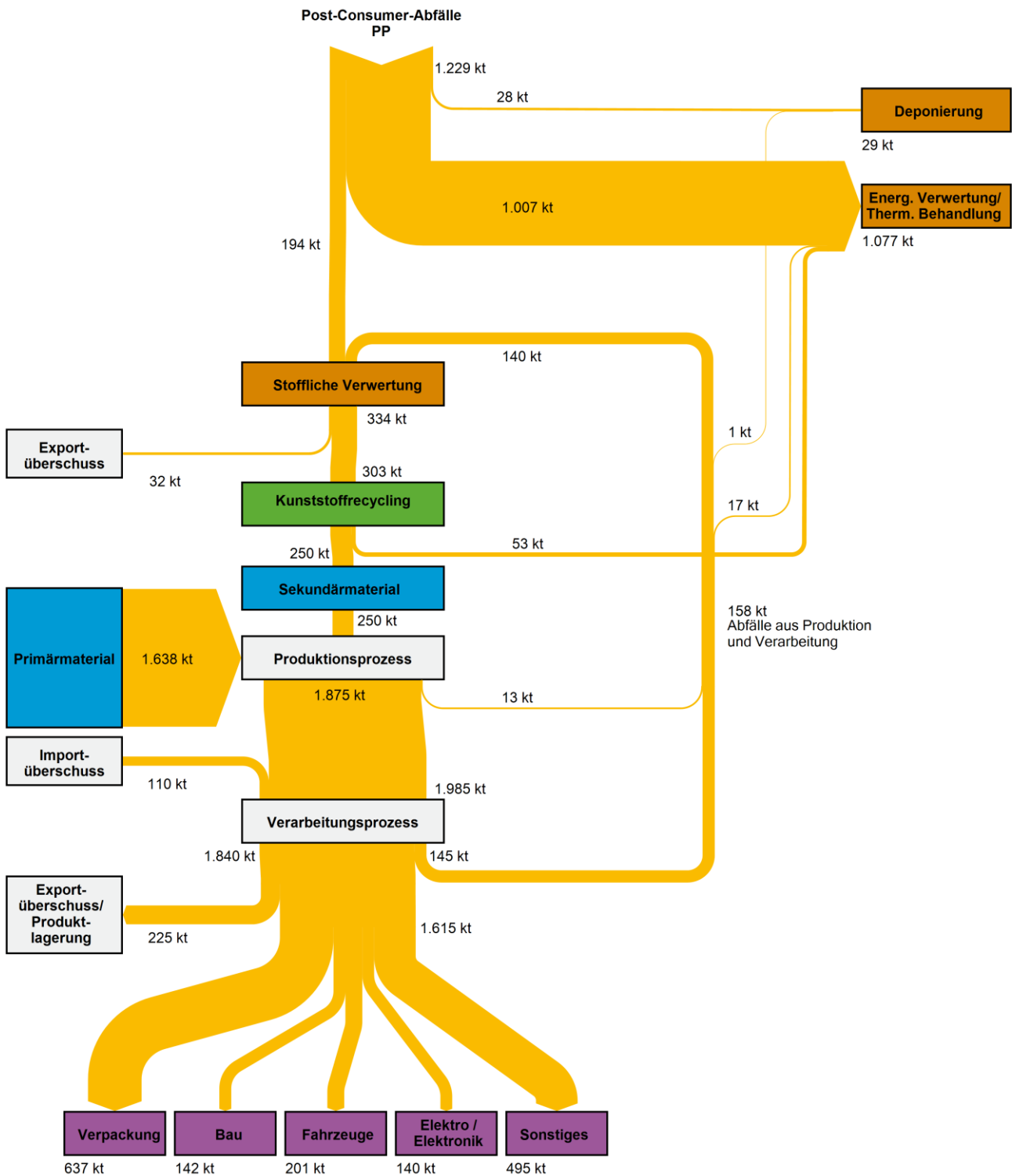
Nach Polyethylen stellt Polypropylen (PP) sowohl produktionsseitig als auch abfallseitig die mengenmäßig zweitwichtigste Kunststoffsorte dar. Wie das Stoffstromdiagramm in Abbildung 7-4 zeigt, betrug das Aufkommen an Kunststoffabfällen aus PP im Jahr 2013 rund 1,4 Mio. t (Post-Consumer-Bereich und Produktion/ Verarbeitung).

Während der Großteil einer energetischen Verwertung zugeführt wurde, konnten insgesamt rund 334.000 t Altkunststoffe für die stoffliche Verwertung erfasst werden. 194.000 t davon gingen aus Post-Consumer-Abfällen und 140.000 t aus Produktions- und Verarbeitungsabfällen hervor.

Während die Benennung der PP-Kunststoffe aus Produktion- und Verarbeitung unter Rückgriff auf Consultic (2014a) erfolgt, wird die zur stofflichen Verwertung rückgewonnene Menge aus Post-Consumer-Abfällen in Ermangelung bestehender Untersuchungen abgeschätzt. Die Benennung der PP-Menge zur stofflichen Verwertung wurde unter der Annahme getroffen, dass die in Tabelle 7-1 als Kunststoffgemisch gekennzeichneten Abfälle im Mittel einen PP-Anteil von 20 Ma.-% aufweisen. Da dem genannten Anteil ausschließlich Sortieranalysen von LVP-Abfällen der Dualen Systeme zu Grunde liegen, ist die Belastbarkeit als begrenzt einzuschätzen. Die Rechtfertigung der Hochrechnung liegt jedoch darin begründet, dass die über die Dualen Systeme erfassten Kunststoffmengen den größten Anteil an den in Tabelle 7-1 genannten Kunststoffgemischen aufweisen.

Unter Berücksichtigung der im Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik geführten Abfallimporte und -exporte aus Polypropylen (WA39159011) verbleiben rund 303.000 t der Altkunststoffe aus PP in Deutschland. Unter Zugrundelegung einer Regranulatausbeute von 70 % für den Post-Consumer-Kunststoff gemäß Dehoust (2012) standen im Jahr 2013 nach abschließender Aufbereitung und Umformung ca. 250.000 t Sekundärrohstoffe aus PP für eine Wiederverwertung in der Kunststoffindustrie zur Verfügung.

Abbildung 7-4: Stoffströme der Kunststoffsorte Polypropylen (PP) in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

7.2.3 Polyethylenterephthalat (PET)

Polyethylenterephthalat (PET) stellt hinsichtlich des Recyclinganteils die mengenmäßig bedeutendste Kunststoffsorte dar. Ausgehend von einem Gesamtaufkommen an Kunststoffabfällen aus PET von rund

0,9 Mio. t im Jahr 2013 gelangen durch bestehende Getrenntsammelsysteme und Sortierbemühungen knapp 0,6 Mio. t PET-Abfall auf den Weg der stofflichen Verwertung.

Die starke Bedeutung der stofflichen Verwertung bei PET ist in erster Linie auf den weit verbreiteten Einsatz von Getränkeflaschen aus PET und das flächendeckende Sammelsystem für Einweg-Pfandflaschen zurückzuführen. Gemäß GVM (2015c) wurden im Jahr 2013 rund 427.600 t an Einweg-Pfandflaschen über Rückführsysteme des Handels getrennt erfasst, welche aufgrund ihrer Sortenreinheit praktisch vollständig recycelbar sind. Da keine Datenerhebungen zu der Menge an sonstigen Kunststoffabfällen aus PET vorliegen, die für die stoffliche Verwertung aus Abfallgemischen weiterer Post-Consumer-Erfassungssysteme aussortiert werden konnten, erfolgte wie bereits für PP beschrieben eine Abschätzung auf Basis vorliegender Sortieranalysen.

Einer Studie der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung im Auftrag der Industrievereinigung Kunststoffverpackungen zufolge wurden im Jahr 2013 97,2 % der in Verkehr gebrachten PET-Einweg-Pfandflaschen dem Recycling zugeführt (IK 2015). 96 % der verkauften Getränkeflaschen werden über die Rücknahmesysteme des Handels wieder erfasst, der Rest geht auf die Sortierung der Abfälle aus der Gelben Tonne bzw. dem Gelben Sack (Duale Systeme) zurück. Gemäß IK (2015) wurden im Jahr 2013 rund 80 % der erfassten PET-Pfandflaschen in Deutschland dem Recycling zugeführt. Dies bestätigt den im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten PET-Stoffstrom, der Eingang in Kunststoffrecyclinganlagen findet (Abbildung 7-5).

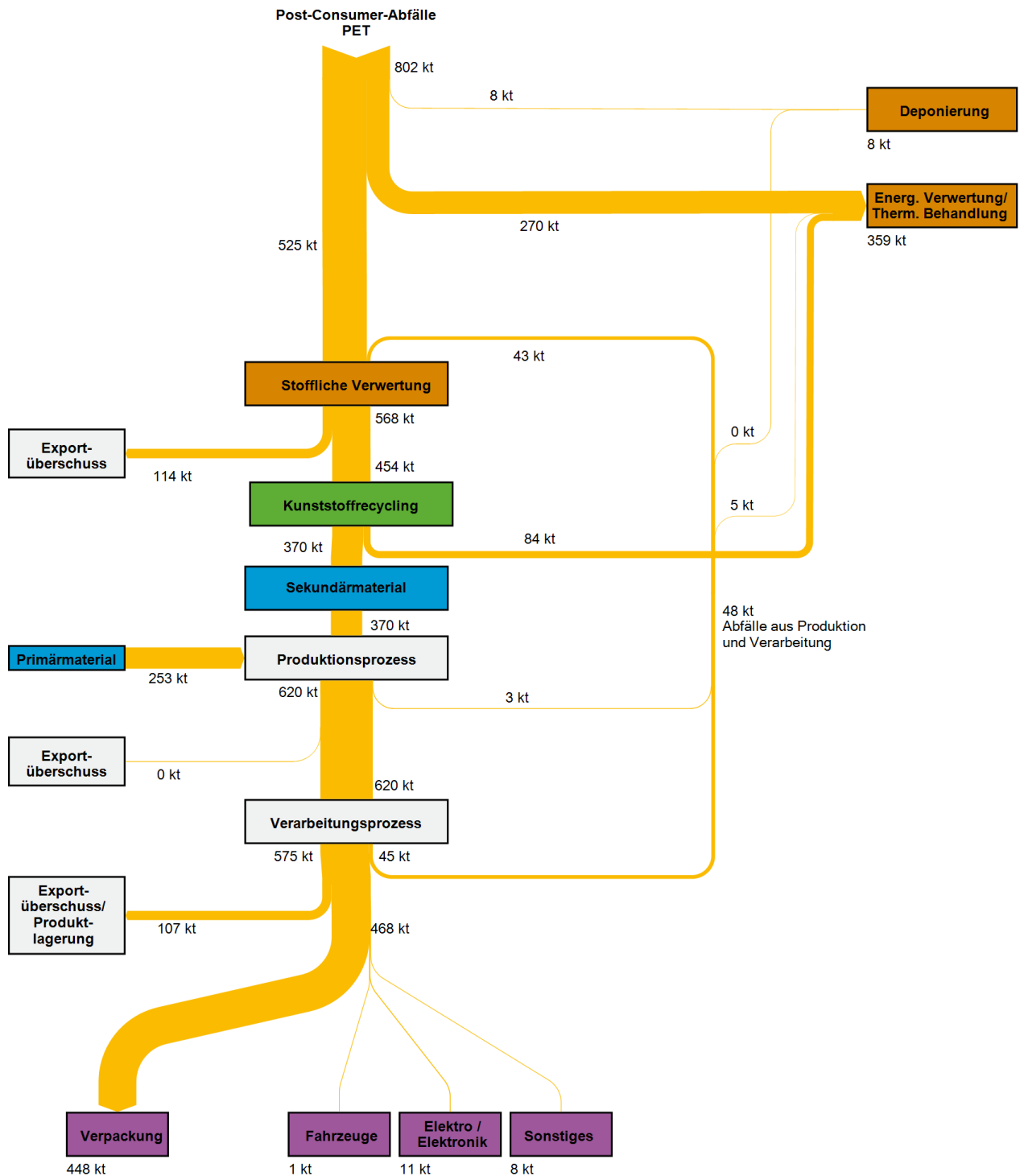
Da die Außenhandelsstatistik Im- und Exporte von Kunststoffabfällen aus PET im Gegensatz zu den anderen hier betrachteten Kunststoffsorten nicht gesondert ausweist⁴⁹, erfolgt eine Abschätzung dieser Warenströme auf Basis von GVM (2015c). Demnach werden von den in Deutschland erfassten bepfandeten Kunststoff-Einweg-Flaschen rund 85.600 t im Ausland werkstofflich verwertet. In Ermangelung weiterer Daten wird dieser Anteil von 20 % an der insgesamt stofflich verwerteten Menge von Einweg-Flaschen auch auf die sonstige stofflich verwertete PET-Menge übertragen.

Im Ergebnis wurden im Jahr 2013 von innerdeutschen Kunststoffrecyclingunternehmen rund 454.000 t PET zu 370.000 t Regranulat bzw. Mahlgut verarbeitet. Diesem abschließenden Aufbereitungsprozess vor dem Einsatz als Sekundärrohstoff in der Kunststoffindustrie liegt eine Regranulatausbeute von 80 % für Post-Consumer-PET zugrunde (Dehoust 2012).

Die aus Abfällen erzeugten PET-Rezyklate werden vorwiegend in der Herstellung von Getränkeflaschen, sonstigen Flaschen (Reinigungsmittel), Verpackungsbändern sowie in der Folien- und Textilfaserindustrie eingesetzt.

⁴⁹ WA39159080 fasst alle Kunststoffe zusammen, bei denen es sich nicht um PE, PS, PP oder PVC handelt.

Abbildung 7-5: Stoffströme der Kunststoffsorte Polyethylenterephthalat (PET) in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

7.2.4 Polystyrol (PS)

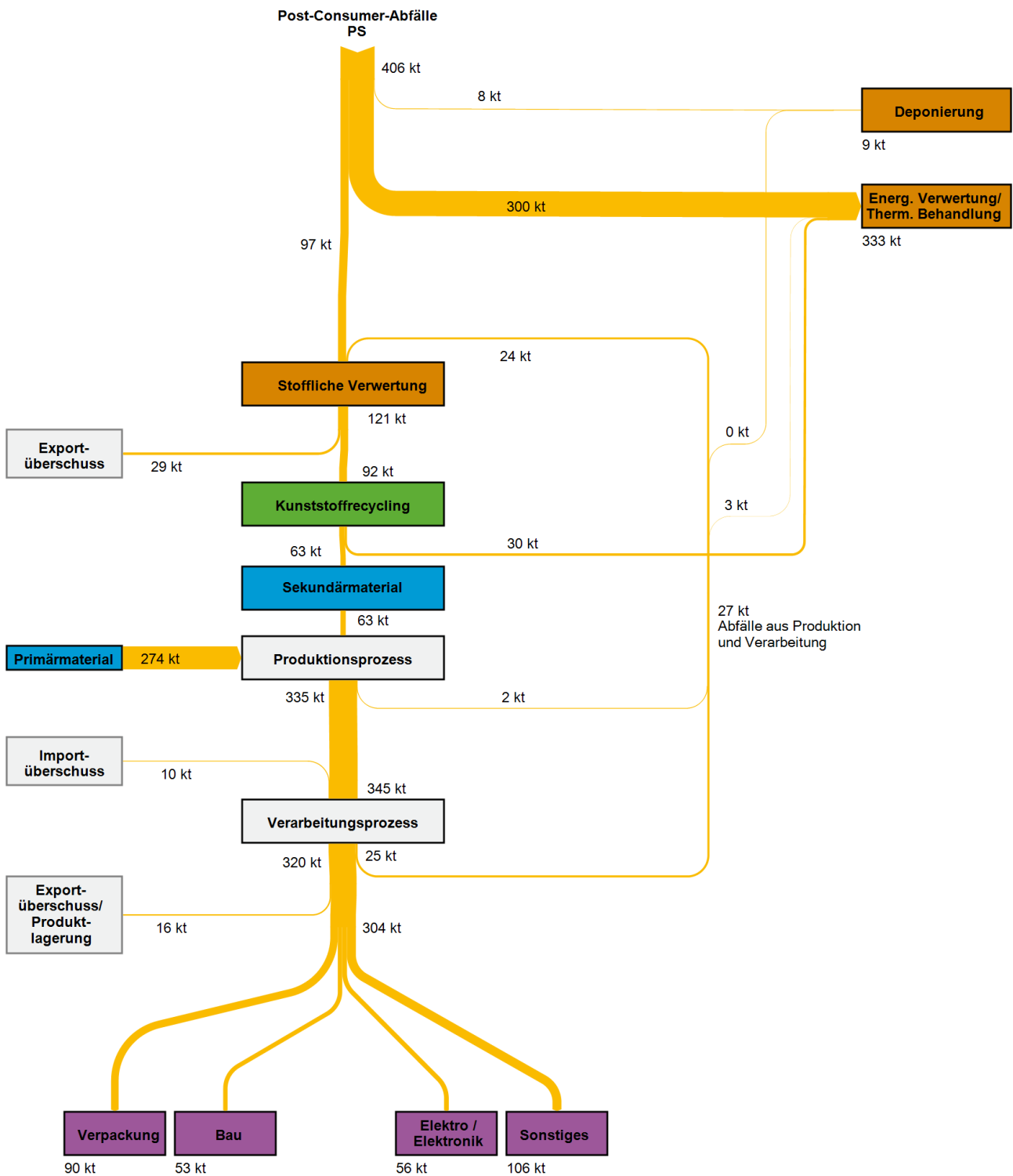
Unter den betrachteten Kunststoffsorten weist Polystyrol (PS) mit rund 433.000 t im Jahr 2013 das geringste Abfallaufkommen an Post-Consumer- und Produktions-/Verarbeitungsabfällen auf. Aufgrund der An-

wendung als geschäumtes Polystyrol und der hiermit verbundenen deutlich niedrigeren Dichte haftet diesem Vergleich allerdings eine gewisse Verzerrung an.

Im Jahr 2013 wurden von den insgesamt erfassten Altkunststoffen aus PS rund 121.000 t der stofflichen Verwertung zugeführt. Laut Veröffentlichung in Consultic (2014a) waren davon 24.000 t aus der produzierenden oder verarbeitenden Industrie. Da keine Untersuchungen zur Erfassung von PS aus Post-Consumer-Abfällen vorliegen, wurde, wie bereits bei der Kunststoffsorte PP beschrieben, eine eigenständige Abschätzung vorgenommen. Die Berechnung von 97.000 t PS zur stofflichen Verwertung basiert auf einem aus Sortieranaysen abgeleiteten Anteil von 10 Ma.-% an der Menge der Kunststoffgemische in Tabelle 7-1.

Nach Berücksichtigung der Im- und Exportmengen gemäß Auflistung im Warenverzeichnis der Außenhandelsstatistik sind 92.000 t der Kunststoffsorte PS in Deutschland recycelt worden. Das bei der abschließenden Aufbereitung erzeugte Rezyklat für den Einsatz als Sekundärrohstoff in der Kunststoffindustrie betrug im Jahr 2013 rund 63.000 t.

Abbildung 7-6: Stoffströme der Kunststoffsorte Polystyrol (PS) in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

7.2.5 Polyvinylchlorid (PVC)

Der Einsatz von Polyvinylchlorid (PVC) erfolgt mit ca. 70 % überwiegend im Baubereich u.a. in Form von Rohren, Fenstern und Bodenbelägen. Dass in Folge von Rückbau-, Umbau- oder Instandsetzungsmaßnah-

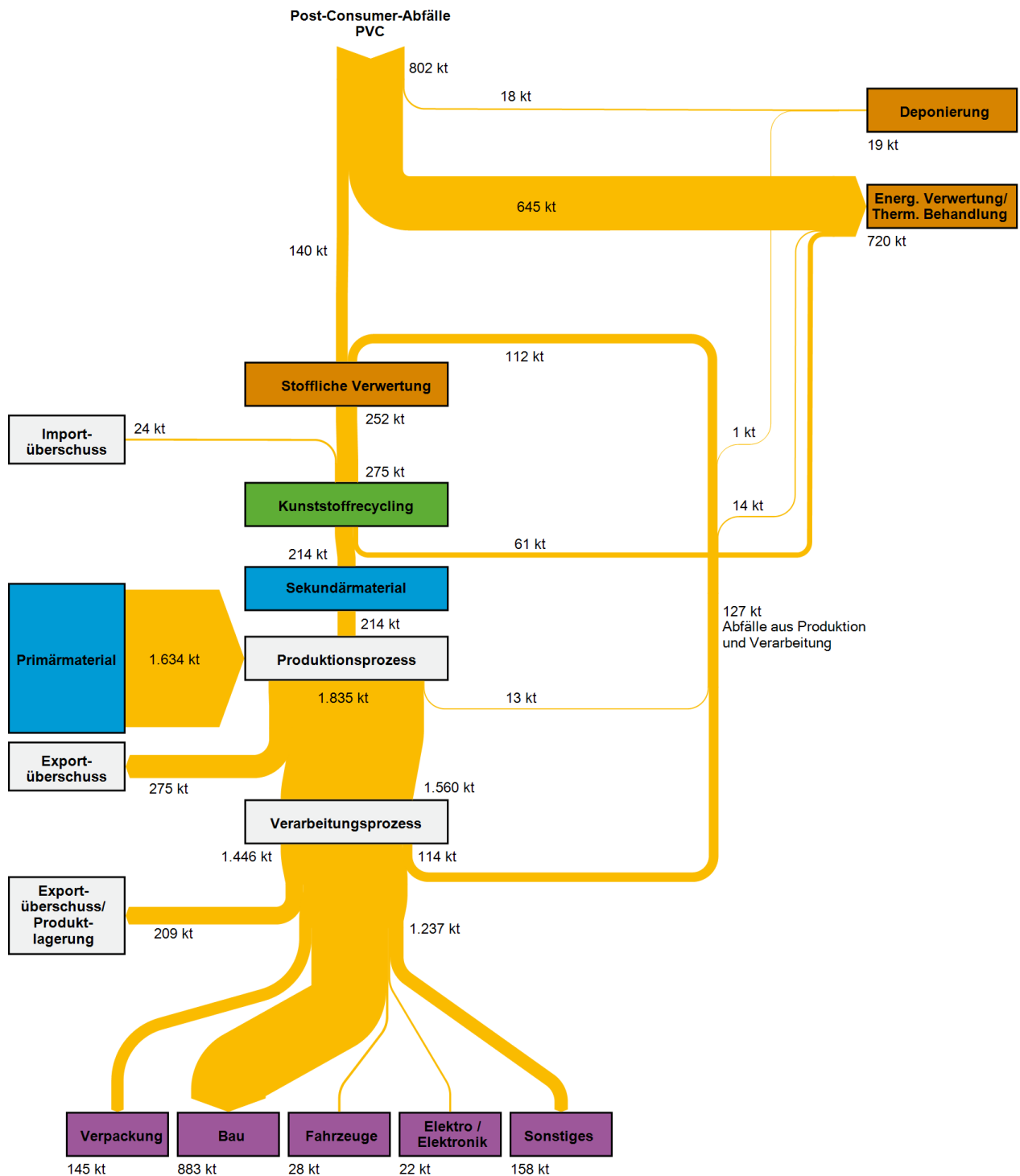
men an Bauwerken ein Teil dieser Materialien gezielt demontiert und getrennt erfasst wird, trägt maßgeblich zu dem Anteil der stofflichen Verwertung von PVC bei.

In Fortschreibung der Mengenangaben aus den Jahren 2005 und 2009 in der Veröffentlichung „Alles über PVC“ der heutigen AGPU Media GmbH und der für das Jahr 2013 von Consultic veröffentlichten Analyse der PVC-Ströme ist von einer stofflich verwerteten PVC-Menge aus Post-Consumer Abfällen in Höhe von ca. 140.000 t im Jahr 2013 auszugehen (PVC plus 2011 und Consultic 2014b). Die getrennte Erfassung der für das Recycling geeigneten PVC-Abfälle geht in erster Linie auf brancheninterne Rücknahmesysteme wie das der Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling, Rewindo (Fenster, Rollläden, Türen), RoofCollect (Dach- und Dichtungsbahnen) und den Kunststoffrohrverband zurück. Darüber hinaus fallen rund 127.000 t Kunststoffabfälle aus PVC in dessen Produktion und Verarbeitung an (Consultic 2014a).

Aus der Gesamtmenge von 275.000 t PVC-Abfälle zur stofflichen Verwertung in Deutschland werden durch die Aufbereitung in Kunststoffrecyclinganlagen rund 214.000 t an Rezyklat für den Einsatz als Sekundärrohstoff hergestellt. Dabei liegt ein leichter Importüberschuss von Abfällen aus PVC vor, wie dem Warenverzeichnis der Außenhandelsstatistik (WA39153000) zu entnehmen ist.

Mit 720.000 t wird der Großteil des PVC-Aufkommens dagegen energetisch verwertet. Dabei ist festzustellen, dass PVC gegenüber anderen Kunststoffen verstärkt in MVA anstelle von EBS-Kraftwerken verbrannt wird.

Abbildung 7-7: Stoffströme der Kunststoffsorte Polyvinylchlorid (PVC) in Deutschland im Jahr 2013



Quelle: eigene Zusammenstellung

7.3 Verwertungswege und Verwertungsquoten

Bei den betrachteten Kunststoffsorten (PE, PP, PET, PS und PVC) handelt es sich um Thermoplaste, welche aufgrund ihrer Materialeigenschaften generell dazu geeignet sind, in der Kunststoffindustrie direkt wieder eingeschmolzen zu werden. Diese hochwertige werkstoffliche Verwertung setzt allerdings Sortenreinheit

und eine hohe Qualität des Sekundärrohstoffs voraus, welche im Zuge der Abfallaufbereitung nicht immer gewährleistet werden kann.

Grundsätzlich bestehen bei der stofflichen Verwertung von Sekundärkunststoffen drei verschiedene Verwertungsverfahren mit entsprechend unterschiedlichen Substituten (Tabelle 7-7).

Tabelle 7-7: Stoffliche Verwertungsverfahren von Sekundärkunststoffen und deren Substitute

Verwertungsverfahren	Sekundärprodukt	Substitutionsäquivalent
Hochwertige werkstoffliche Verwertung	Zu Regranulat oder Mahlgut aufbereiteter sortenreiner Sekundärkunststoff	Primärkunststoff
Werkstoffliche Verwertung	Aus Mischkunststoffen und sekundärem PVC durch Einschmelzen im Extruder hergestellte Produkte (Bodenbefestigungsgitter, Palisaden, Verkehrselemente, Bakenfußplatten, Lärmschutzwände etc.)	Holz oder Beton
Rohstoffliche Verwertung	Kunststoffeinsatz als Reduktionsmittel in Hochöfen der Stahlindustrie.	Schweröl

Eine Unterteilung der in dem vorangegangenen Kapitel zusammengefasst dargestellten Kunststoffmengen zur stofflichen Verwertung in die drei genannten Verwertungsverfahren kann aufgrund der bestehenden Datenlage nur unter Einbezug mehrerer Quellen und Anwendung begründeter Annahmen erfolgen, was eine gewisse Unschärfe in sich birgt.

Die in Stahlwerken rohstofflich verwertete Kunststoffmenge wird für das Jahr 2009 durch die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe“ (Dehoust 2012) mit 69.500 t, durch die Studie von Consultic (2012) mit 53.000 t benannt. Da in Consultic (2014a) für das Jahr 2013 von annähernder Konstanz ausgegangen wird, werden für das hier betrachtete Bilanzjahr 2013 50.000 t als rohstofflich verwertete Kunststoffmenge berücksichtigt.

Die werkstoffliche Verwertung durch thermoplastische Verformung erfolgt insbesondere durch die mittels Aufbereitung erzeugte Mischkunststoff- und PVC-Fraktion (Produktübersicht u.a. CABKA 2016). Die Aufbereitungsfraktion der Mischkunststoffe wird hauptsächlich bei der Behandlung der getrennt erfassten LVP/StNVP-Mengen aus Haushalten erzeugt, weshalb die Ergebnisse der Studie „Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe“ (Dehoust 2012) herangezogen werden. Gemäß dieser Untersuchung wurden 102.300 t an Mischkunststoffen im Jahr 2009 werkstofflich verwertet, womit der Anteil der werkstofflichen Verwertung an der stofflichen Verwertung von Kunststoffen aus der LVP-Sammlung insgesamt 25 % beträgt. In Ermangelung aktuellerer Daten, wird diese Verwertungsmenge auf das Jahr 2013 übertragen. Die Zusammensetzung der Mischkunststofffraktion⁵⁰ erfolgt auf Basis vorliegender Ergebnisse von Sortieranalysen an LVP-Behandlungsanlagen. Bezüglich der werkstofflich verwerteten PVC-Menge liegen keine spezifischen Daten vor, weshalb der Anteil der thermoplastisch verarbeiteten Menge ebenfalls mit 25 % der stofflich verwerteten PVC-Menge angenommen wird, einer Verwertungsmenge von rund 50.000 t entsprechend.

Da eine Einzeldifferenzierung aller stofflich verwerteten Kunststoffsorten dieser Studie nicht möglich ist, wird angenommen, dass die nicht rohstofflich oder unter thermoplastischer Verformung werkstofflich verwerteten Kunststoffe als Regranulat hochwertig werkstofflich verwertet werden.

⁵⁰ Angenommene Zusammensetzung Mischkunststofffraktion: 18 % HDPE, 29 % LDPE, 30 % PP, 5 % PS, 3 % PET, 1 % PVC, 15 % sonstige Kunststoffe

Wie den einzelnen Stoffstromdarstellungen zu entnehmen ist, findet ein Großteil der stofflichen Verwertung im Ausland statt. Die hier erzielte Substitutionswirkung geht auf die innerdeutschen Bemühungen der Getrenntsammlung und Abfallbehandlung zurück. Vor diesem Hintergrund werden die im Inland und im Ausland durch die Kunststoffverwertung erzielten Substitutionseffekte der hiesigen Sekundärwirtschaft zugeschrieben. Die in den Unterkapiteln der einzelnen Kunststoffsorten genannten Aufbereitungsverluste/Regranulatausbeuten bei der Kunststoffaufbereitung von Post-Consumer-Abfällen werden für die in In- und Ausland verwerteten Mengen angewendet.

Da die Entfernung von Fremdstoffanteilen und Aufbereitungsverluste in der Aufbereitungskette - Sortierung der Abfälle, Separierung des Kunststoffs, Störstoffentfrachtung und Kunststoffaufbereitung zu Regranulat - bereits enthalten sind, kann die als Sekundärmaterial in die jeweilige Produktion eingehende Menge als massenäquivalent zu den alternativ eingesetzten Primärrohstoffen angesehen werden.

Obwohl Erdöl der Primärrohstoff aller Kunststoffe ist, führen bei der Herstellung der Primärproduktion von Kunststoffsorten verschiedene Verarbeitungsschritte, Zusatzstoffe etc. zu einem unterschiedlichen Produktionsaufwand, der sich auch im Ressourcenverbrauch widerspiegelt. Anstelle von Erdöl werden daher bei der hochwertigen werkstofflichen Verwertung die jeweiligen Primärkunststoffsorten angesetzt.

Wie Tabelle 7-8 zeigt, belaufen sich die für die Substitution von Primärrohstoffen anrechenbaren Mengen der betrachteten Hauptkunststoffe PE, PP, PET, PS und PVC auf insgesamt 1,68 Mio. t.

Während bei der hochwertigen werkstofflichen und der rohstofflichen Verwertung eine massenäquivalente Substitution des entsprechenden Primärkunststoffs bzw. Schweröl angenommen wird, ersetzen die Sekundärkunststoffe bei der werkstofflichen Verwertung Holz oder Beton über das Volumen der erzeugten Produkte⁵¹. Da das Substitutionsverhältnis zwischen Holz und Beton unbekannt ist, wird wie bereits im Vorgängerprojekt von einer Substitution zu gleichen Anteilen ausgegangen.

Tabelle 7-8: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC 2013

Sekundärrohstoff	Hochwertige werkstoffliche Verwertung 1:1 Substitution Primärkunststoff	Werkstoffliche Verwertung			Rohstoffliche Verwertung 1:1 Substitution von Schweröl
		Sekundärkunststoff	Substitution Holz	Substitution Beton	
PE-HD	277.000 t	19.000 t	15.000 t	46.000 t	9.000 t
PE-LD	314.000 t	30.000 t	24.000 t	72.000 t	14.000 t
PP	229.000 t	32.000 t	26.000 t	77.000 t	15.000 t
PET	457.000 t	4.000 t	3.000 t	10.000 t	2.000 t
PS	75.000 t	5.000 t	4.000 t	12.000 t	2.000 t
PVC	146.000 t	50.000 t	40.000 t	120.000 t	300 t
Gesamt	1.498.000 t	139.000 t	111.000 t	334.000 t	43.000 t

Wie den Darstellungen der Stoffströme für die einzelnen Kunststoffsorten zu entnehmen ist, stellt mit Ausnahme von PET die Verbrennung von Kunststoffabfällen nach wie vor den mengenmäßig dominierenden Verwertungsweg dar.

⁵¹ Der volumenäquivalenten Substitution liegen folgende Dichten zugrunde: durch thermoplastische Verformung erzeugte Sekundärkunststoffprodukte: 0,5 t/m³; Holz: 0,8 t/m³; Beton: 2,4 t/m³

In den bisherigen Einzeldarstellungen wurde aufgrund der bestehenden Datenlage auf eine Aufschlüsselung der energetisch verwerteten Mengen nach Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen und Feuerungsanlagen (EBS-Kraftwerke bzw. Mitverbrennungsanlagen) verzichtet. Da sich die Wirkungsgrade dieser beiden Verbrennungsanlagen jedoch deutlich voneinander unterscheiden, erscheint für die Abschätzung der Substitutionswirkung eine Unterteilung notwendig.⁵² Daher wird unter Rückgriff auf die in der Fachserie 19 Reihe 1 nach den Entsorgungswegen in MVA und Feuerungsanlagen differenzierten Abfallmengen in Kombination mit den angenommenen Kunststoffgehalten (siehe Anhang II) ein Verwertungsverhältnis von 60 Ma.-% MVA zu 40 Ma.-% Feuerungsanlagen abgeleitet und auf alle Kunststoffsorten pauschal übertragen. Die stattfindende Verlagerung von PVC Abfällen aus den für Feuerungsanlagen erzeugten Brennstofffraktionen in die Abfallströme zur Verbrennung in MVA lässt sich aufgrund der geringen Datenlage nicht mit Bestimmtheit quantifizieren und wird deshalb nicht gesondert ausgewiesen. Die Einschätzung von Consultic für das Jahr 2005 mit einer angegebenen energetischen Verwertung von 93 Ma.-% der PVC Abfälle in MVA erscheint überhöht (EcoEnergy 2008).

Während die Kunststoffabfälle aus Produktion und Verarbeitung in trockener Form anfallen und verwertet werden, haftet den in Post-Consumer-Abfällen enthaltenen Kunststoffen eine gewisse Wassermenge an. Anhand der Untersuchungen von Dehoust (2012) und Bachhiesl et al. (2001) werden Wassergehalte von 9 Ma.-% (PE-HD, PP, PET), 13 Ma.-% (PE-LD), 15 Ma.-% (PS) und 3 Ma.-% (PVC) abgeleitet.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich die in Tabelle 7-9 aufgelisteten Kunststoffmengen zur energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen und Feuerungsanlagen.

Tabelle 7-9: Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC 2013

Verwertungsort	Kunststoffsorte	Verwertete Menge	Heizwert	Substitutions-äquivalent
MVA	PE-HD	391.000 t TM	46,1 MJ/kg	Strom + Wärme
	PE-LD	882.000 t TM	46,1 MJ/kg	
	PP	592.000 t TM	44,0 MJ/kg	
	PET	201.000 t TM	20,0 MJ/kg	
	PS	173.000 t TM	40,2 MJ/kg	
	PVC	420.000 t TM	18,0 MJ/kg	
Summe MVA		2.658.000 t TM		
Feuerungsanlagen (insb. EBS-Kraftwerke und Mitverbrennungsanlagen)	PE-HD	261.000 t TM	46,1 MJ/kg	Strom + Wärme
	PE-LD	588.000 t TM	46,1 MJ/kg	
	PP	394.000 t TM	44,0 MJ/kg	
	PET	134.000 t TM	20,0 MJ/kg	
	PS	115.000 t TM	40,2 MJ/kg	
	PVC	280.000 t TM	18,0 MJ/kg	
Summe EBS-KW		1.772.000 t TM		
Gesamt		4.430.000 t TM		

⁵² Als Wirkungsgrade werden in dieser Studie folgenden Annahmen getroffen: MVA: elektrischen Wirkungsgrad: 12 %, thermischer Wirkungsgrad: 30 %; EBS: elektrischen Wirkungsgrad: 20 %, thermischer Wirkungsgrad: 16 %; Biomasse-HKW: elektrischen Wirkungsgrad: 20 %, thermischer Wirkungsgrad: 20 %; BHKW Biogas: elektrischen Wirkungsgrad: 37 %, thermischer Wirkungsgrad: 43 % (Quelle: Dehne, Iswing (2015) und eigenen Daten u.e.c. Berlin

Für 2013 errechnen sich aus den in Kapitel 7.2 dargestellten, auf Frischmasse bezogenen Stoffströmen die in Tabelle 7-10 dargestellten Verwertungsquoten. Da bei Kunststoffen die ausländische gegenüber der inländischen Verwertung überwiegt, beinhaltet die Quote zur Darstellung des Sekundärkunststoffanteils in Kunststoffprodukten (Sekundärproduktion) in Abweichung zu anderen hier betrachteten Materialarten auch die im Ausland erfolgende Verwertung. Die Quoten der werkstofflichen und rohstofflichen Verwertung je Kunststoffsorte werden nicht dargestellt, da deren Anteil unter 1 % der Holz-/Betonproduktionsmenge bzw. Erdölfördermenge liegt.

Tabelle 7-10: Verwertungsquoten der betrachteten Kunststoffsorten: PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC im Jahr 2013

Sekundärkunststoff	Sekundärproduktion (hochwertige werkstoffliche Verwertung) im In- und Ausland / inländ. Gesamtproduktion	Stoffliche Verwertung in Anlagen im In- und Ausland / Abfallaufkommen	Energetische Verwertung im Inland / Abfallaufkommen
PE-HD	23 %	35 %	63 %
PE-LD	21 %	21 %	77 %
PP	12 %	24 %	74 %
PET	74 %	67 %	32 %
PS	22 %	28 %	70 %
PVC	8 %	29 %	71 %

7.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Berechnung der DIERec und DERec-Indikatoren und KEA-Salden wurden für die stoffliche Verwertung die oben genannten unterschiedlichen Verwertungsmöglichkeiten über Prozessdaten aus ecoinvent abgebildet. Für die hochwertige werkstoffliche Verwertung als Re-Kunststoff wurde für die DERec-Berechnung für Erdgas und Erdöl, als wichtigster Grundstoff der Kunststoffe, die ausländische Vorkette abgeschnitten. Aus den entsprechenden Prozessdaten von ecoinvent lassen sich die Materialinputs für Erdgas und Erdöl bestimmen; umfassen dabei aber sowohl die stoffliche wie energetische Nutzung dieser beiden fossilen Brennstoffe in der Kunststoffherstellung. Daher wurde aus jeweiligen Öko-Profilen der untersuchten Kunststoffsorten (PlasticsEurope 2005, 2012, 2014a, 2014b, 2017) die jeweiligen Anteile für Erdöl und Erdgas abgeleitet, die im Kunststoff entweder stofflich gespeichert sind oder aber als Prozessenergie genutzt wurde. Die Inputs für Erdgas und Erdöl laut ecoinvent wurden anschließend entsprechend um die Faktoren der stofflichen Speicherung modifiziert. Für die Berechnung der KRA und KEA-Koeffizient für rezyklierte Kunststoffe wurde grundsätzlich auf die Systematik der Vorgängerstudie zurückgegriffen, die einen rein energetischen Aufwand für das Recycling von Kunststoffen unterstellt, der sich aus einem Transportaufkommen (1.000 MJ/t als Dieselkraftstoff) und einem nach Kunststoffsorten abhängigen Aufwand an elektrischer Energie für den mechanischen Recyclingprozess zusammensetzt. Die Vorgängerstudie zitiert dafür Fricke et al. (2009), die für PVC und PE einen ausgesprochen hohen energetischen Aufwand von bis zu 15.000 MJ/t benennen. Dieser Maximalwert wurde in der Vorgängerstudie für PVC verwendet. Für PE übernimmt die Vorgängerstudie einen Wert von 9.000 MJ/t aus BUND (2010), der ebenfalls deutlich über Werten aus anderen Studien liegt. In dieser Studie wird argumentiert, dass der energetische Aufwand für das Recycling von unterschiedlichen Kunststoffsorten in vergleichbaren Größenordnungen liegt und zwar eher im Bereich der von der Vorgängerstudie verwendeten Werte für PET und Mischkunststoffe. In einer aktuellen Studie zum PVC-Recycling in China (Ye et al. 2017) wird der energetische Aufwand in Form von Elektrizität in kWh und Erdgas in m³ für den Recyclingprozess angegeben. Umgerechnet in MJ ergibt dies

einen energetischen Aufwand von 2.600 MJ/t. Zusätzlich wird diesem Wert der Transportaufwand aus der Vorgängerstudie hinzugerechnet, so dass wir, im Gegensatz zur Vorgängerstudie, bei sekundärem PVC nicht mit einem energetischen Aufwand von 15.000 MJ/t rechnen, sondern mit 3.600 MJ/t. Aus Arena et al. (2003), einer LCA für das Recycling von PET und PE, kann aus den detaillierten Angaben im Text sowie aus Fig. 4 ein energetischer Aufwand von rund 4.000 MJ/t für das mechanische Recycling von PE und PET abgeleitet werden.⁵³ Dieser Wert ist inklusive der Transportaufwendungen und wird in dieser Studie sowohl für PE als auch für PP, PET und PS verwendet. Diese Angaben werden in ihrer Größenordnung von Ergebnissen einer Studie von WRAP (2008) gestützt, die je nach Sortiermethode einen energetischen Aufwand für gemischte Kunststoffabfälle, normiert auf die Outputmenge von 1 t sortierten und mechanisch rezyklierte Kunststoffsorten, von 5.000 MJ/t bis 6.150 MJ/t für das mechanische Recycling plus Transport ermitteln. Daher werden der Energieaufwand für das Recycling von Mischkunststoffen im Vergleich zur Vorgängerstudie ebenfalls leicht reduziert (statt 6.400 MJ/t nur 5.600 MJ/t als Mittelwert der angegebenen Spannweite in WRAP (2008)).

Wie bereits bei der Darstellung der Verwertungswege werden die Indikatoren im Folgenden für die hochwertige werkstoffliche Verwertung und die energetische Verwertung (in Zusammenfassung von thermischer Behandlung und energetischer Verwertung, siehe Kapitel 2.2) separat ausgewiesen. Im Falle der Mischkunststoffe wird die rohstoffliche Verwertung zusammen mit der werkstofflichen Verwertung betrachtet.

Tabelle 7-11: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PE-HD, Granulat primär	1,80	497
PE-HD, Re-Granulat, sekundär	0,55	153
	DIERec	344

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-12: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PE-HD, Granulat primär	1,70	469
PE-HD, Re-Granulat, sekundär	0,44	153
	DERec	316

Quelle: eigene Zusammenstellung

⁵³ Der Artikel von Arena et al. (2003) untersucht allerdings ein gemeinsames Recycling von PET und PE, bei der die Bezugsgröße 1 t PET darstellt. Zudem sind noch Aufwendungen für Deponierung von nicht recyclingfähigen Bestandteilen etc. mit beachtet.

Tabelle 7-13: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PE-HD, Granulat primär	78,58	77,65	21.766	21.731
PE-HD, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	2.833	2.588
KEA-Saldo			18.987	18.886

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-14: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-HD, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PE-HD, Granulat primär	36,21	35,34	10.030	9.775
PE-HD, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	2.833	2.588
KEA-Saldo			7.180	7.187

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-15: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PE-LD, Granulat primär	1,81	567
PE-LD, Re-Granulat, sekundär	0,55	173
DIERec		393

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-16: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PE-LD, Granulat primär	1,71	537
PE-LD, Re-Granulat, sekundär	0,55	173
DERec		363

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-17: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PE-LD, Granulat primär	80,82	79,48	25.361	24.939
PE-LD, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	3.215	2.936
KEA-Saldo			22.146	22.003

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-18: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PE-LD, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PE-LD, Granulat primär	40,48	39,19	12.701	12.299
PE-LD, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	3.215	2.936
KEA-Saldo			9.486	9.363

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-19: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PP, Granulat primär	1,75	402
PP, Re-Granulat, sekundär	0,55	127
DIERec		276

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-20: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PP, Granulat primär	1,63	374
PP, Re-Granulat, sekundär	0,55	127
DERec		247

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-21: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PP, Granulat primär	76,40	75,89	17.507	17.390
PP, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	2.348	2.144
		KEA-Saldo	15.159	15.246

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-22: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PP, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PP, Granulat primär	32,77	32,33	7.510	7.409
PP, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	2.348	2.144
		KEA-Saldo	5.163	5.265

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-23: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PET, Granulat primär	3,49	1.600
PET, Re-Granulat, sekundär	0,55	2.53
	DIERec	1.347

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-24: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PET, Granulat primär	3,43	1.568
PET, Re-Granulat, sekundär	0,55	2.53
	DERec	1.316

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-25: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PET, Granulat primär	80,41	77,81	36.774	35.582
PET, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	4.685	4.279
KEA-Saldo			32.089	21.958

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-26: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PET, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PET, Granulat primär	58,26	55,69	26.643	25.467
PET, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	4.685	4.279
KEA-Saldo			21.958	21.188

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-27: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PS, Granulat primär	2,17	163
PS, Re-Granulat, sekundär	0,55	41
DIERec		121

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-28: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PS, Granulat primär	2,05	154
PS, Re-Granulat, sekundär	0,55	41
DERec		112

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-29: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PS, Granulat primär	89,13	88,77	6.689	6.662
PS, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	769	702
KEA-Saldo			5.920	5.960

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-30: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PS, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PS, Granulat primär	42,98	42,70	3.224	3.204
PS, Re-Granulat, sekundär	10,25	9,36	769	702
KEA-Saldo			2.457	2.502

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-31: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PVC, Granulat primär	2,20	321
PVC, Re-Granulat, sekundär	0,48	70
DIERec		250

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-32: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
PVC, Granulat primär	2,14	312
PVC, Re-Granulat, sekundär	0,48	70
DERec		242

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-33: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PVC, Granulat primär	63,14	62,15	9.202	9.058
PVC, Re-Granulat, sekundär	9,20	9,06	1.317	1.205
	KEA-Saldo		7.884	7.853

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-34: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von PVC, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
PVC, Granulat primär	35,92	34,98	5.236	5.098
PVC, Re-Granulat, sekundär	9,20	9,06	1.317	1.205
	KEA-Saldo		3.919	3.893

Quelle: eigene Zusammenstellung

Für eine werkstoffliche Verwertung von (Misch-)Kunststoffen in Form von Lärmschutzwänden wurde angenommen, dass diese Kunststoffe Beton und Holz substituieren. Die entsprechenden Mengen können der Tabelle 7-8 entnommen werden. Im Folgenden wurden die verschiedenen Kunststofffraktionen zur werkstofflichen Verwertung bzw. rohstofflichen Verwertung als Summe aller Kunststoffsorten berechnet. Für die Substitution von Schweröl durch eine rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen wurden ebenfalls die ausländischen Vorketten bei der Berechnung der DERec-Werte und KEA-Salden abgeschnitten.

Tabelle 7-35: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Mischkunststoffe, sekundär	0,83	116
Schnittholz	2,87	321
Beton	1,09	365
Schweröl	1,21	52
	DIERec	622

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-36: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Mischkunststoffe, sekundär	0,83	116
Schnittholz	2,87	319
Beton	1,09	363
Schweröl (ohne Vorkette)	1,02	44
	DERec	578

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-37: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Mischkunststoffe, sekundär	15,08	13,71	2.102	1.912
Schnittholz	37,93	3,07	4.248	344
Beton	0,97	0,88	325	296
Schweröl	49,35	49,20	2.105	2.099
		KEA-Saldo	4.576	826

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-38: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die hochwertige werkstoffliche sowie rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Mischkunststoffe, sekundär	15,08	13,71	2.102	1.912
Schnittholz	37,93	3,07	4.210	341
Beton	0,97	0,88	323	294
Schweröl	0,13	0,07	6	3
		KEA-Saldo	2.477	-1.269

Quelle: eigene Zusammenstellung

Zur Berechnung der Rohstoffeinsparung durch eine energetische Verwertung von Kunststoffen wurde zunächst die bereitgestellte elektrische wie thermische Energie, die bei der Verbrennung der verschiedenen Kunststoffsorten in MVA und EBS entsteht, ermittelt. Dabei wurden die Wirkungsgrade der Kraftwerke sowie die individuellen Heizwerte der Kunststoffsorten berücksichtigt. Die Energiemenge wurde an an-

schließlich mit KRA-Koeffizienten in eingesparte Rohstoffmengen umgerechnet. Für die bereitgestellte elektrische Energie wurde der KRA-Koeffizienten für den deutschen Strommix im Hochspannungsnetz verwendet, für die thermische Energie sowohl ein KRA-Koeffizient für Wärme auf Basis von Erdgas sowie ein KRA-Koeffizient basierend auf ecoinvent-Prozessdaten für Wärme mit einem Brennstoffmix ohne Erdgas. Die Gewichtung der beiden KRA-Koeffizienten für Wärme ergibt sich aus dem Anteil von Erdgas an der deutschen Wärmeerzeugung (40,3%).

Der KRA-Koeffizient für Wärme aus Erdgas ist sehr klein, da die Prozessdaten auf Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung beruhen und entsprechend der ökonomischen Allokation in ecoinvent die stofflichen Vorketten vor allem dem Strom zurechnet werden. Würde bei einer DERec-Berechnung der KRA für importiertes Erdgas dem KRA für Wärme aus Erdgaskraftwerke abgezogen, ergäbe dies einen negativen Koeffizienten. Dies ist inhaltlich nicht zu begründen.

Tabelle 7-39: Ergebnisse für den Indikator DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Kunststoffen, 2013

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]					
		PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC
Strom	0,175	799	1.803	1.154	178	307	335
Wärme Erdgas	0,013	38	87	55	9	15	12
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,180	789	1.781	1.140	176	304	331
DIERec und DERec		1.626	3.670	2.350	362	626	679

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-40: Saldo KEA insgesamt für die energetische Verwertung von Kunststoffen, 2013

	spezifischer KEA insgesamt [MJ/kg]	KEA insgesamt [TJ]					
		PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC
Strom	3,019	13.777	31.094	19.909	3.069	5.303	5.786
Wärme Erdgas	0,472	1.392	3.142	2.012	310	536	585
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,109	4.850	10.947	7.009	1.080	1.867	2.037
KEA-Saldo		20.020	45.183	28.930	4.460	7.706	8.408

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-41: Saldo KEA (nicht-erneuerbar für die energetische Verwertung von Kunststoffen, 2013

	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]					
		PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC
Strom	2,724	12.430	28.054	17.963	2.769	4.785	5.220
Wärme Erdgas	0,469	1.384	3.125	2.001	308	533	581
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,821	3.593	8.108	5.192	800	1.383	1.509

KEA-Saldo	17.407	39.287	25.155	3.878	6.701	7.311
------------------	---------------	---------------	---------------	--------------	--------------	--------------

Quelle: eigene Zusammenstellung

7.4.1 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

7.4.1.1 Verwertungsmengen

Die Consultic-Veröffentlichung „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland“ erfolgt lediglich alle zwei Jahre für die ungeraden Jahre. Aus diesem Grund beschränkt sich die nachfolgende Zeitverlaufsdarstellung der stofflich und energetisch verwerteten Kunststoffe auf die Jahre 2007, 2009, 2011, 2013 und 2015⁵⁴.

Es zeigt sich, dass die stoffliche Verwertung der betrachteten Kunststoffsorten PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC in Sekundärprodukten von 2007 (1,5 Mio. t) auf 2015 (1,8 Mio. t) zunahm. Die stoffliche Verwertung dieser und nachfolgend genannter Kunststoffmengen aus innerdeutschen Abfällen erfolgt größtenteils im Ausland, weshalb in Abweichung zu anderen hier betrachteten Materialarten die im Ausland erzielten Substitutionseffekt der hiesigen Sekundärwirtschaft zugeschrieben werden. Die weiterführende Differenzierung der zuvor genannten stofflich verwerteten Mengen nach Hochwertigkeit der Verwertung und jeweiliger Kunststoffsorte sind Tabelle 7-42 und Tabelle 7-43 zu entnehmen.

Tabelle 7-42: Hochwertige werkstoffliche und rohstoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe im In- und Ausland, PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC in kt TM

Sekundärrohstoff	Hochwertige werkstoffliche Verwertung 1:1 Substitution Primärkunststoff					Rohstoffliche Verwertung 1:1 Substitution von Schweröl				
	2007	2009	2011	2013	2015	2007	2009	2011	2013	2015
PE-HD	226	221	265	277	297	9	9	9	9	12
PE-LD	287	268	294	314	329	14	14	15	14	20
PP	219	200	226	229	232	15	15	16	15	21
PET	360	453	480	457	467	2	2	2	2	2
PS	92	76	73	75	78	2	2	2	2	3
PVC	125	116	132	146	151	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5
Gesamt	1.309	1.335	1.470	1.498	1.555	43	43	45	43	60

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-43: Werkstoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe im In- und Ausland, PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC in kt TM

Sekundärrohstoff	Werkstoffliche Verwertung		
	Sekundär-Kunststoff	Substitution Holz	Substitution Beton

⁵⁴ Da die GVM Veröffentlichung zu Verpackungsabfällen aus dem Jahr 2015 zum Zeitpunkt dieser Studie noch nicht erschienen ist, wurden die methodisch auf GVM-Daten zurückgehenden Kunststoffabfälle zur stofflichen Verwertung auf Basis der GVM Untersuchung des Jahres 2014 abgeschätzt.

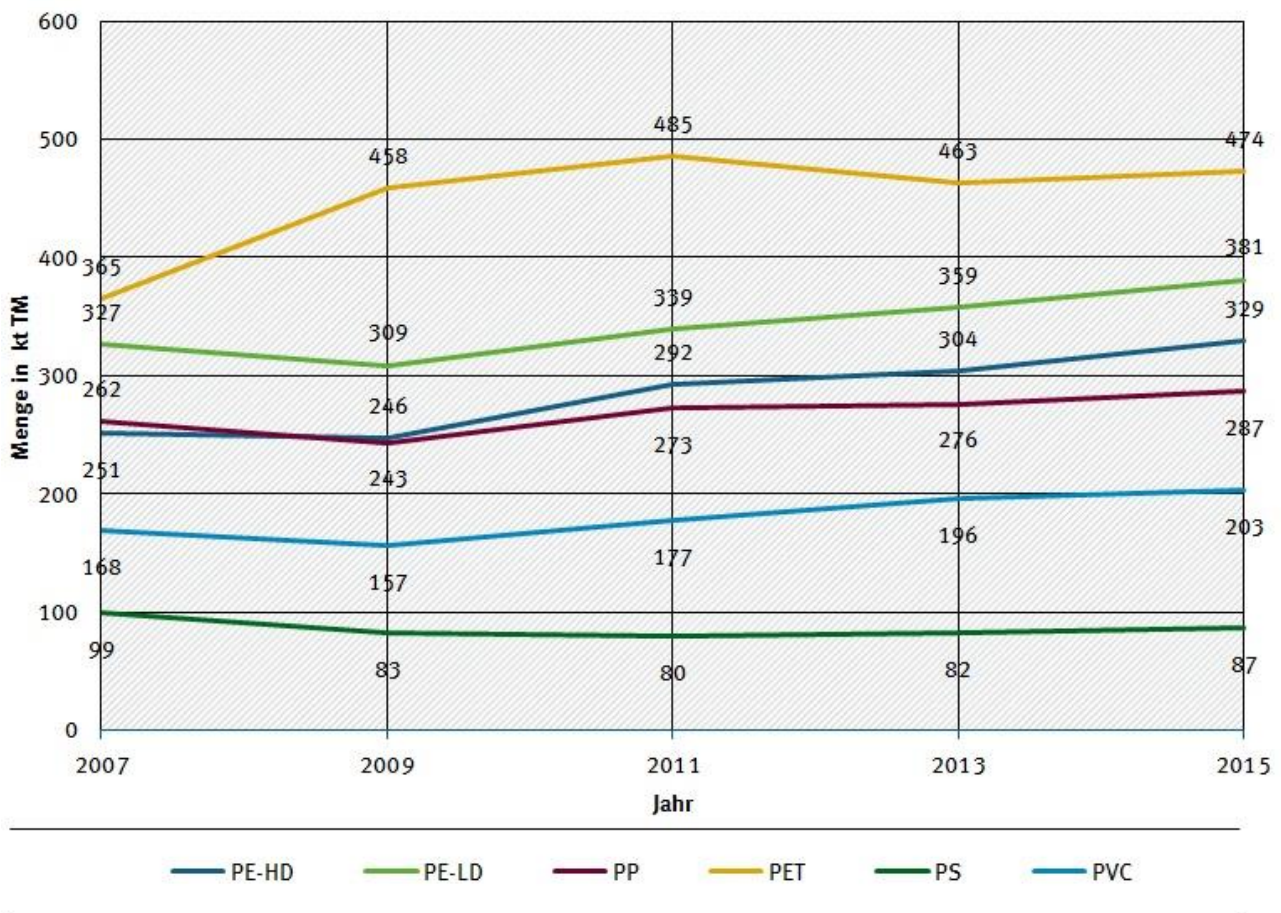
Sekundärrohstoff	Werkstoffliche Verwertung														
	Sekundär-Kunststoff					Substitution Holz					Substitution Beton				
	2007	2009	2011	2013	2015	2007	2009	2011	2013	2015	2007	2009	2011	2013	2015
PE-HD	16	17	18	19	20	13	14	14	15	16	38	41	43	46	48
PE-LD	26	27	29	30	32	21	22	23	24	26	62	65	70	72	77
PP	27	28	31	32	34	22	22	25	26	27	65	67	74	77	82
PET	3	3	3	4	4	2	2	2	3	3	7	7	7	10	10
PS	4	4	5	5	5	3	3	4	4	4	10	10	12	12	12
PVC	43	40	45	50	51	34	32	36	40	41	103	96	108	120	122
Gesamt	120	119	132	139	146	95	95	105	112	117	286	286	314	336	350

Quelle: eigene Zusammenstellung

Abbildung 7-8: Stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen nach Kunststoffsorten 2007 - 2015

Stoffliche Verwertung in Deutschland erfasster Kunststoffsorten

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2015



Wie Tabelle 7-44 verdeutlicht, lag die Menge der energetisch verwerteten Kunststoffe im gesamten Betrachtungszeitraum 2007 bis 2015 deutlich über jener der stofflichen Verwertung. Gleichzeitig, nahm die

energetisch verwertete Kunststoffmenge von 2007 auf 2015 um rund 1,3 Mio. t zu, was auf einen Anstieg des Aufkommens an Kunststoffabfällen zurückzuführen ist.

Tabelle 7-44: Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Kunststoffe in Deutschland
PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS und PVC

Verwertungsort	Kunststoffsorte	Verwertete Menge in kt TM				
		2007	2009	2011	2013	2015
MVA	PE-HD	270	311	364	391	381
	PE-LD	675	731	828	882	864
	PP	420	464	548	592	587
	PET	87	92	158	201	206
	PS	136	144	170	173	160
	PVC	315	338	390	420	413
Summe MVA		1.902	2.080	2.456	2.658	2.611
Feuerungsanlagen (insb. EBS- Kraftwerke und Mitverbrennungsanlagen)	PE-HD	180	207	242	261	254
	PE-LD	450	488	552	588	576
	PP	280	309	365	394	392
	PET	58	61	105	134	138
	PS	91	96	113	115	107
	PVC	210	226	260	280	275
Summe EBS-KW		1.268	1.387	1.638	1.772	1.741
Gesamt		3.170	3.467	4.094	4.430	4.352

Quelle: eigene Zusammenstellung

7.4.1.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus den in Kapitel 7.4.1.1 dargestellten Mengen an stofflich und energetisch verwerteten Kunststoffen im Zeitverlauf der Jahre 2007-2015 ergeben sich folgende DIERec- und DERec-Indikatoren sowie KEA-Salden. Die Indikatoren sind getrennt nach stofflicher und energetischer Verwertung ausgewiesen. Für die energetische Verwertungen mit dem Ziel Energierohstoffe zu substituieren, werden sowohl bei den Kunststoffen als auch den organischen Materialien (siehe nachfolgende Kapitel) keine Unterscheidung zwischen „mit Vorkette“ und „ohne Vorkette“ vorgenommen. Vielmehr wurde für alle mit Stromprozessen assoziierten Rohstoffe grundsätzlich die Annahmen getroffen, dass kein Unterschied zwischen einheimischen und ausländischen Energierohstoffen besteht. Da auf jeder Stufe der ecoinvent-Prozessketten Energieinputs enthalten sind, wäre eine Differenzierung und Anpassung der Energieinputs nach inländischen Energieträgern (mit Vorkette) und ausländischen Energieträgern (nur mit Eigengewicht) ein enormer Aufwand. Bei den verwendeten Prozess-Daten für Wärme aus ecoinvent ("market for heat, district or industrial, natural gas"), basieren die energetischen Inputs vor allem auf "combined heat and power (CHP) plants". Deren Wärme stellt ein Nebenprodukt dar, welche bei der ökonomischen Allokation in ecoinvent wenig Beachtung findet. Entsprechend gering ist der KRA und KEA für den verwendeten Wärme-Prozess. Nach der hier angewandten Systematik würde man zum Abschneiden der Vorkette den KRA für importiertes Erdgas (dargestellt über den Prozess "market for natural gas, high pressure") vom KRA des Prozesses „market for heat, district or industrial, natural gas“ abziehen. Aufgrund der Allokation im Wärmeprozess erhielte man dann jedoch einen negativen (netto-)KRA-Koeffizient. Daher wird auch bei Wärmeprozessen nicht zwischen inländischen

und ausländischen Energiequellen unterschieden und der DERec der energetischen Verwertung zur Substitution von Strom und Wärme ist gleich dem DIERec.

Tabelle 7-45: DIERec für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen in kt 2007 – 2015

	In kt	PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC	Misch-Kunststoff
2007	DIERec	281	359	264	1.061	149	215	535
2009	DIERec	275	335	241	1.336	123	200	536
2011	DIERec	330	369	272	1.414	117	227	587
2013	DIERec	344	393	276	1.347	121	250	622
2015	DIERec	370	413	279	1.377	126	259	666

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-46: DERec für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen in kt 2007 – 2015

	In kt	PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC	Misch-Kunststoff
2007	DERec	258	332	237	1.036	138	208	491
2009	DERec	252	310	216	1.305	113	193	492
2011	DERec	302	341	244	1.381	108	219	541
2013	DERec	316	363	247	1.316	112	242	578
2015	DERec	339	381	250	1.345	117	250	605

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-47: KEA-Saldo mit Vorkette für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015

	In TJ	PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC	Misch-Kunststoff
2007	KEA	15.433	20.221	14.510	25.272	7.266	6.783	4.183
2009	KEA	15.095	18.904	13.238	31.818	5.992	6.296	4.199
2011	KEA	18.084	20.778	14.965	33.680	5.722	7.141	4.526
2013	KEA	18.897	22.146	15.159	32.089	5.920	7.884	4.576
2015	KEA	20.282	23.236	15.353	32.799	6.169	8.159	5.509

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-48: KEA-Saldo ohne Vorkette für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015

	In TJ	PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC	Misch-Kunststoff
2007	KEA	5.864	8.662	4.941	17.293	3.016	3.371	2.084
2009	KEA	5.735	8.098	4.508	21.772	2.487	3.129	2.099
2011	KEA	6.871	8.900	5.096	23.047	2.375	3.549	2.301
2013	KEA	7.180	9.486	5.163	21.958	2.457	3.919	2.477
2015	KEA	7.706	9.953	5.229	22.443	2.560	4.055	2.570

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-49: DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015

		KRA [kt]					
		PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC
2007	Strom	552	1.379	819	77	243	251
	Wärme Erdgas	27	66	39	4	12	9
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	545	1.362	809	76	240	248
	DIERec und DERec	1.123	2.807	1.667	157	494	508
2009	Strom	635	1.495	905	81	256	270
	Wärme Erdgas	31	72	44	4	12	10
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	627	1.477	894	80	253	267
	DIERec und DERec	1.293	3.043	1.843	166	521	546
2011	Strom	743	1.692	1.068	140	302	311
	Wärme Erdgas	36	81	51	7	15	11
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	734	1.671	1.055	138	299	307
	DIERec und DERec	1.512	3.445	2.174	285	616	629
2013	Strom	799	1.803	1.154	160	276	301
	Wärme Erdgas	38	87	55	9	15	11
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	789	1.781	1.140	180	310	338
	DIERec und DERec	1.626	3.670	2.350	348	602	649
2015	Strom	779	1.765	1.146	183	286	329
	Wärme Erdgas	37	85	55	9	14	12
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	770	1.743	1.132	181	282	326
	DIERec und DERec	1.586	3.593	2.332	373	582	666

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-50: KEA insgesamt für die energetische Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015

		KEA insgesamt [TJ]					
		PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC
2007	Strom	9.514	23.785	14.123	1.326	4.189	4.333
	Wärme Erdgas	961	2.404	1.427	134	423	438
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	3.350	8.374	4.972	467	1.475	1.525
	KEA-Saldo	13.825	34.563	20.522	1.927	6.087	6.296
2009	Strom	10.953	25.785	15.618	1.405	4.418	4.659
	Wärme Erdgas	1.107	2.606	1.578	142	446	471

	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	3.856	9.078	5.498	494	1.555	1.640
	KEA-Saldo	15.916	37.468	22.694	2.041	6.419	6.770
2011	Strom	12.821	29.188	18.423	2.414	5.216	5.365
	Wärme Erdgas	1.296	2.949	1.862	244	527	542
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	4.514	10.276	6.486	850	1.836	1.889
	KEA-Saldo	18.630	42.413	26.771	3.508	7.579	7.796
2013	Strom	13.777	31.094	19.909	3.069	5.303	5.786
	Wärme Erdgas	1.392	3.142	2.012	310	536	585
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	4.850	10.947	7.009	1.080	1.867	2.037
	KEA-Saldo	20.020	45.183	28.930	4.460	7.706	8.408
2015	Strom	13.439	30.445	19.763	3.158	4.927	5.680
	Wärme Erdgas	1.358	3.076	1.997	319	498	574
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	4.731	10.718	6.958	1.112	1.735	2.000
	KEA-Saldo	19.528	44.239	28.718	4.588	7.160	8.254

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 7-51: KEA nicht erneuerbar für die energetische Verwertung von Kunststoffen 2007 – 2015

		KEA nicht erneuerbar [TJ]					
		PE-HD	PE-LD	PP	PET	PS	PVC
2007	Strom	8.584	21.460	12.742	1.197	3.779	3.909
	Wärme Erdgas	956	2.390	1.419	133	421	435
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	2.481	6.202	3.683	346	1.092	1.130
	KEA-Saldo	12.021	30.053	17.844	1.676	5.292	5.475
2009	Strom	9.882	23.264	14.091	1.267	3.986	4.204
	Wärme Erdgas	1.101	2.591	1.569	141	444	468
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	2.856	6.724	4.073	366	1.152	1.215
	KEA-Saldo	13.839	32.579	19.733	1.775	5.582	5.887
2011	Strom	11.567	26.334	16.622	2.178	4.706	4.841
	Wärme Erdgas	1.288	2.933	1.851	243	524	539
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	3.343	7.611	4.804	630	1.360	1.399
	KEA-Saldo	16.199	36.879	23.277	3.050	6.590	6.779
2013	Strom	12.430	28.054	17.963	2.769	4.785	5.220
	Wärme Erdgas	1.384	3.125	2.001	308	533	581
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	3.593	8.108	5.192	800	1.383	1.509
	KEA-Saldo	17.407	39.287	25.155	3.878	6.701	7.311
2015	Strom	12.125	27.468	17.831	2.849	4.446	5.125
	Wärme Erdgas	1.350	3.059	1.986	317	495	571

	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	3.504	7.939	5.153	823	1.285	1.481
	KEA-Saldo	16.980	38.467	24.971	3.990	6.225	7.177

Quelle: eigene Zusammenstellung

8 Detaillierte Darstellung der Stoffstrombilanzen und Verwertungswege von organischen Abfällen

8.1 Altholz

8.1.1 Materialeinsatz in Deutschland

Unter dem Begriff „Altholz“ werden gemäß Altholzverordnung (AltholzV) Industrierestholz und Gebrauchtholz zusammengefasst. Bei Industrieböhlern handelt es sich demnach um „(...) die in Betrieben der Holzbe- oder -verarbeitung anfallenden Holzreste einschließlich der in Betrieben der Holzwerkstoffindustrie anfallenden Holzwerkstoffreste sowie anfallende Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil (> 50 Ma.-%)“. Gebrauchtholz hingegen bezeichnet gebrauchte Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegendem Holzanteil (> 50 Ma.-%).

Durch die Verwendung von Holzschutzmitteln, Farbanstrichen, Beschichtungen und Holzwerkstoffbestandteilen (u.a. Bindemittel und Härter) erfolgt ein Eintrag von Schadstoffen in das Holz (LfU Bayern 2012). In Abhängigkeit von der Belastung mit Schadstoffen sieht die AltholzV eine Einteilung von Altholz in vier Kategorien und die Sonderkategorie PCB-Altholz vor (Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Einteilung in Altholzkategorien gemäß AltholzV

Altholzkategorie	Beschreibung
Altholzkategorie A I	naturbelassenes oder mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung lediglich in unerheblicher Weise mit Schadstoffen verunreinigt wurde
Altholzkategorie A II	verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel
Altholzkategorie A III	Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel
Altholzkategorie A IV	mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz
PCB-Altholz	Altholz, das polychlorierte Biphenyle (PCB) im Sinne der PCB/PCT-Abfallverordnung enthält

Gemäß den Ergebnissen eines Forschungsvorhabens des BMUB unter dem Titel „Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung“ stellten im Jahr 2003 die Althölzer der Kategorie A I und der A II unter den separat erfassten Althölzern den größten Anteil dar. Die Anteile von A III/IV-Hölzern sind dagegen deutlich geringer (Tabelle 8-2).

Tabelle 8-2: Abschätzung der Altholzkategorieanteile an separat erfassten Althölzern im Jahr 2003 (UBA 2006)

	Anteil Altholzkategorie nach AltholzV			
	A I	A II	A III	A IV
Siedlungsabfälle	20 Ma.-%		80 Ma.-%	
Verpackungsabfälle	70 Ma.-%	20 Ma.-%	10 Ma.-%	
Bauabfälle		70 Ma.-%		30 Ma.-%
Abfälle der Holzindustrie	70 Ma.-%	30 Ma.-%		

	Anteil Altholzkategorie nach AltholzV			
	A I	A II	A III	A IV
Altholzmenge 2003	1.923 kt lutro	2.422 kt lutro	331 kt lutro	727 kt lutro
Anteil	36 Ma.-%	45 Ma.-%	6 Ma.-%	13 Ma.-%

Die stoffliche Nutzung von Holz gleicht einer mehrstufigen Kaskadennutzung, die bis zur abschließenden energetischen Verwertung mehrere Nutzungsphasen durchlaufen kann. So ist z.B. eine mehrfache stoffliche Nutzung von Altholz durch wiederholtes Recycling von Spanplatten möglich.

Für die Aufbereitung von Altholz zur Herstellung von Holzwerkstoffen sind nur Althölzer der Altholzkategorien A I und A II zugelassen. Altholz der Altholzkategorie A III ist nur zulässig, wenn Lackierungen und Beschichtungen durch eine Vorbehandlung oder im Rahmen des Aufbereitungsprozesses weitgehend entfernt wurden (Anhang I AltholzV).

Die Zuführung von Altholz zu einer stofflichen Verwertung setzt zunächst eine mechanische Aufbereitung voraus. Diese umfasst im Allgemeinen die Schritte Zerkleinerung, Abtrennung von Fe-/NE-Metallen, Klassifizierung und Separierung. Anschließend wird durch eine Siebung die Nutzfraktion von Überlängen und Feinteilen abgetrennt. Wenn es für die weitere Verwertung erforderlich ist, findet außerdem eine Nachzerkleinerung statt.

Zur Herstellung von Spanplatten aus Altholz können neben naturbelassenen Hölzern auch Holzwerkstoffe eingesetzt werden. Begünstigt wird dies durch die nicht hydrolysebeständige Span-zu-Span-Bindung mittels Harnstoffformaldehydharzen (UF-Harze), welche bei 90 % der Möbelspanplatten verwendetes Bindemittel ist (Kuntz 2011).

Zur Gewinnung von Holzspänen bzw. Holzfasern aus gebrauchten Holzwerkstoffen gibt es verschiedene Recyclingverfahren (Kuntz 2011). Eine Möglichkeit sind thermo-hydrolytische Verfahren, bei denen die Spanplatten einer Dampfbehandlung unterzogen werden. Dabei werden vorzerkleinerte Span- und Faserplatten etwa eine halbe Stunde lang mit Dampf bei Temperaturen von 120 °C aufgeschlossen. Anschließend wird das aufgeschlossene Gut in einem Trommelsieb von Beschichtungsrückständen befreit.

Weiterhin können Holzspan- und Faserplatten im Extruderverfahren recycelt werden. Dabei werden die Platten unter Zuführung von Dampf der Scherwirkung gegenläufiger Doppelschnecken ausgesetzt. Die Durchsatzkapazität dieses Verfahrens ist jedoch sehr gering.

Eine weitere Möglichkeit für das Recycling von UF-gebundenen Spanplatten ist ein Verfahren, bei dem kondensierte Tannine als Bindemittel eingesetzt werden. Dabei werden die Spanplatten zunächst zu sogenannten Retrospänen zerkleinert und anschließend mit einer Tanninlösung beharzt. Die beharzten Retrospäne werden in Deck- und Mittelschichtspäne separiert und den direkt aus Holz gewonnenen Mittel- und Deckschichtspänen beigemischt. Die weitere Vorgehensweise gleicht der üblichen Herstellungsweise von Spanplatten. Während des Pressvorgangs entweicht aus den UF-Recyclingspänen durch den Abbau des UF-Harzes Formaldehyd, der das zugegebene Tannin „in situ“ vernetzt. Eine zusätzliche vorgeschaltete thermo-hydrolytische Behandlung ist folglich nicht notwendig, was zu erheblichen Energieeinsparungen dieses Verfahrens gegenüber den thermo-hydrolytischen Verfahren führt (Kuntz 2011).

8.1.2 Stoffströme in Deutschland 2010

Eine mengenrelevante stoffliche Verwertung von Altholz findet derzeit ausschließlich in der Herstellung von Spanplatten statt. Laut einer Veröffentlichung des Arbeitsbereiches Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft der Universität Hamburg unter dem Titel „Altholz im Entsorgungsmarkt“ betrug die in der deutschen Spanplattenindustrie eingesetzte Altholzmenge im Jahr 2010 etwas mehr als 1,1 Mio. t (Mantau et al. 2012a). Hierbei handelt es sich um Althölzer der Altholzkategorien A I und A II.

Die Produktionsmenge der Spanplattenindustrie belief sich im Jahr 2010 auf rund 6,1 Mio. m³, unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Dichte nach Kuntz (2011) ungefähr 4,3 Mio. t. Die Einsatzmenge an Primärrohstoffen geht ebenfalls auf die Erhebungen der Holzrohstoffbilanz Deutschlands zurück (Mantau 2012b). Grund für die ausschließliche stoffliche Verwertung von Altholz in der Spanplattenindustrie sind insbesondere deren geringere Anforderungen an die Rohstoffqualität.

Wie die Dissertation von Markus Erbreich belegt, ist eine Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF) aus einer Kombination von Altholz und Frischholz theoretisch ebenso möglich (Erbreich 2004). Die detaillierte Untersuchung ergab, dass MDF mit einem Anteil von 25 Ma.-% gut vorsortiertem und gereinigtem Altholz technologische Platteneigenschaften erreichen, die denen einer Frischholzplatte entsprechen. Im Jahr 2010 fand der Einsatz von Altholz in diesem Produktionszweig jedoch noch keine Anwendung (Mantau et al. 2012a). Laut Aussagen der Holzverarbeitenden Industrie ist ein Einsatz von Altholz bei der Herstellung von MDF-Platten aufgrund der Qualität der verfügbaren Altholzfraktionen (hohe Schwankungsbreite an Verunreinigungen und Störstoffen, bereits zerstörte Holzfasern, Beschichtungsrückstände) und dem deshalb notwendigen zusätzlichen Aufbereitungsaufwand weniger wirtschaftlich⁵⁵ (Egger 2016, Glunz 2016). Erst bei der jüngsten Erhebung unter den Holzwerkstoffproduzenten im Jahr 2015 wurden erste Einsatzmengen an Altholz (ca. 0,1 Mio. t) für die Herstellung von MDF- und LDF-Platten dokumentiert (Mantau et al. 2017).

Für das gesamte in Deutschland separat und mit Abfallgemischen erfasste Altholzaufkommen liegen keine gesicherten Daten vor. Das von Mantau et al. (2012a) für das Jahr 2010 benannte Marktvolumen⁵⁶ an Altholz in Höhe von 6,3 Mio. t betrachtet ausschließlich das durch Getrenntsammlung an Entsorgungsbetrieben erfasste Altholz. Diese vor marktwirtschaftlichem Hintergrund erstellte Studie weist zudem darauf hin, dass das tatsächliche Altholzpotezial deutlich über der genannten Menge liegt. Nicht enthalten sind u.a. die nicht quantifizierbaren Altholzmengen, die direkt am Ort des Anfalls (z.B. in privaten Haushalten und Unternehmen) verwertet werden, und die aus Forstwirtschaft und Holzverarbeitender Industrie stammenden Holzreste, die größtenteils von Großfeuerungsanlagen angekauft und energetisch verwertet werden.

Hiervon abweichend bedient sich die vorliegende Studie zur Ermittlung des Altholzaufkommens einer eigenen Bilanzierung auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1. Dabei werden neben den registrierten Abfallschlüsselnummern für getrennt erfasstes Holz auch die genannten Anteile an gemischten Siedlungsabfällen betrachtet (berücksichtigte Abfallarten und deren Anteile siehe Anhang II).

Demnach belief sich das im Jahr 2010 in Deutschland erfasste Altholzaufkommen auf rund 10,5 Mio. t, wobei die Bau- und Abbruchbranche sowie die Holzverarbeitende Industrie die bestimmenden Erzeuger sind (Abbildung 8-1). Bei den dargestellten Abfällen aus der Forstwirtschaft handelt es sich u.a. um Wurzelstöcke/-ballen, Rinden und Holzreste⁵⁷. Mit Ausnahme der bereits genannten, in der Spanplattenindustrie stofflich verwerteten Altholzmenge, wird der Großteil des Altholzaufkommens entweder direkt oder nach Aufbereitung in einer Behandlungsanlage in thermischen Abfallbehandlungsanlagen (Müllverbrennungsanlagen) oder Feuerungsanlagen verbrannt. Zu letzteren zählen neben den genehmigungspflichtigen Feuerungsanlagen (Biomassekraftwerke, EBS-Anlagen, Heizwerke, Kohlekraftwerke, Zementwerke u.a.) auch Kleinfeuerungsanlagen in öffentlicher und privater Hand.

Die in Abbildung 8-1 dargestellte Differenzierung der energetischen Verwertung basiert auf der statistischen Erhebung getrennt nach Müllverbrennungsanlagen und genehmigungspflichtigen Großfeuerungsan-

⁵⁵ Teil der Prozesskette ist die Zerfaserung von Holzhackschnitzeln im Refiner. Dieser mit Hackschnitzeln aus Primärmaterial durchgeführte Prozessschritt ist mit den verfügbaren Altholzfraktionen ohne zusätzliche Aufbereitung nicht möglich (Glunz 2016).

⁵⁶ Teil des Handelsvolumens von 8,1 Mio. t ohne innerbetriebliche Nutzung und Weitervertrieb.

⁵⁷ Statistisch erfasst unter der Abfallschlüsselnummer 020107 gemäß AVV.

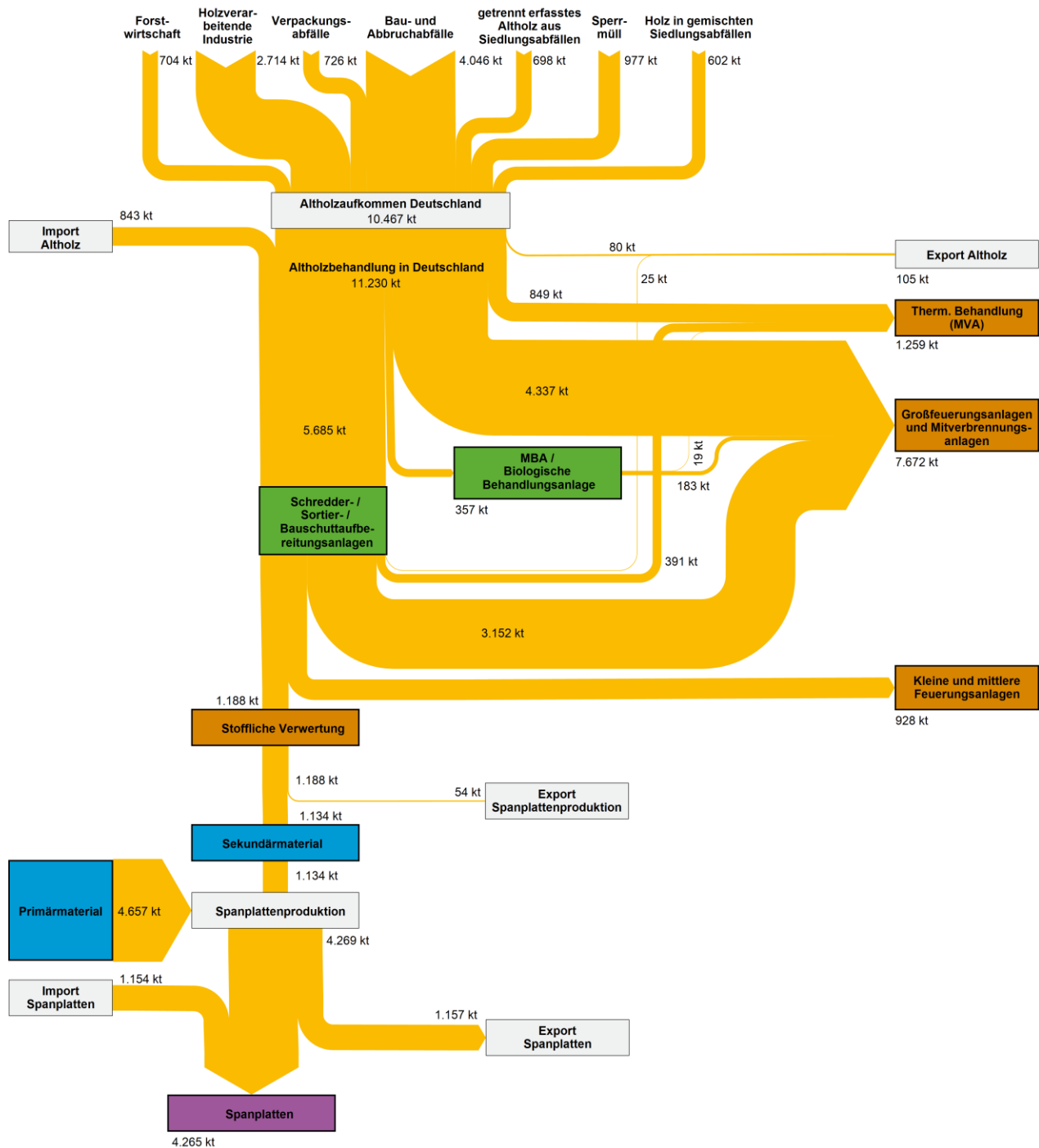
lagen gemäß Fachserie 19 Reihe 1⁵⁸. Neben den Müllverbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen sind damit alle Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 50 MW erfasst. Die energetische Verwertung der verbleibenden Altholzmenge findet im Umkehrschluss in kleinen und mittleren Feuerungsanlagen statt. Da Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung unter 1 MW nicht genehmigungsbedürftig sind und keine gesicherten Informationen zu ihrem Brennstoffeinsatz vorliegen, ist eine Aufschlüsselung der Feuerungsanlagen unter 50 MW nicht möglich.

Zur Darstellung der gesamtinnerdeutschen Altholzbehandlung weist Abbildung 8-1 in Ergänzung des inländischen Altholzaufkommens auch die Im- und Exporte von Altholz aus. Während die Altholzimporte zur Behandlung an Abfallbehandlungsanlagen auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 dargestellt werden können, werden die Exporte anhand der statistischen Erfassung zur grenzüberschreitenden Verbringung zustimmungspflichtiger Abfällen ausgewiesen, da die Fachserie hierüber keine Auskunft gibt. In beiden Fällen handelt es sich um die ausschließlich bzw. überwiegend aus Holz bestehenden Abfallarten⁵⁹.

⁵⁸ Anlagen genehmigt nach 13. und 17. BImSchV

⁵⁹ Enthalten sind folgende Abfallschlüssel gem. AVV: 020107, 0301, 030301, 150103, 170201, 170204*, 191206*, 191207, 200137*, 200138

Abbildung 8-1: Stoffströme der Altholzerfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2010



8.1.3 Verwertungswege und Verwertungsquoten

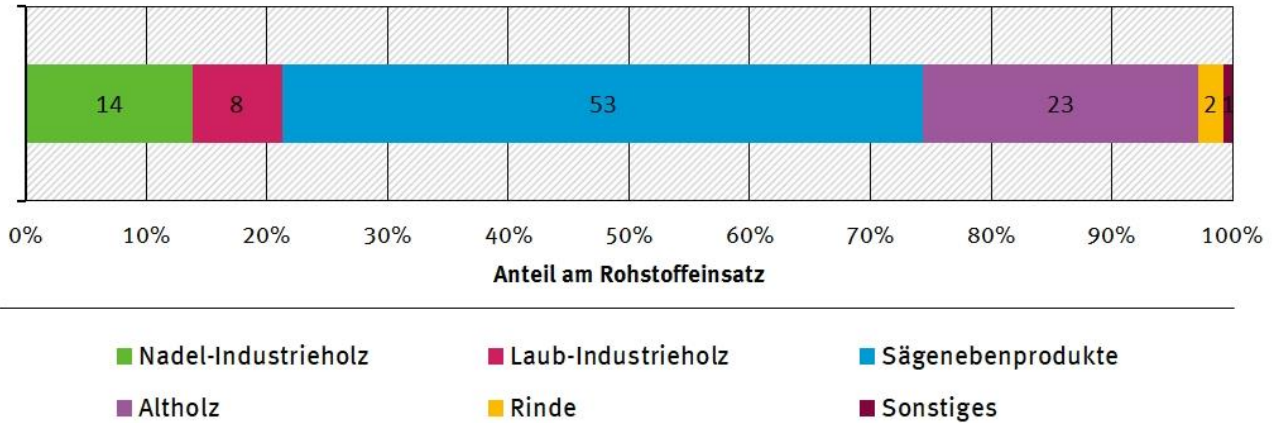
Wie Abbildung 8-1 zeigt, werden rund 1,1 Mio. t des in Deutschland erfassten Altholzes als Sekundärrohstoff in der Produktion von Spanplatten eingesetzt. Die hierdurch substituierten Rohstoffe adäquat zu kennzeichnen, setzt eine Betrachtung der alternativ eingesetzten Primärmaterialien voraus.

Zur Herstellung von Spanplatten werden neben Altholz insbesondere Nebenprodukte der Sägeindustrie und ein gewisser Anteil an Nadel- sowie Laub-Industrieholz eingesetzt (Abbildung 8-2).

Abbildung 8-2: Rohstoffeinsatz der Spanplattenindustrie im Jahr 2010

Rohstoffeinsatz der Spanplattenindustrie 2010

Altholz-Verwertungsweg



Quelle: Mantau, Udo (2012b)

Quelle: Mantau 2012b

Zur Bestimmung der Substitutionsäquivalente geht diese Studie davon aus, dass durch den Einsatz von Altholz bei der Herstellung von Spanplatten Industrieholz ersetzt wird.

Tabelle 8-3: Stoffliche Verwertung des in Deutschland erfassten Altholzes 2010

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Produkt	Substitutionsäquivalent
Spanplatten-industrie	Altholz	1,134	Spanplatten	Industrieholz

Die mit rund 9 Mio. t deutlich größere Menge an Altholz wird entsprechend der in Abbildung 8-1 aufgezeigten Stoffströme zu rund 14 Ma.-% in MVA, 77 Ma.-% in Großfeuerungsanlagen und 9 Ma.-% in kleinen und mittleren Feuerungsanlagen energetisch verwertet.

Die Berücksichtigung des energetischen Nutzens durch die Produktion von Strom und Wärme erfolgt nach dem Prinzip der Verdrängung von Energieträgern konventioneller Kraftwerke (Marginalansatz).

Der für die energieäquivalente Umrechnung verwendete Heizwert (siehe Tabelle 8-4) bezieht sich auf den Frischmassezustand von Altholz, mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von rund 20 % gemäß Mantau (2012b).

Tabelle 8-4: Energetische Verwertung des in Deutschland erfassten Altholzes 2010

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Heizwert	Substitutionsäquivalent
MVA	Altholz	1,227	13,2 MJ/kg ⁶⁰	Strom + Wärme

⁶⁰ Quellen: Dehoust 2010 und Simon 2008

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Heizwert	Substitutions-äquivalent
Großfeuerungsanlagen	Altholz	6,968	13,2 MJ/kg	Strom + Wärme
Kleine und mittlere Feuerungsanlagen	Altholz	0,853	13,2 MJ/kg	Strom + Wärme
Gesamt		9,048		

Für 2010 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ 27 % der deutschen Spanplattenproduktion (rund 4,3 Mio. t - siehe Kapitel 8.1.2) stammen aus inländischem Altholz als Sekundärmaterial.
- ▶ 11 % des Altholzaufkommens (inkl. der Altholzimporte) werden inländischen Anlagen zur stofflichen Verwertung zugeführt.

8.1.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Altholz ersetzt Industrieholz in Spanplatten. Zur Berechnung der DIERec und DERec-Indikatoren und KEA-Salden dieser Substitution wurde daher als Bezugsgröße für diese Substitution der Holzinput aus den Prozessdaten für Spanplatten verwendet. Dieser ecoinvent-Prozess bildet den globalen Durchschnitt für die Herstellung von Spanplatten ab und enthält dadurch vor allem Holz aus Eukalyptus-Plantagen inklusiver der Transportaufwendungen. ⁶¹Für die Berechnung des DERec wurde auf den Prozess „market for sawlog and veneer log, hardwood, measured as solid wood under bark“, der vor allem Buchenholz enthält, zurückgegriffen, der eine inländische Holzversorgung darstellen soll, auch wenn die Prozessdaten in ecoinvent den räumlichen Bezug „Europa ohne Schweiz“ haben. Der KRA für einheimisches Sägeholz ist höher als Holz aus Eukalyptus-Plantagen. Der KEA ist allerdings geringer, vermutlich aufgrund geringerer Transportaufwendungen. Zusätzlich wurde der rohstoffliche und energetische Aufwand der Altholz-Verwertung (Transport etc.) beachtet.

Wie bereits bei der Darstellung der Verwertungswege werden die Indikatoren im Folgenden für die stoffliche Verwertung und die energetische Verwertung (in Zusammenfassung von thermischer Behandlung und energetischer Verwertung, siehe Kapitel 2.2) separat ausgewiesen.

Tabelle 8-5: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Industrieholz, Eukalyptus	1,357	1.508
Altholz, Aufwand Verwertung	0,027	31
	DIERec	1.477

Quelle: eigene Zusammenstellung

⁶¹ Allerdings wird in Deutschland hergestellte Spanplatten überwiegend aus einheimischen Holz und nicht aus Eukalyptusholz gefertigt.

Tabelle 8-6: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Sägeholz, überwiegend Buche	1,547	1.754
Altholz, Aufwand Verwertung	0,027	31
	DERec	1.723

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-7: Saldo KEA inkl. der ausländischen Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Industrieholz, Eukalyptus	35,76	0,40	40.437	345
Altholz, Aufwand Verwertung	0,10	0,10	116	112
		KEA-Saldo	40.322	233

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-8: Saldo KEA ohne ausländische Vorkette für die Substitution von Rohholz durch Altholz in Spanplatten, 2010

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Sägeholz, überwiegend Buche	16,60	0,51	18.819	576
Altholz, Aufwand Verwertung	0,10	0,10	116	112
		KEA-Saldo	18.703	464

Quelle: eigene Zusammenstellung

Der größte Teil des Altholzes wird jedoch energetisch verwertet. Wie aus Tabelle 8-4 zu entnehmen ist, werden rund 9 Mio. t Altholz energetisch verwertet und substituieren damit Energieträger für die Bereitstellung von Strom und Wärme. Nachfolgend sind die damit verbundenen eingesparten Rohstoff- und Energiemengen dargestellt. Auch hier wird wie im Kapitel „Kunststoffe“ argumentiert, dass eine Differenzierung nach DIERec und DERec für die verwendeten Wärmeprozesse methodisch zu falschen Ergebnissen führen würde.

Tabelle 8-9: Ergebnisse für DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Altholz, 2010

	spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Strom	0,18	4.018
Wärme Erdgas	0,01	136
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,18	2.784
DIERec		6.938

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-10: Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altholz, 2010

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Strom	3,019	2,724	69.311	62.535
Wärme Erdgas	0,472	0,469	4.914	4.886
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,109	0,821	17.118	12.679
KEA-Saldo			91.343	80.101

Quelle: eigene Zusammenstellung

8.1.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

8.1.5.1 Verwertungsmengen

Auf Basis unregelmäßiger Erhebungen unter den Holzwerkstoffproduzenten veröffentlichte der Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft der Universität Hamburg die in der Spanplattenindustrie eingesetzten Altholzmengen in Höhe von 1,02 Mio. t für das Jahr 2006 und 1,13 Mio. t für die Jahre 2010 und 2015 (Mantau et al. 2012a und Mantau et al. 2017). Aufgrund dieser konstanten Einsatzmengen wird davon ausgegangen, dass die in der Spanplattenindustrie verwerteten Altholzmengen auch zwischen den benannten Jahren im Verlauf 2007 - 2015 weitestgehend konstant waren.

Tabelle 8-11: Stoffliche Verwertung von Altholz in Deutschland 2007 - 2015

Verwertungsort	Abfall	Sekundärproduktion in Mio. t									Produkt
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Spanplattenindustrie	Altholz	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	Spanplatten

Auf Basis der abfallstatistischen Erhebung wurden für die Jahre 2007 bis 2015 die in Tabelle 8-12 gelisteten Altholzmengen energetisch verwertet. Die im Verlauf der Jahre 2007 bis 2015 dargestellten Mengen der Altholzverwertung sind auf konjunkturelle Schwankungen der Wirtschaft zurückzuführen. Die für die Altholzentsorgung bestimmenden Rahmenbedingungen unterlagen seit Inkrafttreten der Altholzverordnung 2003 keinen Veränderungen. Ebenfalls nicht mengenbeeinflussend sind die Änderungen der Altholzverordnung 2006 und 2010.

Tabelle 8-12: Energetische Verwertung von Altholz in Deutschland 2007 - 2015

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge in Mio. t								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
MVA	Altholz	1,14	1,16	1,22	1,23	1,25	1,23	1,22	1,46	1,34
Kleine, mittlere und Großfeuerungsanlagen	Altholz	7,32	7,36	6,80	7,82	8,25	7,88	7,97	7,72	8,24
Gesamt		8,46	8,52	8,02	9,05	9,49	9,10	9,18	9,18	9,58

8.1.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Aus der stofflichen und energetischen Verwertung von Altholz ergeben sich auf Grundlage der Mengenangaben in den Tabellen folgende Indikatoren für den Zeitraum 2007-2015.

Tabelle 8-13: Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Altholz 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	1.303	1.433	1.433	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477	1.477
DERec	kt	1.519	1.671	1.671	1.723	1.723	1.723	1.723	1.723	1.723
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	35.557	39.113	39.113	40.322	40.322	40.322	40.322	40.322	40.322
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	16.493	18.142	18.142	18.703	18.703	18.703	18.703	18.703	18.703

Tabelle 8-14: Indikatoren für die energetische Verwertung von Altholz 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec und DERec	kt	6.391	6.434	6.056	6.834	7.171	6.877	6.938	6.926	7.233
KEA-Saldo	TJ	84.105	84.659	79.485	89.930	94.439	90.509	91.343	90.810	95.112

8.2 Papier, Pappe, Kartonage (PPK)

8.2.1 Materialeinsatz in Deutschland

Papier, Pappe und Kartonagen sind durch den mechanischen und chemischen Aufschluss von Holz gewonnene Materialien, die zum Beschreiben, Bedrucken und Verpacken verwendet werden. Im Wesentlichen besteht Papier aus Faserstoffen, zu wechselnden Anteilen Cellulosefasern (Zellstoff) und Lignin (Holzstoff). Neben den Faserstoffen sorgen Füllstoffe wie Calciumcarbonat, Kaolin, Talkum, Stärke etc. für die gewünschten Eigenschaften. Diese sind insbesondere Festigkeit (Zug-, Reiß-, Biegefestigkeit), Rauigkeit, Helligkeit, Weißgrad, Lichtundurchlässigkeit, Schmutzpunktfreiheit und Glanz.

Die deutsche Papierindustrie liegt gemessen an der produzierten Menge von Papier, Pappe und Karton im weltweiten Vergleich an vierter Stelle, hinter China, den USA und Japan. Nach Angaben des Verbandes Deutscher Papierfabriken (VDP) wurden im Jahr 2013 rund 22,4 Mio. t an Papier, Pappe und Karton erzeugt. Unter Berücksichtigung der Im- und Exportmengen betrug der Einsatz an PPK innerhalb Deutschlands ca. 20 Mio. t (Tabelle 8-15).

Tabelle 8-15: Anwendung und Materialeinsatz von PPK in Deutschland 2013 (VDP 2015)

Material	Papiersorten	Produktion nach Papiersorten	Materialeinsatz in Deutschland nach Im-/Export
Papier, Pappe und Karton (PPK)	Grafische Papiere (Zeitungen, Zeitschriften, Druckpapier)	Grafische Papiere (39 Ma.-%)	19.982.000 t
	Verpackungsmaterial (Kartonagen, Wellpappe, Faltschachteln)	Verpackungs-PPK (49 Ma.-%)	
	Hygienepapiere (Toiletten- und Küchenpapier, Taschentücher)	Hygiene-PPK (6 Ma.-%)	
	PPK für technische Zwecke (Spezialpapiere, Tapeten)	PPK für technische Zwecke (6 Ma.-%)	

Für das Recycling von Altpapier ist die Qualität des erfassten sortenreinen oder gemischten Altpapiers maßgeblich, gekennzeichnet durch Eigenschaften wie Faserlänge, Weißgrad, Optik und Oberflächenbeschaffenheit. Wie die Altpapiereinsatzquoten in Tabelle 8-16 zum Ausdruck bringt, wird Altpapier je nach bestehender Anforderung des neuwertigen Papiers in sehr unterschiedlichem Maße eingesetzt. Während z.B. Zeitungspapier nahezu vollständig aus Recyclingpapier hergestellt wird, ist der Altpapieranteil der grafischen Papiere insgesamt zumeist deutlich geringer. Aber auch Papiere mit bedeutendem Recyclinganteil erreichen die hohen Qualitätsansprüche grafischer Papiere.

Sowohl im alltäglichen Umgang mit Papier und Kartonagen als auch im Recyclingkreislauf treten Faserverluste bzw. Faserverkürzungen auf. Diese materialgebundene Eigenschaft verhindert die unbegrenzte Kreislaufführung einer Papiersorte ohne Zufuhr von Frischfasern. Generell wird in der Papierindustrie eine Frischfaserzufuhr von mindestens 20 % benötigt. Neben deren Zufuhr über frischen Holz- bzw. Zellstoff verbessern auch unverbrauchtere Fasern qualitativ hochwertigerer Papiersorten die Rohstoffqualität.

Vor dem Einsatz als Recyclingmaterial in der Papierproduktion ist je nach Erfassungsqualität eine Aufbereitung/Sortierung notwendig. Während bereits sortenrein erfasste Altpapiersorten, u.a. an Anfallstellen wie Druckereien, Papierverarbeitern, Gewerbebetrieben mit hohem Papierverbrauch, dieser Aufbereitung nicht bedürfen, sind die als Sammelgemisch erfassten Mengen zum Zweck der Störstoffabtrennung und Sortie-

rung in verschiedene Altpapiersorten (Altpapiersortenliste EN 643⁶²) zu behandeln. Diese Altpapiersorten unterschiedlicher Qualität können anschließend gezielt bei der Produktion neuer Papiersorten dosiert werden.

Die den Papierfabriken vorgeschalteten abfallwirtschaftlichen Aufbereitungsanlagen bestehen zur Trennung des Abfallgemisches und Entfernung von Störstoffen in ihren Grundzügen aus Scheibensieben, Ballistikseparatoren, optischen- und nahinfrarot-Sensoren gekoppelt mit Luftdrucktrennsystemen und manueller Sortierung. Die Aufbereitung des gesamten Anlageninputs in sortenreine Altpapierfraktionen ist allerdings begrenzt, es verbleiben sowohl Fehlanteile in den „sortenreinen“ Altpapierfraktionen als auch Altpapiergemische als Restfraktionen.

Die verschiedenen Altpapiersorten sind hiernach für den Einsatz in der Papierfabrik geeignet. Je nach Qualitätsanforderung des im Anschluss entstehenden Papierproduktes folgen in der Papierindustrie weitere mechanische und chemische Aufbereitungsschritte, die grundsätzlich in zwei verschiedene Kategorien unterteilt werden:

- ▶ ausschließlich mechanisch reinigende Verfahren (Herstellung von Testlinern, Wellpapier, Kartonaugen u.a.)
- ▶ mechanisch und chemisch reinigende Verfahren, inkl. Druckfarbentfernung (Deinking) (Herstellung von Zeitungs-/Zeitschriftendruckpapier, Druck- und Kopierpapier, Hygienepapier u.a.)

Während bei rein mechanischen Aufbereitungsverfahren die zu entsorgenden Aufbereitungsrückstände relativ gering sind, wird durch eine zusätzliche Deinking-Stufe ein höherer Altpapieranteil als Reststoff ausgezogen. Beispielsweise beträgt die Papierausbeute bei dem am häufigsten angewandten 2-Loop-Deinking Verfahren mit zweifacher mehrstufiger Flotation und zwischengeschalteter Dispergierung 76 - 82 % (1-Loop-Anlagen: 83 - 87 %) (Höke 2013). Die Reststoffe stellen den verbleibenden Anteil dar.

In einem ersten Schritt wird das Altpapier im Pulper oder einer Auflösetrommel aufgelöst und zerfasert. Die Zugabe einer Waschlauge sorgt sowohl für die Faservereinzelung als auch für das Ablösen von Druckfarben, Klebstoffen und Heftklammern. Im zweiten Schritt werden über mehrstufige Schwerteilabscheidung (Lochsortierung oder Zentrifugalverfahren) grober Schmutz und Fremdstoffe (Heftklammern, Schrauben, Steine, Glas etc.) von den Fasern abgetrennt. Anschließend erfolgt die erstmalige Flotation - ein Prozess, bei dem sich freie hydrophobe Partikel (Druckfarben) an die eingeblasenen Luftblasen anheften. Der aufschwimmende Deinkingschlamm (Abfall) wird abgeschöpft und für die anschließende Verwertung mechanisch entwässert. Der verbleibende Stoffstrom wird nach Feinsortierung und Zufuhr von Bleichhilfsmitteln der Dispergierung zugeführt. Deren Ziel ist es, auf den Fasern verbliebene Druckfarbenreste abzulösen und optisch störende Partikel weiter zu zerkleinern. Bei der zweiten Flotation werden nun die im Disperger freigesetzten Partikel aufgeschwemmt und ausgeschleust. Nachgeschaltete Filter und Eindicker sorgen dafür, dass die erzeugte Pulpe für die anschließenden Verarbeitungsschritte der Papierproduktion verwendet werden kann.

8.2.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Mit 136 Produktionsstätten ist der Großteil der rund 160 Betriebe der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie im Verband Deutscher Papierfabriken organisiert. Dessen alljährliche Veröffentlichung von Produktions-, Einsatz- sowie Im- und Exportmengen im Papierkompass (VDP 2009-2015) und Leistungsbericht (VDP 2015b) zeigen das Grundgerüst der Stoffströme dieses Wirtschaftszweiges auf.

⁶² Enthält 57 Altpapiersorten unter Zuordnung zu 5 Gruppen (1 Untere Sorten, 2 Mittlere Sorten, 3 Bessere Sorten, 4 Kraft-haltige Sorten, 5 Sondersorten)

Demnach wurden im Jahr 2013 für die Produktion von 22,4 Mio. t an PPK neben den Primärrohstoffen Holz und Zellstoff sowie Mineralien und Additiven rund 16,5 Mio. t an Altpapier eingesetzt. Unter Berücksichtigung der in VDP (2015) veröffentlichten grenzüberschreitenden Altpapierströme gehen 15,3 Mio. t an stofflich verwertetem PPK auf die private und gewerbliche Getrenntsammlung innerhalb Deutschlands zurück.

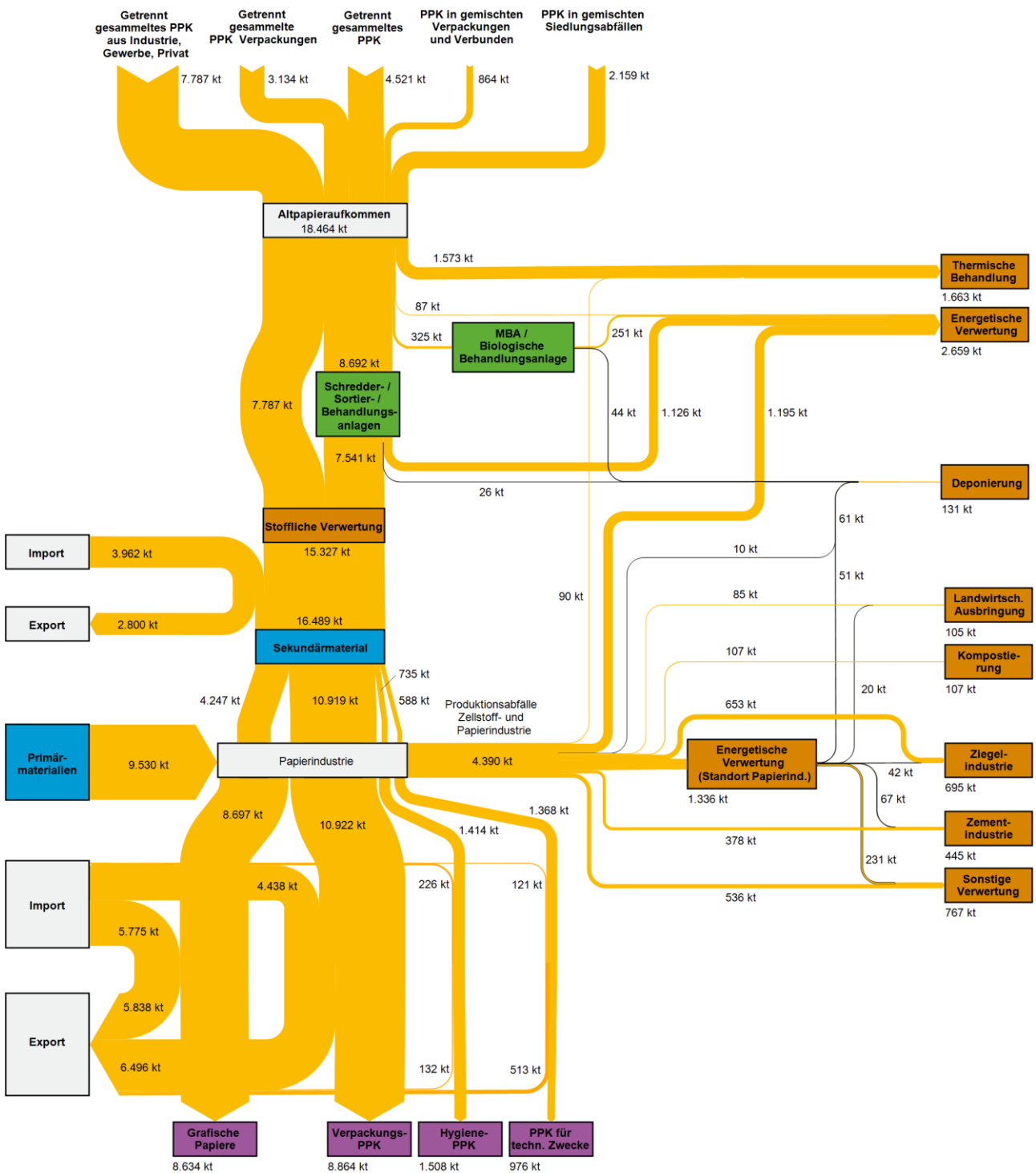
Statistisch erfasst und über die Fachserie 19 Reihe 1 ausgewiesen werden lediglich die an Abfallbehandlungsanlagen angenommenen Abfälle. Häufig weisen getrennt gesammelte PPK-Abfälle jedoch Qualitäten auf, die eine Behandlung in Abfallsortieranlagen unnötig machen und eine unmittelbare Verwertung in Papierfabriken ermöglichen. Selbst getrennt gesammelte PPK-Abfälle aus der Erfassung bei Privathaushalten, die gewisse Fremdstoffanteile beinhalten, werden zum Teil direkt verwertet. In diesem Fall verfügen die Papierfabriken über eine entsprechende Störstoffabscheidung.

Unter den Abfallschlüsselnummern AS 200101 (rund 4,52 Mio. t) und AS 150101 (rund 3,13 Mio. t) weist die Fachserie 19 Reihe 1 lediglich rund 7,7 Mio. t getrennt erfasste und an Sortieranlagen behandelte PPK-Abfälle aus. Rund 7,5 Mio. t für die stoffliche Verwertung geeignetes Altpapier verließ im Jahr 2013 die Sortieranlagen in Richtung Papierindustrie. PPK-Fraktionen aus der Sortierung gemischter Abfallarten sind hierin zu gewissen Teilen ebenfalls enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei der zu 15,3 Mio. t (Altpapiereinsatz in Papierfabriken) verbleibenden Altpapiermenge von rund 7,8 Mio. t um Direktanlieferungen an den Papierfabriken handelt. Diese statistisch nicht erfasste Altpapiermenge wird nachfolgend als „getrennt gesammeltes PPK aus Industrie, Gewerbe und Privathaushalten“ ausgewiesen.

Neben dem als Recyclingpapier eingesetzten Altpapier enthalten weitere Abfallarten PPK-Mengen, die aufgrund ihrer minderen Qualität für eine stoffliche Verwertung nicht geeignet sind, so z.B. PPK-Bestandteile in privaten und gewerblichen Restabfällen. Unter Berücksichtigung der Papieranteile in den gemischten Siedlungsabfällen gemäß materialspezifischer Stoffstrombilanzierung in Anhang II (Basis Fachserie 19 Reihe 1) belief sich das innerhalb Deutschlands erfasste Altpapieraufkommen im Jahr 2013 damit in Summe auf 18,5 Mio. t.

Die genaue Stoffstromdarstellung für das Jahr 2013, von der Erfassung des Altpapiers über dessen Aufbereitung bis hin zum Einsatz als Recyclingpapier in der Papierindustrie, zeigt das Sankey-Diagramm in Abbildung 8-3, dessen Einzelheiten nachfolgend genauer erläutert werden.

Abbildung 8-3: Stoffströme der Altpapiererfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2013



Wie sich anhand der statistisch registrierten Abfallmengen, ausgewiesen in der Fachserie 19 Reihe 1, in Verbindung mit den enthaltenen Altpapieranteilen (siehe Anhang II) aufzeigen lässt, wurden im Jahr 2013 10,7 Mio. t des gesamten Altpapieraufkommens in Abfallentsorgungsanlagen aufbereitet, energetisch verwertet oder beseitigt. Bei dem Großteil handelt es sich um getrennt gesammeltes PPK, das nach Aussortierung papierfremder Stoffe und Trennung in verschiedene Altpapiersorten von der Papierindustrie als Sekundärmaterial eingesetzt wird. Die in Abbildung 8-3 in Richtung MVA, MBA, biologische Behandlungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerke abgehenden Altpapierströme kennzeichnen die in Abfallgemischen

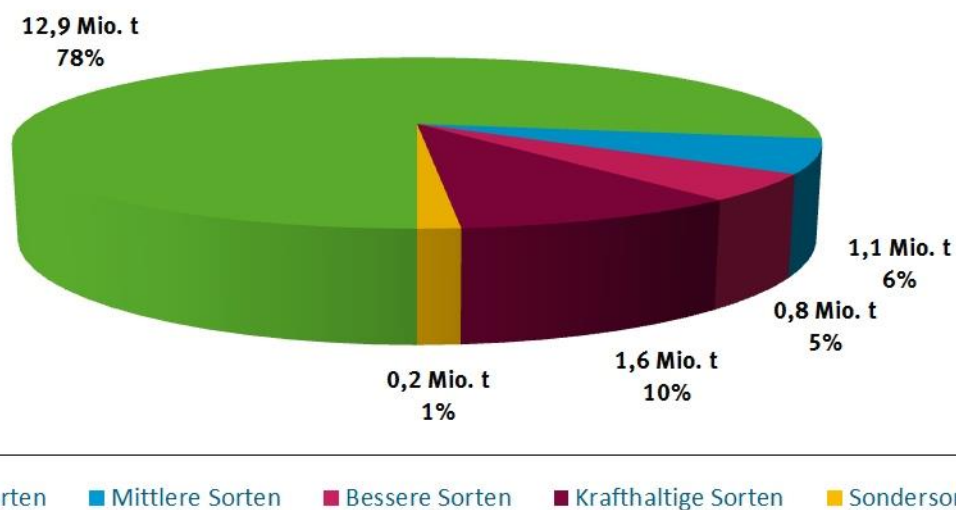
enthaltenen Altpapiermengen, welche aufgrund ihres Verschmutzungsgrades in aller Regel nicht für eine stoffliche Verwertung in Frage kommen.

Gemäß Veröffentlichung des Verbandes Deutscher Papierfabriken dominieren unter den 16,5 Mio. t an verwertetem Altpapier die „Unteren Sorten“, eine Gruppe niedriger Stoffqualität, bestehend aus gemischten Altpapieren (Zeitungen und Illustrierten), gebrauchten Papier- und Kartonverpackungen u.ä. (Abbildung 8-4). Die Unterteilung des Altpapiereinsatzes in der Papierindustrie nach Qualitäten lässt zugleich einen Rückschluss auf die praktizierte Getrenntsammlung und Aufbereitung zu.

Abbildung 8-4: Altpapiereinsatz in der Papierindustrie Deutschlands nach Altpapiersortenliste 2013

Altpapiereinsatz in der Papierindustrie

Differenzierung nach Altpapiersorten für das Jahr 2013



Quelle: Verband Deutscher Papierfabriken - Leitungsbericht 2012

Quelle: VDP 2015b

Je nach bestehenden Anforderungen an die Produktqualität enthalten Papiersorten unterschiedlichste Anteile an Recyclingpapier. Von den veröffentlichten Altpapiereinsatzquoten des VDP (2015) erreicht Zeitungsdrukpapier mit 112 % den höchsten Wert (Tabelle 8-16). Prozentangaben über 100 % erklären sich dadurch, dass der Altpapiereinsatz bezogen auf die produzierte Menge dargestellt wird. Tatsächlich beträgt der Altpapieranteil am Zeitungspapier nahezu 100 %. Grund für den höheren Altpapiereinsatz gegenüber dem Altpapieranteil im Produkt sind die bei der Altpapieraufbereitung in der Papierfabrik, insbesondere dem Deinking (Entfernung der Druckfarbe), entstehenden und als Abfall entsorgten Rückstände, welche den beschriebenen Faserverlust darstellen⁶³.

Laut einer Erhebung der Papiertechnischen Stiftung unter der Papierindustrie fielen im Jahr 2013 in der Papier- und Zellstoffindustrie insgesamt rund 4,4 Mio. t (lutro⁶⁴) an Produktionsabfällen an (PTS 2014, PTS 2015). Gegenstand der Befragung war die Ermittlung des Aufkommens an Produktionsrückständen unter Differenzierung nach Abfallart gemäß AVV und gewähltem Verwertungsweg. Da die Ergebnisse der Rück-

⁶³ Beim Beispiel Zeitungspapier ist, wie auch bei anderen grafischen Recyclingpapieren, eine Zugabe von Frischfasern praktisch nicht notwendig, da das der Produktion zugeführte Altpapier neben kurzfasrigem Zeitungspapier auch grafische Papiere mit einer besseren Faserqualität enthält.

⁶⁴ lutro = lufttrocken. Bei Rückständen: feuchte Rückstandsmenge

standsumfrage Überschneidungen zu den in der Fachserie 19 Reihe 1 veröffentlichten Abfallmengen aufweisen, wurden zur Darstellung der Stoffströme in Abbildung 8-3 beide Quellen in Kongruenz gebracht.

Die Ergebnisse der Rückstandsumfrage weisen die erzeugten Produktionsabfälle insgesamt aus, weshalb sowohl die Reststoffe der Altpapieraufbereitung als auch die bei der Frischfaserherstellung anfallenden Rückstände enthalten sind. Die Erhebung anhand der Abfallarten gemäß AVV lässt zwar erkennen, dass die 4,4 Mio. t (lutro) rund 0,4 Mio. t Rinden- und Holzabfälle (AS 030301) enthalten, die der Frischfaserherstellung zuzuordnen sind, eine weiterführende Trennung nach Altpapieraufbereitung und Frischfaserherstellung ist dagegen nicht möglich.

Zur Abschätzung der in Papierprodukten tatsächlich enthaltenen Altpapiermenge erfolgt daher eine Hochrechnung anhand von Verlustquote bei der Altpapieraufbereitung. Dabei unterscheiden sich die Rückstandsanteile je nach Qualitätsanforderung des Papierprodukts und der angewandten Aufbereitungsschritte. Die von Borschke (1997) für die Herstellung einzelner Papiersorten veröffentlichten Aufbereitungsverluste reichen von 4-9 Ma.-% des Altpapierereinsatzes für Kartonagen über 10-25 Ma.-% für grafische Papiere bis hin zu 28-40 Ma.-% für Hygienepapiere.

Für nachfolgende Reststoffabschätzung entsprechend der betrachteten Hauptpapiersorten werden folgende, auch von der Papiertechnischen Stiftung und der TU Darmstadt FG Papierfabrikation und mechanische Verfahrenstechnik genutzten, mittleren Anteile angewandt:

- ▶ Grafische Papiere: 20 Ma.-% des Altpapierereinsatzes,
- ▶ Verpackungs-PPK: 10 Ma.-% des Altpapierereinsatzes,
- ▶ Hygienepapiere: 35 Ma.-% des Altpapierereinsatzes,
- ▶ PPK für techn. Zwecke: 10 Ma.-% des Altpapierereinsatzes.

Die bei der Altpapieraufbereitung in deutschen Papierfabriken anfallende Rückstandsmenge belief sich im Jahr 2013 demnach auf rund 2,26 Mio. t (otro⁶⁵), bzw. rund 2,57 Mio. t unter Annahme eines bei Altpapier vorliegenden mittleren Wassergehaltes von rund 12 Ma.-% (PMV 2008). Diese Feuchtekorrektur ist notwendig, da nachfolgend eine Differenzbildung mit Altpapier erfolgt.

Im Ergebnis betrug die in Deutschland im Jahr 2013 stofflich verwertete Altpapiermenge ohne Fremdstoffe rund 13,92 Mio. t (Tabelle 8-16).

Unter Berücksichtigung des Importüberschusses an Altpapier entfallen davon rund 12,9 Mio. t auf die Getrennsammlung innerhalb Deutschlands.

Tabelle 8-16: Stoffliche Verwertung von Altpapier in der Papierindustrie 2013

Papiersorte	Altpapier-einsatz- quote (VDP 2015) [%]	Altpapier-einsatz (inkl. Fremd- stoffe) [Mio. t]	Rückstände Altpapier- aufbereitung [Mio. t]	Altpapierver- wertung (exkl. Fremd- stoffe) [Mio. t]
Grafische Papiere		4,25	0,97	3,28
davon Zeitungsdruckpapier	112	1,96		
davon LWC Papier	30	0,52		
davon sonst. holzhaltige Papiere	39	0,87		

⁶⁵ otro = ofentrocken. Die verwendeten Reststoffanteile weisen die Reststoffe im trockenen Zustand aus.

Papiersorte	Altpapier- einsatz- quote (VDP 2015) [%]	Altpapier- einsatz (inkl. Fremd- stoffe) [Mio. t]	Rückstände Altpapier- aufbereitung [Mio. t]	Altpapierver- wertung (exkl. Fremd- stoffe) [Mio. t]
davon ungestrichenes holzfreies Papier	30	0,46		
davon gestrichenes holzfreies Papier	30	0,44		
Verpackungs-PPK		10,92	1,24	9,68
davon Pack- und Wellpappenpapiere	109	8,51		
davon Maschinenkarton	80	2,03		
davon sonst. Verpackungs-PPK	66	0,39		
Hygienepapiere	52	0,74	0,29	0,44
PPK für techn. Zwecke	43	0,59	0,07	0,52
Summe	74	16,49	2,57	13,92

8.2.3 Verwertungswege und Verwertungsquoten

Wie die Stoffstromdarstellung in Abbildung 8-3 zeigt, findet sowohl eine stoffliche als auch energetische Verwertung der erfassten Altpapiermengen und hierin enthaltenen Fremdstoffe statt. Nachfolgende Ausführungen weisen die für den Ersatz von Primärrohstoffen anrechenbaren Verwertungsmengen und entsprechenden Substitutionsäquivalente aus. Betrachtet werden dabei ausschließlich die auf die Altpapiererfassung in Deutschland zurückgehenden Verwertungsmengen.

Insgesamt wurden im Jahr 2013 von dem in Deutschland erfassten Altpapier nach Abzug der Fremdstoffe rund 13,92 Mio. t reines Altpapier in der Papierindustrie bzw. als Aufbereitungsreststoff in der Ziegel- und Zementindustrie stofflich verwertet.

Mit 12,9 Mio. t entfällt der größte Teil davon auf den Altpapiereinsatz in Produkten der Papierindustrie. Da zur Erreichung der verschiedenen Papierqualitäten ein unterschiedlicher Primärrohstoffbedarf besteht, ist der Einsatz einer Tonne Altpapier in zwei unterschiedlichen Papiersorten hinsichtlich des Substitutionswertes nicht als gleichwertig anzusehen. Anstelle einer konstanten Primärrohstoffzusammensetzung an Zellstoff, Holzstoff und Additiven für alle Papiersorten wird dieser verschiedenen Wertigkeit durch Substitutionsäquivalente Rechnung getragen, die bereits den jeweiligen Rohstoffbedarf des Produkts berücksichtigen (siehe Tabelle 8-17).

Neben dem Einsatz in der Papierindustrie erfolgt eine weitere stoffliche Verwertung von Altpapierbestandteilen in der Ziegel- und Zementindustrie.

Papierfangstoffe (Papierfasern und Papierfaserschlamm) werden in der Ziegelindustrie bei der Herstellung von Hochlochziegeln als Porosierungsmittel verwendet. Hierbei werden die Reststoffe der Papierindustrie beim Brennen der Ziegel mit verbrannt und hinterlassen die gewünschten Hohlräume. Alternativ eingesetzte organische Porosierungsmittel sind Sägespäne und geschäumtes Polystyrol. Da letzteres die am häufigsten verwendete Alternative ist, wird für die 0,61 Mio. t an verwerteten Papierfangstoffen geschäumtes Polystyrol (EPS) als Substitutionsäquivalent angenommen (UBA AT 2009). Aufgrund ihrer Eigenschaft, zur

Magerung des Tons beizutragen⁶⁶, finden in der Ziegelindustrie auch die Aschen aus der Monoverbrennung von Papierreststoffen ihre Verwendung. Für diese Verbesserung der Ziegeleigenschaften würden alternativ Sand bzw. Quarzmehl eingesetzt (Gaggl 2012).

Papierfangstoffe und Aschen aus der Verbrennung von Papierreststoffen enthalten u.a. die vier wesentlichen Grundbestandteile von Zement (Calcium-, Silizium-, Aluminium- und Eisenoxid)⁶⁷. Daher finden Aschen aus der Papierindustrie, Schlacken und Faserfangstoffe Eingang in die Klinkerherstellung und Flugaschen werden zusätzlich als Zumahlstoff beim anschließenden Mahlen eingesetzt. Der natürliche Primärrohstoff mit einer ähnlichen Zusammensetzung der genannten anorganischen Bestandteile ist Mergel, weshalb er an dieser Stelle als Substitut Verwendung findet (Scur 2013). Die in Tabelle 8-17 genannten, in Zementwerken stofflich verwerteten 0,17 Mio. t enthalten neben den Aschen aus der Monoverbrennung der Papierreststoffe auch die Papierfangstoffe als mineralischen Verbrennungsrückstand⁶⁸.

Die verbleibenden in der Stoffstromdarstellung Abbildung 8-3 aufgezeigten stofflichen Verwertungswege „Kompostierung“, „landwirtschaftliche Ausbringung“ und „sonstige Verwertung“ finden hinsichtlich der erzielten Substitutionswirkung hier keine Berücksichtigung. Bei den in die Kompostierung und landwirtschaftliche Ausbringung gehenden Mengen handelt es sich um Rinden- und Holzabfälle, Fangstoffe sowie Aschen, die ausschließlich aus der Primärproduktion von Papier stammen⁶⁹. Da eine weitergehende Differenzierung der auf die Umfrage unter den Papierherstellern PTS (2014) zurückgehende Sammelkategorie „sonstige Verwertung“ nicht möglich ist, kann über deren Substitutionswirkung keine Aussage getroffen werden. Folglich ist möglich, dass die im Jahr 2013 stofflich verwertete Altpapiermenge leicht über der in Tabelle 8-17 genannten liegt.

Tabelle 8-17: Stoffliche Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Produkt	Substitutionsäquivalent
Papierindustrie	Altpapier	3,05	Grafische Papiere	Grafische Papiere
		9,00	Verpackungs-PPK	Verpackungs-PPK
		0,41	Hygienepapiere	Hygienepapiere
		0,49	PPK für techn. Zwecke	PPK für techn. Zwecke
Summe Papierindustrie		12,94		
Ziegelindustrie	Papierfangstoffe (Papierindustrie)	0,61	Ziegel	Geschäumtes Polystyrol (EPS) - Volumenäquivalent
	Aschen (Papierindustrie)	0,04	Ziegel	Quarzsand

⁶⁶ Durch Zugabe von Aschen oder Schlacken wird der Feinkörnigkeit des Tons entgegengewirkt und somit der bindefähige Anteil des Tons herabgesetzt. Magerungskörner bewirken eine gleichmäßigere Austrocknung der Ziegel und verhindern die Ausbreitung von Rissen.

⁶⁷ Aufgrund der Verwendung der Zusatzstoffe Kaolin, Kalk, Talkum, Kreide etc. in der Papierproduktion.

⁶⁸ Sommer et al. (2009) weist für Fangstoffe und Deinkingschlämme einen Aschegehalt von 20 bzw. 40 % aus. Unter Annahme eines Aschegehaltes von 30 % entstehen bei der Verbrennung von 351.000 t an Papierfangstoffen und Schlämmen in der Zementindustrie rund 105.000 t an Asche.

⁶⁹ Gemäß DüngemittelV können sowohl Aschen aus der Monoverbrennung von Primärpapier als Dünger (Kalk und Kaliumgehalt) ausgebracht werden als auch anfallende Schlämme der altpapierfreien Produktion in die Kompostierung gegeben werden.

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Produkt	Substitutionsäquivalent
Summe Ziegelindustrie		0,65		
Zementindustrie	Aschen (Papierindustrie)	0,17	Zement	Mergel
Gesamt		13,76		

Parallel zur stofflichen Verwertung wurden im Jahr 2013 insgesamt 6,17 Mio. t an Altpapier und Reststoffen aus der Aufbereitung des deutschlandweit erfassten Altpapiers energetisch verwertet.

Mit 3,03 Mio. t entfällt rund die Hälfte davon auf Altpapier, das in gemischten Siedlungs- und Verpackungsabfällen enthalten und aufgrund minderer Qualität für eine Verwertung als Recyclingpapier nicht geeignet ist oder bei der mechanischen Aufbereitung getrennt erfasster Altpapiermengen vor dem selben Hintergrund aussortiert wurde. Darüber hinaus werden ca. 3,14 Mio. t Reststoffe verbrannt, die aus der nass-mechanischen Aufbereitung innerhalb der Papierindustrie stammen.

Während das Altpapier über Müllverbrennungsanlagen (Altpapier gemischter Siedlungsabfälle) und EBS-Kraftwerke (insb. Sortierfraktion der mechanischen Aufbereitung) energetisch genutzt wird, sind die Verwertungswege der Reststoffe aus der Papierindustrie vielfältiger. Da ein Teil der Papierfabriken über betriebseigene bzw. unmittelbar angrenzende Verbrennungsanlagen verfügt, erfolgt eine Verwertung ihrer beim Recyclingprozess entstehenden Spuckstoffe und Papierfangstoffe (Faserabfälle und Schlämme) direkt vor Ort. Alle weiteren Anlagen entsorgen diese Produktionsabfälle in externen, auch andere Ersatzbrennstoffe einsetzenden Kraftwerken.

Ferner gilt es zu berücksichtigen, dass mit der Verwertung von Reststoffen der Papierindustrie in der Ziegel- und Zementindustrie neben dem bereits angesprochenen stofflichen Nutzen durch die Verbrennung auch ein energetischer Nutzen einhergeht, der mit der Einsparung von Primärenergieträgern gleichzusetzen ist.

Die Berücksichtigung dieses energetischen Nutzens folgt grundsätzlich einer energieäquivalenten Substitution alternativ eingesetzter fossiler Energieträger. Im Falle der Ziegel- und Zementindustrie wird vom energieäquivalenten Ersatz der konventionell eingesetzten Primärenergieträger Erdgas (Ziegelindustrie) und Steinkohle (Zementindustrie) ausgegangen. Die bei der Abfallverbrennung in Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken erfolgende Energieumwandlung in Strom und Wärme verdrängt dagegen einen Mix an Energieträgern konventioneller Kraftwerke. Diese Substitutionswirkung wird über den Marginalansatz berücksichtigt.

Tabelle 8-18: Energetische Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Heizwert [MJ/kg]	Substitutionsäquivalent
EBS-Kraftwerke der Papierindustrie	Papierfangstoffe	0,73	4,2	Strom + Wärme
	Rejecte / Spuckstoffe	0,34	13,5	
Summe EBS-KW Papierindustrie		1,07		
Sonstige EBS-Kraftwerke	Altpapier	1,46	15,1	Strom + Wärme
	Papierfangstoffe	0,70	4,2	
	Rejecte / Spuckstoffe	0,33	13,5	

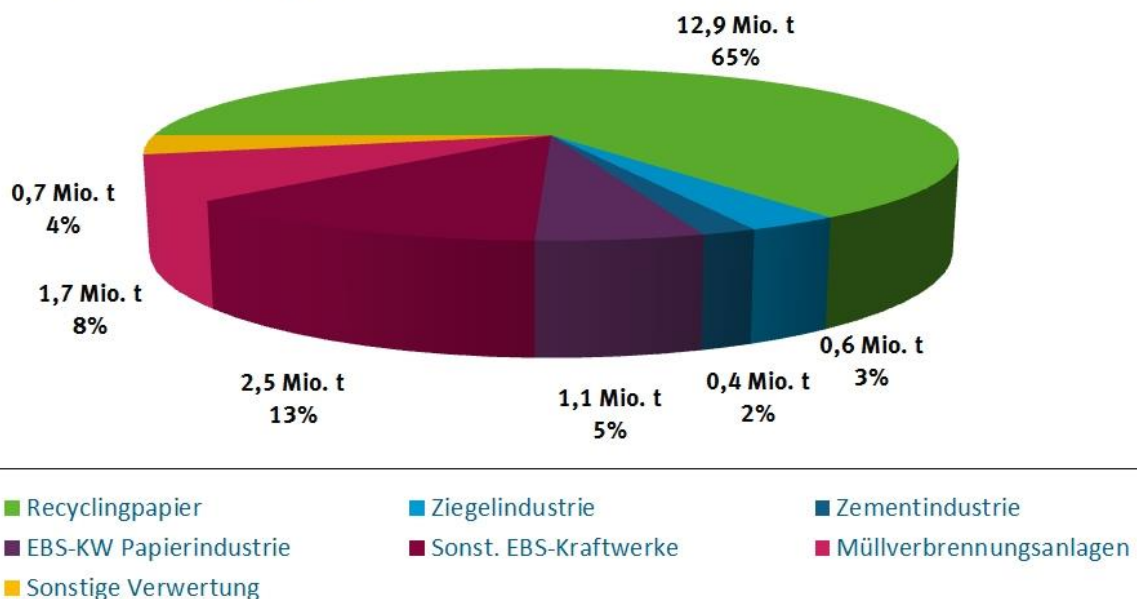
Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge [Mio. t]	Heizwert [MJ/kg]	Substitutionsäquivalent
Summe sonst. EBS-KW		2,49		
MVA	Altpapier	1,57	15,1	Strom + Wärme
	Papierfangstoffe	0,05	4,2	
	Rejecte / Spuckstoffe	0,03	13,5	
Summe MVA		1,65		
Ziegelindustrie	Papierfangstoffe	0,61	4,2	Erdgas
Zementindustrie	Papierfangstoffe	0,35	4,2	Steinkohle
Gesamt		6,17		

Eine zusammenfassende Übersicht über die stofflichen und energetischen Verwertungswege des in Deutschland erfassten Altpapiers und der hieraus erzeugten Aufbereitungsreststoffe für das Jahr 2013 zeigt Abbildung 8-5⁷⁰.

Abbildung 8-5: Verwertungswege des in Deutschland erfassten Altpapiers 2013

Verwertungswege für Altpapier und dessen Aufbereitungsreststoffe

In Deutschland erfasstes Altpapier, Jahr 2013



Quelle: u.e.c. Berlin

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ 74 % der deutschen Papierproduktion (22,4 Mio. t) erfolgt unter Rückgriff auf den Einsatz von Altpapier (VDP 2015).
- ▶ 68 % der deutschen Papierproduktion erfolgt unter Rückgriff auf inländisches Altpapier.

⁷⁰ Die Abweichung zum Altpapieraufkommen von 18,5 Mio. t resultiert aus Unterschieden im Wassergehalt.

- ▶ Weniger als 1 % der deutschen Ziegelproduktion (6,9 Mio. m³ gemäß BBS 2016) stammen aus Aschen energetisch verwerteter Altpapiere, die als inländisches Sekundärprodukt eingesetzt werden.
- ▶ Weniger als 1 % der deutschen Zementklinkerproduktion (23,1 Mio. t gemäß VDZ 2016) stammen aus Aschen energetisch verwerteter Altpapiere, die als inländisches Sekundärprodukt eingesetzt werden.
- ▶ 84 % des Altpapieraufkommens (inkl. des Altpapierimportüberschusses) werden inländischen Anlagen zur stofflichen Verwertung zugeführt, der Rest energetisch verwertet.

8.2.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Wie bereits bei der Darstellung der Verwertungswege werden die Indikatoren im Folgenden für die stoffliche Verwertung und die energetische Verwertung (in Zusammenfassung von thermischer Behandlung und energetischer Verwertung, siehe Kapitel 2.2) separat ausgewiesen.

Für die Berechnung der entsprechenden Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Altpapier, der Reststoffe des Papierrecyclings sowie von Aschen wurden die oben beschriebenen substituierter Materialien berücksichtigt. Die eingesparte Menge an Energie aus primären Energierohstoffen durch eine energetische Verwertung von Altpapier, Papierfangstoffen und Spuckstoffen wurde mittels der verschiedenen Einsatzbereiche aus Tabelle 8-18 berechnet.

Tabelle 8-19: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. der ausländischen Vorketten für die verschiedenen Substitutionspfade bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013

		spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Altpapier in der Papierindustrie	Grafisches Papier	3,84	11.691
	Verpackungs-PPK	4,58	41.187
	Hygienepapier	6,61	2.722
	PPK für technische Zwecke*	3,84	1.859
Papierfangstoffe und Aschen in der Ziegelindustrie	EPS in der Ziegelherstellung	2,84	707
	Sand	1,04	41
Aschen in der Zementindustrie	Mergel	1,01	169
Altpapier Sammlung und Aufbereitung		2,80	38.571
		DIERec	19.804

Quelle: eigene Zusammenstellung

*für PPK für technische Zwecke werden hilfsweise die ecoinvent-Prozessdaten für grafisches Papier verwendet

Tabelle 8-20: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne die ausländischen Vorketten für EPS in den verschiedenen Substitutionspfaden bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013

		spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Altpapier in der Papierindustrie	Grafisches Papier	3,84	11.691
	Verpackungs-PPK	4,58	41.187

		spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
	Hygienepapier	6,61	2.722
	PPK für technische Zwecke*	3,84	1.859
Papierfangstoffe und Aschen in der Ziegelindustrie	EPS in der Ziegelherstellung	2,76	686
	Sand	1,04	41
Aschen in der Zementindustrie	Mergel	1,01	169
Altpapier Sammlung und Aufbereitung		2,80	38.570
		DERec	19.783

Quelle: eigene Zusammenstellung

*für PPK für technische Zwecke werden hilfsweise die ecoinvent Prozessdaten für grafisches Papier verwendet

Tabelle 8-21: Saldo KEA inkl. ausländische Vorkette in den verschiedenen Substitutionspfaden bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013

		spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Altpapier in der Papierindustrie	Grafisches Papier	61,12	30,86	186.292	94.068
	Verpackungs-PPK	59,88	18,67	538.840	168.020
	Hygienepapier	101,37	51,17	41.725	21.061
	PPK für technische Zwecke*	61,12	30,86	29.622	14.957
Papierfangstoffe und Aschen in der Ziegelindustrie	EPS in der Ziegelherstellung	98,14	96,18	24.425	23.937
	Sand	0,06	0,05	2	2
Aschen in der Zementindustrie	Mergel	0,09	0,08	15	14
Altpapier Sammlung und Aufbereitung		24,51	17,94	337.185.	246.736
		KEA-Saldo		483.735	75.324

Quelle: eigene Zusammenstellung

*für PPK für technische Zwecke werden hilfsweise die ecoinvent Prozessdaten für grafisches Papier verwendet

Tabelle 8-22: Saldo KEA ohne die ausländische Vorkette in den verschiedenen Substitutionspfaden bei der stofflichen Verwertung von Altpapier, 2013

		spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Altpapier in der Pa-	Grafisches Papier	61,12	30,86	186.292	94.068

		spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Papierindustrie	Verpackungs-PPK	59,88	18,67	538.840	168.020
	Hygienepapier	101,37	51,17	41.725	21.061
	PPK für technische Zwecke*	61,12	30,86	29.622	14.957
Papierfangstoffe und Aschen in der Ziegelindustrie	EPS in der Ziegelherstellung	54,93	53,03	13.671	13.199
	Sand	0,06	0,05	2	2
Aschen in der Zementindustrie	Mergel	0,09	0,08	15	14
Altpapier Sammlung und Aufbereitung		24,51	17,94	337.185.	246.736
KEA-Saldo				472.982	64.585

Quelle: eigene Zusammenstellung

*für PPK für technische Zwecke werden hilfsweise die ecoinvent Prozessdaten für grafisches Papier verwendet

Bei der Berechnung der DIERec und DERec-Indikatoren und KEA Salden durch die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen aus der Sortierung und Aufbereitung von Altpapier wird nach den gleichen Berechnungskriterien wie für Kunststoffe oder Altholz verfahren. Eine Unterscheidung zwischen inländischen und ausländischen Vorketten findet bei der Berechnung der Daten für die Wärmebereitstellung nicht statt.

Tabelle 8-23: Ergebnisse für den Indikator DIERec für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier, 2013

		spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Altpapier	Strom	0,175	1.269
	Wärme Erdgas	0,013	56
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,180	1.146
Spuckstoffe	Strom	0,175	325
	Wärme Erdgas	0,013	8,2
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,180	169
Papierfangstoffe	Strom	0,175	215
	Wärme Erdgas	0,013	6,6
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,180	136
	Ersatz Erdgas Ziegelindustrie	1,218	68
	Ersatz Steinkohle Zementindustrie	1,407	67
DIERec			3.465

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-24: Ergebnisse für den Indikator DERec für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier, 2013

		spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Altpapier	Strom	0,175	1.269
	Wärme Erdgas	0,013	56
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,180	1.146
Spuckstoffe	Strom	0,175	325
	Wärme Erdgas	0,013	8,2
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,180	169
Papierfangstoffe	Strom	0,175	215
	Wärme Erdgas	0,013	6,6
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,180	136
	Ersatz Erdgas Ziegelindustrie	1,207	56
	Ersatz Steinkohle Zementindustrie	1,318	51
DERec			3.438

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-25: Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier inklusive der ausländischen Vorketten, 2013

		spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Altpapier	Strom	3,02	2,72	21.898	19.757
	Wärme Erdgas	0,47	0,47	2.022	2.011
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	7.044	5.217
Spuckstoffe	Strom	3,02	2,72	5.608	5.059
	Wärme Erdgas	0,47	0,47	298	296
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	1.039	769
Papierfangstoffe	Strom	3,02	2,72	3.702	3.340
	Wärme Erdgas	0,47	0,47	240	239
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	837	620
	Ersatz Erdgas Ziegelindustrie	52,30	52,25	2.906	2.904
	Ersatz Steinkohle Zementindustrie	25,86	25,55	1.226	1.212

		spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
			KEA-Saldo	46.820	41.425

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-26: Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altpapier und Reststoffen der Aufbereitung von Altpapier ohne ausländische Vorketten, 2013

		spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Altpapier	Strom	3,02	2,72	21.898	19.757
	Wärme Erdgas	0,47	0,47	2.022	2.011
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	7.044	5.217
Spuckstoffe	Strom	3,02	2,72	5.608	5.059
	Wärme Erdgas	0,47	0,47	298	296
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	1.039	769
Papierfangstoffe	Strom	3,02	2,72	3.702	3.340
	Wärme Erdgas	0,47	0,47	240	239
	Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	837	620
	Ersatz Erdgas Ziegelindustrie	0,96	0,95	53	53
	Ersatz Steinkohle Zementindustrie	0,75	0,71	35	34
			KEA-Saldo	42.776	37.396

Quelle: eigene Zusammenstellung

8.2.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

8.2.5.1 Verwertungsmengen

Anhand der jährlichen Datenerfassung und -veröffentlichung des Verbandes Deutscher Papierfabriken (VDP 2015b und VDP 2017) ist eine zeitliche Verlaufsdarstellung für die Jahre 2007 bis 2015 für die produzierten Mengen an Papier, Pappe und Kartonagen und die bei der Produktion zum Einsatz gekommenen Altpapiermengen möglich. Die Produktionszahlen weisen sowohl bei der Papierproduktion als auch dem Altpapiereinsatz einen deutlich erkennbaren Einbruch im Zuge der Wirtschaftskrise der Jahre 2008/2009 auf.

Die stofflich verwerteten Rückstandsmengen für die bei der Altpapieraufbereitung anfallenden Reststoffe der Jahre 2007 bis 2012 und 2014 bis 2015 (Papierfangstoffe, Rejecte/Spuckstoffe) wurden in Ermangelung weiterer Erhebungen aus den Vorjahren auf Basis der im Jahr 2013 durchgeführte Erhebung der Papiertechnischen Stiftung (PTS 2014 und 2015) abgeschätzt⁷¹.

Tabelle 8-27: Stoffliche Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2007 - 2015

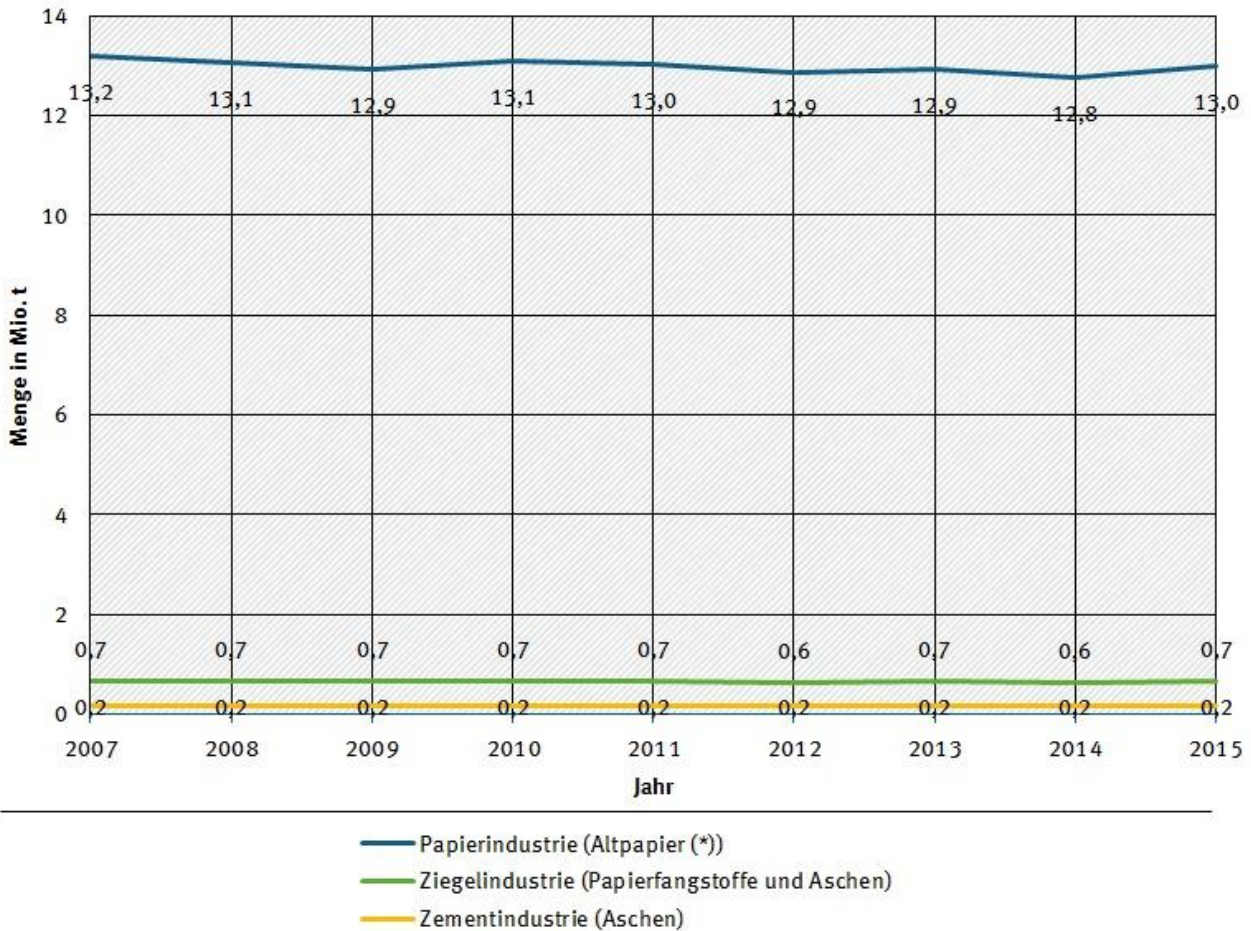
Verwer- tungs- ort	Abfall	Sekundärproduktion in Mio. t									Produkt
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Papier- industrie	Altpapier	3,64	3,80	3,49	3,38	3,28	3,05	3,05	2,98	2,81	Grafische Papiere
		8,49	8,17	8,48	8,80	8,86	8,99	9,00	8,89	9,25	Verpackungs- PPK
		0,47	0,47	0,48	0,41	0,40	0,40	0,41	0,40	0,45	Hygienepa- piere
		0,60	0,62	0,49	0,49	0,48	0,44	0,48	0,47	0,48	PPK für techn. Zwecke
Summe Papierindustrie		13,19	13,05	12,94	13,08	13,02	12,88	12,94	12,75	12,99	
Ziegel- industrie	Papier- fangstoffe (Papierin- dustrie)	0,62	0,62	0,61	0,62	0,61	0,60	0,61	0,60	0,61	Ziegel
	Aschen (Papierin- dustrie)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	Ziegel
Summe Ziegelindustrie		0,66	0,66	0,65	0,65	0,65	0,64	0,65	0,64	0,65	
Zement- industrie	Aschen (Papierin- dustrie)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Zement
Gesamt		14,03	13,88	13,76	13,90	13,84	13,69	13,76	13,55	13,80	

⁷¹ Je Verwertungsweg verwertete Rückstandsmenge des Jahres 2013 bezogen auf den Altpapiereinsatz des Jahres 2013.

Abbildung 8-6: Stoffliche Verwertung von Altpapier und Aufbereitungsrückständen 2007 - 2015

Stoffl. Verwertung von Altpapier und Aufbereitungsrückständen aus Deutschland (*)

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2015



(*) Altpapiermengen: nach Altpapieraufbereitung in Sekundärprodukten enthaltene Altpapiermenge

Die Mengen der energetischen Verwertung über die Jahre 2007 bis 2015 zeigt Tabelle 8-28. Die Abschätzung der Rückstände aus der Papierindustrie erfolgt gleichfalls auf Basis der Rückstandsumfrage der Papier-technischen Stiftung (PTS 2014 und 2015). Zu beobachten sind die durch die Krise bedingten wirtschaftlichen Veränderungen nicht nur bei der geringer ausfallenden Papierproduktionsmenge, sondern aufgrund des sich anschließenden Konsums in letzter Konsequenz auch bei den entsorgten Abfallmengen. Die auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 anhand von Papieranteilen abschätzbaren Altpapiermengen in gemischten Siedlungs- und Verpackungsabfällen zeigen dementsprechend ebenfalls Veränderungen, die dem Wirtschaftsverlauf folgen.

Tabelle 8-28: Energetische Verwertung des in Deutschland erfassten Altpapiers 2007 - 2015

Verwertungs-ort	Abfall	Verwertete Menge in Mio. t								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EBS-Kraftwerke der Papierindustrie	Papierfangstoffe	0,70	0,68	0,65	0,72	0,71	0,71	0,73	0,73	0,74
	Rejecte / Spuckstoffe	0,33	0,32	0,31	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35
Summe EBS-KW Papierindustrie		1,03	1,01	0,96	1,06	1,04	1,05	1,07	1,08	1,09

Verwertungs-ort	Abfall	Verwertete Menge in Mio. t								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sonstige EBS-Kraftwerke	Altpapier	1,02	0,96	0,86	1,13	1,37	1,47	1,46	1,55	1,60
	Papierfangstoffe	0,67	0,66	0,63	0,69	0,69	0,69	0,70	0,71	0,71
	Rejecte / Spuckstoffe	0,32	0,31	0,30	0,33	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34
Summe sonst. EBS-KW		2,01	1,93	1,79	2,15	2,38	2,49	2,49	2,59	2,66
MVA	Altpapier	1,60	1,53	1,52	1,54	1,58	1,54	1,57	1,55	1,54
	Papierfangstoffe	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Rejecte / Spuckstoffe	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
Summe MVA		1,67	1,60	1,59	1,62	1,66	1,62	1,65	1,63	1,62
Ziegelindustrie	Papierfangstoffe	0,58	0,57	0,55	0,60	0,59	0,60	0,61	0,61	0,62
Zementindustrie	Papierfangstoffe	0,34	0,33	0,32	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36
Gesamt		5,64	5,44	5,20	5,77	6,01	6,10	6,17	6,26	6,34

8.2.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Unter unveränderten Annahmen ergeben sich aus den stofflich verwerteten Mengen an Altpapier (siehe Tabelle 8-27) folgende DIERec, DERec und KEA-Indikatoren. Wie in Kapitel 8.2.4 dargestellt, wird keine Differenzierung hinsichtlich inländischer und ausländischer Vorketten bei den KEA-Indikatoren der Wärmeerzeugung vorgenommen.

Tabelle 8-29: Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Altpapier 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	19.851	19.423	19.596	19.771	19.730	19.709	19.804	19.515	20.138
DERec	kt	19.828	19.402	19.575	19.750	19.709	19.689	19.783	19.494	20.117
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	497.528	490.918	487.118	488.903	486.107	480.983	483.735	476.205	486.642
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	485.777	479.972	476.287	478.004	475.272	470.284	472.982	465.618	475.865

Tabelle 8-30: Indikatoren für die energetische Verwertung von Altpapier 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	3.098	2.972	2.843	3.164	3.378	3.432	3.465	3.481	3.576
DERec	kt	3.072	2.947	2.819	3.138	3.353	3.405	3.438	3.454	3.549
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	41.560	39.919	38.047	42.660	45.530	46.385	46.820	46.955	48.452
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	37.688	36.128	34.424	38.679	41.596	42.423	42.776	42.888	44.353

8.3 Lebensmittel- und Gartenabfälle

8.3.1 Materialeinsatz in Deutschland

Die unter dem Begriff Lebensmittel- und Gartenabfälle zusammengefasste Materialart stellt eine summarische Betrachtung dar, die einerseits entlang der Verarbeitungskette von Nahrungsmitteln anfallende Lebensmittelabfälle und andererseits die bei der Pflege privater Gärten und kommunaler Park- und Landschaftsflächen erzeugte Gartenabfälle einschließt.

Unter dem Begriff der Lebensmittelabfälle werden alle Abfälle zusammengeführt, die als Verarbeitungsreste, Ausschuss oder Überschuss nach der Ernte im Zuge von Lebensmittelverarbeitung, Handel, Verarbeitung und Konsum anfallen.

Wie die ebenfalls betrachteten biogenen Abfälle (Altholz und PPK) bestehen auch Lebensmittel- und Gartenabfälle aus Stoffen, die durch natürliche Stoffwechselaktivitäten erzeugt wurden. Die organischen Verbindungen enthalten neben Kohlenstoff weitere Elemente wie z.B. Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium etc., welche durch biologische Abbauprozesse wieder freigesetzt werden und als Nährstoffe zurück in den natürlichen Kreislauf gelangen können.

Im Gegensatz zu anderen Abfällen, die aufgrund ihrer Materialeigenschaften durch Einschmelzung, thermische Verformung o.ä. unmittelbar in ihre Primärform zurückgeführt werden können, werden beim Recycling von Lebensmittel- und Gartenabfällen biologische Abbauprodukte erzeugt, die nach Ausbringung in der Natur wiederum Grundbausteine von Wachstumsprozessen sind.

Zu den derzeit gängigsten stofflichen Verwertungsverfahren für Lebensmittel- und Gartenabfälle zählen Kompostierung und Vergärung bzw. eine Kombination beider (Vergärung mit nachgeschalteter Kompostierung).

Bei der Kompostierung erfolgt durch passive oder aktive Belüftung ein Ab- und Umbau der Organik unter Anwesenheit von Sauerstoff. Bei technischen Kompostierungsverfahren unterscheidet man grundsätzlich in die Verfahrensweisen der Mieten- und Boxenkompostierung. Während bei der entstehungsgeschichtlich älteren Verfahrensart der Mietenkompostierung die biogenen Abfälle durch Aufschütten und Umsetzen von Dreiecks-, Trapez- oder Tafelmieten behandelt werden, erfolgt bei der Boxenkompostierung eine Zwangsbelüftung der Abfälle in geschlossenen Boxen.

Die ursprüngliche Form der technischen Kompostierung ist die Eigenkompostierung im eigenen Garten, welche den kleinstmöglichen Verwertungskreislauf darstellt. Eigenkompostierer behandeln hierbei einen Teil ihrer Küchenabfälle sowie anfallende Gartenabfälle in eigens bewirtschafteten Kompostbehältern, von denen Kompostmiete, Latten- und Schnellkomposter die gängigsten Typen sind.

Die Vergärung erfolgt dagegen in einer sauerstofffreien Atmosphäre, was zu einer Ausprägung anderer Bakterienkulturen führt, die u.a. Methan als Stoffwechselprodukt erzeugen. Unter der Voraussetzung luftdicht abgeschlossener Reaktoren stellt sich die sauerstofffreie Atmosphäre aufgrund der biologischen Aktivität automatisch ein. Eine Einordnung der Vergärungsanlagen erfolgt nach diskontinuierlich und kontinuierlich sowie nass und trocken arbeitender Verfahrensart. Neben der Erzeugung von flüssigen und festen Gärresten, wobei letztere vor einer Ausbringung durch eine nachgeschaltete Kompostierung eine Qualitätssteigerung erfahren können, entsteht mit dem Biogas zusätzlich ein energetisch verwertbarer Brennstoff.

Die durch die Recyclingverfahren erzeugten Komposte und Gärreste stellen natürliche Düngemittel dar, die z.B. den Nährstoffbedarf landwirtschaftlich und hobbygärtnerisch genutzter Flächen decken können. Ihre Anwendung verringert u.a. den Bedarf an chemisch erzeugten Mineraldüngern.

Deren Bedeutung lässt sich angesichts der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Düngemittelmengen einschätzen. So wurden im Wirtschaftsjahr 2013/2014 durch die Ausbringung von Düngemitteln allein

rund 1,7 Mio. t Stickstoff (N), 0,3 Mio. t Phosphat (P_2O_5) und 0,5 Mio. t Kalium (K_2O) in Deutschland eingesetzt (StBA 2014).

8.3.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Anhand einer ausschließlichen Betrachtung ausgewählter Getrennterfassungssysteme, wie bei anderen Materialien, lässt sich die tatsächliche Menge und Verbreitung von Lebensmittelabfällen nicht genügend darstellen. Auch die umfassende Studie zur „Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen ...“ von Kranert (2012) kann als Ergebnis einer Abschätzung der insgesamt in Deutschland anfallenden Lebensmittelabfälle (Haushalte, Großverbraucher, Handel, Industrie etc.) nur eine Bandbreite 8 bis 15 Mio. t (Median 11 Mio. t) benennen.

Vor dem Hintergrund einer klaren Abgrenzung des Bilanzraumes und der Erleichterung der Fortschreibbarkeit wird die Organikmenge der Lebensmittel- und Gartenabfälle unter Rückgriff auf die in der Fachserie 19 Reihe 1 erfassten Abfallmengen abgeschätzt.

Die in Abbildung 8-7 aufgezeigten Aufkommensströme gehen zurück auf die Stoffstrombilanzierung in Kapitel 3.3. Neben den erfassten Mengen der Getrennterfassungssysteme wurden die Organikanteile von Abfallgemischen entsprechend vorliegender Sortieranalysen und den Ergebnissen des Vorgängerprojektes (Wagner 2012) abgeschätzt (Mengenanteile siehe Anhang II). Die statistisch erfassten Garten- und Parkabfälle werden darüber hinaus um die in Privatgärten verbleibenden Gartenabfälle ergänzt, da es sich hierbei um eine relevante Abfallmenge mit substituierender Düngewirkung in Folge von Eigenkompostierung und Nährstoffausbringung im Garten handelt. In Anlehnung an die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen“ (Krause 2014) wird die eigenkompostierte Gartenabfallmenge in Fortschreibung für das Jahr 2013 auf rund 7,5 Mio. t geschätzt.

Insgesamt betrug das Aufkommen an Lebensmittel- und Gartenabfällen im Jahr 2013 rund 26 Mio. t, womit es sich unter den betrachteten Materialien hinsichtlich der Mengenrelevanz um eine der bedeutendsten handelt.

Entsprechend der Erfassung an den jeweiligen Behandlungsanlagen werden hiervon rund 7 Mio. t durch Verbrennung in MVA und EBS-KW direkt energetisch verwertet. Während in MVA vorwiegend Lebensmittel- und Gartenabfälle verbrannt werden, die über den Restabfall und andere gemischte Siedlungsabfälle entsorgt wurden, sind es insbesondere holzige Gartenabfälle, die EBS-KW zugeführt werden.

Neben dieser direkten energetischen Verwertung erfolgt eine weitere energetische Nutzung nach biologischer Umwandlung von organischer Substanz zu Biogas. Der geringere Anteil des Biogases geht auf die Behandlung von Siedlungsabfällen in MBA mit einer Vergärung als biologischer Behandlungsstufe zurück. Die Abschätzung des hier erzeugten Biogases erfolgte unter Rückgriff auf den MBA-Steckbrief der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA 2010), der einen Rückschluss auf den Anteil anaerob arbeitender MBA an der gesamten MBA-Behandlungskapazität zulässt (28 % der MBA-Kapazität verfügt über eine Vergärungsstufe). Der weitaus größere Teil des Biogases wird in Vergärungsanlagen erzeugt, die getrennt erfasste Organikabfälle (Inhalt der Biotonne, Speiseabfälle, Marktabfälle etc.) verarbeiten.

Da die statistische Erfassungstiefe der Fachserie 19 Reihe 1 keine Unterscheidung der biologischen Behandlungsanlagen in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen vorsieht, für die Darstellung der unterschiedlichen stofflichen Verwertungswege dies jedoch vonnöten ist, erfolgt eine Aufteilung der Organikmengen auf Basis verfügbarer Quellen und eigener Abschätzung. Entsprechend der Veröffentlichung „Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe“ (Fricke 2013) betrug die Kapazität der 73 ausschließlich Biogut⁷² und Grüngut⁷³ verarbeitenden Vergärungsanlagen im Jahr 2013 rund 1,64 Mio. t. Ferner

⁷² Biogut: Mittels Biotonne und/oder Biosack getrennt erfasste Nahrungs- und Küchenabfälle sowie Gartenabfälle aus Privathaushalten (Krause 2014).

existieren in Deutschland gemäß Biogas-Atlas 2014/2015 (Kern 2015) 38 Vergärungsanlagen mit einer Anlagenkapazität von rund 1,9 Mio. t, die vorwiegend Lebensmittelabfälle verarbeiten (Lebensmittel-, Speisereste, Abfälle aus Nahrungsmittelindustrie, industrielle Reststoffe etc.). Nach Korrektur um enthaltene, nicht organische Störstoffanteile im Biogut und mit verarbeitete Güllemengen sowie Berücksichtigung der durchschnittlichen Anlagenauslastung wurden im Jahr 2013 rund 3 Mio. t Lebensmittel- und Gartenabfälle vergoren.

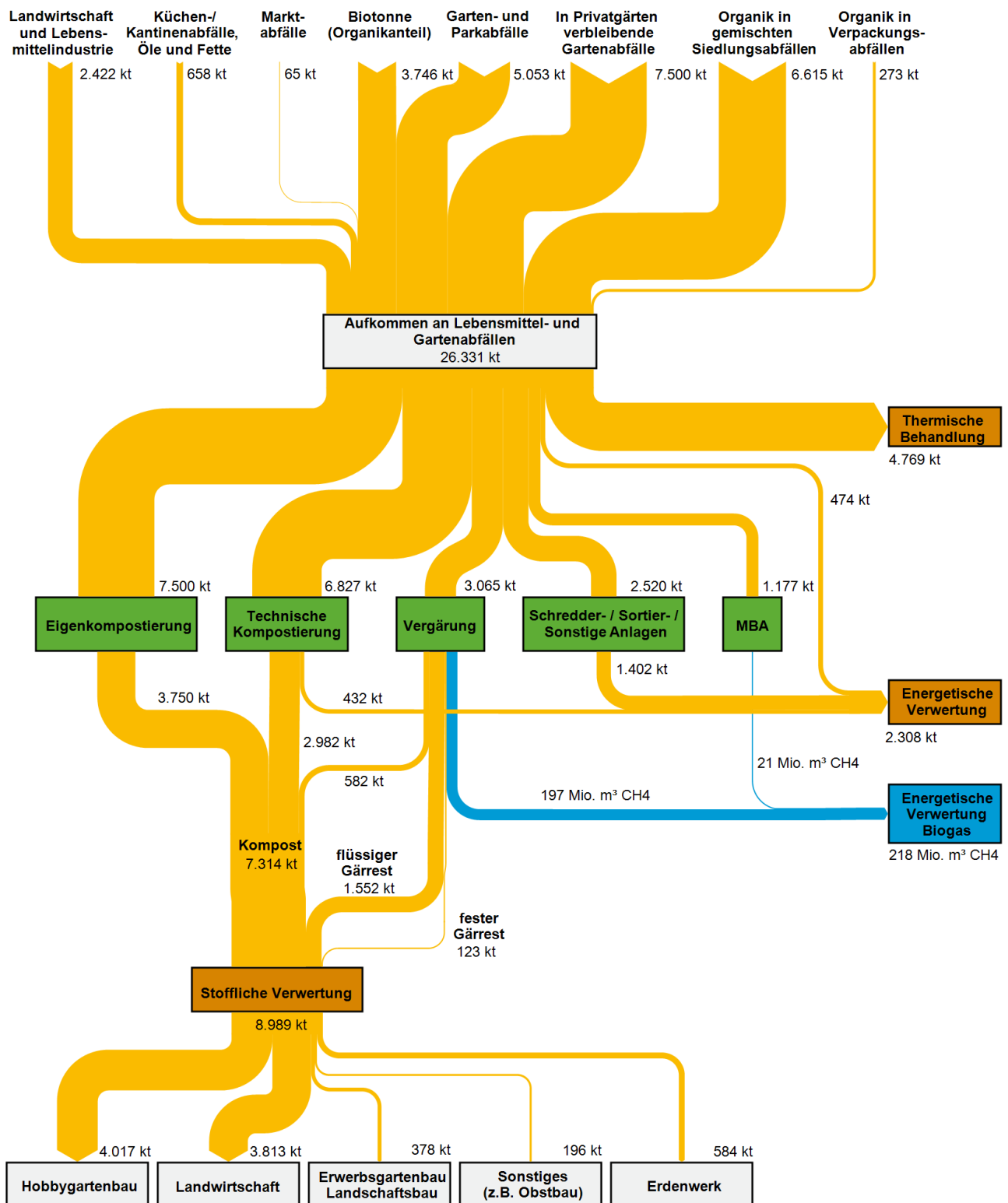
Die verbleibenden 6,8 Mio. t an Lebensmittel- und Gartenabfällen, die gemäß Fachserie 19 Reihe 1 an biologischen Behandlungsanlagen registriert wurden, entfallen im Umkehrschluss auf eine Behandlung in Kompostierungsanlagen. Bestätigung erfährt die angewandte Rechenmethode durch die Veröffentlichungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK), die in ihrer Jahresstatistik für das Jahr 2014 eine in Kompostierungsanlagen mit RAL-Gütesicherung verarbeitete Organikmenge von rund 6,7 Mio. t ausweist BGK (2015).

Für die Abschätzung der für die stoffliche Verwertung relevanten Outputströme der Vergärungsanlagen liegt eine nach den bestimmenden Verfahrensarten (Trockenvergärung (kontinuierlich und diskontinuierlich) und Nassvergärung) differenzierende Betrachtung der Massenbilanzen zugrunde. Die in der Veröffentlichung von Raussen (2015) für die Vergärung separat erfassten Bioguts ausgewiesene Menge jährlich anfallender Gärreste (flüssig und fest) von 1,5 Mio. t bestätigt die eigenen Berechnungen. Für den Prozess der Kompostierung wurde ein Rotteverlust von 50 % und eine Aufteilung in Kompost und heizwertreiches Material zur energetischen Verwertung gemäß einer Betreiberumfrage im Auftrag des UBA (UBA 2012) angenommen. Dieser Ansatz deckt sich wiederum mit der Veröffentlichung der BGK (2015).

Den Abschluss der zusammenfassenden Darstellung der Stoffströme von Lebensmittel- und Gartenabfällen bildet eine Differenzierung der stofflich verwerteten Kompost- und Gärrestmengen. Den in Abbildung 8-7 aufgezeigten Stoffströmen liegt für Kompost eine Verteilung gemäß „Vermarktung der RAL-gütesicherten Komposte im Jahr 2014“ zugrunde, während Gärreste ausnahmslos in der Landwirtschaft verwertet werden (BGK 2016). Die Kompostmengen aus der Eigenkompostierung werden dem Hobbygartenbau zugeschrieben.

⁷³ Grüngut: Getrennt erfasste Gartenabfälle aus Privathaushalten sowie bei der kommunalen Pflege erzeugte Park- und Landschaftspflegeabfälle (Krause 2014).

Abbildung 8-7: Stoffströme der Erfassung und Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen in Deutschland im Jahr 2013



8.3.3 Verwertungswege und Verwertungsquoten

Bei der biologischen Behandlung getrennt erfasster Lebensmittel- und Gartenabfälle erzeugte Komposte und Gärreste sind aufgrund der enthaltenen Nährstoffe sehr gut geeignet, die Nährstoffversorgung von Böden sicherzustellen. Wie Abbildung 8-7 zeigt, kommen diese natürlichen Düngemittel neben dem Haupteinsatzfeld auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in vielen weiteren Anwendungsbereichen zum Einsatz.

Der Einsatz von Kompost und Gärrest führt zu Einsparungen alternativ eingesetzter und zum Teil aufwendig hergestellter mineralischer Düngemittel und trägt somit zu einer Schonung der natürlichen Ressourcen bei.

Die Substitution von Primärrohstoffen ausschließlich über eine reine Mengenäquivalenz herzustellen, ist aufgrund der heterogenen Zusammensetzung sowohl der Komposte/Gärreste als auch der mineralischen Dünger/torfbasierenden Komposte nicht geeignet. Vielmehr sind für den Anwender die in den jeweiligen Düngemitteln enthaltenen Nährstoffe und bodenverbessernden Eigenschaften entscheidend.

Unter der Voraussetzung eines fachgerechten Gebrauchs wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes die durch den Einsatz von Kompost/Gärrest aus Lebensmittel- und Gartenabfällen erzielte Substitutionswirkung in Äquivalenz zur enthaltenen Nährstoffmenge angenommen. Durch diese Vorgehensweise werden unterschiedliche Wassergehalte, geringere Nährstoffgehalte von Komposten gegenüber Handelsdüngern (Jauch 2012) etc. berücksichtigt. Die Betrachtung der Substitutionswirkung von Primärrohstoffen beschränkt sich auf die Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphat (P₂O₅) und Kalium (K₂O), welche die Hauptnährstoffe von Kompost, Gärresten und anderen Düngemitteln darstellen.

Den für Komposte, flüssige und feste Gärreste gewählten durchschnittlichen Nährstoffgehalten liegt eine Auswertung diverser Prüfzeugnisse der RAL-Gütesicherung und Abgleich mit verschiedenen Literaturquellen zugrunde (Witzenhausen 2008, Bifa 2015, BGK 2010 etc.). Unter dem Ansatz der verschiedenen Nährstoffgehalte in Kombination mit den aufgezeigten Stoffströmen für Komposte und Gärreste ergeben sich durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen die in Tabelle 8-45 dargestellten Substitutionsäquivalente von rund 32.000 t P₂O₅, 59.000 t N und 42.000 t K₂O.

Tabelle 8-31: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2013

Produkt der Abfallaufbereitung	Verwertete Menge [Mio. t]	Substitutions-äquivalent	Nährstoffgehalt im Produkt	Äquivalente Menge [t]
Kompost	7,314	Phosphat (P ₂ O ₅)	4 kg P ₂ O ₅ / t Kompost	29.256
		Stickstoff (N)	7 kg N / t Kompost	51.198
		Kalium (K ₂ O)	5 kg K ₂ O / t Kompost	36.570
Flüssiger Gärrest	1,552	Phosphat (P ₂ O ₅)	1,5 kg P ₂ O ₅ / t fl. Gärrest	2.328
		Stickstoff (N)	4,5 kg N / t fl. Gärrest	6.984
		Kalium (K ₂ O)	3 kg K ₂ O / t fl. Gärrest	4.656
Fester Gärrest	0,123	Phosphat (P ₂ O ₅)	4 kg P ₂ O ₅ / t fester Gärrest	492
		Stickstoff (N)	7 kg N / t fester Gärrest	861
		Kalium (K ₂ O)	4 kg K ₂ O / t fester Gärrest	492
Gesamt	8,989			

Neben der aufgezeigten stofflichen Substitutionswirkung wird, wie in Abbildung 8-7 ersichtlich, ein Teil der betrachteten Lebensmittel- und Gartenabfälle direkt oder im Anschluss an eine Aufbereitung energetisch

verwertet. Hierbei handelt es sich insbesondere um die Verbrennung von Organik als Bestandteil gemischter Siedlungsabfälle in MVA und die Verwertung holziger Aufbereitungsprodukte in EBS-KW.

Ferner wird durch die Kaskadennutzung der Vergärung getrennt erfassten Lebensmittel- und Gartenabfällen neben den stofflichen Eigenschaften der organischen Abfälle durch das erzeugte Biogas auch ein energetischer Nutzen geschaffen. Sowohl für die Verwertung dieses Biogases als auch des Biogases aus MBA wird überschlägig eine Verbrennung in BHKW angesetzt.

Die Berücksichtigung der energetischen Substitutionswirkung erfolgt für alle drei energetischen Verwertungswege nach dem Marginalansatz.

Tabelle 8-32: Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2013

Verwertungsort	Abfall / Aufbereitungsprodukt	Verwertete Menge	Heizwert	Substitutionsäquivalent
MVA	Lebensmittel- und Gartenabfälle	4,769 Mio. t	4,0 MJ/kg ⁷⁴	Strom + Wärme
EBS-KW	Holzige Organik	2,308 Mio. t	12,0 MJ/kg ⁷⁵	Strom + Wärme
BHKW	Biogas	218 Mio. m ³ CH ₄	35,9 MJ/m ³	Strom + Wärme

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ Der in inländisch erzeugten Komposten und Gärresten enthaltene Stickstoff entspricht 4 % der deutschen Stickstoffdüngemittelherstellung (1,4 Mio. t gemäß IVA 2014).
- ▶ Das in inländisch erzeugten Komposten und Gärresten enthaltene Kalium entspricht 1 % der deutschen Kalidüngemittelherstellung (3 Mio. t gemäß IVA 2014).
- ▶ Das in inländisch erzeugten Komposten und Gärresten enthaltene Phosphat entspricht 11 % des Inlandabsatzes an mineralischem Phosphatdünger (0,3 Mio. t gemäß StBA 2014).
- ▶ 65 % des Aufkommens an Lebensmittel- und Gartenabfällen werden stofflichen Verwertungsanlagen im Inland zugeführt, 40 % energetisch verwertenden Anlagen⁷⁶.

8.3.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die stoffliche Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen wurden den substituierten Mengen an Nährstoffen in Düngemitteln die Aufwendungen für die Sammlung und Aufbereitung von Kompost, sowie flüssigen und festen Gärresten gegenübergestellt. Für den DERec wurde die Vorkette für Phosphor abgeschnitten und nur das Eigengewicht des importierten Phosphors in die Berechnung integriert.

Wie bereits bei der Darstellung der Verwertungswege werden die Indikatoren im Folgenden für die stoffliche Verwertung und die energetische Verwertung (in Zusammenfassung von thermischer Behandlung und energetischer Verwertung, siehe Kapitel 2.2) separat ausgewiesen.

⁷⁴ Quelle: Pohl 2013

⁷⁵ Quelle: Kern 2010

⁷⁶ Da Biogasanlagen getrennt erfasste Bioabfälle sowohl stofflich als auch energetisch verwerten, werden 100 % überschritten.

Tabelle 8-33: Ergebnisse für den Indikator DIERec inkl. ausländischer Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Phosphat	13,74	441
Stickstoff	10,47	619
Kalium	0,89	37
Kompost Behandlungsanlage	0,13	925
Kompost Sammlung	0,11	775
Flüssiger Gärrest	0,23	360
Fester Gärrest	0,11	13
	DIERec	- 964

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-34: Ergebnisse für den Indikator DERec ohne ausländische Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Phosphat	11,73	376
Stickstoff	10,47	619
Kalium	0,89	37
Kompost Behandlungsanlage	0,13	925
Kompost Sammlung	0,23	775
Flüssiger Gärrest	0,11	360
Fester Gärrest	0,11	13
	DERec	- 1.028

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-35: Saldo KEA inkl. ausländische Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Phosphat	35,79	32,68	1.148	1.048
Stickstoff	73,30	67,24	4.328	3.970
Kalium	11,71	5,57	488	232

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Kompost Behandlungsanlage	0,35	0,31	2.568	2.269
Kompost Sammlung	0,75	0,66	5.517	4.838
Flüssiger Gärrest	2,36	1,81	3.660	2.814
Fester Gärrest	0,75	0,66	93	81
KEA-Saldo			- 5.781	- 4.753

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-36: Saldo KEA ohne die ausländische Vorketten für die Substitution von Nährstoffen in Düngemitteln durch die Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Phosphat	34,73	31,68	1.114	1.016
Stickstoff	73,30	67,24	4.328	3.970
Kalium	11,71	5,57	488	232
Kompost Behandlungsanlage	0,35	0,31	2.568	2.269
Kompost Sammlung	0,75	0,66	5.517	4.838
Flüssiger Gärrest	2,36	1,81	3.660	2.814
Fester Gärrest	0,75	0,66	93	81
KEA-Saldo			- 5.815	- 4.784

Quelle: eigene Zusammenstellung

Für die energetische Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfälle wurde die Verbrennung in MVA und EBS berücksichtigt, sowie die energetische Verwertung in Biogasanlagen. Es wurden keine ausländischen Vorketten bei den substituierten Wärmeprozessen abgeschnitten.

Tabelle 8-37: Ergebnisse für die Indikatoren DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Strom	0,18	1.877
Wärme Erdgas	0,01	77
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,18	1.575
DIERec und DERec		3.529

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-38: Saldo KEA für die energetische Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Strom	3,02	2,72	32.373	29.208
Wärme Erdgas	0,47	0,47	2.780	2.764
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	9.684	7.173
	KEA-Saldo		44.837	39.145

Quelle: eigene Zusammenstellung

8.3.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

8.3.5.1 Verwertungsmengen

Den durch stoffliche Verwertung von Lebensmittel- und Gartenabfällen erzielten Substitutionsäquivalenten für die Jahre 2007 bis 2015 (Tabelle 8-40) seien die zugrundeliegenden Verwertungsmengen an Kompost sowie festen und flüssigen Gärresten vorangestellt (Tabelle 8-39).

Tabelle 8-39: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2007-2015

Produkt der Abfallaufbereitung	Verwertete Menge in Mio. t								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Kompost	7,51	7,33	7,29	7,33	7,31	7,29	7,31	7,52	7,45
Flüssiger Gärrest	1,05	1,14	1,23	1,27	1,41	1,51	1,55	1,58	1,64
Fester Gärrest	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13
Gesamt	8,65	8,57	8,63	8,71	8,83	8,92	8,99	9,23	9,22

Abbildung 8-8: Stoffl. Verw. in Deutschland erfasster Lebensmittel- und Gartenabfälle 2007-2015

Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2015

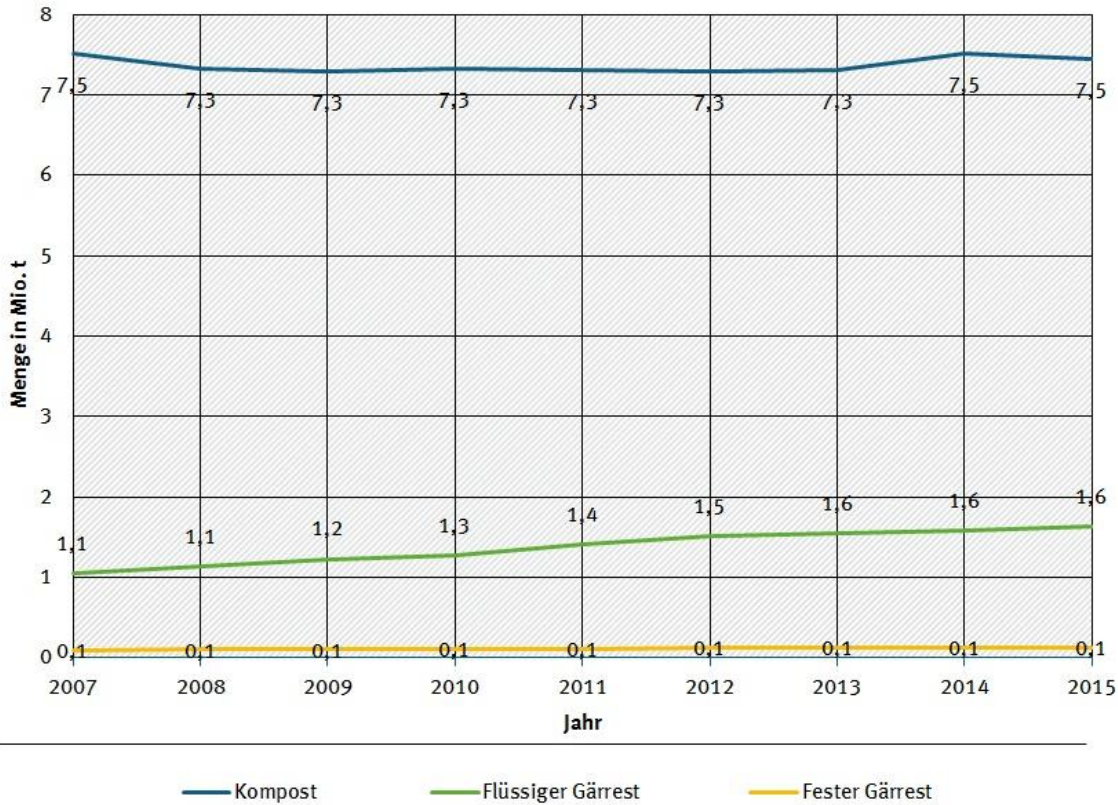


Tabelle 8-40: Substitutionsäquivalente der stofflichen Verwertung von in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfällen 2007-2015

Produkt der Abfallaufbereitung	Substitutions-äquivalent	Äquivalente Menge in t								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Kompost	Phosphat (P ₂ O ₅)	30.051	29.325	29.178	29.330	29.223	29.166	29.256	30.075	29.811
	Stickstoff (N)	52.589	51.318	51.061	51.328	51.140	51.041	51.198	52.631	52.170
	Kalium (K ₂ O)	37.564	36.656	36.472	36.663	36.529	36.458	36.570	37.594	37.264
Flüssiger Gärrest	Phosphat (P ₂ O ₅)	1.573	1.709	1.847	1.906	2.113	2.268	2.328	2.373	2.461
	Stickstoff (N)	4.720	5.126	5.540	5.719	6.339	6.804	6.984	7.118	7.382
	Kalium (K ₂ O)	3.146	3.417	3.693	3.813	4.226	4.536	4.656	4.745	4.921
Fester Gärrest	Phosphat (P ₂ O ₅)	357	385	411	424	457	483	492	498	508
	Stickstoff (N)	625	675	719	742	799	846	861	872	889
	Kalium (K ₂ O)	357	385	411	424	457	483	492	498	508

Den Verlauf der Lebensmittel- und Gartenabfallmengen, die durch Verbrennung energetisch verwertet werden und die durch Vergärung entstehenden Biogasmengen über die Jahre 2007 bis 2015 zeigt Tabelle 8-46.

Tabelle 8-41: Energ. Verwertung der in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfälle 2007-2015

Verwertungsort	Abfall/ Aufbereitungs- produkt	Verwertete Menge								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
MVA	Lebensmittel- und Gartenab- fälle in Mio. t	4,84	5,06	5,08	5,07	4,97	4,75	4,77	4,78	4,72
EBS-KW	Holzige Orga- nik in Mio. t	1,61	1,58	1,66	1,87	1,96	2,22	2,31	2,50	2,37
BHKW	Biogas in Mio. m ³ CH ₄	149	163	172	178	197	208	218	226	232

8.3.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Tabelle 8-42: Indikatoren für die stoffliche Verwertung von in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfällen 2007 – 2015

Indikator	Ein- heit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	- 907	- 902	- 912	- 922	- 941	- 955	- 964	- 989	- 991
DERec	kt	- 971	- 965	- 976	- 986	- 1.005	- 1.019	- 1.028	- 1.055	- 1.057
KEA- Saldo mit Vorketten	TJ	- 4.906	- 5.005	- 5.165	- 5.255	- 5.505	- 5.696	- 5.781	- 5.917	- 6.003
KEA- Saldo ohne Vorketten	TJ	- 4.940	- 5.038	- 5.198	- 5.288	- 5.539	- 5.730	- 5.815	- 5.952	- 6.038

Tabelle 8-43: Indikatoren für die energetische Verwertung von in Deutschland erfassten Lebensmittel- und Gartenabfällen 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec und DERec	kt	2.779	2.865	2.963	3.126	3.249	3.421	3.529	3.698	3.621
KEA-Saldo	TJ	34.824	35.855	37.157	39.341	41.017	43.406	44.837	47.100	46.084

8.4 Altreifen

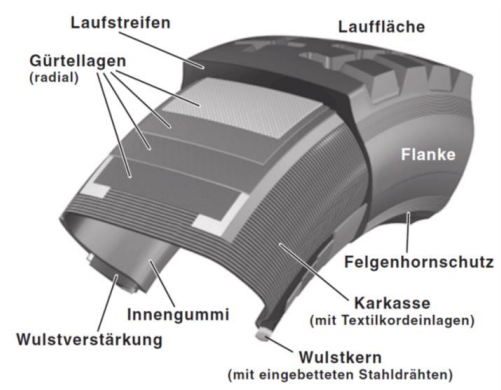
8.4.1 Materialeinsatz in Deutschland

Die hohen sicherheits- und haltbarkeitsbedingten Anforderungen an PKW, LKW und andere Fahrzeuge haben dazu geführt, dass Reifen inzwischen ein komplexes Mehrkomponentenprodukt sind. Ursprünglich größtenteils aus Naturkautschuk bestehend, sind neben dem petrochemisch hergestellten Synthekautschuk derweil eine Vielzahl weiterer Grund- und Zusatzstoffe hinzugekommen. Diese führen zu der geforderten Widerstandsfähigkeit (Abriebfestigkeit, Luftundurchlässigkeit, Elastizität, Reißfestigkeit etc.).

Wie die stoffliche Zusammensetzung in Tabelle 8-44 zeigt, sind neben dem Hauptbestandteil Kautschuk vorwiegend Quarz (SiO₂) und Ruß sowie Stahl die mengenmäßig bestimmenden Materialien.

Tabelle 8-44: Stoffliche Zusammensetzung und Aufbau von Reifen (UBA 1999)

Material	Personenwagen	Lastwagen	Durchschnitt
Naturkautschuk	21 Ma.-%	31 Ma.-%	24 Ma.-%
Synthekautschuk	24 Ma.-%	14 Ma.-%	21 Ma.-%
Ruß, SiO ₂	28 Ma.-%	21 Ma.-%	26 Ma.-%
Stahldrähte	12 Ma.-%	24 Ma.-%	16 Ma.-%
Gewebe	4 Ma.-%	1 Ma.-%	3 Ma.-%
Öle, weitere Zuschlagsstoffe	11 Ma.-%	9 Ma.-%	10 Ma.-%



Laut Angaben der Gesellschaft für Altgummi-Verwertungs-Systeme (GAVS) betrug der Bedarf an Ersatzreifen im Jahr 2014 rund 550.000 t. Davon waren ca. 498.000 t Neureifen, 10.000 t Gebrauchtreifen und 49.000 t Reifen, die durch Runderneuerung wieder in Verkehr gebracht werden konnten (GAVS 2015).

Bei der Herstellung von Reifen wird das Verfahren der Vulkanisation angewendet, um aus einer Rohkautschukmischung ein widerstandsfähiges und elastisches Produkt zu erhalten. Dieses Verfahren wird allgemein als irreversibel angesehen. Zwar können die beim Recycling von Altreifen erhaltenen Gummigranulate durch Entvulkanisations-Verfahren teilweise als Sekundärrohstoff bei der Neureifenherstellung eingesetzt werden. Ein einfaches Wiedereinschmelzen wie beim Recycling thermoplastischer Kunststoffe ist jedoch nicht möglich.

Das Recycling von Altreifen gliedert sich in drei Schritte: Vorzerkleinerung, Granulierung und Feinvermahlung. Dabei ist eine Trennung in die drei Hauptbestandteile Gummi, Stahl und Textilfaser erst nach einer Zerkleinerung auf eine Körnung von 5 mm möglich (Reschner 2012). Vor der Zerkleinerung des Altreifens ist ggf. eine Entschwulstung der Altreifen erforderlich. Dies trifft insbesondere auf LKW-Reifen zu, welche dicke Stahlwulste enthalten, die in den nachfolgenden Prozessschritten zu hohem Verschleiß der Aufbereitungsgeräte führen würden (UBA 2004).

In der Vorzerkleinerung findet mit Hilfe von Rotorschern eine Zerkleinerung der Altreifen auf eine Korngröße von 50 bis 150 mm statt. Die gewünschte Korngröße wird über eine Siebung der Reifenschnitzel und Rückführung des Überkorns erreicht. Die durch Vorzerkleinerung erhaltenen Reifenschnitzel enthalten noch alle Bestandteile des Altreifens. Daher findet in der Granulierung neben einer weiteren Zerkleinerung des Materials auf Korngrößen von kleiner 5 mm der Aufschluss in die Einzelkomponenten statt. Dies kann in den eingesetzten Granulatoren durch eine Kombination aus Quetschen, Reißen und Schneiden erreicht werden. Stahl und Textilfasern können nach Aufschluss des Stoffgemisches durch Magnetbänder bzw. Ab-

saugen entfernt werden. Abschließend wird in der Feinvermahlung das nun von Stahl und Textilfasern befreite Gummigranulat auf die vom Kunden gewünschte Korngröße zerkleinert (Reschner 2012).

Eine derartige Aufbereitung der Altreifen wird als Warmvermahlung bezeichnet, wenn sie bei Umgebungstemperatur stattfindet. Bei diesem Verfahren können Korngrößen bis zu 0,8 mm erreicht werden. Bei der Kaltvermahlung (kryogene Vermahlung) hingegen werden die vorzerkleinerten Reifenschnitzel mit flüssigem Stickstoff auf Temperaturen von -100 °C gekühlt. So kann eine Versprödung des Materials erreicht werden, die es erlaubt, in einem einzigen Verfahrensschritt sowohl die Stahl- und Faseranteile aufzuschließen, als auch die Gummifraktion auf eine Korngröße von 0,4 mm bis 5 mm zu zerkleinern. Eine Zerkleinerung im Granulator ist somit bei einem kryogenen Verfahren nicht zwingend erforderlich. Im Vergleich zur Warmvermahlung werden bei der Kaltvermahlung kleinere Korngrößen der entstehenden Gummimehle und -granulate erreicht, was deren Einsatzgebiet deutlich vergrößert (Reschner 2012, UBA 2004).

8.4.2 Stoffströme in Deutschland 2014

Die im Auftrag des Wirtschaftsverbandes der deutschen Kautschukindustrie arbeitende Gesellschaft für Altgummi-Verwertungs-Systeme (GAVS) benennt das in Deutschland anfallende Altreifenaufkommen für das Jahr 2014 mit 501.000 t (GAVS 2015). Dabei werden die meisten Altreifen bei Reifen- und Autohändlern, Kraftfahrzeugwerkstätten, Abschleppdiensten, Tankstellen, Unternehmen mit einem großen Fuhrpark (z.B. öffentliche Verkehrsbetriebe) oder bei Reifenlieferanten erfasst. Aufgrund weiterer Angaben der GAVS zur Runderneuerung und Wiederverwendung von Gebrauchtreifen und in Ermangelung veröffentlichter Zahlen der GAVS für das Jahr 2013 erfolgt die vorliegende Stoffstromdarstellung für das Jahr 2014. Für die Berechnung der Indikatoren (Kapitel 8.4.4) wurden aufgrund der späteren Addition aller DIERec und DERec-Indikatoren für ein Jahr jedoch die Werte des Jahres 2013 verwendet.

Gegenüber den Mengen der GAVS wird in der Fachserie 19 Reihe 1 unter dem Abfallschlüssel 160103 eine etwas geringere Altreifenmenge ausgewiesen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der an Behandlungsanlagen angenommen Altreifen diese auch wieder verlässt (sichtbar an den ebenfalls unter AS 160103 geführten Outputmengen) und einer weiteren Behandlungsanlage zugeführt wird. So verlassen Altreifen z.B. eine Sortieranlage um anschließend in einer Schredderanlage weiter behandelt zu werden. Welche Anlagen wie oft durchlaufen werden, lässt sich anhand der statistisch erfassten Zahlen nicht exakt benennen. Die Menge der im Output von Behandlungsanlagen unter AS 160103 ausgewiesenen Altreifen beträgt immerhin rund 110.000 t, wobei in etwa 87.000 t auf Altreifen aus Deutschland entfallen.

Vor dem Hintergrund der Stoffstromdarstellung in jährlicher Abfolge (siehe Kapitel 8.4.5) wird das Altreifenaufkommen in dieser Studie auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 benannt. Demnach beträgt das in Deutschland erzeugte Altreifenaufkommen des Jahres 2014 vor Im- und Export⁷⁷ rund 487.000 t.

Die von Autos demontierten Reifen, die aufgrund ihrer Qualität entweder direkt oder nach einer sogenannten Runderneuerung als Gebrauchtreifen wiederverwendet werden können, fallen nicht unter die Bezeichnung der Altreifen. Ihre Menge belief sich im Jahr 2014 auf insgesamt rund 44.000 t. Anhand von Zahlen nicht zu belegen sind die für andere Zwecke weiterverwendeten Altreifen, die zur Beschwertung von Abdeckungen in der Landwirtschaft oder auf Deponien, als Aufprallschutz in Hafenanlagen, im Landschaftsbau oder Küstenschutz genutzt werden.

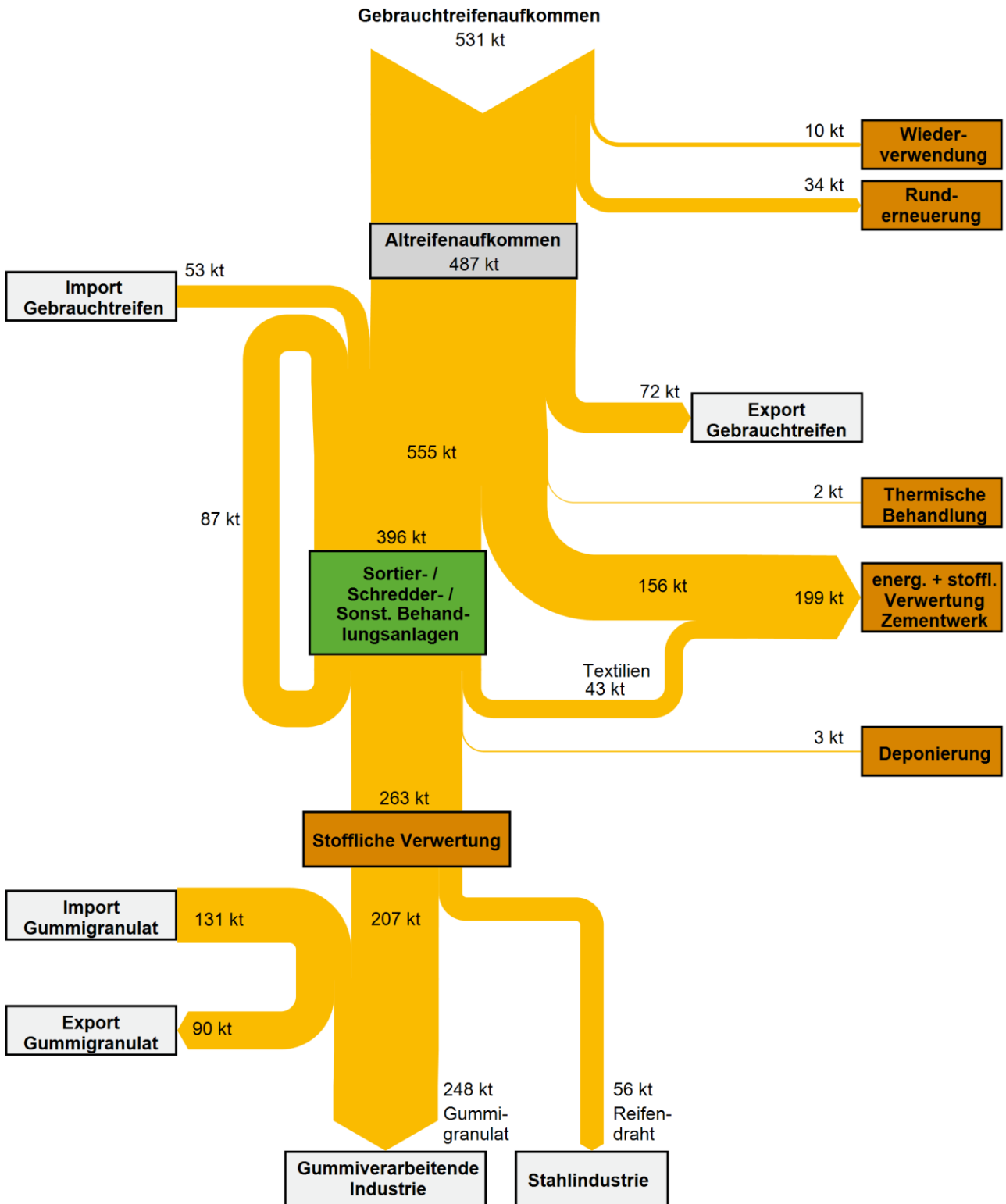
Wie Abbildung 8-9 zeigt, führt die Aufbereitung von Altreifen in Sortier-, Schredder- und sonstigen Behandlungsanlagen in Deutschland dazu, dass im Jahr 2014 rund 263.000 t einer stofflichen Verwertung zugeführt wurden. Neben wieder einsetzbarem Gummigranulat, das den Großteil der Recyclingmenge ausmacht, handelt es sich auch um die durch Aufbereitung abgetrennten Stahleinlagen und Reifendraht, die wieder ihren Eingang in der Stahlindustrie finden. Den beim Recycling von Altreifen entstehenden Outputmengen

⁷⁷ Im- und Export werden auf Basis des Warenverzeichnisses der Außenhandelsstatistik (WA40122000) benannt.

(Gummigranulat, Stahl, Textilgewebe, sonst. Abfälle) liegen die Ausführungen einer vom Copenhagen Resource Institute, FORCE Technology und ifeu-Institut verfassten Studie zur Verwertung von Altreifen zugrunde (Cop 2009).

Gleichzeitig verdeutlicht die zusammenfassende Stoffstromdarstellung der Altreifenverwertung, dass ein Großteil der anfallenden Altreifenmenge nach wie vor in Zementwerken energetisch verwertet wird.

Abbildung 8-9: Stoffströme der Altreifenerfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2014



8.4.3 Verwertungswege

Altreifen bzw. die hierin enthaltenen Materialien werden sowohl stofflich als auch energetisch verwertet (thermischer Behandlung und energetischer Verwertung). Basierend auf den Mengen der Fachserie 19 Reihe 1 (AS 160103) wurden im Jahr 2013 von den in Deutschland erfassten Gebrauchtireifen insgesamt 258.000 t an Altreifen und Aufbereitungsprodukten in der gummiverarbeitenden-, Stahl- und Zementindustrie stofflich verwertet (Tabelle 8-45).

Wie die Differenzierung zeigt, entfällt der größte Anteil davon auf die Verwertung des beim Recycling entstehenden Gummigranulats. Als Sekundärrohstoff findet dieses Anwendung bei der Produktion von Einstreumaterialien und Gummiformteilen für Sportanlagen (Kunstrasenfüllung, Spielfelder, Tennisplätze, Laufbahnen etc.) und Herstellung elastischer Gummimatten, sowie Platten zur Isolierung oder Abdichtung. Darüber hinaus mindern sie als Zusatzstoff zum Bitumen des Asphalts die Verkehrsräusche (LfU Bayern 2013). Aufgrund bestehender Qualitätsanforderungen erfolgt der Einsatz von Recyclingmaterial bei der Herstellung von Neureifen dagegen nur in begrenztem Maße (Reschner 2012). Durch den Einsatz von Gummigranulat als Sekundärrohstoff wird eine effektive Einsparung von Synthetikgummi erzielt.

Der bei der mechanischen Aufbereitung der Altreifen wiedergewonnene Reifendraht wird der Stahlindustrie zugeführt.

Bei der Verbrennung von Altreifen in der Zementindustrie geht mit der Nutzung des Energiegehalts auch ein stofflicher Nutzen einher. Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen bei der Klinkerherstellung verbrennen die Reifen fast vollständig. Neben Natur- und Synthetikgummi oxidieren sogar Ruß und die enthaltenen Stahleinlagen. Die verbleibenden Verbrennungsrückstände, insbesondere Eisenoxid, Quarz (SiO₂), Schwefel, Aluminium, Calcium sowie die schwerflüchtigen Metalle gehen als Zusatzstoffe in den Klinker über und werden anstelle von Primärrohstoffen Bestandteil des Zements. Wie Tabelle 8-44 zu entnehmen ist, sind für die Betrachtung der substituierten Primärrohstoffe hiervon Eisenoxid und Quarz relevant. Dabei wurden für die eingesparten Mengen an Eisenerz und Quarz ein Stahlanteil von 16 Ma.-% und ein Quarzanteil von 24 Ma.-%⁷⁸ am Altreifen angenommen.

Tabelle 8-45: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2013

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge	Produkt	Substitutionsäquivalent
Gummiverarbeitende Industrie	Gummigranulat	156.000 t	Gummimodifiziertes Bitumen für Asphalt, Materialien für Sportanlagen, Matten, Lärmschutzwände	Synthetikgummi
Stahlindustrie	Stahleinlagen, Reifendraht	42.000 t	Stahl	Stahl
Zementindustrie	Altreifen	36.000 t	Zement	Quarzsand
	Altreifen	24.000 t	Zement	Eisenerz
Summe Zementindustrie		60.000 t		
Gesamt		258.000 t		

⁷⁸ Rußanteil hat mit fortschreitendem Entwicklungsstand abgenommen. Rußanteil mit 2 % auf Basis von Conti (2008) abgeschätzt.

Neben der Nutzung der stofflichen Eigenschaften wurden im Jahr 2013 rund 187.000 t an deutschlandweit erfassten Altreifen und Bestandteilen aus deren Aufbereitung energetisch verwertet (thermischer Behandlung und energetischer Verwertung).

Dabei erfolgt die Verbrennung als Ersatzbrennstoff in Deutschland nahezu vollständig in Zementwerken. Die Beliebtheit von Altreifen bei Zementwerksbetreibern ist neben dem hohen Heizwert auch auf ihren rohstofflichen Nutzen für das Produkt Zement zurückzuführen. Die Berücksichtigung des energetischen Nutzens durch die Verbrennung von Altreifen erfolgt unter energieäquivalenter Substitution des alternativ in Zementwerken eingesetzten Primärenergieträgers Steinkohle.

Eine Verbrennung von Altreifen in Kohlekraftwerken wäre zwar ebenso denkbar, würde jedoch den stofflichen Wert ungenutzt lassen und zudem aufgrund der notwendigen Zerkleinerung zu einem höheren Aufbereitungsaufwand führen.

Tabelle 8-46: Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2013

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge	Heizwert	Substitutionsäquivalent
MVA	Altreifen	4.000 t	29,0 MJ/kg	Strom + Wärme
Zementindustrie	Altreifen	150.000 t	29,0 MJ/kg	Steinkohle
	Textilien	33.000 t	20,1 MJ/kg	
Summe Zementindustrie		183.000 t		
Gesamt		187.000 t		

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ 10 % der deutschen Kautschukproduktion (1,54 Mio. t gemäß wdk 2013) stammen aus Kautschuk aus Altreifen als inländisches Sekundärprodukt.
- ▶ 0,1 % der deutschen Stahlproduktion (42,6 Mio. t) stammen aus Stahl aus Altreifen als inländisches Sekundärprodukt.
- ▶ 0,3 % der deutschen Zementklinkerproduktion (23,1 Mio. t gemäß VDZ 2016) stammen aus den Verbrennungsrückständen der Altreifenverbrennung als inländisches Sekundärprodukt.
- ▶ 76 % des Altreifenaufkommens wurden inländischen Behandlungsanlagen zum Zweck der stofflichen Verwertung zugeführt.
- ▶ Einschließlich der Behandlungsreste stofflicher Verwertungsanlagen wurden 45 % des Altreifenaufkommens energetisch verwertet, so dass insgesamt maximal 55 % stofflich verwertet worden sind.

8.4.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Die Verwertung von Altreifen substituiert synthetischen Kautschuk und Stahl. Bei der Verbrennung von Altreifen im Zementwerk werden neben der thermischen Komponente auch Klinkerrohstoffe substituiert. Sowohl synthetischer Kautschuk als auch Stahl verfügen über material- und energieintensive ausländische Vorketten, so dass sich hier DIERec und DERec unterscheiden.

Wie bereits bei der Darstellung der Verwertungswege werden die Indikatoren im Folgenden für die stoffliche Verwertung und die energetische Verwertung (in Zusammenfassung von thermischer Behandlung und energetischer Verwertung, siehe Kapitel 2.2) separat ausgewiesen.

Tabelle 8-47: Ergebnisse für den Indikator DIERec für die stoffliche Verwertung von Altreifen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
synthetischer Kautschuk	3,57	555
Stahl	6,71	281
Quarzsand als Input in der Zementindustrie	1,04	38
Stahlanteil in Altreifen ersetzt Klinkerrohstoffe	1,67	40
Sammlung/Aufbereitung Altreifen	0,11	28
	DIERec	888

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-48: Ergebnisse für den Indikator DERec für die stoffliche Verwertung von Altreifen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
synthetischer Kautschuk	3,41	532
Stahl	1,76	83
Quarzsand als Input in der Zementindustrie	1,04	38
Stahlanteil in Altreifen ersetzt Klinkerrohstoffe	1,67	40
Sammlung/Aufbereitung Altreifen	0,11	28
	DERec	665

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-49: Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Altreifen, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
synthetischer Kautschuk	93,02	89,98	14.511	14.037
Stahl	17,52	16,83	736	707
Quarzsand als Input in der Zementindustrie	0,06	0,05	2	2
Stahlanteil in Altreifen ersetzt Klinkerrohstoffe	2,98	2,75	72	66
Sammlung/Aufbereitung Altreifen	0,79	0,76	205	196
		KEA-Saldo	15.116	14.615

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-50: Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Altreifen ohne ausländische Vorkette, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
synthetischer Kautschuk	43,77	40,80	6.827	6.365
Stahl	5,46	6,05	229	254
Quarzsand als Input in der Zementindustrie	0,06	0,05	2	2
Stahlanteil in Altreifen ersetzt Klinkerrohstoffe	2,99	2,75	72	66
Sammlung/Aufbereitung Altreifen	0,79	0,76	258	248
		KEA-Saldo	6.926	6.491

Quelle: eigene Zusammenstellung

Neben der stofflichen Verwertung von Altreifen in Zementwerken ist vor allem die energetische Verwertung für die Zementindustrie von Interesse. Kleine Mengen an Altreifen werden zusätzlich in MVA thermisch behandelt. Die rohstofflichen und energetischen Einsparungseffekte sind in den nächsten vier Tabellen dargestellt. Der Heizwert von Altreifen entspricht dem von Steinkohle. Daher wird eine mengenmäßige Substitution von Steinkohle durch Altreifen im Verhältnis von 1:1 unterstellt. Die Daten für Steinkohle beziehen sich auf einen globalen Herkunftsmix.

Tabelle 8-51: Ergebnisse für den Indikator DIERec für die energetische Verwertung von Altreifen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Strom	0,18	2,44
Wärme Erdgas	0,01	0,18
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,18	3,74
Steinkohleersatz Zementindustrie	1,41	257
	DIERec	264

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-52: Ergebnisse für den Indikator DERec für die energetische Verwertung von Altreifen, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Strom	0,18	2,44
Wärme Erdgas	0,01	0,18
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,18	3,74
Steinkohleersatz Zementindustrie	1,32	199
	DERec	205

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-53: Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altreifen inkl. ausländische Vorkette, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Strom	3,02	2,72	42	38
Wärme Erdgas	0,47	0,47	7	7
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	23	17
Steinkohleersatz Zementindustrie	25,86	24,84	6.656	4.676
		KEA-Saldo	6.728	4.739

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-54: Saldo KEA für die energetische Verwertung von Altreifen ohne ausländische Vorkette, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Strom	3,02	2,72	42	38
Wärme Erdgas	0,47	0,47	7	7
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	23	17
Steinkohleersatz Zementindustrie	0,75	0,71	137	130
		KEA-Saldo	209	191

Quelle: eigene Zusammenstellung

8.4.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

8.4.5.1 Verwertungsmengen

Die zeitliche Verlaufsdarstellung für die Jahre 2007 bis 2015 wurde in unveränderter Methodik zur Ermittlung der Stoffströme für das Jahr 2014 erstellt.

Die Mengen der in der gummi-verarbeitenden-, Stahl- und Zementindustrie stofflich verwerteten Altreifen und deren Aufbereitungsprodukte für die Jahre 2007 bis 2015 zeigt Tabelle 8-55.

Die für Gummigranulat und Stahleinlagen / Reifendraht dargestellten Veränderungen im Verlauf der Jahre 2007 bis 2015 gehen auf Änderungen der in der Fachserie 19 Reihe 1 unter der Abfallschlüsselnummer AS 160103 verzeichneten Altreifenmengen als Input an Abfallbehandlungsanlagen zurück. In Einzelbetrachtung der an den jeweiligen Abfallbehandlungsanlagen verarbeiteten Altreifenmengen sind unterschiedliche Entwicklungen zu verzeichnen, die in Summe zu den in Abbildung 8-10 dargestellten Verläufen führen. Die in Schredderanlagen registrierten Altreifenmengen weisen hin zu den Jahren 2011 (Effekt der Umwelt- bzw. Abwrackprämie) und 2015 deutliche Anstiege auf. Ein genereller Anstieg der verarbeiteten Altreifenmengen von 2007 auf 2015 fand in Sonstigen Behandlungsanlagen statt. Dagegen verzeichneten die in Feuerungsanlagen (hpts. Zementwerke) verwerteten Altreifenmengen von 2007 bis 2015 einen Rückgang.

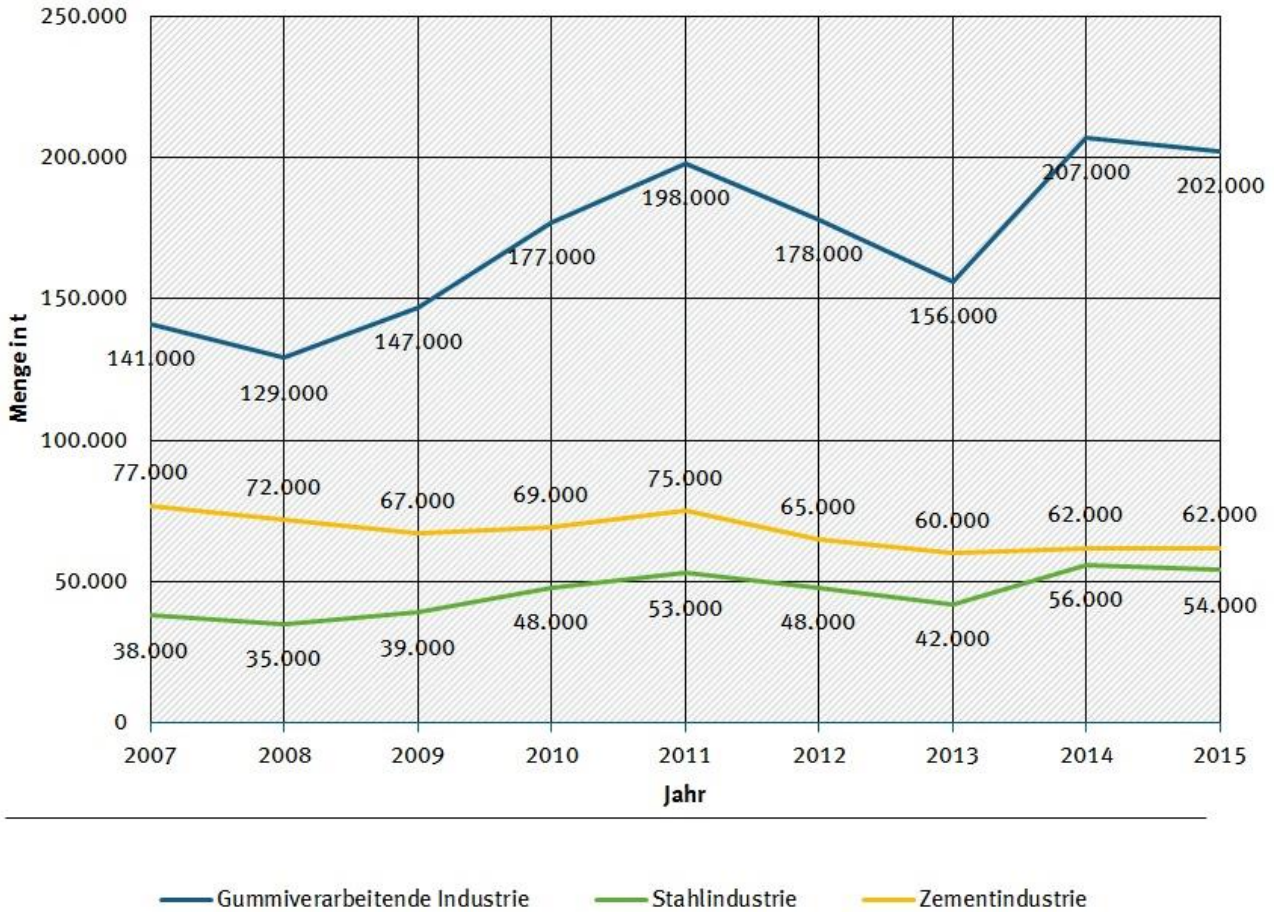
Tabelle 8-55: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2007 - 2015

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge in t								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Gummi-verarbeitende Industrie	Gummi-granulat	141.000	129.000	147.000	177.000	198.000	178.000	156.000	207.000	202.000
Stahl-industrie	Stahleinlagen, Reifendraht	38.000	35.000	39.000	48.000	53.000	48.000	42.000	56.000	54.000
Zement-industrie	Altreifen (Quarzsands-sub.)	46.000	43.000	40.000	41.000	45.000	39.000	36.000	37.000	37.000
	Altreifen (Eisenerz-sub.)	31.000	29.000	27.000	28.000	30.000	26.000	24.000	25.000	25.000
Summe Zementindustrie		77.000	72.000	67.000	69.000	75.000	65.000	60.000	62.000	62.000
Gesamt		256.000	236.000	253.000	294.000	326.000	291.000	258.000	325.000	318.000

Abbildung 8-10: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2007 - 2015

Stoffliche Verwertung in Deutschland erfasster Altreifen

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2015



Die in den Jahren 2007 bis 2015 energetisch verwerteten Mengen (in Thermischen Behandlungsanlagen und Feuerungsanlagen mit energetischer Verwertung) der deutschlandweit erfassten Altreifen und ihrer Bestandteile listet Tabelle 8-56 auf.

Tabelle 8-56: Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Altreifen 2007 - 2015

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge in t								
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
MVA	Altreifen	2.000	1.000	3.000	1.000	1.000	2.000	4.000	2.000	1.000
Zementindustrie	Altreifen	191.000	180.000	169.000	173.000	189.000	161.000	150.000	156.000	156.000
	Textilien	30.000	27.000	31.000	37.000	41.000	37.000	33.000	43.000	42.000
Summe Zementindustrie		221.000	207.000	200.000	210.000	230.000	198.000	183.000	199.000	198.000
Gesamt		223.000	208.000	203.000	211.000	231.000	200.000	187.000	201.000	199.000

8.4.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Tabelle 8-57: Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Altreifen 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	830	763	845	1.011	1.124	1.010	888	1.159	1.129
DERec	kt	628	577	637	756	842	754	665	862	841
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	13.674	12.515	14.239	17.158	19.180	17.247	15.116	20.055	19.560
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	6.270	5.738	6.528	7.861	8.788	7.901	6.926	9.184	8.960

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-58: Indikatoren für die energetische Verwertung von Altreifen 2007 – 2015

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DIERec	kt	314	293	286	297	325	285	264	283	280
DERec	kt	244	227	222	230	252	221	205	220	217
KEA-Saldo	TJ	8.075	7.547	7.329	7.656	8.384	7.311	6.728	7.274	7.220
KEA-Saldo ohne Vorkette	TJ	201	173	203	175	190	185	209	185	166

Quelle: eigene Zusammenstellung

8.5 Alttextilien

8.5.1 Materialeinsatz in Deutschland

Bei Alttextilien handelt es sich um gebrauchte Haushalts- und Bekleidungstextilien. Haushaltstextilien umfassen u.a. Bett- und Tischwäsche, Hand-, Trocken- und Badetücher. Unter Bekleidungstextilien fallen alle Körper-bedeckenden Textilien. Dazu gehören Oberbekleidung, Leibwäsche und sonstige Accessoires (mit Ausnahme von Schmuck) wie Gürtel, Hüte, Mützen, Schals, Tücher, Handtaschen etc. (LfU Bayern 2013b).

Laut Industrievereinigung Chemiefaser e.V. (IVC 2016) setzte sich die Gesamtfaserproduktion weltweit im Jahr 2015 wie folgt zusammen: 68 % Synthefaser, 7 % Cellulosefaser, 24 % Baumwolle und 1 % Wolle. Mit rund 75 % sind Chemiefasern damit die dominierende Faserart. Auch bei den in Deutschland vermarkteten Textilien zeigt sich gemäß Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR 2006) diese Vorreiterrolle von Chemiefasern (Bekleidung ca. 60 %, Heimtextilien ca. 80 %) gegenüber Naturfasern wie Baumwolle, Wolle und Flachs.

Rund 100 Recyclingunternehmen, die sich mit der Sammlung, Sortierung, Verwertung und Vermarktung von Alttextilien beschäftigen, sind allein im Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse) organisiert.

Die Sortierung von über Kleidercontainer oder Kleidersammlungen auf der Straße erfassten Alttextilien erfolgt manuell. Dabei werden Kriterien wie Qualität, Produktgruppe (Damen-, Herren und Kinderkleidung, Sommer- und Winterware etc.) und Materialart unterschieden. Rund die Hälfte der sortierten Kleidung ist noch tragbar und wird weiterverwendet (siehe Verwertungswege von Alttextilien in Abbildung 8-11).

Nicht mehr als Kleidungsstücke einsetzbare Textilien können noch zur Herstellung von Putzlappen genutzt werden. Insbesondere Textilien mit einem hohen Baumwollanteil und somit guter Saugfähigkeit sind für diesen Einsatz geeignet. Die Produktpalette an Putzlappen weist dabei eine große Vielfalt auf und steht aufgrund unterschiedlicher Eigenschaftsschwerpunkte (saugfähig, fusselfrei, lösungsmittelbeständig, weitgehend nahtfrei etc.) für verschiedenste Einsatzmöglichkeiten zur Verfügung (Texaid 2016).

Weiterhin ist eine Herstellung von Reißfasern aus nicht mehr tragbaren Alttextilien möglich. Dabei werden die Alttextilien zunächst mechanisch von Fremdstoffen befreit. Anschließend wird ihr Faserverbund durch mehrstufiges Reißen gelöst. Aus den erzeugten Reißfasern werden wieder Garne gesponnen oder Vliesstoffe hergestellt. (LfU Bayern 2013b)

8.5.2 Stoffströme in Deutschland 2013

Die Erfassung von Alttextilien erfolgt sowohl über Getrenntsammlersysteme (haushaltsnahe Sammelsysteme, Containersammlungen, Abgabe bei Textilrecyclern und Altkleiderkammern) als auch die Restabfallentsorgung.

Gemäß der im Jahr 2015 veröffentlichten Studie des Fachverbandes Textilrecycling mit dem Titel Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland betrug das Gesamtaufkommen an entsorgten Alttextilien und Schuhe im Jahr 2013 rund 1,25 Mio. t. Dabei wurden 1,01 Mio. t über Getrenntsammlersysteme und 0,24 Mio. t über den Restabfall erfasst (FTR 2015).

Da an dieser Stelle ausschließlich die Stoffströme von Alttextilien betrachtet werden, erfolgt eine Bereinigung um die enthaltene Menge an Schuhen, die vom Fachverband Textilrecycling für das Jahr 2013 erstmalig mitbetrachtet wurde. Den Anteil an Schuhen an der wiederverwendeten Secondhandkleidung gibt der Fachverband Textilrecycling mit 12 Ma.-% an. Wie vorliegende Restabfallanalysen zeigen, ist das Entsorgungsverhalten von Schuhen und Textilien in die Entsorgungssysteme Restabfall- und Getrenntsammlung unterschiedlich ausgeprägt. Ein mittlerer Anteil von 20 Ma.-% Schuhe an der Summe aus Textilien und Schuhen im Restabfall zeigt, dass nicht mehr gebrauchte Schuhe eher in den Restabfallbehälter als in die Kleidersammlung gelangen.

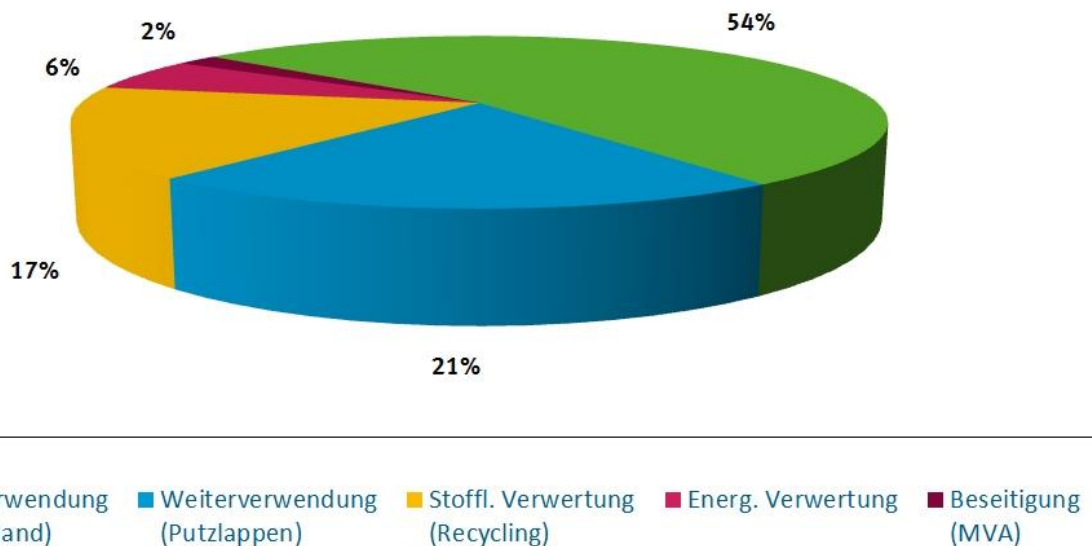
Vor diesem Hintergrund betrug das ausschließliche Aufkommen an Alttextilien im Jahr 2013 rund 1,1 Mio. t, von denen 0,89 Mio. t über Getrenntsammlensysteme und 0,2 Mio. t über den Restabfall entsorgt wurden (Abbildung 8-12). Die anhand des Warenverzeichnisses der Außenhandelsstatistik nachvollziehbaren Im- und Exporte von Altkleidern (WA63109000 und WA63101000) sind mehr oder minder ausgeglichen.

Während die im Restabfall enthaltenen Alttextilien aufgrund des Verschmutzungsgrades und der minderen Qualität für eine stoffliche Verwertung nicht in Frage kommen, sortieren Textilrecyclingunternehmen die getrennt erfassten Alttextilien in unterschiedliche Produktgruppen. Nach Untersuchungen des Fachverbandes Textilrecycling handelt es sich bei der größten Sortierfraktion um Altkleider, die als Second-Hand-Ware wiederverwendet werden (Abbildung 8-11). Wie die Außenhandelsstatistik (WA63090000) belegt, gelangen diese Altkleider dabei fast vollständig ins Ausland.

Abbildung 8-11: Verwertungswege von Alttextilien der Getrenntsammlung 2013

Verwertungswege von Alttextilien

aus der Sortierung getrennt gesammelter Alttextilien, Jahr 2013

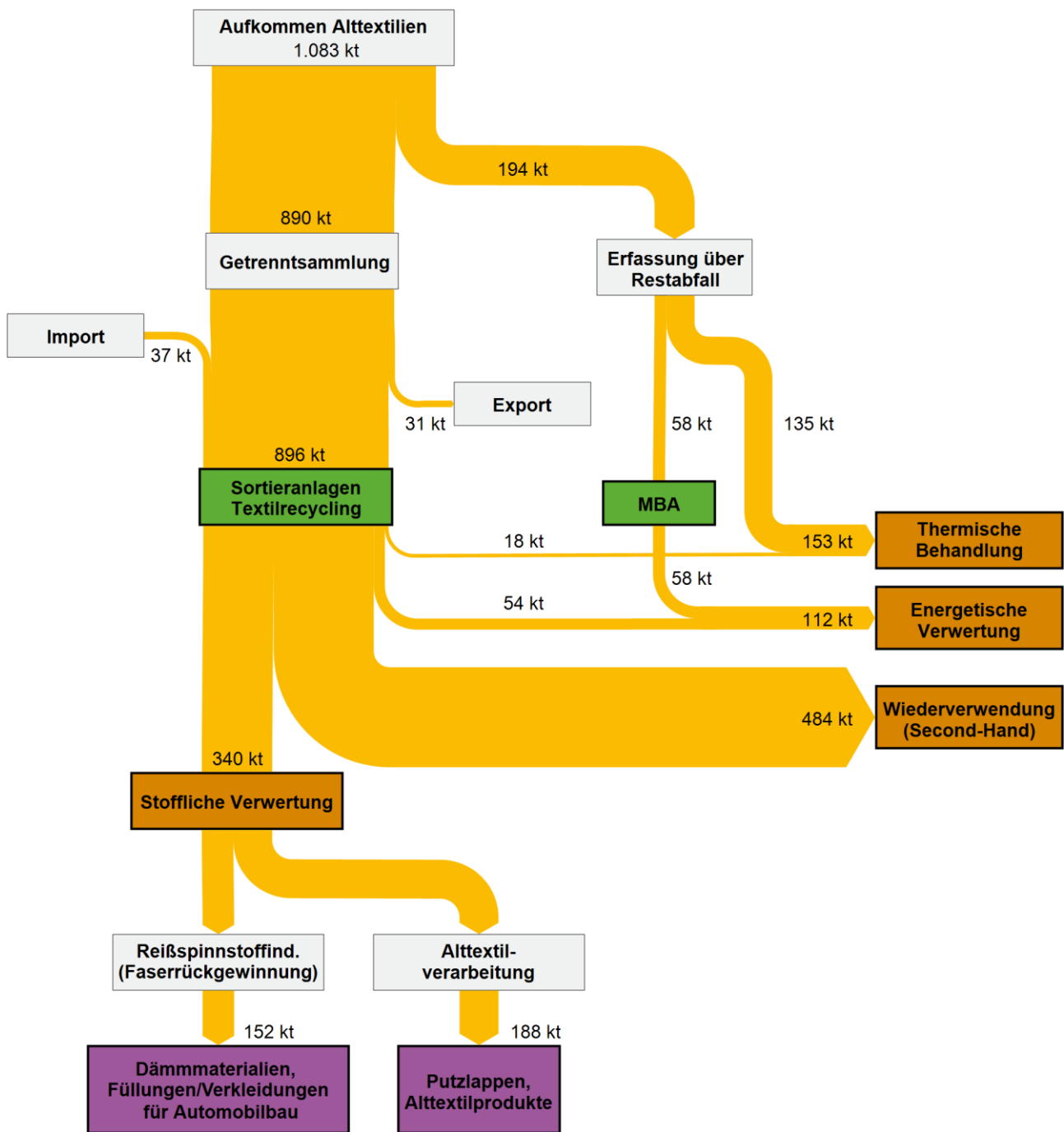


Quelle: Fachverband Textilrecycling (2015) - Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland

Quelle: FTR 2015

Abweichend von der Klassifizierung des Fachverbandes Textilrecycling werden in dieser Studie sowohl die Nutzung von Altkleidern als Putzlappen bzw. andere Alttextilprodukte (21 Ma.-% der sortierten Alttextilien) als auch die Auflösung des Faserverbundes und Rückgewinnung der Textilfaser (17 Ma.-% der sortierten Alttextilien) als stoffliche Verwertung angesehen. In Summe betrug diese Verwertungs menge im Jahr 2013 rund 340.000 t (Abbildung 8-12).

Abbildung 8-12: Stoffströme der Alttextilerfassung und -verwertung in Deutschland im Jahr 2013



8.5.3 Verwertungswege

Bei der Sortierung der Sammelware in Textilrecyclingunternehmen wurden im Jahr 2013 rund 151.000 t an inländisch erfassten Alttextilien aussortiert, die in speziellen Reißbetrieben zerkleinert werden. Aus den hierdurch gewonnenen Recyclingfasern können anschließend wieder Garne gesponnen oder Vliese gebildet werden, die wiederum Primärfasern ersetzen.

Verwendung finden die erzeugten Recyclingfasern überwiegend als Vliesstoffe im technischen Einsatz der Automobilindustrie (Innenverkleidung, Formteile etc.) und der Baubranche (Wärme-/Schalldämmmaterialien), aber ebenso auch als Heimtextilien (Teppichunterböden, Teppiche).

Aufgrund der Diversität der genannten Einsatzbereiche und in Ermangelung von Erhebungen oder Studien, die den Einsatz von Recyclingfasern übergreifend quantitativ abbilden, wird die substituierende Wirkung durch Recyclingfasern anhand der durchschnittlich in Deutschland für technische Textilien verarbeiteten Faser abgeschätzt. Laut IVC (2016) wurden im Jahr 2015 für Textilien technischer Anwendung 98 % Chemiefasern und 2 % Baumwollfasern eingesetzt. In Verbindung mit der durchschnittlichen innerdeutschen Chemiefaserproduktion⁷⁹ wird angenommen, dass technische Textilien im Mittel zu 71 % aus Synthefasern auf Erdölbasis, zu 27 % aus Cellulosefasern und 2 % aus Baumwolle bestehen.

Neben dieser werkstofflichen Verwertung gelangten im Jahr 2013 rund 187.000 t an inländisch erfassten Alttextilien in die stoffliche Wiederverwertung von Textilflächen. Hierbei erfolgt kein Aufschluss bis zur einzelnen Faser, stattdessen werden Kleidungsstücke von Knöpfen, Reißverschlüssen etc. befreit und zu Poliertüchern und Putzlappen für unterschiedliche Anwendungen zurechtgeschnitten.

Die vielfältigen Produktpaletten alttextilaufbereitender Unternehmen sind entsprechend der Eigenschaften der sortierten Alttextilfraktionen gegliedert (saugfähig, fusselarm, lösungsmittelbeständig, weitgehend nahtfrei etc.) (siehe u.a. Texaid 2016). Diese Beschreibungen lassen zwar auf die Alternativen zu Reinigungstüchern aus Neuwaren schließen, quantitative Aussagen zur Substitution lassen sich hieraus jedoch nicht ableiten. Bis auf die Fachserie 4 Reihe 3.1 (Produktionszahlen des produzierenden Gewerbes) liegen keine übergreifenden Produktions- oder Verkaufszahlen von Reinigungstüchern vor. Dabei lässt auch die statistische Ausweisung in der Fachserie keine Rückschlüsse zu, da Reinigungstücher nicht nach Primär- und Sekundärware unterschieden werden und keine Differenzierung nach Materialarten vorgenommen wird.

Vor diesem Hintergrund kann die substituierende Wirkung des Alttextileinsatzes als Putzlappen u.ä. lediglich abgeschätzt werden. Wie eine qualitative Sondierung der Herstellerpalette hinsichtlich der verarbeiteten Einsatzmaterialien zeigt, werden Reinigungstücher aus Neuwaren überwiegend aus einer Kombination aus Cellulose- und Polyesterfasern (beides Chemiefasern) hergestellt⁸⁰. Dies deckt sich mit der von der Industrievereinigung Chemiefaser veröffentlichten Materialzusammensetzung der in Produkten des technischen Einsatzes verarbeiteten Fasern, die einen Anteil von 98 % Chemiefaser und 2 % Baumwolle ausweisen. In Anlehnung an eigene Recherchen wird für die Substitutionswirkung durch den Einsatz von Putzlappen aus Alttextilien eine Zusammensetzung von 60 % Cellulosefasern und 40 % Polyesterfasern angenommen.

Tabelle 8-59: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge	Produkt	Substitutionsäquivalent
Reißspinnstoffindustrie	Alttextilien	151.000 t	Verkleidungen und Füllungen im Automobilbau, Dämmmaterialien (Wärme, Schall)	Synthefasern auf Erdölbasis (71 %), Cellulosefasern (27 %), Baumwolle (2 %)
Alttextilverarbeitung	Alttextilien	187.000 t	Putzlappen und weitere Produkte aus Alttextilien	Cellulose (60 %) Polyester (40 %)

⁷⁹ Chemiefaserproduktion in Deutschland 2015 gemäß IVC (2016): 29 % Polyester, 28 % Polyacryl, 11 % Polyamid, 4 % sonst. Synthefasern, 28 % Cellulose

⁸⁰ Gemäß eigener Recherchen umfasst die Produktpalette an Reinigungstüchern aus Neuwaren Zusammensetzungen von Cellulose (Zellstoff) + Polyester in Verhältnissen von 55:45 bis 80:20. Produziert werden auch ausschließlich aus Cellulose oder Polyester bestehende Reinigungstücher (Klenatex 2016, Kimberly 2016)

Neben der stofflichen Verwertung von Alttextilien wurden im Jahr 2013 rund 265.000 t an Alttextilien und mit der Altkleidersammlung erfasste Fremdstoffe energetisch verwertet. Wie Abbildung 8-12 zeigt, handelt es sich dabei größtenteils um Alttextilien, die über den Restabfall entsorgt und damit in MVA oder Großfeuerungsanlagen verbrannt wurden. Zusätzlich fallen auch bei der Sortierung der Textilrecycler Alttextilien an, die aufgrund ihrer minderen Qualität nicht mehr stofflich verwertet werden können.

Die bei der Verbrennung in MVA und Großfeuerungsanlagen erfolgende Bereitstellung von Strom und Wärme wird als energieäquivalente Substitution (Marginalansatz) berücksichtigt.

Tabelle 8-60: Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge	Heizwert	Substitutionsäquivalent
MVA	Alttextilien	135.000 t	20,1 MJ/kg ⁸¹	Strom + Wärme
	Fremdstoffe der Altkleidersammlung	18.000 t	20,1 MJ/kg ⁸²	Strom + Wärme
Großfeuerungsanlagen	Alttextilien	112.000 t	20,1 MJ/kg ⁸¹	Strom + Wärme
Gesamt		265.000 t		

Für 2013 errechnen sich aus den oben dargestellten Stoffströmen folgende Verwertungsquoten:

- ▶ 82 % des Alttextilaufkommens (inkl. des Alttextilimportüberschusses) werden auf stoffliche Verwertung abzielende Behandlungsanlagen im Inland zugeführt.
- ▶ Einschließlich der Behandlungsreste stofflicher Verwertungsanlagen werden 24 % des Alttextilaufkommens energetisch verwertet.

8.5.4 Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos

Für die Berechnung der DIERec und DERec-Indikatoren und KEA-Salden wurden die Substitutionsprozesse für erdölbasierte Synthefasern und Polyester auf Basis von Prozessdaten für Fleece aus Polyethylen abgeschätzt. Für Cellulosefasern und Cellulose wurden die gleichen Prozessdaten verwendet.

Wie bereits bei der Darstellung der Verwertungswege werden die Indikatoren im Folgenden für die stoffliche Verwertung und die energetische Verwertung (in Zusammenfassung von thermischer Behandlung und energetischer Verwertung, siehe Kapitel 2.2) separat ausgewiesen.

Tabelle 8-61: Ergebnisse für den Indikator DIERec für die stoffliche Verwertung von Alttextilien, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Synthefasern und Polyester	2,77	505
Zellulosefasern	8,08	1.235

⁸¹ Quelle: Lechtenböhmer 2006 und FTR 2015

⁸² Der durchschnittliche Heizwert in MVA verbrannter gemischter Abfälle beträgt rd. 10,0 MJ/kg (Spohn 2013). Da die Zusammensetzung der Fremdstoffe unbekannt ist, es sich z.T. jedoch um heizwertreichere Kunststofftüten handelt, wird ebenfalls der Heizwert für Alttextilien angesetzt.

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Baumwolle	2,80	8,4
Alttextilien (Sammlung/Aufbereitung)	0,15	50
	DIERec	1.698

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-62: Ergebnisse für den Indikator DERec für die stoffliche Verwertung von Alttextilien, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Synthesefasern	2,66	484
Zellulosefasern	8,08	1.235
Baumwolle	1,05	3
Alttextilien (Sammlung/Aufbereitung)	0,15	50
	DERec	1.672

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-63: Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Alttextilien inkl. der ausländischen Vorketten, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Synthesefasern	98,16	96,54	17.865	17.571
Zellulosefasern	23,66	20,20	3.620	3.090
Baumwolle	68,08	32,05	206	97
Alttextilien (Sammlung/Aufbereitung)	1,52	1,50	514	506
		KEA-Saldo	21.176	20.252

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-64: Saldo KEA für die stoffliche Verwertung von Alttextilien ohne ausländische Vorkette, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Synthesefasern	49,52	47,98	9.013	8.732
Zellulosefasern	23,66	20,20	3.620	3.090
Baumwolle	0,10	0,33	0,30	1

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Alttextilien (Sammlung/Aufbereitung)	1,52	1,50	514	506
KEA-Saldo			12.118	11.317

Quelle: eigene Zusammenstellung

Neben der stofflichen Verwertung von Alttextilien wurde ein Teil der energetischen Verwertung zugeführt. Die stofflichen und energetischen (Einspar-)Effekte durch das Verbrennen von Alttextilien sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. Wie bei den vorherigen Abschätzungen der entsprechenden Indikatoren der energetischen Verwertung wird auch keine ausländische Vorkette abgeschnitten. Daher sind DIERec und DERec identisch.

Tabelle 8-65: Ergebnisse für die Indikatoren DIERec und DERec für die energetische Verwertung von Alttextilien, 2013

	Spezifischer Rohstoffaufwand [kg/kg]	KRA gesamt [kt]
Strom	0,18	143
Wärme Erdgas	0,01	7,2
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	0,18	148
DIERec und DERec		298

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-66: Saldo KEA für die energetische Verwertung von Alttextilien, 2013

	spezifischer KEA gesamt [MJ/kg]	spezifischer KEA nicht-erneuerbar [MJ/kg]	KEA gesamt [TJ]	KEA nicht-erneuerbar [TJ]
Strom	3,02	2,72	2.473	2.231
Wärme Erdgas	0,47	0,47	261	259
Wärme aus anderen Quellen als Erdgas	1,11	0,82	909	673
KEA-Saldo			3.643	3.164

Quelle: eigene Zusammenstellung

8.5.5 Zeitliche Verlaufsdarstellung und Ermittlung des DIERec, DERec und KEA-Saldos für die Jahre 2007 bis zum aktuellsten möglichen Jahr

8.5.5.1 Verwertungsmengen

Anhand der zugrunde gelegten Studie des Fachverbandes Textilrecycling (FTR 2015), die eine Betrachtung des Alttextilaufkommens des Jahres 2013 vornimmt und zugleich auf den Zeitraum bis zur Vorgängerstudie für das Jahr 2007 zurückblickt, lässt sich eine zeitliche Verlaufsdarstellung für die Jahre 2007 bis 2013 vor-

nehmen. Da eine Veröffentlichung der entsorgten Alttextilaufkommen nachfolgender Jahre durch den FTR bislang nicht erfolgte, ist eine Betrachtung der Jahre nach 2013 im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

Während die Studie FTR (2015) das über Getrennsammelsysteme und über den Restabfall erfasste Alttextilaufkommen ohne Schuhe getrennt voneinander für die Jahre 2007 bis 2013 benennt, ist die Verteilung der getrennt erfassten Alttextilien auf die einzelnen Verwertungswege (Wiederverwendung, Weiterverwendung, Stoffliche Verwertung etc. siehe Abbildung 8-11) nur für die Jahre 2007 und 2013 dargestellt. Die dazwischen liegenden Jahre wurden für die nachfolgenden zeitlichen Verlaufsdarstellungen der stofflichen (Tabelle 8-67) und energetischen Verwertung (Tabelle 8-68) in Deutschland erfasster Alttextilien linear interpoliert.

Tabelle 8-67: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2007-2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge in t						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Reißspinnstoffindustrie	Alttextilien	168.000	224.000	204.000	199.000	208.000	164.000	151.000
Alttextilverarbeitung	Alttextilien	128.000	185.000	183.000	194.000	219.000	187.000	187.000
Gesamt		296.000	409.000	387.000	393.000	427.000	351.000	338.000

Abbildung 8-13: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2007-2013

Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien

Zeitliche Verlaufsdarstellung 2007 - 2013

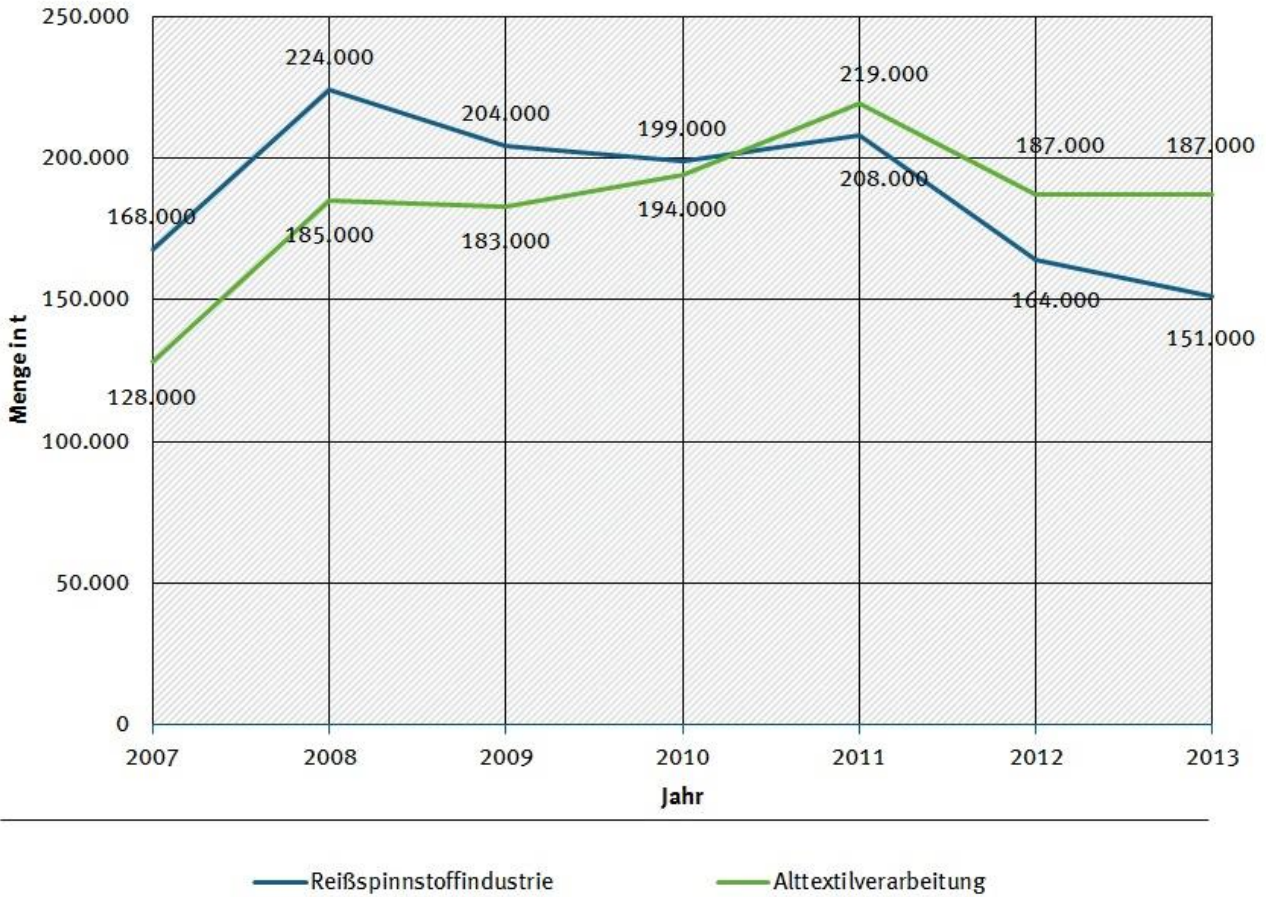


Tabelle 8-68: Energetische Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2007-2013 (keine Berücksichtigung von Im- und Exportmengen)

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge in t						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
MVA	Alttextilien	188.000	187.000	185.000	182.000	181.000	171.000	135.000
	Fremdstoffe der Altkleidersammlung	80.000	96.000	76.000	63.000	53.000	31.000	18.000
Großfeuerungsanlagen	Alttextilien	141.000	160.000	149.000	146.000	142.000	129.000	112.000
Gesamt		409.000	443.000	410.000	391.000	376.000	331.000	265.000

8.5.5.2 DIERec, DERec und KEA-Saldo in Zeitreihe

Tabelle 8-69: Indikatoren für die stoffliche Verwertung von Alttextilien 2007 – 2013

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
DIERec	kt	1.425	1.983	1.890	1.934	2.115	1.751	1.698
DERec	kt	1.399	1.948	1.858	1.902	2.081	1,723	1.672
KEA-Saldo mit Vorketten	TJ	19.402	26.614	24.992	25.183	27.165	22.163	21.176
KEA-Saldo ohne Vorketten	TJ	10.882	14.975	14.109	14.267	15.439	12.638	12.118

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 8-70: Indikatoren für die energetische Verwertung von Alttextilien 2007 – 2013

Indikator	Einheit	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
DIERec und DERec	kt	459	497	460	439	422	372	298
KEA-Saldo	TJ	5.522	6.004	5.560	5.315	5.116	4.516	3.643

Quelle: eigene Zusammenstellung

9 Wirtschaftliche Bedeutung des Recyclings

Neben einer Einsparung von Primärrohstoffen und Energie sind mit dem Recycling und dem Einsatz von Sekundärmaterialien sowie Nebenprodukten auch Kosteneinsparungen verbunden, da diese einer der wichtigsten Treiber für die Verwendung von Sekundärmaterialien und Nebenprodukten gegenüber Primärmaterialien darstellt. Wie im Vorgängerprojekt (Wagner et al. 2012) wurde versucht, für die untersuchten Materialien einen Marktpreisvergleich zwischen Primär- und Sekundärmaterial durchzuführen. Allerdings wurde im Projektverlauf deutlich, dass nur wenige Preisinformationen zur Verfügung stehen und eine Hochrechnung des Kosteneffekts der Nutzung von Sekundärmaterialien für die Mehrheit der 30 untersuchten Materialien nicht möglich ist. Eine umfassende Hochrechnung der Kosteneinsparung durch den Vergleich der Preise von Primär- und Sekundärmaterialien scheiterte an folgenden Punkten:

- ▶ fehlende Preisangaben für Sekundär- und Primärmaterial
- ▶ Preise für Edelmetalle sind identisch für Primär- und Sekundärmaterial
- ▶ Einige der Preisangaben für Primär- und Sekundärmaterial beziehen sich auf unterschiedlichen Materialqualitäten
- ▶ Bei einigen Sekundärmaterialien sind die Verarbeitungsqualitäten auch bei sortenreiner Sortierung nicht exakt identisch mit der Qualität des Primärmaterials, so dass Sekundärmaterialien nur mit einem deutlichen Preisabschlag verkaufbar sind.

9.1 Stahl/Roheisen

Die Substitution von Primärmaterial durch Schrott bei der Produktion von Stahl ist zum einen technologisch determiniert und zum anderen eine Frage der Preisdifferenz von Schrott zu Eisenerz und Koks. Sinken die Preise für Rohmaterialien im Vergleich zu Schrottpreisen zu stark, können integrierte Stahlproduzenten in ihren Konverterstahlwerken zum Teil billiger produzieren als Elektrostahlwerke, die auf den Einsatz von Stahlschrott angewiesen sind. Gleichzeitig werden die Hochofen-Konverter-Stahlwerke ihren Schrotteinsatz auf das technologische Minimum reduzieren, welches häufig durch Eigenschrotte bedient werden kann.

Der Preis von Stahlschrott wird u.a. von globalen Faktoren beeinflusst. Die Stahlindustrie einiger Länder wird stark durch Elektrostahlwerke dominiert (z.B. Türkei, Italien) und ist entsprechend Abnehmer von international gehandeltem Schrott und beeinflusst so auch die Schrottpreise in Deutschland. Im Betrachtungszeitraum dieser Studie (2007 – 2015) wurden in den monatlichen Marktberichten zum deutschen Schrottmarkt (publiziert in EUWID) die Veränderung der Preise häufig mit der steigenden oder fallenden Nachfrage nach Schrott in der Türkei begründet, aber auch mit dem globalen Überangebot an Stahl, da China mittlerweile große Mengen an Stahl exportiert.

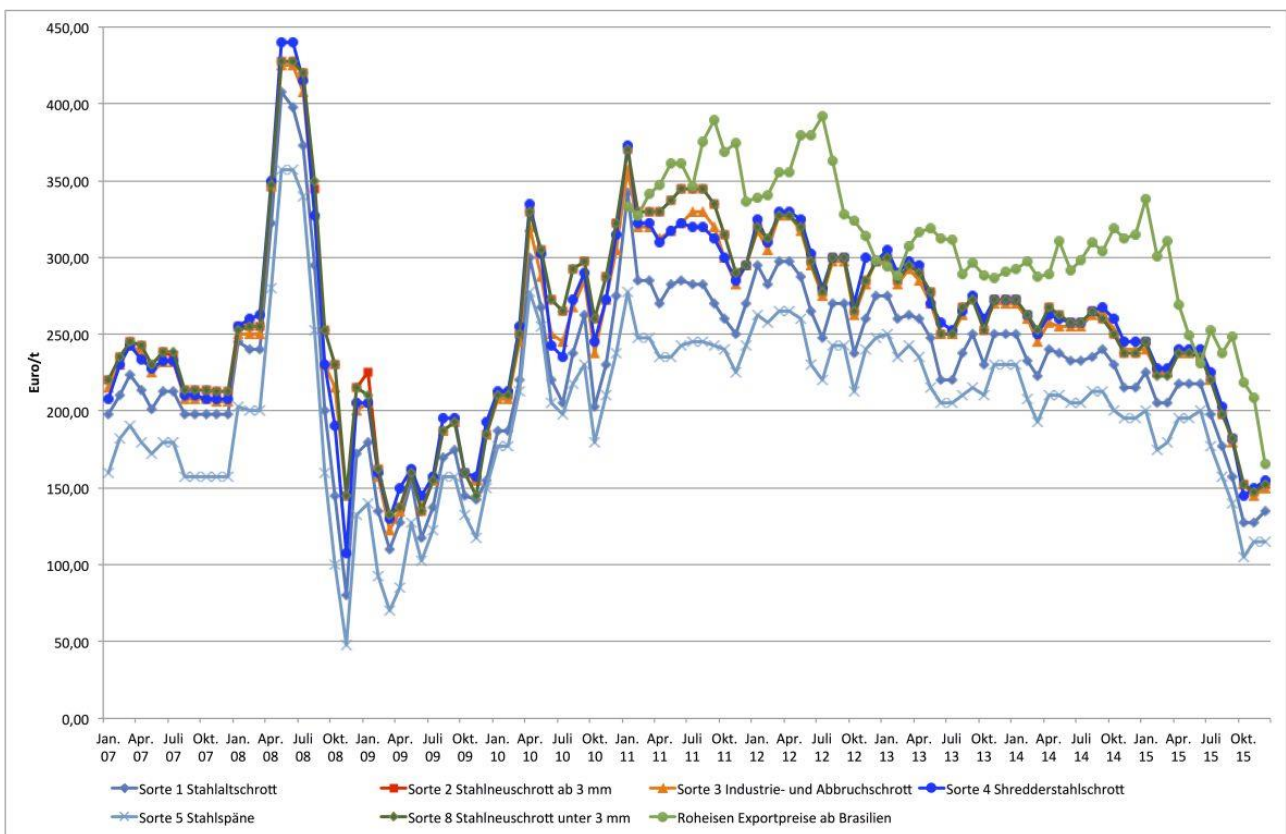
Die Preise für verschiedene Arten von Stahlschrott werden monatlich in den EUWID-Berichten oder auf der Webseite des BDSV publiziert. Die Preise für Stahl oder Roheisen konnten nicht ohne weiteres direkt recherchiert werden, da diese oft nur über kostenpflichtigen Portale oder nur Verbandsmitgliedern zugänglich sind. Allerdings werden drei Stahlqualitäten global an Börsen gehandelt, deren (Spot-) Preise zugänglich sind. Dies ist zum einen Warmbreitband, das an der Warenterminbörse in Chicago gehandelt wird. Der Preis für Warmbreitband liegt deutlich über dem Schrottpreisniveau (ca. 450 Euro/t im Jahresdurchschnitt 2013), stellt aber schon ein verarbeitetes Zwischenprodukt dar. Sogenannte Stahlknüppel, die ein Vorprodukt der Stahlindustrie sind, werden an der Londoner Metal Exchange (LME) gehandelt. Deren Börsenpreise lagen im Jahr 2013 wiederum deutlich unterhalb der Schrottpreise in Deutschland: Wurden im Sommer 2011 noch fast 476 Euro/t bezahlt, gingen die Spotpreise für Stahlknüppel im Sommer 2013 teilweise bis auf 76 Euro/t zurück (siehe www.stahlpreise.eu). Über das ganze Jahr 2013 bewegten sich die Preise für Stahlknüppel an der LME unterhalb der Schrottpreise in einer Bandbreite von 200 bis 76 Euro/t. Die Webseite www.stahlpreise.eu dokumentiert zusätzlich noch Preise für Betonstahl, der an der Warenterminbörse in Shanghai gehandelt wird. Diese Preise liegen oberhalb der Schrottpreise und in Nähe der

Chicagoer Preise für Warmbreitband. Stahl wird in London und Chicago in Dollar gehandelt, so dass der Wechselkurs des Euro zum Dollar zusätzlich die Preisdifferenz zwischen deutschem Schrott und an der Börse gehandeltem Stahl beeinflusst. Im untersuchten Jahr 2013 war der Euro-Kurs gegenüber dem Dollar auf einem vergleichsweise hohen Niveau mit Kursen durchgängig über 1,30 US-Dollar/Euro im Jahresverlauf (bei einem durchschnittlichen Wechselkurs für das Jahr 2013 von 1,3277 Dollar/Euro).

Wie an den Preisen für Stahlknüppel ersichtlich, ist die Volatilität der Spotpreise sehr stark ausgeprägt. Die Stahlerzeuger haben aber sowohl in ihrem Einkauf als auch mit ihren Abnehmern langfristige Verträge mit entsprechenden Preisgestaltungen, die nur mit Verzögerung und abgeschwächt die Preisverläufe der Spotmärkte in ihren Lieferverträgen einpreisen. Statt also die Schrottpreise mit den volatilen LME-Spotpreisen für Stahlknüppel zu vergleichen, ist es sinnvoller, die durchschnittlichen Exportpreise vom Hafen für Roheisen als Vergleich zu verwenden. Ohne Stahlschrott wäre Roheisen zudem das natürliche Substitut über die Hochofen-Konverter-Stahlroute.

Zeitreihendaten für Roheisenpreise sind nicht ohne weiteres zu finden. Auf der Webseite www.steelonthenet.com werden durchschnittliche monatliche Exportpreise in Dollar für Roheisen ab Häfen in Brasilien für den Zeitraum ab 2011 dokumentiert (<http://www.steelonthenet.com/files/pig-iron.html>). Diese Preisangaben wurden mit durchschnittlichen monatlichen Wechselkursen für Euro/Dollar in Euro-Preise umgerechnet. Wie aus Abbildung 9-1 ersichtlich, liegen die Roheisenpreise bis auf wenige Ausnahme kontinuierlich über den verschiedenen Schrottpreisen.

Abbildung 9-1: Preisentwicklung von Stahlschrott und Roheisen (2007 – 2015)



Quelle: eigene Zusammenstellung, auf Basis von EUWID (verschiedene Jahrgänge), <http://www.steelonthenet.com/files/pig-iron.html> und Wechselkursen abgerufen auf www.börse.de

Unter der Annahme eines durchschnittlichen Schrottpreises, der zwischen den Preisen für Altschrott (Sorte 1) und den eng beieinanderliegenden Preisen für Neuschrotte, Schredderschrott und Industrie- und Ab-

bruchsrott (Sorte 2, 3, 4 und 8) liegt, wird in dieser Studie für das Jahr 2013 ein durchschnittlicher Schrottpreis von 261,- Euro/t angenommen. Der Schrottpreis liegt somit 39,- Euro pro Tonne unter den Exportpreisen von Roheisen. Der durchschnittliche Roheisenpreis lag im Jahr 2013 bei 300 Euro/t. Wie in Kapitel 5.1 dargestellt, wurden im Jahr 2013 in der Stahlindustrie 19,4 Mio. t Schrott eingesetzt, zuzüglich weiterer 3,5 Mio. t Eisen- und Stahlschrott im Bereich der Gießereien. Ohne diesen Schrotteinsatz wäre bei gleicher Produktionsmenge an Stahl und Guss-Produkten ein Roheiseneinsatz von rund 25,23 Mio. t notwendig gewesen. Aus diesen Annahmen ergibt sich im Jahr 2013 eine theoretische Kosteneinsparung von 984 Mio. Euro.⁸³

9.2 Aluminium

Die Preisentwicklung von Primäraluminium ist im Betrachtungszeitraum 2007 bis 2015 gekennzeichnet von einem deutlichen Preisverfall, der Mitte 2008 begann und bis Mitte 2009 anhielt. Bis Ende 2011 erholte sich der Preis an der LME wieder fast auf das Niveau des Jahres 2007, um seitdem bis Ende des Jahres 2015 kontinuierlich wieder in Richtung des niedrigen Standes der Wirtschaftskrise 2009 zu sinken (Abbildung 9-2).

Abbildung 9-2: Preisentwicklung von Primäraluminium in Dollar/t



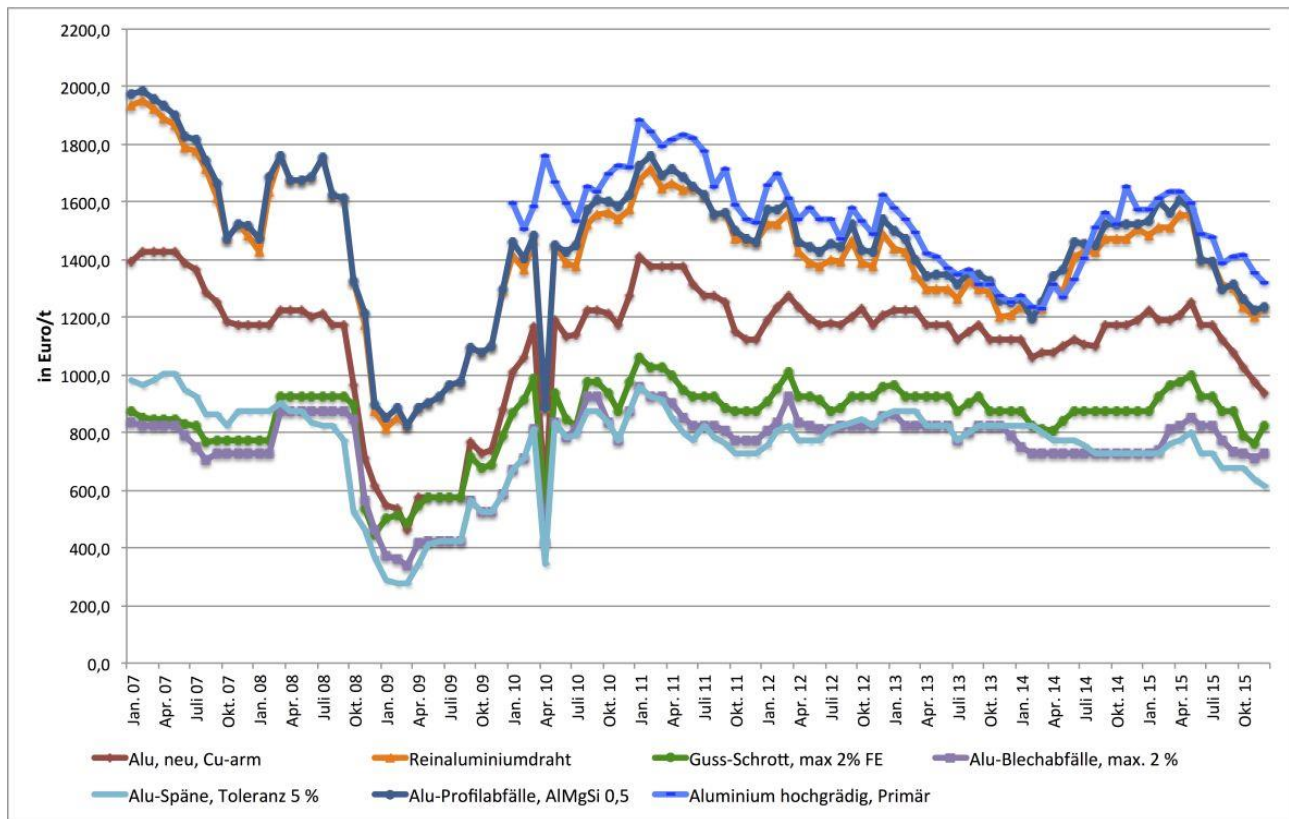
Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen, publiziert in EUWID.

Aluminium-Altmetalle werden in den Marktberichten des EUWID in sechs Qualitäten gelistet. Für Aluminiumspäne mit einer Verschmutzungstoleranz von 5 % wird nur rund die Hälfte des Preises bezahlt, der für Reinaluminiumdraht und Aluminiumprofile erzielt werden kann. Wie man aus Abbildung 9-3 erkennt, liegen die Preise für Reinaluminiumdraht und Aluminiumprofilen nahe am Preis, der für eine Tonne Primäraluminium bezahlt werden muss und folgt auch stärker dem Preisverlauf für Primäraluminium, als andere Schrottsorten. Der deutlich stärkere zwischenzeitliche Anstieg des Preises für Primäraluminium in Euro/t im

⁸³ Da keine Annahmen über die Zusammensetzung des Schrotteinsatzes in Gießereien vorliegen, wurde angenommen dass die 3,5 Mio. t sich zu jeweils 50% aus Eisen- sowie Stahlschrott zusammensetzen. Da keine Preise für Eisenschrott vorliegen, wurde die Menge Eisenschrott ebenfalls mit dem Stahlschrott-Preis von 261 Euro/t multipliziert.

Jahr 2014 erklärt sich aus der Kombination von steigendem Weltmarktpreis in Dollar/t und sinkendem Wechselkurs.

Abbildung 9-3: Preisentwicklung von Aluminiumschrott und Primäraluminium in Euro/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen und Großhandelsan-kaufpreisen für Almetalle, publiziert in EUWID.

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, sind rund zwei Drittel der anfallenden Mengen an Sekundäraluminium Alt- und Neuschrotte nicht definierter, unterschiedlicher Qualität und ein Drittel reine und definierte Neu- schrotte, die direkt zu Halbzeugen verarbeitet werden können. Daraus abgeleitet ergibt sich für 2013 ein gewichteter Durchschnittspreis für Aluminiumschrott von 1.056 Euro/t und für Primäraluminium von 1.390 Euro/t. Bei 860.000 Tonnen Sekundäraluminium, die 2013 Primäraluminium substituierten, ergibt diese Preisdifferenz von 234 Euro/t einen theoretischen Kosteneffekt von 201,24 Mio. Euro.

9.3 Kupfer

Die Preisentwicklung für Kupfer folgt einem ähnlichen Verlauf wie Aluminium: von einem hohen Preisni-veau zu Beginn des Jahres 2008 ging in Folge der wirtschaftlichen Turbulenzen der Finanzmarktkrise der Preis für Primärkupfer kräftig zurück, um sich ab der zweiten Jahreshälfte 2009 wieder zu erholen. In den folgenden Monaten zogen die Preise für Primärkupfer kräftig an. Vom Tiefpunkt im Januar 2009 verdrei- fachte sich der Preis für Primärkupfer bis zum Jahresbeginn 2011, um seitdem in einem Abwärtstrend bis Ende 2015 wieder auf einen Preis von rund 4.500 Euro/t zu fallen.

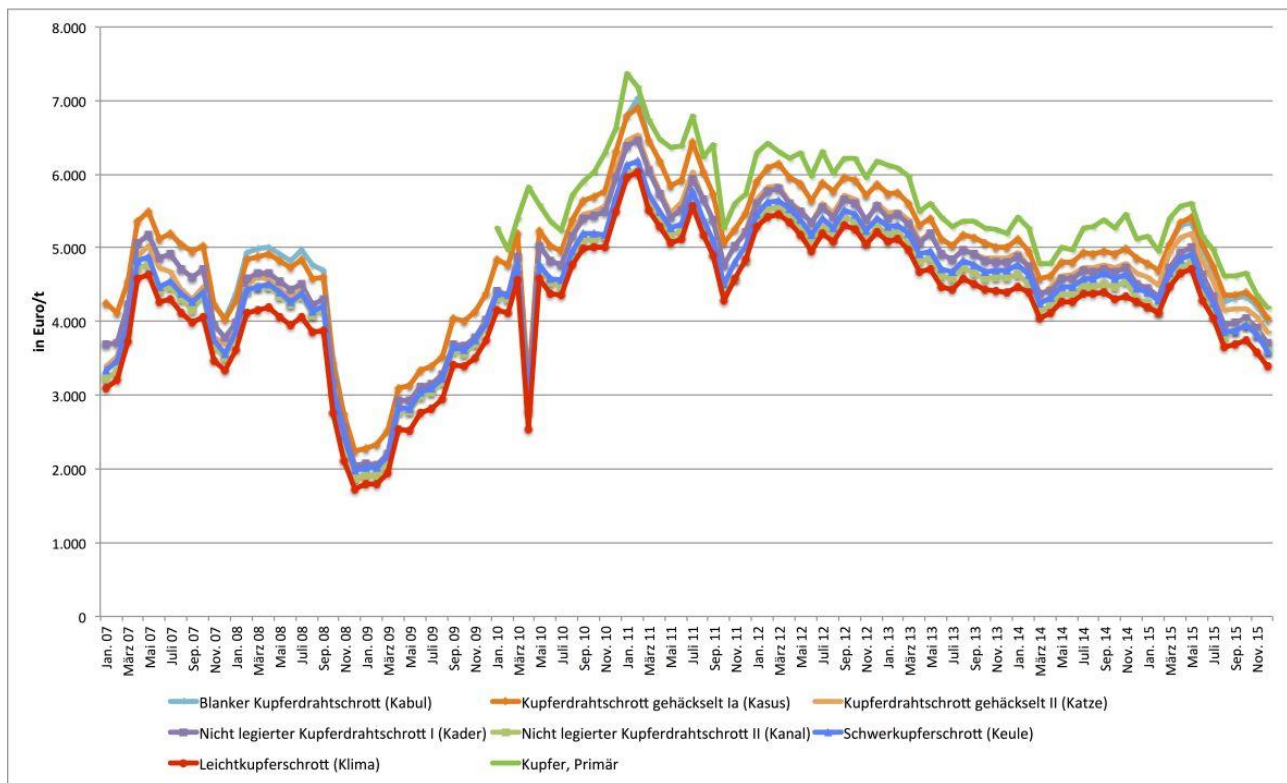
Abbildung 9-4: Preisentwicklung von Primärkupfer in Dollar/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen, publiziert in EUWID.

Großhandelsankaufpreise für Kupferschrott werden in den Marktberichten des EUWID in sieben verschiedenen Qualitätsstufen publiziert. Die Preise der einzelnen Schrottsorten variieren um etwa 15 % und liegen somit recht nah beieinander. Sie folgen dabei auch identischen Zeitverläufen. Ebenso sieht man in Abbildung 9-5, dass sich die Schrottpreise auf einem ähnlichen Niveau wie Primärkupfer bewegen.

Abbildung 9-5: Preisentwicklung Kupferschrott und Primärkupfer in Euro/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen und Großhandelsankaufpreisen für Altmetalle, publiziert in EUWID.

Kupferdrahtschrott gehäckselt der Klasse Ia (Kasus) sowie blanker Kupferdrahtschrott (Kabul) erzielen die höchsten Preise, während Leichtkupferschrott (Klima) den niedrigsten Preis erzielt.

Die Analysen in Kapitel 5.4 verweisen auf eine Vielzahl an Quellen von Sekundärkupfer mit unterschiedlicher Qualität. Neuschrott ist hier mit einem Anteil > 30 % Kupfer vertreten. Der theoretische Kosteneffekt durch die Nutzung von Sekundärkupfer wird daher mit einem Schrottpreis ermittelt, der einen ungewichteten Mittelwert der sieben unterschiedlichen Kupferqualitäten darstellt. Daraus ergeben sich für das Jahr 2013 ein durchschnittlicher Preis für Kupferschrott von 5.002 Euro/t sowie ein durchschnittlicher Preis für Primärkupfer von 5.534 Euro/t. Bei einer substituierten Menge von 741.000 t Primärkupfer ergibt dies für das Jahr 2013 einen theoretischen Kosteneffekt von 394,21 Mio. Euro.

9.4 Blei

Der Preis für Primärblei folgt im Wesentlichen dem (Preis-)Verlauf der anderen Metalle: Nach dem Einbruch der Spotpreise in Folge der weltweiten wirtschaftlichen Krise in 2008 und 2009 folgte eine Erholung der Preise, um anschließend ab 2011 einem leicht negativen Trendverlauf mit sinkenden Preisen bis Ende 2015 zu folgen.

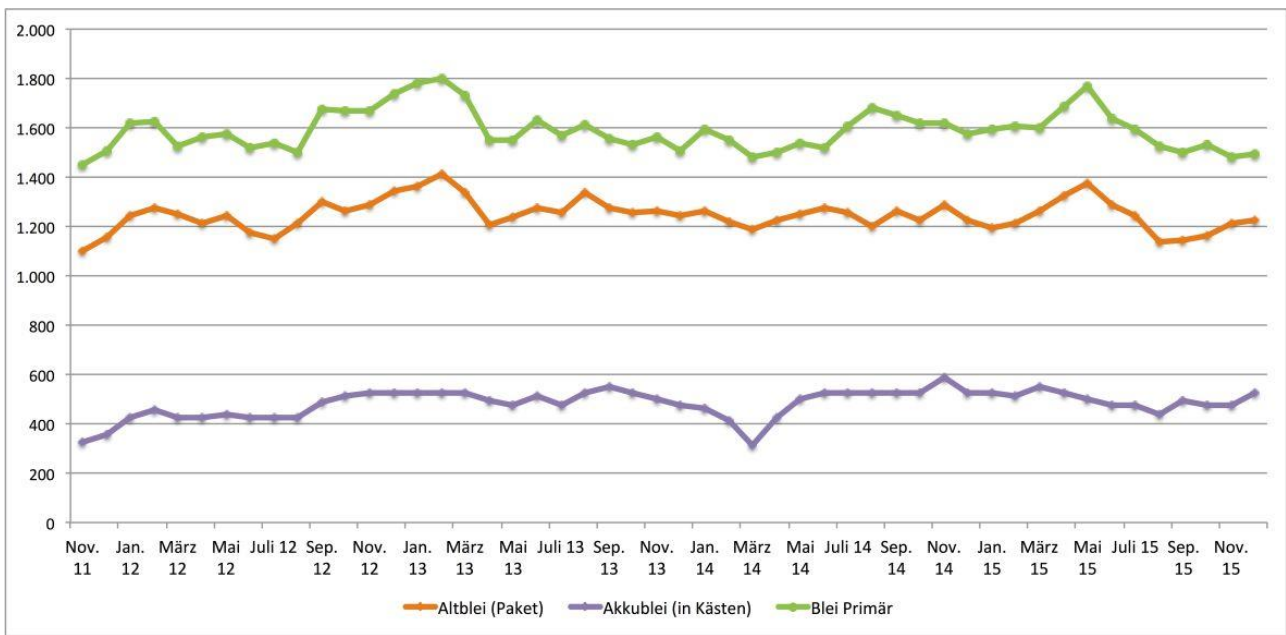
Abbildung 9-6: Preisentwicklung von Primärblei in Dollar/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen, publiziert in EUWID.

Sekundärblei wird in zwei Qualitäten gehandelt: zum einen als Altblei und zum anderen als Akkublei. Die Preise zwischen Altblei und Akkublei unterscheiden sich deutlich: Der Preis für Akkublei ist um zwei Drittel niedriger als der Preis für Altblei, da für Akkublei weitere Aufbereitungsschritte notwendig sind. Insbesondere die Verwertung der anfallenden Säure aus Blei-Säure-Batterien ist mit erhöhten Kosten verbunden. Der Preis von Altblei liegt dagegen nur geringfügig unter dem Spotpreis für Blei an der LME (Abbildung 9-7). Für den Zeitraum vor November 2011 werden in der EUWID-Datenabfrage keine Schrottpreise für Blei ausgewiesen, daher ist in Abbildung 9-7 nur der Zeitraum von Nov 2011 bis Dezember 2015 abgebildet.

Abbildung 9-7: Preisentwicklung Bleischrott und Primärblei in Euro/t seit November 2011



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen und Großhandelsankaufpreisen für Altmetalle, publiziert in EUWID.

Der Preis für Altblei folgt dem Spotpreis für Primärblei ohne merkliche Verzögerung, so dass der Preisabstand zwischen Primärblei und Altblei über den Betrachtungszeitraum nahezu identisch ist.

Die theoretischen Kosteneffekte durch die Nutzung von Sekundärblei lassen sich nicht einfach anhand der Differenz der verschiedenen Preise ableiten. Wie in Kapitel 5.5.6 dargestellt, wird die Hälfte des in Deutschland anfallenden Sekundärbleis aus Blei-Säure-Batterien gewonnen. Es liegen jedoch keine Angaben über die Kosten der Aufbereitung von Blei-Säure-Akkus zur Rückgewinnung des Bleigehaltes vor, welche den Großhandelsankaufpreisen von Akkublei noch hinzugerechnet werden müssen. Wird die Preisdifferenz zwischen Primärblei und Altblei für die anfallende Menge von 263.000 t Sekundärblei angewendet, ergibt sich für 2013 ein durchschnittlicher Preis für Sekundärblei von 1.288 Euro/t und für Primärblei von 1.614 Euro/t. Daraus entsteht ein theoretischer Kosteneffekt von 85,74 Mio. Euro.

9.5 Zink

Der Weltmarktpreis für Zink war zu Beginn des Beobachtungszeitraums 2007 - 2015 auf hohem Niveau und begann schon, im Gegensatz zu den anderen betrachteten Metallen, im Laufe des Jahres 2007 zu fallen, um dann analog zu den anderen betrachteten Metallen im Rahmen der Wirtschaftskrise von über 3.700 Dollar/t auf knapp über 1.000 Dollar/t zu sinken. In der zweiten Jahreshälfte 2009 erholte sich der Preis für Zink auf 2.500 Dollar/t, um anschließend, bei leicht negativer Tendenz, bis Mitte 2015 um die 2.000-2.200 Dollar/t zu verharren. Ende 2015 sank der Preis für Primärzink auf 1.500 Dollar/t.

Abbildung 9-8: Preisentwicklung von Primärzink in Dollar/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen, publiziert in EUWID.

Sekundärzink wird als Umschmelzzink und Altzink gehandelt. Der Preis für Umschmelzzink liegt über dem Preis des Altzinks, da es sich bei Umschmelzzink um wieder eingeschmolzenes Altzink mit weniger Verunreinigungen handelt. Beide Sekundärmetallpreise verlaufen parallel zum Spotpreis für Zink an der London Metal Exchange. Wie in Kapitel 5.5 dargestellt, wurden in Deutschland im Jahr 2013 42.000 t Hüttenzink und Wälzoxid mit einem Zinkgehalt von rund 58.000 t wiedergewonnen. Unter der Annahme, dass die Menge der wiedervergewonne Zinkmenge im Wälzoxid mit dem Preis für Umschmelzzink und die wiedergewonnenem Menge an Hüttenzink mit dem Preis für Altzink gehandelt wurden, ergibt sich aus der Substitution von primären Zink und Zinkerz durch Altzink und Umschmelzzink ein gewichteter durchschnittlicher Preis für Sekundärzink von 1.084 Euro/t, dem ein durchschnittlicher Preis für Primärzink in Höhe von 1.438 Euro/t gegenübersteht. Daraus ergibt sich im Jahr 2013 bei einer Substitution von 100.000 t (58.000 t Zinkgehalt im Wälzoxid plus 42.000 t sekundäres Hüttenzink) ein theoretischer Kosteneffekt von 35 Mio. Euro.⁸⁴

⁸⁴ Die Zinkgehalte und Zink-Rückgewinnung durch das Recycling von Messing ist in diesen Mengen nicht mitbetrachtet. Für Messingschrott werden in EUWID eigenen Preise dokumentiert. Allerdings stehen keine Preisangaben für primäres Messing zur Verfügung.

Abbildung 9-9: Preisentwicklung Zinkschrott und Primärzink in Euro/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise auf Basis von LME-Preisen und Großhandelsankaufpreisen für Altmetalle, publiziert in EUWID.

9.6 Kunststoffe

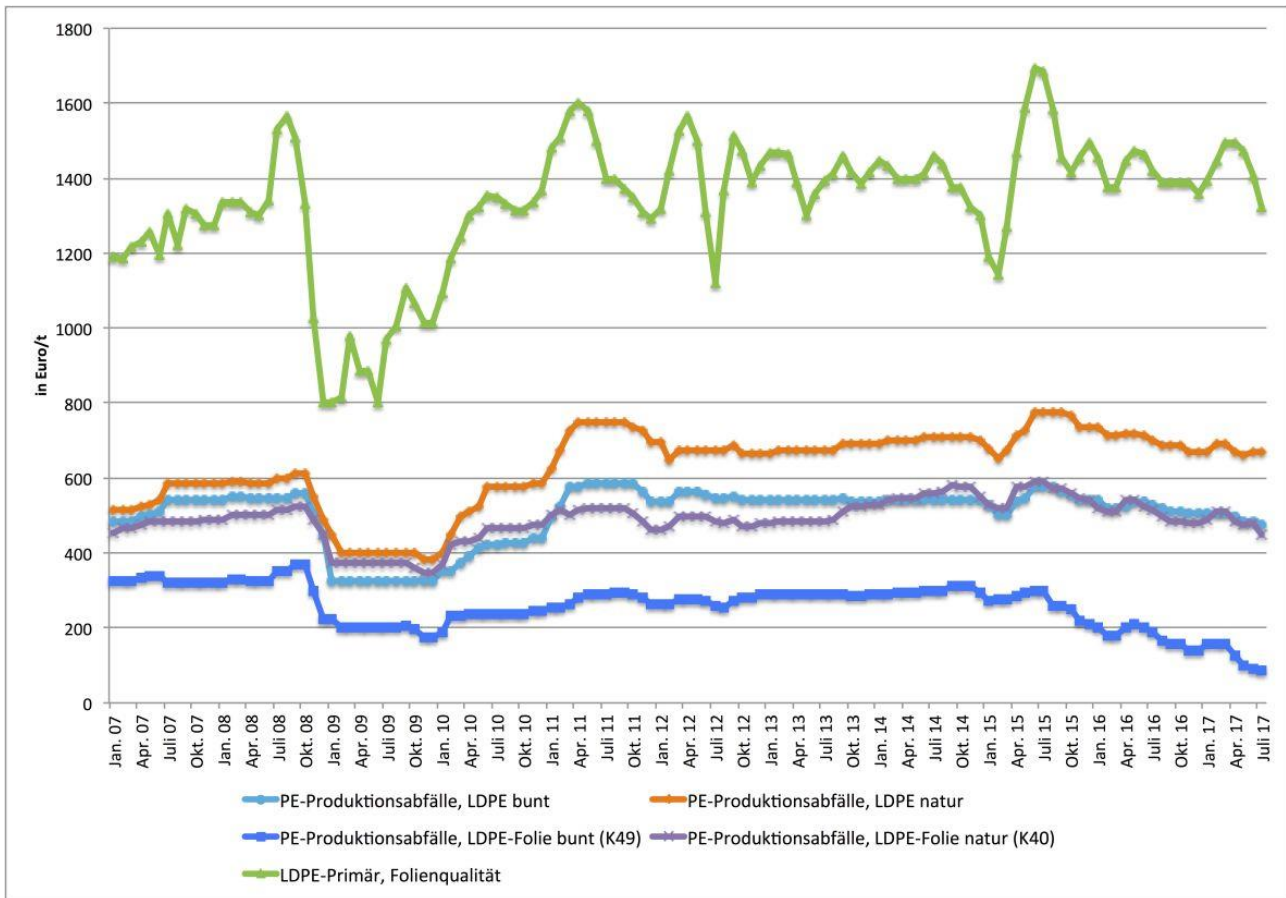
Die Preisangaben für Altkunststoffe, die in den Marktberichten des EUWID monatlich dokumentiert werden, beziehen sich auf Preise, die zwischen Händler bzw. Sortierer und Weiterverarbeiter erzielt werden. Die Preise für Altkunststoffe werden entweder als Mahlgut angegeben, das zu Re-Granulat verarbeitet werden kann, oder als Ballenware. Für Ballenware sind noch weitere Prozessschritte, wie z.B. Sortierung und Reinigung notwendig, bevor diese Altkunststoffe zu Re-Granulat verarbeitet werden können. Daher können für Ballenware von Kunststofffolien zum Teil nur deutlich geringere Marktpreise erzielt werden als für Altkunststoffe, die als Mahlgut gehandelt werden. Beide Produktqualitäten sind jedoch noch kein Re-Granulat und daher nur bedingt mit den Preisen für Neuware auf Basis von primären Rohstoffen zu vergleichen.

Der Einsatz von Re-Granulat ist für Weiterverarbeiter häufig nicht attraktiv, da trotz gründlicher Sortierung und Granulierung die Weiterverarbeitungsqualität nicht vollständig mit Granulat aus primären Rohstoffen vergleichbar ist und so zu einem höheren Aufwand bei der Verwendung von Sekundärkunststoffen führt (Probeläufe des Re-Granulat etc.). Dies führt dazu, dass viele Produzenten Re-Granulat aus Sekundärkunststoffen nur einsetzen, wenn dies deutlich preiswerter als Neuwaren-Granulat ist.

Die Abbildung 9-10 bis Abbildung 9-14 zeigen die Preisentwicklung von verschiedenen Altkunststoffen in verschiedenen Qualitätsstufen im Vergleich zu Neuware aus primären Rohstoffen. Abbildung 9-11 zeigt lediglich die Preisentwicklung von Post-Consumer PE-Abfällen in Folienform ohne direkten Vergleich zur Preisentwicklung von Primär-PE. Auffallend bei allen Kunststoffsorten ist der deutlich volatilere Verlauf der Preisentwicklung für Primärkunststoffe im Vergleich zu Altkunststoffen: Der Preisrückgang im Kontext des wirtschaftlichen Einbruchs 2008 und 2009 ist zwar auch für Altkunststoffe jeglicher Qualität zu erkennen, allerdings deutlich abgeschwächt, als für Primärkunststoffe. Während des Betrachtungszeitraums 2007 – 2015 verläuft die Preisentwicklung für die Mehrzahl der Sekundärkunststoffe, mit Ausnahme des Einbruchs

2008/2009, recht konstant, wobei ab dem Jahr 2015 für viele Sekundärkunststoffe sinkende Preise festgestellt werden können.

Abbildung 9-10: Preisentwicklung PE-Produktionsabfälle und LDPE-Primär in Folienqualität in Euro/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise und Großhandelsankaufpreisen für Altkunststoffe, publiziert in EUWID.

Bei den Preisunterschieden zwischen den verschiedenen Sekundärqualitäten zeigt sich, dass die höchsten Preise für farblose Altkunststoffe erzielt werden, da deren Fähigkeit zur Wiederverwendung nicht durch farbliche Einschränkungen limitiert ist. Entsprechend sind farbliche Altkunststoffe nur zu geringen Preisen absetzbar.

Aus den Marktberichten des EUWID liegen keine Preisangaben für Re-Granulat von Altkunststoffen vor. In Wagner et al. (2012) werden die „technischen Kosten“ für den Aufbereitungsschritt Mahlgut -> Re-Granulat mit 100-150 Euro/t angegeben. Zusätzlich sind noch weitere betriebswirtschaftliche Aufschläge hinzuzurechnen. Um eine Annäherung an den ökonomischen Kosteneffekt durch die Nutzung von Sekundärkunststoffen vornehmen zu können, sollte daher auf die Preisangaben für Mahlgut ein geschätzter Aufschlag von rund 200 Euro/t hinzugerechnet werden.

Da keine Angaben über die Qualität der verwerteten Sekundärrohstoffe vorliegen, wird für 2013 sowohl ein Mittelwert über die verschiedenen Aufbereitungsqualitäten der jeweiligen Kunststoffsorten ermittelt und diese monatlichen Mittelwerte wiederum zu einem Durchschnittswert für das Jahr 2013 genormt. In die Berechnung der Mittelwerte fließen nur Altkunststoffe ein, die als Mahlgut gehandelt werden. Diesem Mittelwert je (Alt-)Kunststoffsorte wird jeweils ein geschätzter Aufschlag von 200 Euro/t für die Weiterverarbeitung des Mahlgutes zu Re-Granulat hinzugerechnet. Daher wird in Tabelle 9-1 kein monetärer Effekt für

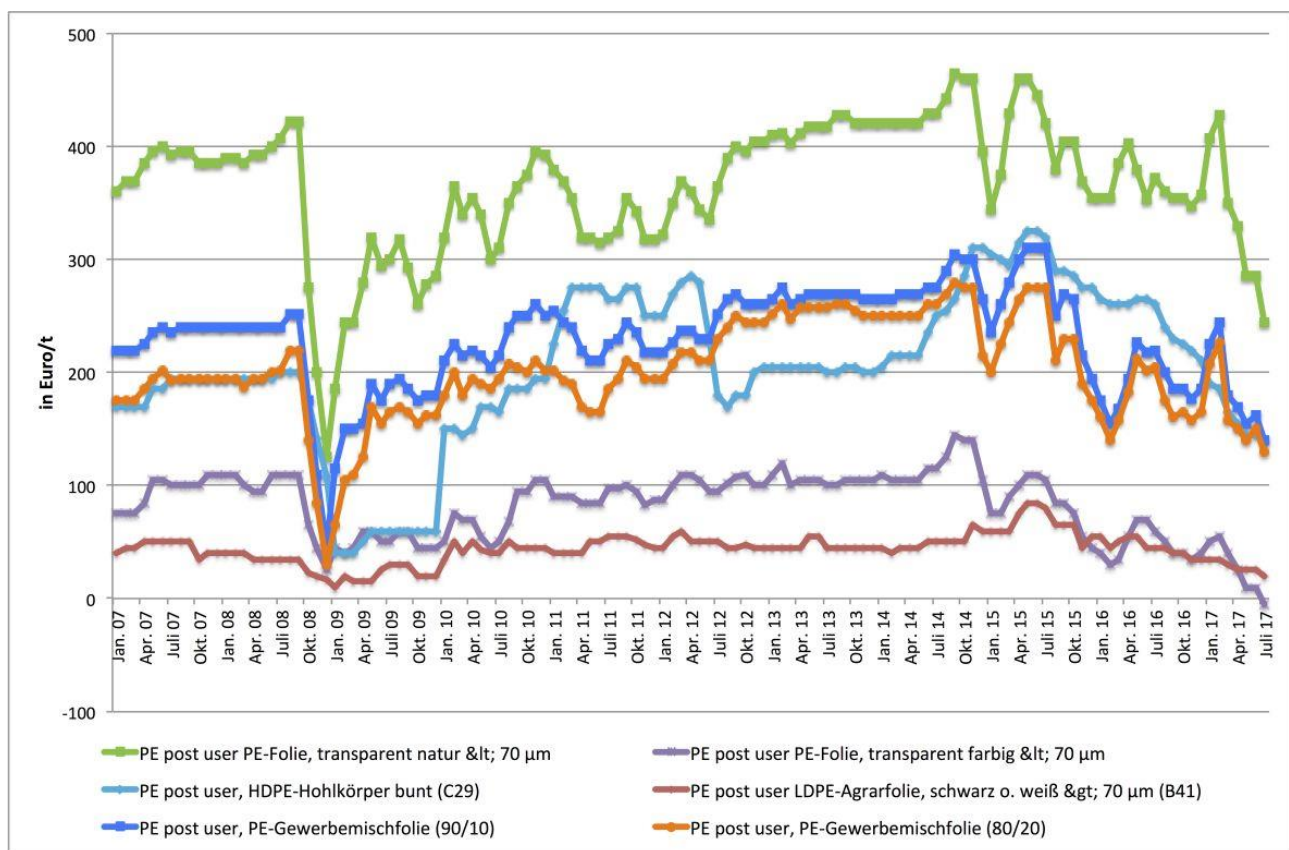
PP-Altkunststoffe ausgewiesen, da für PP-Altkunststoffe nur Angaben für Folien als Ballenware vorliegen. Für PET liegen in den Marktberichten des EUWID nur Preisangaben für Neuware vor, allerdings nicht für Altkunststoffe. Unter diesen Annahmen ergeben sich folgende Durchschnittswerte für Re-Granulat und Neuware aus primären Rohstoffen:

Tabelle 9-1: Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärkunststoffen 2013

	PE-LD	PE-HD	PVC	PS
Preis Re-Granulat in Euro/t	701	855	689	893
Preis Neuware in Euro/t	1.411	1.518	1.215	1.706
Preisdifferenz in Euro/t	710	663	526	813
Hochwertig stofflich verwertete Menge in t	313.791	276.547	145.742	75.045
theoretischer Einspareffekt in Mio. Euro	222,79	183,39	76,71	61,04

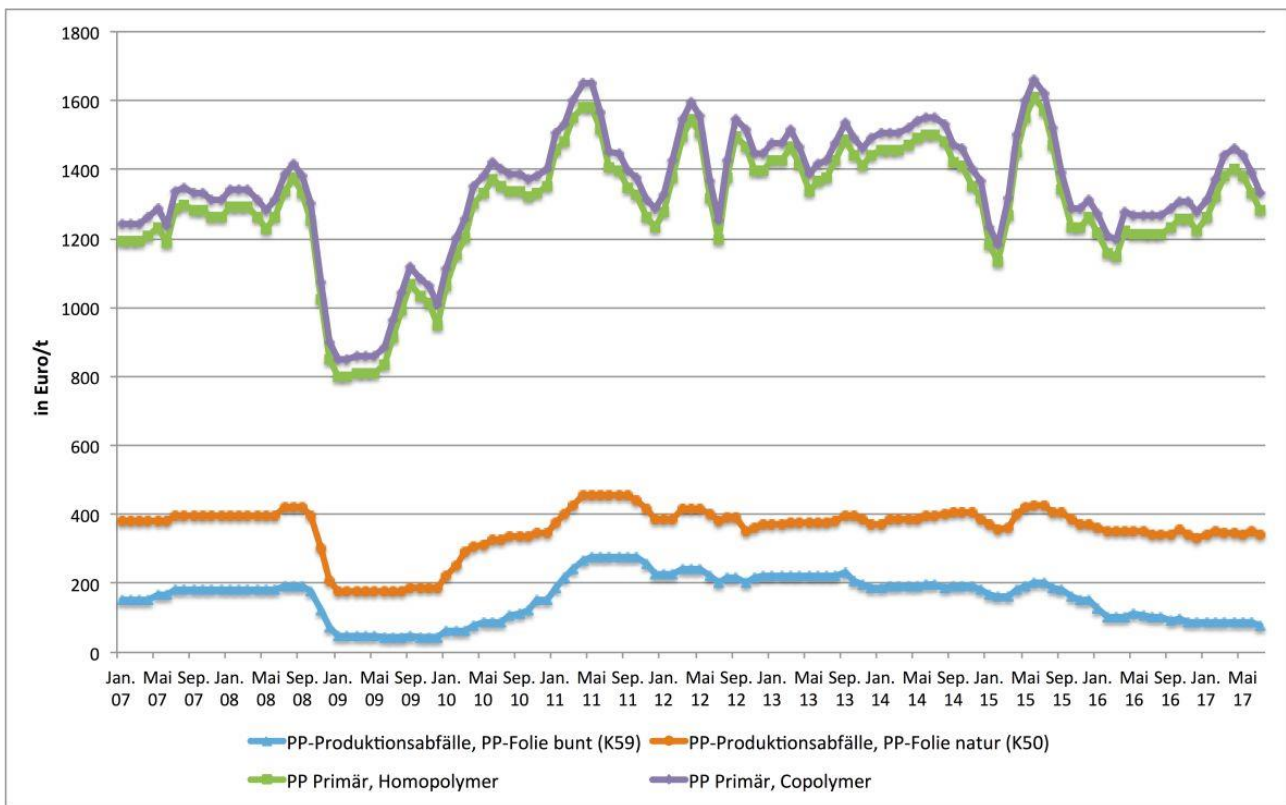
Quellen: eigene Berechnungen

Abbildung 9-11: Preisentwicklung Post-Consumer PE-Folien in Euro/t



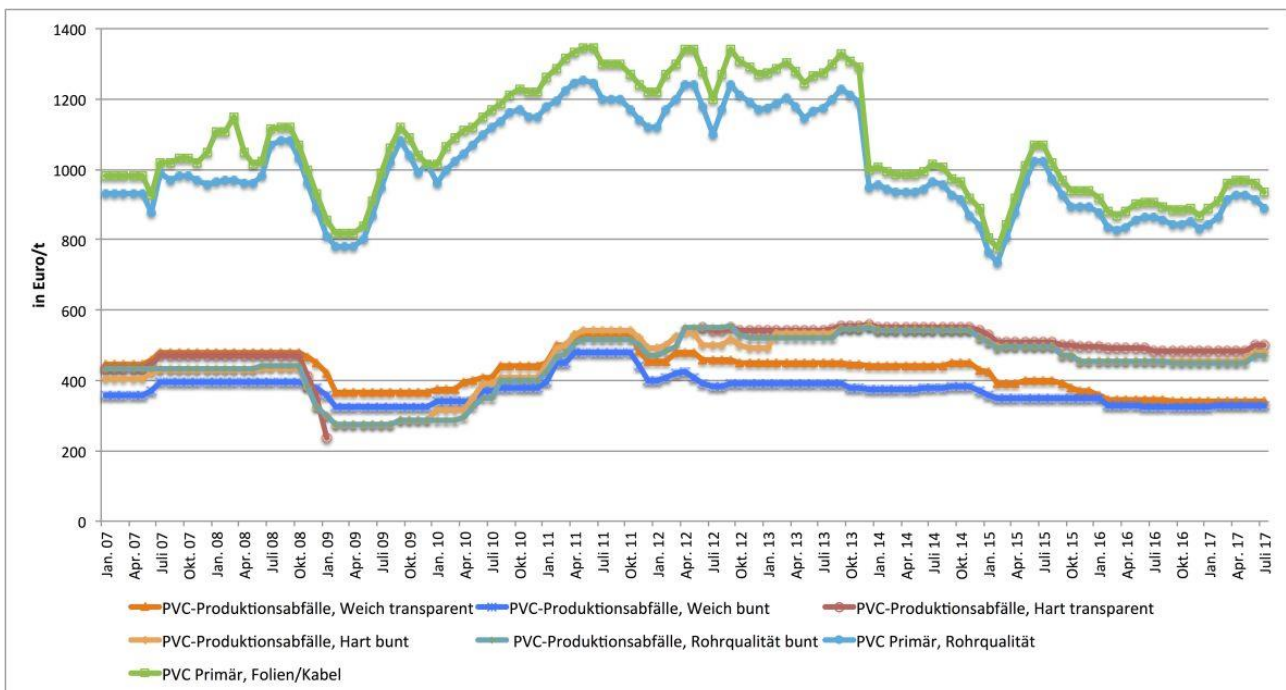
Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise und Großhandelsankaufpreisen für Altkunststoffe, publiziert in EUWID

Abbildung 9-12: Preisentwicklung PP-Produktionsabfälle und PP-Primär in Euro/t



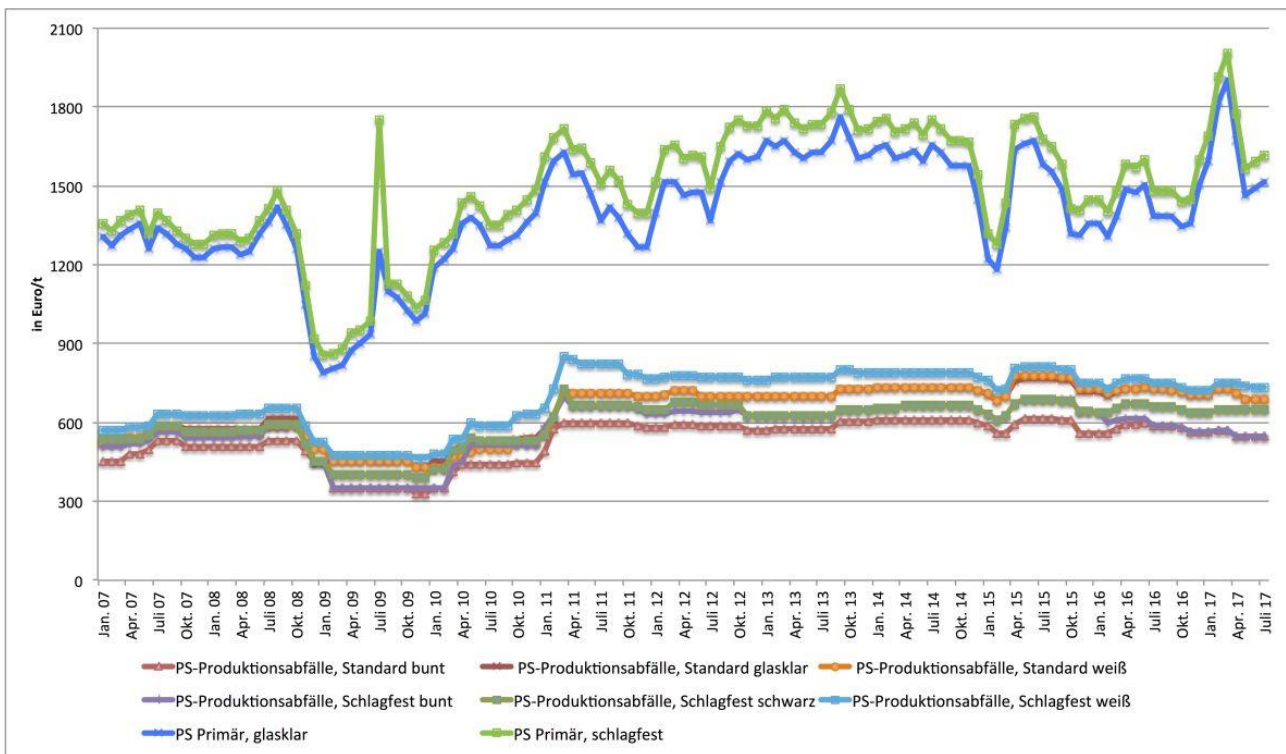
Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise und Großhandelsankaufpreisen für Altkunststoffe, publiziert in EUWID

Abbildung 9-13: Preisentwicklung PVC-Produktionsabfälle und PVC-Primär in Folienqualität in Euro/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise und Großhandelsankaufpreisen für Altkunststoffe, publiziert in EUWID

Abbildung 9-14: Preisentwicklung PS-Produktionsabfälle und PS-Primär in Euro/t



Quelle: eigene Zusammenstellung monatlicher Durchschnittspreise und Großhandelsankaufpreisen für Altkunststoffe, publiziert in EUWID

Letztlich konnten theoretische Einsparpotentiale für einige der Massemetalle und Kunststoffe in ihrer Größenordnung abgeschätzt werden. In erster Linie sind dies Materialien, für die EUWID regelmäßig Preisangaben für Primär – wie Sekundärmaterial publiziert. Aufgrund der schlechten Datensituation wurde auf eine Abschätzung der Einsparpotentiale für die gesamte Untersuchungsperiode 2007 – 2015 verzichtet und lediglich für das Basisjahr 2013 entsprechend der Datenverfügbarkeit eine Abschätzung vorgenommen. Unter Beachtung der getroffenen Annahmen ergeben sich aus der Substitution von Primärmaterial durch Sekundärmaterial folgende wirtschaftliche Einspareffekte:

Tabelle 9-2: Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärmetallen 2013

	Stahl	Aluminium	Kupfer	Blei	Zink
verwertete Menge in t	19.400.000	860.000	741.000	263.000	100.000
theoretischer Einspareffekt in Mio. Euro	984,00	201,24	394,21	85,74	35,00

Tabelle 9-3: Abschätzungen des monetären Effektes des Einsatzes von in Deutschland erfassten Sekundärkunststoffen 2013

	PE-LD	PE-HD	PVC	PS
Hochwertig stofflich verwertete Menge in t	313.791	276.547	145.742	75.045
theoretischer Einspareffekt in Mio. Euro	222,79	183,39	76,71	61,04

10 Auswertung und Zusammenfassung

In Kap 10.1 wird zunächst ein Überblick über die produzierten Sekundärprodukte aus verwerteten Abfällen und Nebenprodukten gegeben. Im Kapitel 10.2 werden dann die Ergebnisse für die Indikatoren DIERec und DERec dargestellt. Kapitel 10.3 fasst die Ergebnisse für den KEA zusammen.

10.1 Sekundärproduktion aus in Deutschland verwerteten Abfällen und Nebenprodukten

Für die in Kapitel 5 – 8 untersuchten 30 Materialien summieren sich die verwerteten Abfälle auf rund 118 Mio. t zuzüglich rund 20 Mio. t Nebenprodukte aus der Stahl- und Energieerzeugung. Nahezu die Hälfte der verwerteten Abfallmengen sind auf die beiden mineralischen Abfallkategorien Bau- und Abbruchabfälle und Ausbauphase zurückzuführen. Jeweils ein weiteres Fünftel der Sekundärprodukte aus der Abfallverwertung stammt aus der Eisen- und Stahlverwertung bzw. der Verwertung von organischen Abfällen.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die erzeugten Sekundärprodukte aus in Deutschland im Jahr 2013 ganz oder teilweise verwerteten Abfällen und Nebenprodukten⁸⁵.

Tabelle 10-1: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen metallischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Herkunft	Menge [t]	Substitutionsäquivalent
Stahl und Gusseisen	Stahlschrott	19.400.000	Stahl aus Primärrohstoffen
	Eisen-/Stahlschrott Guss	3.700.000	Roheisen
Summe Stahl und Gusseisen		23.100.000	
Edelstahl	CrNi Neuschrott	90.900	Primärchrom/Primärnickel
	CrMn Neuschrott	31.600	Primärchrom/-mangan
	Cr Neuschrott	46.200	Primärchrom
	Edelstahl Altschrott	243.300	Primärer Edelstahl
	Karbonstahlschrott	121.900	Rohstahl
Summe Edelstahl		533.600	
Sekundäraluminium aus Refinern	Altschrotte und Neuschrotte mit nicht genau definierter Zusammensetzung	597.000	Primäres Hüttenaluminium
Sekundäraluminium aus Remeltern	Reine und definierte Neuschrotte	262.000	Primäres Hüttenaluminium
Summe Aluminium		859.000	
Sekundäres Raffinadekupfer	Kupfer aus der Aufbereitung von Altschrotten	249.000	Primäres Raffinadekupfer

⁸⁵ Die Verwertung von exportierten Abfällen ist in den Zahlen nur dann enthalten, wenn ein wesentlicher Teil der Verwertung in Deutschland stattgefunden hat. Beispielhaft sind hier Platin und Palladium aus Autokatalysatoren zu nennen. Hier finden der Ausbau, das Einsammeln und das Entmanteln überwiegend in Deutschland statt. Die nachfolgende Raffination erfolgt dann teilweise im Ausland. Analog zu diesem Ansatz wurde auch bei den Kunststoffen vorgegangen. Die Zahlen enthalten die in Deutschland verwerteten Kunststoffe (Sammlung und Sortierung in Deutschland) unabhängig davon, ob das nachfolgende Kunststoffrecycling im In- oder Ausland stattgefunden hat.

Sekundärprodukt	Herkunft	Menge [t]	Substitutionsäquivalent
Cu-Halbzeug	Kupfer aus der Verwertung von Neuschrotten	236.000	Primäres Halbzeug
Messingschrott	Kupferanteil - davon Messing	241.000 (57.000)	
Summe Kupfer		726.000	
Sekundäres Hüttenzink	Altschrotte und Neuschrotte mit nicht genau definierter Zusammensetzung	42.000	Primäres Hüttenzink
Sekundäres Messing	Messing, Halbzeug, sekundär – Zinkanteil	161.000	Primäres Hüttenzink
Zinkoxid	Zinkoxide aus der Aufbereitung von KRS-Oxiden (netto, Aufwand gleich 0 im Vergleich zu primär)	38.000	Zinkhaltiges Erzkonzentrat mit einem Zinkanteil von 36.000 t
Wälzoxid aus der Aufbereitung mittels Wälzrohr	Zink aus mineralischen Abfällen (insbesondere aus Stahlwerkstäuben)	76.000	Zinkhaltiges Erzkonzentrat mit einem Zinkanteil von 58.000 t
Summe Zink		317 .000	
Sekundärblei aus der Raffination mit vorgelagerter Aufbereitung der Blei-Säure-Batterien und Abfall-Importen	Blei aus in Deutschland anfallenden Blei-Säure-Batterien plus Importe	263.000	Primäres metallisches Blei
Summe Blei		263.000	
Sekundäres Hüttenzinn für Halbzeug und Legierungen	Altschrotte und Neuschrotte mit nicht genau definierter Zusammensetzung Sekundäres Hüttenzinn für Halbzeug und Legierungen	5.100	Primäres Hüttenzinn
Summe Zinn		5.100	
Sekundärsilber aus Scheideanstalten	Stückige und relativ reine Abfälle aus Silberwaren, Münzen und Schmuck	169	Primäres metallisches Silber
Sekundärsilber aus der Raffination (plus Importe)	Heterogene silberhaltige Abfälle aus Fotografie und Industrie	369	Primäres metallisches Silber
Summe Silber		538	
Sekundärgold aus Scheideanstalten	Stückige und relativ reine Abfälle aus dem Schmuck- und Dentalbereich	5,0	Primäres metallisches Gold
Sekundärgold aus der Raffination	Heterogene goldhaltige Abfälle (Elektronikschrott)	2,6	Primäres metallisches Gold
Summe Gold		7,6	
Sekundärplatin aus Schei-	Stückige und relativ reine Abfäll-	1,5	Primäres metallisches Pla-

Sekundärprodukt	Herkunft	Menge [t]	Substitutionsäquivalent
deanstalten	le aus dem Schmuck- und Dentaltbereich		tin
Sekundärplatin aus der Raffination	Heterogene, fein verteilte PGM-haltige Abfälle (Industrie- und Autokatalysatoren und Elektro-schrott)	6,0	Primäres metallisches Platin
Summe Platin		7,5	
Sekundärpalladium aus Scheideanstalten	Stückige und relativ reine Abfälle aus dem Schmuck- und Dentaltbereich	0,5	Primäres metallisches Palladium
Sekundärpalladium aus der Raffination	Heterogene, fein verteilte PGM-haltige Abfälle (Industrie- und Autokatalysatoren und Elektro-schrott)	7,0	Primäres metallisches Palladium
Summe Palladium		7,5	
SUMME METALLISCHE SEKUNDÄRPRODUKTE		25.804.253	

Tabelle 10-2: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen mineralischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Herkunft	Menge [t]	Substitutionsäquivalent
RC Gesteinskörnung	Bau- und Abbruchabfälle	52.700.000	Natürliche Gesteinskörnung
Asphaltgranulat zur Zugabe zu Asphaltmischgut	Aufbereitung Ausbauasphalt	10.300.000	Primärasphalt
Gesteinskörnung	Straßenunterbau, sonstige Anwendungen	1.200.000	Natürliche Gesteinskörnung
Summe Asphaltgranulat		11.500.000	
Verpackungsglas	Altglas	2.446.000	Glas aus Primärrohstoffen
SUMME MINERALISCHE SEKUNDÄRPRODUKTE AUS DER ABFALLVERWERTUNG		66.646.000	

Tabelle 10-3: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland 2013 angefallenen Kunststoffabfällen und Altreifen im Jahr 2014, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Herkunft	Menge [t]	Substitutionsäquivalent
Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	Hohlkörper, Getränkekästen, Spritzgussteile, Rohre etc.	304.000	277.000 t Primäres PE-HD 15.000 t Holz 46.000 t Beton 9.000 t Schweröl
Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)	Verpackungsfolien, Müllsäcke, Landwirtschaftsfolien etc.	359.000	314.000 t Primäres PE-LD 24.000 t Holz 72.000 t Beton 14.000 t Schweröl
Polypropylen (PP)	Flaschenverschlüsse, Behälter, Fahrzeugbau, Rohrleitungen etc.	276.000	229.000 t Primäres PP 26.000 t Holz 77.000 t Beton 15.000 t Schweröl
Polyethylenterephthalat (PET)	Flaschen, Folien, Lebensmittelverpackungen etc.	463.000	457.000 t Primäres PET 3.000 t Holz 10.000 t Beton 2.000 t Schweröl
Polystyrol (PS)	Lebensmittelverpackungen, Kabelisolation, Dämmstoffe etc.	82.000	75.000 t Primäres PS 4.000 t Holz 12.000 t Beton 2.000 t Schweröl
Polyvinylchlorid (PVC)	Fensterprofile, Rohre, Behälter etc.	196.000	146.000 t Primäres PVC 40.000 t Holz 120.000 t Beton 300 t Schweröl
Summe Kunststoffe		1.680.000	
Gummigranulat	Altreifenverwertung	207.000	Synthesekautschuk
Reifendraht, Stahleinlagen	Altreifenverwertung	56.000	Stahl
Zuschlagsstoff für Zementindustrie	Altreifenverwertung	37.000	Quarzsand
Zuschlagsstoff für Zementindustrie	Altreifenverwertung	25.000	Eisenerz
Summe Altreifen		325.000	
SUMME SEKUNDÄRPRODUKTE AUS KUNSTSTOFFEN UND ALTREIFEN		2.005.000	

Tabelle 10-4: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen organischen Abfällen, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Herkunft	Menge [t]	Substitutionsäquivalent
Altholz zur Spanplattenherstellung	Altholzerfassung	1.134.000	Sägenebenprodukt, Nadel-IH und Laub-IH
Summe Altholz		1.134.000	
Altpapier für Papierindustrie	Getrenntsammlung Altpapier	12.940.000	Primärrohstoffzusammensetzung der einzelnen Papiersorten
Papierfangstoffe für Ziegelindustrie	Abfallprodukt der Papierindustrie	610.000	Geschäumtes Polystyrol (EPS)
Aschen für Ziegelindustrie	Verbrennungsprozess der Papierindustrie	40.000	Quarzsand
Aschen für Zementindustrie	Verbrennungsprozess der Papierindustrie	170.000	Mergel
Summe Altpapier		13.760.000	
Sekundärfasern	Getrenntsammlung Alttextilien, Reißspinnstoffindustrie	151.000	Synthesefasern auf Erdölbasis (71 %), Cellulosefasern (27 %), Baumwolle (2 %)
Sekundärtextilien	Getrenntsammlung Alttextilien	187.000	Cellulose (60 %) Polyester (40 %)
Summe Alttextilien		338.000	
Kompost	Biologische Behandlung getrennt gesammelter Lebensmittel- und Gartenabfälle	7.314.000	Phosphat, Stickstoff, Kalium
Flüssiger Gärrest	Biologische Behandlung getrennt gesammelter Lebensmittel- und Gartenabfälle	1.552.000	Phosphat, Stickstoff, Kalium
Fester Gärrest	Biologische Behandlung getrennt gesammelter Lebensmittel- und Gartenabfälle	123.000	Phosphat, Stickstoff, Kalium
Summe Lebensmittel- und Gartenabfälle		8.989.000	
SUMME ORGANISCHE SEKUNDÄRPRODUKTE		24.221.000	

Tabelle 10-5: Erzeugte Sekundärprodukte aus in Deutschland angefallenen Nebenprodukten, deren Verwertung ganz oder teilweise in Deutschland im Jahr 2013 stattgefunden hat

Sekundärprodukt	Herkunft	Menge [t]	Substitutionsäquivalent
	Aufbereitung Hochofenschlacken	6.120.000	9,75 Mio. t Klinkerrohstoffe, 0,73 Mio. t Steinkohle
Gesteinskörnung	Aufbereitung Hochofen- und Stahlwerkschlacken	3.880.000	3,93 Mio. t natürliche Gesteinskörnung
Düngemittel	Aufbereitung Stahlwerkschlacken	510.000	0,2 Mio. t CaO, 0,05 Mio. t MgO, 0,005 Mio. t Phosphor
Summe Hochofen- und Stahlwerksschlacken		10.510.000	
Steinkohleflugaschen	Verbrennung von Steinkohle	2.717.000	Zement, Klinker, Gesteinskörnung
REA-Gips	Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken	6.576.000	Natürliches Gips und/oder Anhydrit
Summe Kraftwerksnebenprodukte		9.293.000	
SUMME VERWERTETE NEBENPRODUKTE		19.803.000	

10.2 Ermittlung der Indikatoren DIERec und DERec

Aus der stofflichen sowie energetischen Verwertung der ermittelten Sekundärrohstoffmengen ergeben sich Einsparpotentiale für Primärmaterialien und Energierohstoffe. Diese wurden für jede Materialkategorie mittels der Indikatoren DIERec und DERec abgeschätzt und in den Kapiteln 5 – 8 detailliert dargestellt.

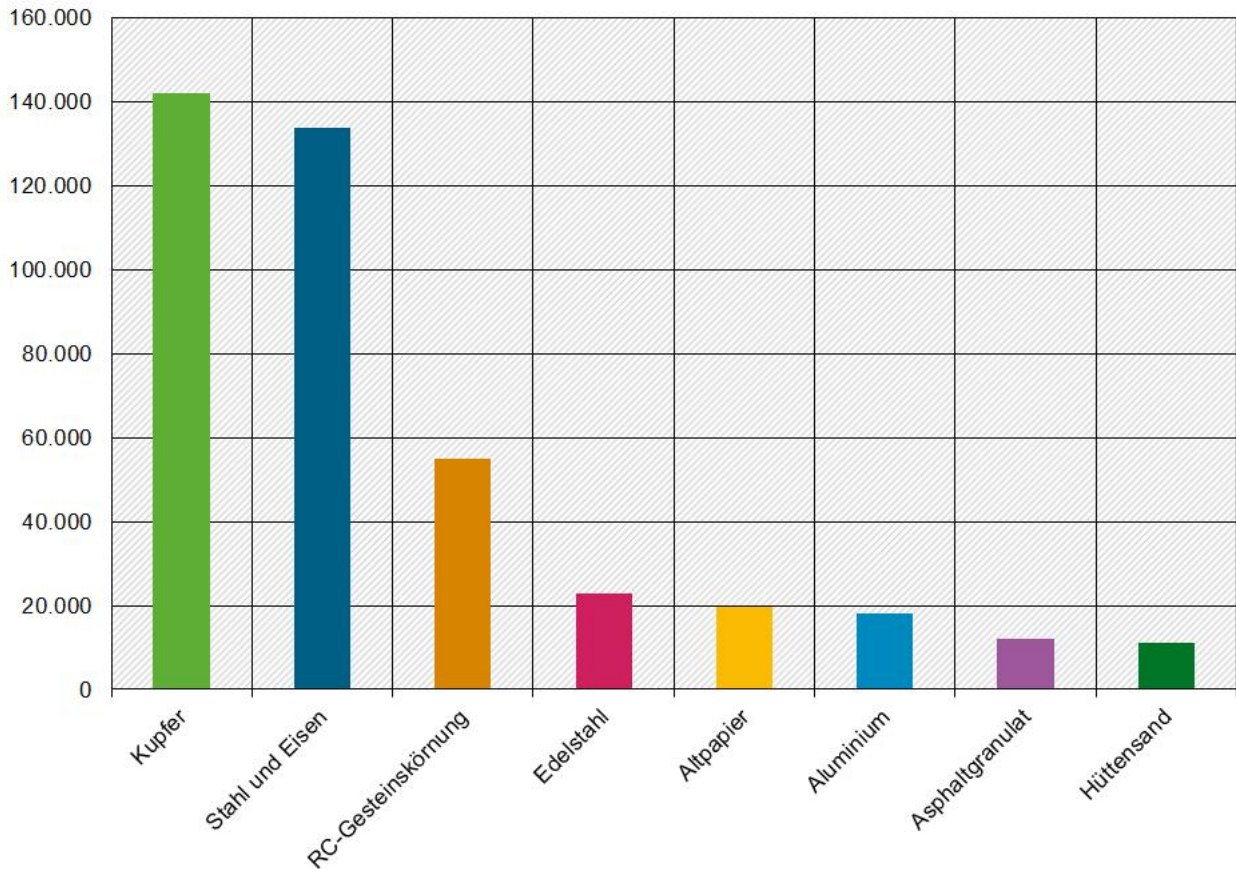
Die Indikatoren für den DIERec und DERec summieren sich für die untersuchten Substitutionsprozesse auf 493 Mio. t (DIERec) bzw. 222 Mio. t (DERec) für die stoffliche und energetische Verwertung. Folgende Aussagen können hierbei gemacht werden:

- Für die Indikatoren DIERec und DERec ist vor allem die stoffliche Verwertung verantwortlich: 469 Mio. t des DIERec (95 %) bzw. 198 Mio. t (89 %) des DERec fallen durch die (werk)-stoffliche Verwertung an.
- Die Abfallverwertung liefert für DIERec und DERec die größten Anteile: 94 % des DIERec bzw. 87 % des DERec werden durch die Abfallverwertung beigetragen (DIERec = 443 Mio. t; DERec = 172 Mio. t). Nebenprodukte spielen eine deutlich geringere Rolle (DIERec = 26 Mio. t; DERec = 26 Mio. t).
- Die nachfolgende Grafik zeigt deutlich, dass die Höhe des DIERec maßgeblich von den Materialien Kupfer (29 %), Stahl und Gusseisen (27 %) und Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen (11 %) abhängt. Weitere Materialien haben Anteile zwischen 2 und 5 % (Edelstahl, Altpapier, Aluminium, Asphaltgranulat, Hüttensand). Die anderen untersuchten Materialien haben Anteile von einem Prozent oder weniger und sind in der Grafik nicht enthalten.

Abbildung 10-1: Ergebnis für den Indikator DIERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %

DIERec 2013 für die relevantesten Materialien

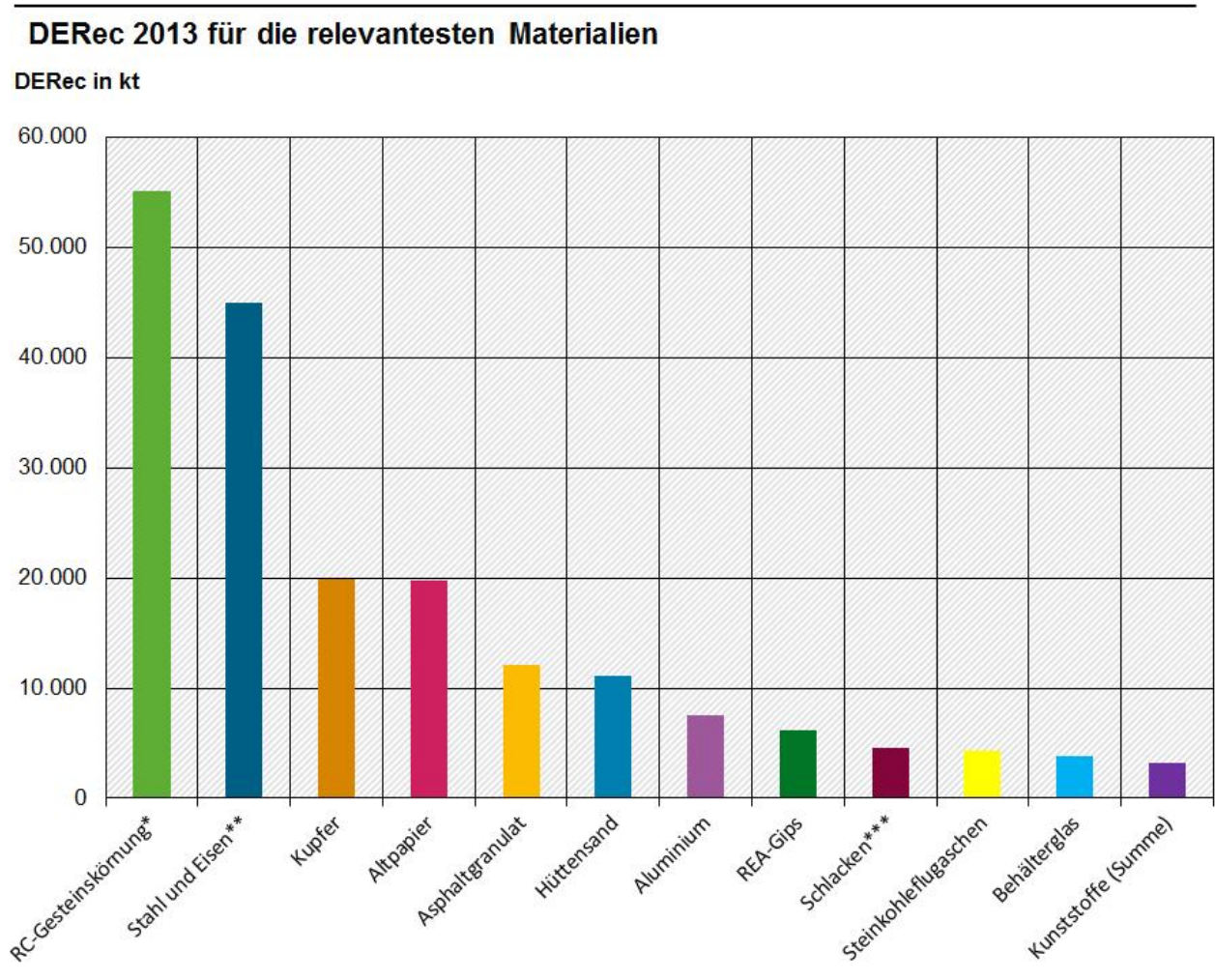
DIERec in kt



Quelle: eigene Berechnungen

- Für den DERec gibt sich ein etwas anderes Bild, weil hier Materialien ohne aufwändige ausländische Vorketten stärker an Bedeutung gewinnen. Die höchsten Beiträge zum Ergebnis mit jeweils rund einem Viertel liefern die RC-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen sowie Stahl und Eisen. Weitere Beiträge im Bereich von 5 – 10 % stammen von Kupfer, Altpapier, Asphaltgranulat und Hüttensand. Die nachfolgende Grafik zeigt die wichtigsten Materialien für den DERec mit Beiträgen $\geq 2\%$ am Gesamtergebnis.

Abbildung 10-2: Ergebnis für den Indikator DERec mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 2 %



*aus Bau- und Abbruchabfällen

**ohne Edelstahl

***aus der Eisen- und Stahlerzeugung (ohne Hüttensand)

Quelle: eigene Berechnungen

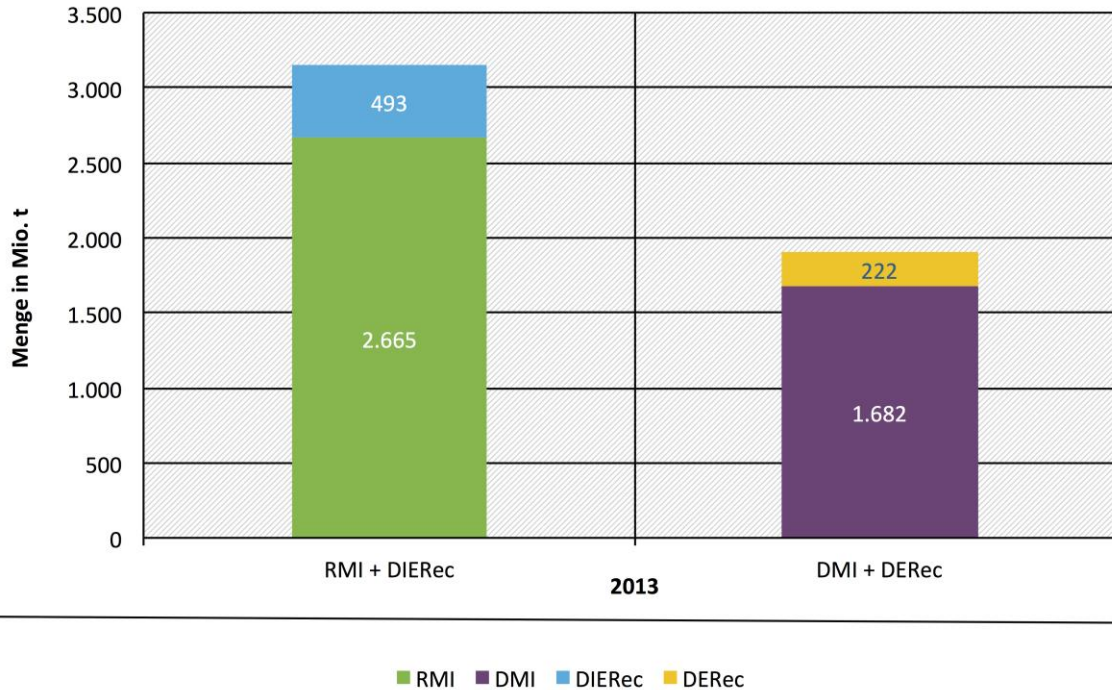
- Der Rohstoffeinsatz in Deutschland betrug im Jahr 2013 gemessen als DMI 1.683 Mio. t. Durch die inländische Verwertung von Abfall- und Nebenprodukten wurden ohne die Beachtung der ausländischen Vorketten 222 Mio. t Material eingespart. Ohne diese Recyclinganstrengungen bei den untersuchten Materialien in Deutschland wäre der DMI somit rechnerisch um diese 222 Mio. t auf 1.904 Mio. t erhöht. Dies entspricht einem hypothetischen Anstieg des DMI um 13 %.
- Für die Berücksichtigung der indirekten Flüsse im Ausland muss der DIERec mit den RMI verglichen werden. Der RMI des Jahres 2013 betrug für Deutschland 2.665 Mio. t und war somit um 58 % höher als der DMI (Destatis 2018). Setzt man den DIERec der untersuchten Sekundärmaterialien und Nebenprodukte von 2013 in Relation zum RMI des Jahres 2013, wird ersichtlich, dass sich ohne die Anstrengungen der Sekundärrohstoffwirtschaft der RMI auf 3.158 Mio. t erhöhen würde. Dies entspräche einem Anstieg des RMI um 18 %.

Die nachfolgende Abbildung stellt das Verhältnis von DIERec und DERec zu DMI bzw. RMI noch einmal grafisch dar.

Abbildung 10-3: Rechnerische Erhöhung des RMI bzw. DMI ohne die Substitution von Primärmaterial durch die Verwertung der untersuchten Materialien und Nebenprodukte, in Mio. t

Reduzierung des theoretischen Rohstoffbedarfs durch die Sekundärrohstoffwirtschaft

DIERec und DERec im Verhältnis zu DMI und RMI



Quelle: Destatis 2018 und eigene Berechnung

- Ursprünglich war in diesem Projekt vorgesehen Zeitreihen für den Zeitraum 2007 bis 2013 zu erstellen. Während des Projektverlaufs wurde entschieden, dass nach Möglichkeit für alle Materialien Zeitreihen von 2007 bis 2015 erstellt werden sollen. Durch Datenlücken können bei einzelnen Materialien nur Zeitreihen bis 2013 oder 2014 erstellt werden. Entsprechend können die Gesamtergebnisse des DIERec und DERec für 2014 und 2015 nur in begrenztem Umfang vergleichend betrachtet werden. Als Gesamtergebnis ist vor allem festzuhalten, dass Differenzen des DIERec zwischen 2007 und 2013 im Wesentlichen von wenigen Materialien bestimmt werden: Kupfer (-30 Mio. t), Stahl und Gusseisen (-18 Mio. t), Edelstahl (-9 Mio. t), Gold (- 7 Mio. t). Die Ursachen hierfür sind vielfältig und stark verbunden mit den branchenspezifischen Entwicklungen und auch Änderungen in der statistischen Methodik.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Indikatoren DIERec und DERec noch einmal zusammenfassend für alle untersuchten Abfall- und Nebenprodukte aufgeführt.

Tabelle 10-6: Zusammenfassung der Indikatoren DIERec und DERec für die stoffliche Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013

Sekundärprodukt	DIERec Menge [kt]	DERec Menge [kt]
Stahl/Guss	133.923	44.991
Edelstahl	22.798	1.373
Aluminium	18.169	7.517
Kupfer (inkl. Messing)	142.060	19.911
Zink	5.709	365
Blei	3.945	657
Zinn	6.040	4,93
Silber	3.568	-10,8
Gold	6.369	-4,41
Palladium	426	-0,4
Platin	2.450	-4,8
Asphaltgranulat (Asphaltnischgut und Gesteinskörnung)	12.138	12.138
RC-Gesteinskörnung aus Bau- und Abbruchabfällen	55.070	55.070
Verpackungsglas	3.793	3.793
Kunststoffe (Summe)	3.354	3.174
davon PE-HD	344	316
davon PE-LD	393	363
davon PP	276	247
davon PET	1.347	1.316
davon PS	121	112
davon PVC	250	242
davon Mischkunststoffe	622	578
Altholz	1.477	1.723
Altpapier	19.804	19.783
Lebensmittel und Gartenabfälle	-964	-1.028
Altreifen	888	665
Alttextilien	1.698	1.672
Summe	442.713	171.787

Tabelle 10-7: Zusammenfassung der Indikatoren DIERec und DERec für die stoffliche Verwertung der untersuchten Nebenprodukte, 2013

Sekundärprodukt	DIERec Menge [kt]	DERec Menge [kt]
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung (ohne Hütten- sand)	4.578	4.578
Hüttensand	11.078	11.078
Steinkohleflugaschen	4.353	4.353
REA-Gips	6.206	6.206
Summe	26.215	26.215

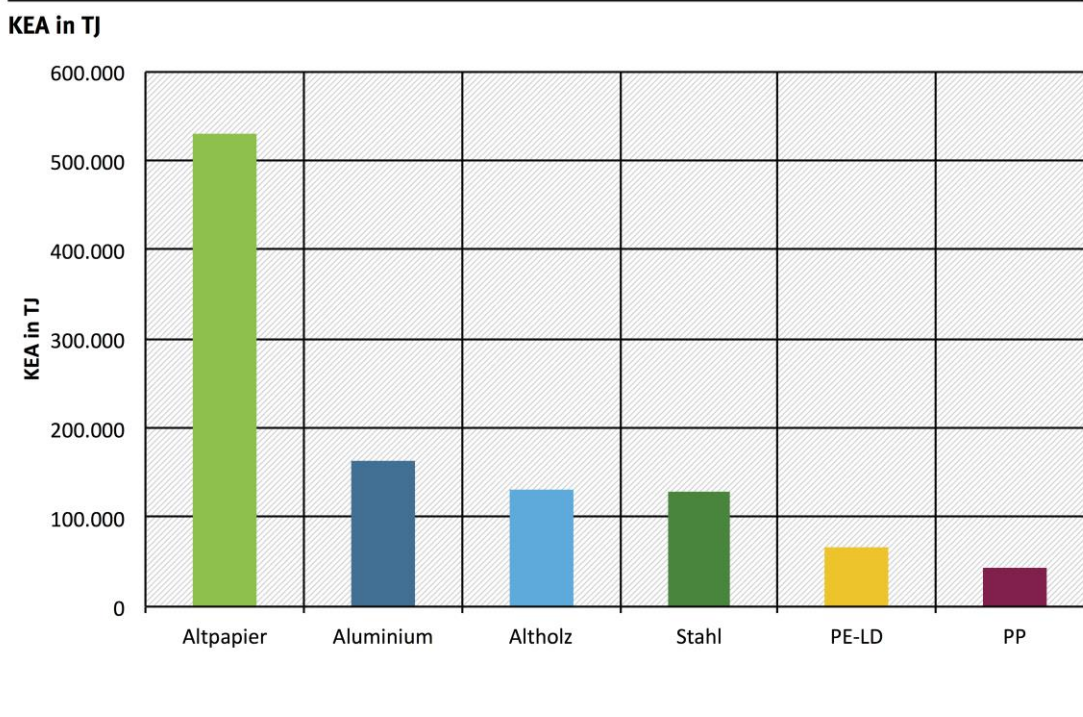
Tabelle 10-8: Zusammenfassung der Indikatoren DIERec und DERec für die energetische Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013

Sekundärprodukt	DIERec Menge [kt]	DERec Menge [kt]
Summe Kunststoffe	9.317	9.317
davon PE-HD	1.626	1.626
davon PE-LD	3.670	3.670
davon PP	2.350	2.350
davon PET	362	362
davon PS	626	626
davon PVC	683	683
Altholz	6.938	6.938
Altpapier	3.465	3.438
Lebensmittel- und Gartenabfälle	3.529	3.529
Altreifen	264	205
Alttextilien	298	298
Summe	23.810	23.725

10.3 Ermittlung der KEA-Salden

Das Ergebnis für die KEA-Salden fällt erwartungsgemäß anders aus als das Ergebnis für DIERec und DERec. Die nachfolgende Grafik zeigt den KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorketten für die Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von > 3 %. Es zeigt sich deutlich, dass das Ergebnis von den Materialien mit einer energetischen Verwertung (Altpapier, Kunststoffe, Altholz) und den Metallen, die durch das Zusammenwirken von energieintensiven Prozessen und großen Produktionsmengen gekennzeichnet sind (Aluminium, Stahl, Kupfer), dominiert wird.

Abbildung 10-4: Ergebnis für den Indikator KEA-Saldo inkl. ausländischer Vorketten mit Darstellung aller Materialien mit Anteilen am Gesamtergebnis von mindestens 3 %



Durch die Substitution von Primärrohstoffen durch die verwerteten Abfälle und Nebenprodukte wurde in Summe im Saldo ein Energieverbrauch von 1.406 PJ vermieden (inkl. ausländischer Vorketten). Ohne ausländische Vorketten wurde ein Energieverbrauch von 1.190 PJ vermieden.

Der Vergleichswert analog zum RMI ist das Primärenergieaufkommen nach dem Inländerkonzept, der sowohl die Verwendung für die inländische Produktion wie für die Importe umfasst. Das Primärenergieaufkommen in 2013 lag bei 24.512 PJ (Destatis 2017). Demgegenüber steht eine KEA-Einsparung (inkl. ausländischer Vorketten) von 1.406 PJ durch die Sekundärrohstoffwirtschaft. Dies entspricht rund 6 % des Primärenergieaufkommens nach Inländerkonzept.

Eine Vergleichsgröße zum DERec ist die Energiegewinnung im Inland. Im Jahr 2013 beträgt sie 4.109 PJ (AG Energiebilanzen, 2015). Der berechnete KEA-Saldo ohne Vorkette aus der Substitution von Primärrohstoffen durch die verwerteten Abfälle und Nebenprodukte beträgt im Jahr 2013 1.190 PJ, was 29 % entspricht. Dies zeigt, dass die Sekundärrohstoffwirtschaft im Verhältnis zur inländischen Energiegewinnung mit relevanten Energieeinsparungen einhergeht, die zum einen auf der energetischen Verwertung von heizwertrei-

chen Abfällen und zum anderen auf der Vermeidung von energieintensiven metallurgischen Prozessen beruht.

Die nachfolgenden Tabellen stellen die wichtigsten Ergebnisse für den KEA-Saldo zusammenfassend dar.

Tabelle 10-9: Zusammenfassung des KEA-Saldos für die stoffliche Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013

Sekundärprodukt	Saldo KEA inkl. ausländischer Vor-kette [TJ]	Saldo KEA ohne ausländische Vor-kette [TJ]
Stahl	127.953	101.613
Edelstahl	23.326	1.482
Aluminium	162.622	151.135
Kupfer	37.227	9.494
Zink	280	-2.618
Blei	1.801	160
Zinn	1.615	-7
Silber	3.134	-48
Gold	1.812	-19
Palladium	622	-8
Platin	2.680	-85
Asphalt (⇔ Asphaltmischgut und Gesteinskörnung)	17.045	17.045
RC Gesteinskörnung aus Bau und Abbruchabfällen	3.302	3.302
Behälterglas	22.076	22.076
Summe Kunststoffe	106.761	52.640
davon PE-HD	18.987	7.180
davon PE-LD	22.146	9.486
davon PP	15.159	5.163
davon PET	32.089	21.958
davon PS	5.920	2.457
davon PVC	7.884	3.919
davon Mischkunststoffe	4.576	2.477
Altholz	40.322	18.703
Altpapier	483.735	472.982
Lebensmittel und Gartenabfälle	-5.781	-5.815
Altreifen	15.116	6.926
Alttextilien	21.176	12.118
Summe	1.066.735	861.075

Tabelle 10-10: Zusammenfassung des KEA-Saldos für die stoffliche Verwertung der untersuchten Nebenprodukte, 2013

Sekundärprodukt	Saldo KEA inkl. ausländischer Vor-kette [TJ]	Saldo KEA ohne ausländische Vor-kette [TJ]
Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung (ohne Hütten-sand)	753	753
Hüttensand	23.412	23.412
Steinkohleflugaschen	9.034	9.034
REA-Gips	-1.854	-1.854
Summe	31.345	31.345

Tabelle 10-11: Zusammenfassung des KEA-Saldos für die energetische Verwertung der untersuchten Abfallprodukte, 2013

Sekundärprodukt	Saldo KEA inkl. ausländischer Vor-kette [TJ]	Saldo KEA ohne ausländische Vor-kette [TJ]
Summe Kunststoffe	114.707	114.707
davon PE-HD	20.020	20.020
davon PE-LD	45.183	45.183
davon PP	28.930	28.930
davon PET	4.460	4.460
davon PS	7.706	7.706
davon PVC	8.408	8.408
Altholz	91.343	91.343
Altpapier	46.820	42.776
Lebensmittel- und Gartenabfälle	44.837	44.837
Altreifen	6.728	209
Alttextilien	3.643	3.643
Summe	308.077	297.513

11 Quellenverzeichnis

11.1 Stoffunspezifische Quellen

- ABANDA (2015): Abfallanalyse Datenbank ABANDA. <http://www.lanuv.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm> . Nordrhein-Westfalen. aufgerufen am 02.02.2015.
- AG Energiebilanzen (2015): Primärenergieverbrauch. Auswertungstabellen.
- Baur, F. (2003): Abfallwirtschaftliche Grundlagen im Saarland. Das Gutachten zum Teilplan Siedlungsabfall. Vortrag Regionales Abfallforum.
- Beyer, J. et al. (2004): Reorganisation der Marktabfallbewirtschaftung in der Stadt Esch-sur-Alzette. Auftraggeber Administration de l'Environnement Division des Déchets. Luxembourg
- BDSV (2014): Deutsche Stahlrecycling-Bilanz 1980 bis 2013. Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen. www.bdsv.org/downloads/statistik_13.pdf Düsseldorf. aufgerufen am 02.02.2015.
- BiPRO (2006): Verwertungsmöglichkeiten von Bildröhrenglas aus der Demontage von Elektroaltgeräten. Endbericht für das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien
- BMU (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin.
- BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II (ProgRes II). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin.
- Bothe, D. (2017): Restabfallanalysen: Was steckt in unserem Müll?. Artikel in Müll und Abfall. Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Ausgabe 07 / 2017. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG
- B+T Group (2015): Reststoffe. B+T Umwelt GmbH. <http://www.bt-umwelt.de/de/Entsorgung/Papierindustrie/Reststoffe.html> Alsfeld. aufgerufen am 02.02.2015
- Consultic (2008-2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007 bis 2013. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH. Alzenau
- Dehne, I. (2015): Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen. Bearbeitung u.e.c. Berlin und Öko-Institut. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3712 93 312. Texte 18/2015. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Denz, W. (2011): Leitfaden gefährliche Abfälle und Materialeffizienz in Gerbereien. Umweltberatung Wilfried Denz. Münster
- Destatis (2018): Umweltökonomische Gesamtrechnung. Aufkommenn und Verwendung in Rohstoffäquivalenten. Lange Reihe 2000 bis 2014. Wiesbaden
- Destatis (2017): Umweltnutzung und Wirtschaft. Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Teil 2: Energie. Wiesbaden
- Europäische Kommission (2015): Mitteilung der Kommission: Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. COM(2015) 614 final, Brüssel, 2.12.2015, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/DOC/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>
- Europäische Kommission (2011): Mitteilung der Kommission: Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. KOM(2011) 571 endgültig.
- European Commission (2014): Report on Critical Raw Materials for the EU – Critical Raw Materials Profiles http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-critical-material-profiles_en.pdf
- FGU (2009): Simplified LCA für Elektronikbauteile. Projekt der exact Fachgruppe Umwelt. Hombrechtikon
- FKN (2015): Getränkekartons. Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. <http://getraenkekarton.de/> Berlin. aufgerufen am 02.02.2015
- Flamme, S. (2002): Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen. Dissertation. Fachbereich Bauingenieurwesen der Bergischen Universität - Gesamthochschule Wuppertal. Wuppertal

- Görisch, U. (2007): Unternehmenskooperation am Beispiel des Recyclings gemischter Bau- und Abbruchabfälle. Dr. Uwe Görisch GmbH. Auftraggeber Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Wiesbaden
- GRS (2009): Jahresbericht / Dokumentation 2008 - Erfolgskontrolle nach Batterieverordnung. Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien. Hamburg
- Hauer, W. (2008): Sammlung und Behandlung von Sperr- und Gewerbemüll - Analyse und Ausgangslage in Österreich. Vortrag.
- Hoffmann, G. et al. (2011): Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung. Bearbeitung Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der Technischen Universität Dresden. Umweltforschungsplan des BMU FKZ 3707 33 303. Texte 33/2011. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- Jochem, E. et al. (2004): Werkstoffeffizienz - Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. Bearbeitung Fraunhofer-Institut Systemtechnik und Innovationsforschung ISI. Umweltforschungsplan des BMWa FKZ 0327313A. August 2004
- Kettler, H.-J.: Altkabelzerlegung und PVC Verarbeitung. Vortrag
- Krause, P. et al. (2014): Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfälle. Bearbeitung u.e.c. Berlin und GAVIA. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 371233328. Texte 84/2014. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- KWB (2011-2015): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2006 bis 2012. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle. Kreislaufwirtschaft Bau
- LfU Bayern (2001): Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Herausgeber Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg
- IPA (2015): Abfallsteckbriefe. Informations-Portal-Abfallbewertung. Internetseite des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. <http://www.abfallbewertung.org/ipa.php>? Recklinghausen. aufgerufen am 08.05.2015
- Obermoser, M. et al. (2008): Technisch-naturwissenschaftliche Grundlagen für den Vergleich von Kompaktleuchtstofflampen mit herkömmlichen Glühlampen. Technische Universität Wien. Auftraggeber Stadt Wien. Wien
- Potsdam AWK (2011): Abfallwirtschaftskonzept 2011-2016. Landeshauptstadt Potsdam. Potsdam
- Reinhardt, T. (2004): Entsorgung von Schredderrückständen - ein aktueller Überblick. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft. Karlsruhe
- Schäfer, T. (2004): Untersuchungen zur Dispersion und ihren Auswirkungen beim Übergang aus der Nutzungsphase in das Recycling. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Aachen
- Statista (2015): Produktionsmenge der wichtigsten NE-Metalle weltweit in den Jahren 2012 und 2013. Statista. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/323132/umfrage/produktion-der-wichtigsten-ne-metalle-weltweit/> Hamburg. aufgerufen am 08.05.2015
- Statistisches Bundesamt (2009-2015): Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1 für die Jahre 2007 bis 2013. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2013): Abwasserbehandlung - Klärschlamm. Erscheinungsfolge: dreijährlich. Wiesbaden
- Trumpf, R. et al. (2007): Energetische Nutzung von Reststoffen und Ersatzbrennstoff in unterschiedlichen Feuerungssystemen - Konzepte zur Versorgung von Industriebetrieben. Eproplan GmbH. Stuttgart
- UBA (2015): Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2013. Umweltbundesamt Fachgebiet III 1.6. Dessau-Roßlau
- VCS (2003): Altreifen Entsorgung - Was ist ökologisch sinnvoll? Bearbeitung BiCon AG. Auftraggeber Verkehrs-Club der Schweiz. Bern
- VDP (2009-2014): Papierkompass der Jahre 2009 bis 2014. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn
- VKE (2003): Kunststoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Verband Kunststofferzeugende Industrie. Frankfurt am Main
- Wagner, J. et al. (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 Abfal-

laufkommens. Bearbeitung INTECUS GmbH. Umweltforschungsplan des BMU FKZ 3709 33 316. Texte 14/2012. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

WVM (2008-2014): Metallstatistik der Jahre 2007 bis 2013. Wirtschaftsvereinigung Metalle. Berlin

WVM (2015): Telefonisches Gespräch mit Herrn Eisenberg am 07.05.2015. Wirtschaftsvereinigung Metalle. Berlin

Zorn, B. (2006): Bauabfallentsorgung aus Sicht der Abfallentsorger. Vortrag auf der 18. Abfalltagung des LANU in Rendsburg.

11.2 Metalle

11.2.1 Eisen/Stahl

BD Guss (2016): Schrotteinsatz in der Gießerei-Industrie: <http://www.guss.de/home/eine-starke-branche/umwelt/>

BDSV (2017): Deutsche Stahlrecycling – Bilanz 1980 bis 2016:

https://www.bdsv.org/fileadmin/service/markt_und_branchendaten/Deutsche_Stahlrecyclingbilanz_1980_2016.pdf

Biedermann, H., Meynerts, U., Deike, R. (2013): Wie funktioniert der Metallhandel? In Thomé-Kozmiensky, K.-J., Goldmann D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 7 (2014).

Björkman, B., Samuelsson, C. (2014): Recycling of Steel. In: Worrell/Reuter (Hrsg.): Handbook of Recycling : state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists . Waltham, Mass : Elsevier, 2014. p. 65-83.

Bowyer, J. et al. (2015): Understanding Steel Recovery and Recycling Rates and Limitations to Recycling.

<http://www.dovetailinc.org>

BVSE (2014): Deutsche Stahlschrottbilanz 2013: Schrottverbrauch ging 2013 zurück.

http://bvse.de/330/7322/bvse__Schrottverbrauch_ging_2013_zurueck

Damath, R. (2010): Iron and Steel Scrap - Accumulation and Availability. Report for the Institute of Scrap Recycling Industries.

International Iron and Steel Institute (2005): Steel: The Foundation of a Sustainable Future.

Janke, D., Savov, L., Weddige, H.J., Schulz, E. (2000): Scrap-Based Steel Production and Recycling of Steel. In: Materiali in Tehnologije (34), pp: 387-399.

Mohr, S. et al. (2014): Projection of Iron Ore Production. In: Natural Resource Research.

https://www.researchgate.net/publication/276920772_Projection_of_Iron_Ore_Production

Reck, B., Graedel, T.E. (2012): Challenges in Metal Recycling. In: Science Vol. 337, pp 690-695.

Rod, O., Becker, C., Nylen, M. (2006): Opportunities and dangers of using residual elements in steel. A literature survey. Jernkontorets Forskning IM-2006-124

Savov, L., Volkova, E., Janke, D. (2003): Copper and Tin in Steel Scrap Recycling. In: RMZ – Materials and Geoenvironment, Vol. 50, No. 3, pp. 627-640.

Wilhelm, C. (2013): Recycling und Materialeffizienz in der Gießerei-Industrie. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie.

Düsseldorf. www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/04-Wilhelm.pdf

WV Stahl (2017): Statistisches Jahrbuch Stahlindustrie 2016/2017.

WV Stahl (2015a): Statistisches Jahrbuch Stahlindustrie 2014/2015.

WV Stahl (2015b): Bericht zur Lage auf dem Stahlschrottmarkt Dezember 2014/Januar 2015.

Yellishetty, M., Mudd, G.M., Ranjith, P.G. (2011): The Steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? Journal of Cleaner Production 19, pp. 78-90

11.2.2 Edelstahl

DIN EN 10020:2000-07: Begriffsbestimmungen für die Einteilung der Stähle; Deutsche Fassung EN 10020:2000

Igarashi, Y.; Daigo, I.; Matsuno, Y.; Adachi, Y. (2007): Dynamic Material Flow Analysis for Stainless Steels in Japan – Reductions Potential of CO₂ Emissions by Promoting Closed Loop Recycling of Stainless Steels, ISIJ International, Vol. 47 (2007) No. 5, pp. 758-76.

- International Stainless Steel Forum (ISSF) (2015): Stainless Steel in Figures 2015, International Stainless Steel Forum (ISSF), Brussels
- International Stainless Steel Forum (ISSF) (2014): Stainless Steel in Figures 2014, International Stainless Steel Forum (ISSF), Brussels
- Johnson, J.; Reck, B.; Wang, T.; Graedel, T.E. (2008): The Energy Benefit of Stainless Steel Recycling, Energy Policy 36 (1), 181-192
- Leffler, B. (1996): Stainless Steels and their Properties, 2nd ed. ISBN 91-9720-216-9
- Mauss, R. (2013): Marktanalyse von Sekundärrohstoffen: Edlstahlschrott BGR/DERA Rohstoffkonferenz 2013, Hannover 4. November 2013, KMR Stainless AG.
- Outokumpu (2013): Handbook of Stainless Steel, Outokumpu Oyj, Espoo
- OUTOKUMPU OYJ, PRESSEMITTEILUNG, 23. Juni 2015, 15 Uhr MEZ: Im Outokumpu Stahlwerk in Bochum endet die Produktion, <http://www.outokumpu.com/de/medien/press-release/Seiten/Outokumpu-665931.aspx>
- OUTOKUMPU OYJ, PRESSEMITTEILUNG, 6. Dezember 2013, 15.00 Uhr MEZ: Stilllegung der Krefelder Flüssigphase von Outokumpu abgeschlossen, <http://www.outokumpu.com/de/medien/press-release/Seiten/Outokumpu-584930.aspx>
- Reck, B. et al. 2010. Global stainless steel cycle exemplifies China's rise to metal dominance. Environmental Science & Technology 44 (10): 3940-3946)
- Team Stainless 2013: Recycling Ferritic Stainless Steel, Team Stainless

11.2.3 Aluminium

- ABANDA (2015): Abfallanalyse Datenbank ABANDA. <http://www.lanuv.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm> . Nordrhein-Westfalen zuletzt aufgerufen am 28.10.2015.
- BGR (2008-2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2007 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). abrufbar unter https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Publikationen/Deutschland/deutschland_node.html
- BMUB(a) (2008-2015): Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland. Tabelle 2. abrufbar unter <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/> (zuletzt abgerufen am 24.07.2017)
- BMUB(b) (2008-2016): Jahresberichte über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland. Abrufbar unter http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/wasser-abfallwirtschaft-download/artikel/jahresberichte-ueber-die-alfahrzeug-verwertungsquoten-in-deutschland/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=599 (zuletzt abgerufen unter 24.07.2017)
- Buchner, Laner (2015): Die österreichische Aluminiumbilanz 2010 aus abfallwirtschaftlicher Perspektive. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Vol. 67. Seite 28-34, ISSN: 0945-358X
- Dechema (2015): Anorganische Rohstoffe – Sicherung der Rohstoffbasis von morgen. Positionspapier des Temporären ProcessNet-Arbeitskreises „Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft“. Frankfurt: Dechema e.V., November 2015. ISBN: 978-3-89746-177-2
- DESTATIS (2009-2017): Statistisches Bundesamt. Umwelt – Abfallentsorgung 2007-2015 – Fachserie 19 Reihe 1. URL: https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202 (letzter Aufruf 07.03.2016). Wiesbaden 2009-2017.
- EAA OEA (2006): European Aluminium Association and Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters: Aluminium Recycling in Europe. Brussels, 2006
- EdDE (2015): Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.: Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen – Bewertung der Ressourceneffizienz. Köln, Oktober 2015
- GDA (2012): Aluminiumanteil in europäischen Kraftfahrzeugen steigt weiter an. Düsseldorf: Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. 21. Mai 2012
- GDA (2014a): Schätzung der Hauptverwendungsgebiete für Aluminium Stand Juli 2014. In (WVM 2014), Seite 7
- GDA (2014b): Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. Presseinformation Verwertung von Aluminiumverpackungen steigt weiter. Düsseldorf: Dezember 2014

IAI (2014): The International Aluminium Institute Regional Mass Flow Models 2012 (Part A) (2014) Europe <http://www.world-aluminium.org/publications/#850>

Martens (2011): Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2011. ISBN 978-3-8274-2640-6

Paulus (2005): Ökonomische und ökologische Effekte der Nutzung des Werkstoffs Aluminium - Ein Beitrag zur Berücksichtigung der Nutzungsphase in der modellgestützten Stoffstromanalyse. Von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften genehmigte Dissertation vorgelegt von Andrea Paulus aus Hilden. Aachen RWTH 2005. <http://publications.rwth-aachen.de/record/60917>

WVM (2008-2016): Wirtschaftsvereinigung Metalle. Die Statistik der Nichteisen-Metallindustrie [http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für die Jahre 2007-2015](http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für%20die%20Jahre%202007-2015) (zuletzt abgerufen am 25.07.2017)

11.2.4 Kupfer

ABANDA (2015): Abfallanalysendatenbank ABANDA. <http://www.lanuv.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm> . Nordrhein-Westfalen zuletzt aufgerufen am 28.10.2015.

Aurubis (2015): Umweltbericht 2015 Webangebot unter: <https://www.aurubis.com/de/de/shared/corp/produkte--leistungen/recycling/technologie>

BGR (2008-2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2007 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). abrufbar unter https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Publikationen/Deutschland/deutschland_node.html

BMUB(a) (2008-2015): Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland. Tabelle 2. abrufbar unter <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/> (zuletzt abgerufen am 24.07.2017)

BMUB(b) (2008-2016): Jahresberichte über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland. Abrufbar unter http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/wasser-abfallwirtschaft-download/artikel/jahresberichte-ueber-die-alfahrzeug-verwertungsquoten-in-deutschland/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=599 (zuletzt abgerufen unter 24.07.2017)

DESTATIS (2009-2017): Statistisches Bundesamt. Umwelt – Abfallentsorgung 2007-2015 – Fachserie 19 Reihe 1. URL: https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202 (letzter Aufruf 07.03.2016). Wiesbaden 2009-2017.

Deutsches Kupferinstitut (2015): Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V. Website: <https://www.kupferinstitut.de/de.html> , zuletzt erreicht am 28. Oktober 2015

EdDE (2015): Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.: Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen – Bewertung der Ressourceneffizienz. Köln, Oktober 2015

European Copper Institute (2012): The copper flow model European Copper Institute, Avenue de Tervueren 168, b-10, 1150 Brussels / Website: <http://www.copperalliance.eu/about-copper/recycling>

GDB (2014): Hauptverwendungsgebiete Kupfer 2013, Schätzung des Gesamtverbandes der Deutschen Buntmetallindustrie. Zitiert in WVM 2014

Gößling-Reisemann et al. (2007): Kupferzyklen Deutschland Projektbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Bremen und Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse – Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme (Hrsg.), Oktober 2007

Hillebrandt et al (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. UBA-Texte 19/05. Dessau-Roßlau: 2005 zitiert in: Jänsch, Römbke 2009

Jänsch, Römbke (2009): Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff: Ökologische Auswirkungen der Akkumulation von Kupfer im Boden. UBA Texte 10/09 ISSN 1862-4804. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt April 2009

Ladewig (2008): Kupfer im Automobil – Potential bis 2020. In: Metall 62. Jahrgang 10/2008, Seite 618 ff

Martens (2011): Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2011. ISBN 978-3-8274-2640-6

Müller, F.; Lehmann, C. et al. (2016): Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän. Umweltbundesamt (Hrsg.). Dessau-Roßlau.

MaRes (2011): Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen. Abschlussbericht zu AP2. Abschlussbericht des Arbeitspaketes 2 des Projektes „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) Ressourceneffizienzpapier 2.8. Wuppertal: Dezember 2011. ISSN 1867-0237

Tikana (2016): Persönliche Korrespondenz mit Ladji Tikana. 06.06.2016

WVM (2008-2016): Wirtschaftsvereinigung Metalle. Die Statistik der Nichteisen-Metallindustrie [http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für die Jahre 2007-2015](http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für%20die%20Jahre%202007-2015) (zuletzt abgerufen am 25.07.2017)

Wöhrle et al. (2012): Phthalocyanine, von Farbstoffen zu Materialien für Optik und Photoelektronik. In: Chem. Unserer Zeit, 2012, 46, 12 – 24. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

11.2.5 Zink

ABANDA (2016): Abfallanalytischen Datenbank ABANDA. <http://www.lanuv.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm> . Nordrhein-Westfalen zuletzt aufgerufen am 27.02.2016.

Von Billerbeck (2014): Verarbeitung von Filterstäuben aus der Elektrostahlerzeugung im Wälzprozess. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 387-398

BGR (2008-2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2007 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). abrufbar unter

https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Publikationen/Deutschland/deutschland_node.html

BGR (2015): Zink Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Juli 2015

DESTATIS (2009-2017): Statistisches Bundesamt. Umwelt – Abfallentsorgung 2007-2015 – Fachserie 19 Reihe 1. URL: https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202 (letzter Aufruf 07.03.2016). Wiesbaden 2009-2017.

Dorner, U. (2015): Rohstoffrisikobewertung – Zink. – DERA Rohstoffinformationen 25. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). ISBN: 978-3-943566-22-2 (PDF)

GDB (2010): Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie Zink. URL: www.gdb-info.de/ Informationen zu Zink vom 27. Mai 2010 zuletzt besucht am 7. März 2016

GDB (2014): Hauptverwendungsgebiete Zink – 2013. Schätzung Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie Zink. URL: www.gdb-info.de/

Grund (2014): Ressourcen- und Klimaschutz durch Zinkrecycling in der EU. In: Erzmetall World of Metallurgy , No. 67. Seite 202 ff

Initiative Zink ohne Datum: Ressourceneffizienz mit Zink. – Zinkinfo – Informationen aus der Welt des Zinks, Ausgabe 12. URL: <http://www.initiative-zink.de/service/mediathek/newsletter/> erreicht am 7. März 2016

Krüger (2002): Sachbilanz Zink erstellt im Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie der RWTH Aachen. ISBN 3-89653-939-6. Aachen: Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag

Müller et al. (2017): Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän. Umweltbundesamt (Hrsg.). Dessau-Roßlau.

Nordenhamer Zinkhütte ohne Datum: Firmenpräsentation Glencore Nordenhamer Zinkhütte GmbH

UBA (2011): Batterierecycling in Deutschland: Rücknahme- und Verwertungsergebnisse 2009. Dessau-Roßlau: 6. Juli 2011

UNEP (2011): Recycling of Metals - A Status Report. United Nations Environmental Programme. ISBN: 978-92-807-3161-3

WVM (2008-2016): Wirtschaftsvereinigung Metalle. Die Statistik der Nichteisen-Metallindustrie [http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für die Jahre 2007-2015](http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für%20die%20Jahre%202007-2015) (zuletzt abgerufen am 25.07.2017)

WV Stahl (2014): Statistisches Jahrbuch Stahlindustrie 2013/2014.

11.2.6 Blei

Allum (2016): Allergie, Umwelt und Gesundheit. Blei – Vorkommen und Verwendung. <https://www.allum.de/stoffe-und-ausloeser/blei/vorkommen-und-verwendung> (abgerufen am 7.1.2016)

Aurubis (2016): Metallrecycling. <https://www.aurubis.com/de/de/shared/corp/produkte--leistungen/recycling/metallrecycling> (abgerufen am 2.2.2016)

BBH (2016): Unternehmensbroschüre BBH - Primärhütte mit QSL-Technologie; http://www.berzelius.de/berzelius/dokumente/BBH_D.pdf; (abgerufen am 2.2.2016)

BGR (2008-2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2007 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). abrufbar unter https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Publikationen/Deutschland/deutschland_node.html

BMUB (2017): Statistik Altbatterien. Stand: 04.07.2017. <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/statistik-altbatterien/> (abgerufen am 24.07.2017)

BSB (2016): Berzelius BSB Sekundärbleihütte mit Compoundieranlage; <http://www.berzelius.de/berzelius/bsb/?navid=3>; (abgerufen am 2.2.106)

Buchholz (2017): Wirtschaftsvereinigung Metalle Herr Buchholz. Telefon- und Mailaustausch. Juli 2017

Buchholz (2016): Wirtschaftsvereinigung Metalle Herr Buchholz. Telefon- und E-Mailaustausch Januar/Februar 2016.

Elektronikinfo (2016): Bleiakumulatoren. <http://www.elektronikinfo.de/strom/bleiakkus.htm>, (abgerufen am 11. 1.2016)

Enius (2016): Schadstoffinformationen Blei. <http://www.enius.de/schadstoffe/blei.html> abgerufen am 20.1.2016

GDB (2016): Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie: Hauptverwendungsgebiete Blei – 2013. http://www.gdb-info.de/wvmprofi/medien/doc_4076_201554134633.pdf (abgerufen am 11. 1.2016)

ILA (2015): International Lead Association: Lead Action 21. Environmental and social responsibility for the 21st Century. Lead Recycling, November 2015; http://www.ila-lead.org/UserFiles/File/ILA9927%20FS_Recycling_V08.pdf

JCI (2016): Johnson Controls. Wir gehen voran beim Recycling von Blei-Säure-Batterien. <http://www.varta-automotive.com/de/de/environment/recycling/> (abgerufen am 2.2.2016)

MRU (2016): Berzelius MRU. Sekundärbleihütte mit integrierter Sonderabfallverbrennungsanlage. <http://www.berzelius.de/berzelius/mru/?navid=4> (abgerufen am 2.2.2016)

RLG (2016): Reverse Logistics GmbH: Blei: Der älteste Wertstoff-Kreislauf der Welt. <http://www.return-to-value.com/de/blei-der-aelteste-wertstoff-kreislauf-der-welt> (abgerufen am 20.1.2016)

RoHS (2011): RICHTLINIE 2011/65/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:DE:PDF>

UBA (2015): Umweltbundesamt: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien> (abgerufen am 7.1.2016)

USGS (2015): U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries - Lead; January 2015; <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/mcs-2015-lead.pdf>

WVM (2008-2016): Wirtschaftsvereinigung Metalle. Die Statistik der Nichteisen-Metallindustrie [http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für die Jahre 2007-2015](http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für%20die%20Jahre%202007-2015) (zuletzt abgerufen am 25.07.2017)

Weser-Metall (2016): Unser Unternehmen <http://www.recylex-germany.com/de/wmg/unternehmen.html> (abgerufen am 2.2.2016)

11.2.7 Zinn

ABANDA (2016): Abfallanalysendatenbank ABANDA. <http://www.lanuv.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm> . Nordrhein-Westfalen zuletzt aufgerufen am 27.02.2016.

BGR (2008-2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2007 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). abrufbar unter

https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Publikationen/Deutschland/deutschland_node.html

BGR (2014a): DERA Rohstoffinformationen 20: Zinn –Angebot und Nachfrage bis 2020. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. ISBN: 978-3-943566-12-3. Berlin: März 2014

BGR (2014b): Zinn – Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover Juni 2014

DESTATIS (2009-2017): Statistisches Bundesamt. Umwelt – Abfallentsorgung 2007-2015 – Fachserie 19 Reihe 1. URL:

https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202 (letzter Aufruf 07.03.2016). Wiesbaden 2009-2017.

Kawohl (2011): Multi-Metal Recycling bei der Aurubis AG Vortrag im Praxisdialog „Ressourcen- und materialeffiziente Produktgestaltung“ am 2. November 2011 in Berlin.

Maurell-Lopez (2012): Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott. In: Thomé-Kozmiensky 2012, Seite 413 ff

RoHS (2011): Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. L 174/88 Amtsblatt der Europäischen Union vom 1.7.2011

Rotter (2014): Anlagenbilanzierung als Bewertungsinstrument für ein Qualitätsrecycling von Elektroaltgeräten In: Thomé-Kozmiensky 2014, Seite 189 ff

WVM (2008-2016): Wirtschaftsvereinigung Metalle. Die Statistik der Nichteisen-Metallindustrie

[http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für die Jahre 2007-2015](http://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/für%20die%20Jahre%202007-2015) (zuletzt abgerufen am 25.07.2017)

11.2.8 Silber

Aurubis (2016a): Recycling bei Aurubis. URL: <https://www.aurubis.com/de/de/shared/corp/produkte--leistungen/seite-recycling> (letzter Aufruf 07.03.2016). Hamburg 2016.

Aurubis (2016b): Die Technologie des Recyclings. URL:

https://www.aurubis.com/binaries/content/gallery/aurubisrelaunch/grafiken/grafik-vom-kupfer-recyclingmaterial-zur-kathode_.png (letzter Aufruf 07.03.2016). Hamburg 2016.

Aurubis (2016c): Greif, S.: E-Mailkorrespondenz. Hamburg 2016.

BGR (2008-2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2007 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). abrufbar unter

https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Publikationen/Deutschland/deutschland_node.html

BMUB (2008-2015): Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland. Tabelle 2. abrufbar unter

<http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/> (zuletzt abgerufen am 24.07.2017)

Daxbeck et al. (2000): Abwasserrelevante Silberströme in Wien – Konkretisierung der Ursachen bzw. Verursacher von Silberemissionen in die Kanalisation und Maßnahmenvorschläge zur Vermeidung. Wien 2000.

DESTATIS (2009-2017): Statistisches Bundesamt. Umwelt – Abfallentsorgung 2007-2015 – Fachserie 19 Reihe 1. URL:

https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202 (letzter Aufruf 07.03.2016). Wiesbaden 2009-2017.

DESTATIS (2016a): Statistisches Bundesamt. GENESIS-Online Datenbank. URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (letzter Aufruf 07.03.2016). Wiesbaden 2016.

DESTATIS (2016b): Statistisches Bundesamt. Bevölkerung auf Grundlage des Zensus 2011. URL:

https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/Zensus_Geschlecht_Statsangehoerigkeit.html (letzter Aufruf 07.03.2016). Wiesbaden 2016.

Eurostat (2016): Statistisches Amt der Europäischen Union. Außenhandelsstatistik für Silberschrott 2013. Luxemburg 2016.

Gsodam et al. (2014): The Austrian silver cycle: A material flow analysis. Resources, Conservation and Recycling 88 (2014), S. 76-84.

Lanzano et al. (2006): The contemporary European silver cycle. Resources, Conservation and Recycling 46 (2006), S. 27-43.

MaRes (2011): Materialeffizienz & Ressourcenschonung. Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen – Abschlussbericht zu AP2. Ressourceneffizienz Paper 2.8, ISSN 1867-0237, Wuppertal Dezember 2011.

Metal Focus (2015): Metal Focus / The Silver Institute: Silver Scrap: The Forgotten Fundamental. London 2015.

Recknagel, S.; Richter, A. (2007): Überprüfung der Schwermetallgehalte von Batterien – Analyse von repräsentativen Proben handelsüblicher Batterien und in Geräten verkaufter Batterien – Erstellung eines Probenahmeplans, Probenbeschaffung und Analytik (Hg, Pb, Cd) – Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 205 35 312. Berlin, Dessau Februar 2007.

Sachtleben (2016): Baur, M.: E-Mailkorrespondenz. Hausach 2016.

Seuferling, F. (1970): Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie – Silber – Teil A2. Springer6, Heidelberg 1970.

Silver Institute (2017): The Silver Institute / Thomson Reuters: World Silver Survey 2017. London, Washington, D.C., 2017.

Silver Institute (2015): The Silver Institute / Thomson Reuters: World Silver Survey 2015 – A Summary. London, Washington, D.C. 2015.

UBA (2012): Batterien und Akkus – Ihre Fragen – Unsere Antworten zu Batterien, Akkus und Umwelt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4414.pdf> (letzter Aufruf 07.03.2016). Dessau 2012.

11.2.9 Gold

Agosi (2016): Allgemeine Gold- und Silberanstalt AG; persönliche E-Mail-Information Ulrike Beuchle 12.2.2016

ARD (2016): „Gold, Träume, Staub und großes Geld – Dokumentation deutsch ARD“ abgerufen am 8.2.2016 unter <https://www.youtube.com/watch?v=omu-mgxomKs>

Aurubis (2014): Aurubis Nachhaltigkeitsbericht 2013.

<https://www.aurubis.com/binaries/content/assets/aurubisrelaunch/files/verantwortung/nachhaltigkeitsbericht-aurubis-2013.pdf>

Aurubis (2016a): <https://www.aurubis.com/de/de/shared/corp/produkte--leistungen/seite-recycling>, abgerufen am 2.2.2016

Aurubis Geschäftsbericht Geschäftsjahr 2014/2015 (2015) . Analystenkonferenz 11.12.2015, abgerufen am 2.2.2016 https://www.aurubis.com/binaries/content/assets/aurubisrelaunch/files/prasentationen/2014-15/conferencecall_gj-2014_15_de.pdf

Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz (2015): Recycling und Rohstoffe Band 8, Artikel „Perspektiven der zunehmenden Fahrzeugelektronik für das Altfahrzeugrecycling“ von Kohlmeyer, Groke, Sander, Bergamos. Hrsg.: Thome-Kozmiensky, Goldmann

Beuchle 2016: Ulrike Beuchle, Agosi AG; Mailaustausch, 12.2.2016

BGR (2008-2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2007 (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). abrufbar unter https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Publikationen/Deutschland/deutschland_node.html

BMUB(a) (2008-2015): Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland. Tabelle 2. abrufbar unter <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/> (zuletzt abgerufen am 24.07.2017)

BMUB(b) (2008-2016): Jahresberichte über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland. Abrufbar unter http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/wasser-abfallwirtschaft-download/artikel/jahresberichte-ueber-die-alfahrzeug-verwertungsquoten-in-deutschland/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=599 (zuletzt abgerufen unter 24.07.2017)

Deutsche Bundesbank (2015): Bundesbank veröffentlicht Goldbarrenliste. Frankfurt am Main, 07.10.2015; abgerufen am 03.02.2016: https://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Themen/2015/2015_10_07_gold.html

ElmoReL (2016): Projekt “Elektrofahrzeugrecycling 2020 – Schlüsselkomponente Leistungselektronik”; gefördert durch das BMUB; Projektleitung durch das Öko-Institut; Projektwebsite: <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-von-2013/forschung-und-entwicklung-zum-thema-batterierecycling/ElmoReL2020>

Eurostat (2016a): Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Abgerufen am 03.02.2016

<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> / <http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/weee>

Eurostat (2016b): End-of-life vehicles: Reuse, recycling and recovery, Totals. Abgerufen am 03.02.2016

<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> / <http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/elvs>

Fcx (2016): Freeport-McMoRan: Copper Concentrate; abgerufen am 09.02.2016 unter

http://www.fcx.com/resources/copper_concentrate.htm

G123 (2016): Goldankauf123.de: Die Scheideanlage kauft Gold, Silber Platin & Palladium!; Abgerufen am 18.3.2016

<http://www.goldankauf123.de/scheideanstalt.html>

GFMS (2015): GFMS Gold Survey 2015; published April 2015 by Thomson Reuters

Hagelüken et al. (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle. Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. Clausthal-Zellerfeld

Kleine/Krautbauer (2010): Goldbesitz der Privatpersonen in Deutschland, Research Center For Financial Services, Steinbeis-Hochschulen Berlin, 2010, http://www.steinbeis-research.de/pdf/20101102_Goldstudie_RFS-Steinbeis_Kurzfassung.pdf

MaRess (2011): Materialeffizienz & Ressourcenschonung. Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Ressourceneffizienz Paper 2.2., ISSN 1867-0237, Wuppertal, November 2011

UBA (2012): Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Recyclings an der Wertschöpfung. Dessau-Roßlau, Mai 2012.

Uni-Freiburg (2013): Goldig I – Gewinnung, Raffination, Eigenschaften und Verwendung von Gold. AC Oberseminar, 10. 2013.

abgerufen am 03.02.2016 http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Seminare/gold_os.pdf

Unze (2016): Das Gewicht Unze: Die Maßeinheit Unze und ihre Geschichte; abgerufen am 09.02.2016 unter

<http://www.unze.de/unze.html>

WGC (2016): World Gold Council: Gold Demand Trends. Fully year 2015. February 2016. <https://www.gold.org/supply-and-demand/gold-demand-trends/back-issues/gold-demand-trends-full-year-2015>

Wrap (2012): Working together for a world without waste: Electrical product material composition

<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Electrical%20product%20material%20composition%20overview.pdf>

11.2.10 Platin und Palladium

BAST (2001): Abgasuntersuchung – Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat. BAST-Bericht F37.

BMUB(a) (2008-2015): Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland. Tabelle 2. abrufbar unter

<http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete/> (zuletzt abgerufen am 24.07.2017)

BMUB(b) (2008-2016): Jahresberichte über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland. Abrufbar unter

http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/wasser-abfallwirtschaft-download/artikel/jahresberichte-ueber-die-alfahrzeug-verwertungsquoten-in-deutschland/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=599 (zuletzt abgerufen unter 24.07.2017)

Buchert, M. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38. Hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LA-NUV NRW). Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter

http://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_commercedownloads/30038.pdf.

Buchert, M. et al. (2015): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen. 2. Zwischenbericht (nicht publiziert). Öko-Institut e.V.; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH (IZT).

Eurostat (2016): Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Products put on the market. Online verfügbar unter

<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do>; zuletzt geprüft am 28.01.2016.

Hagelüken, C. et al. (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle. Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. Clausthal-Zellerfeld: GDMB Medienverlag.

JM (2016): Market data tables. Platin and Palladium 1975-2013. Johnson Matthey (JM). Online verfügbar unter <http://www.platinum.matthey.com/services/market-research/market-data-tables>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2016.

Lucas, R. et al. (2011): Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM). Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.2. des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Online verfügbar unter http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes_AP2_3.pdf.

ReStra (2015): Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien. AP3: Darstellung verfügbarer Aufbereitungs- und Recyclingtechnologien für strategische Metalle (nicht publiziert).

Schmidt, M. (2015): Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle. DERA Rohstoffinformationen 26. Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (DERA). Berlin. Online verfügbar unter http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/studie_Platin_2015.pdf

Wittmer, D. et al. (2011): Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH (IZT); Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu). Online verfügbar unter http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes_AP2_1.pdf.

Wrap (2012): Working together for a world without waste: Electrical product material composition <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Electrical%20product%20material%20composition%20overview.pdf>.

11.3 Mineralische Rohstoffe

11.3.1 Recycling-Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen

Bleher, D. et al. (2017): Planspiel Mantelverordnung (Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes) Planspiel mit dem Ziel einer Gesetzesfolgenabschätzung zu den Auswirkungen der Mantelverordnung (aktuelle Entwurfsfassung). Öko-Institut e.V., Prognos AG, Zentrum für Angewandte Geowissenschaft / Fachbereich Geowissenschaften / Universität Tübingen, Gewerbliches Institut für Umweltanalytik GmbH, Teningen 2017.

DAV (2016): Asphaltproduktion in Deutschland. Stand März 2016. Deutsche Asphaltverband e.V. Online verfügbar unter <http://www.asphalt.de/media/exe/198/a5169b76909b9ca97469448ff61f3f9/asphaltp2015.pdf>, zuletzt geprüft am 10.03.2016.

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Bergmann, T.; Mottschall, M. (2015): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub. Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung. Endbericht 2015. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu).

Kreislaufwirtschaft Bau (2011a): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2006. Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2006.

Kreislaufwirtschaft Bau (2011b): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2008. Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2008.

Kreislaufwirtschaft Bau (2013): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2010. Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010.

Kreislaufwirtschaft Bau (2015): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2012. Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012.

Kreislaufwirtschaft Bau (2017): Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2014. Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014.

Müller, F., Lehmann, C., Kosmol, J., Keßler, H. und Bolland, T. (2017): Urban Mining - Ressourcenschonung im Anthropozän. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2017, 69 S.

Statistisches Bundesamt (2016): Umwelt. Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallkennzahlen, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) 2014 (2016). Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. Online verfügbar unter

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/AbfallbilanzPDF_5321001.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 10.11.2016.

11.3.2 Asphaltgranulat

DAV Wiederverwendungen (2014): Wiederverwendungen von Asphalt. Nachhaltigkeit auf höchstem Niveau. Überarbeitung 2014. Online verfügbar unter

http://www.asphalt.de/media/exe/134/867e44dfcb2e06a89a88f9911e19d02d/wiederverwenden_2014.pdf, zuletzt geprüft am 10.03.2016.

Deutscher Asphaltverband e.V (DAV) (2016): Asphaltproduktion in Deutschland. Stand März 2016. Online verfügbar unter <http://www.asphalt.de/media/exe/198/a5169b769099b9ca97469448ff61f3f9/asphaltp2015.pdf>, zuletzt geprüft am 10.03.2016.

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Bergmann, T.; Mottschall, M. (2015): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub. Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung. Endbericht 2015. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu).

Täube, André (2009): Neues Technisches Regelwerk stärkt Wiederverwendung. Wiederverwendung von Asphaltgranulat. Deutscher Asphaltverband e.V (DAV). Online verfügbar unter http://taeube.com/fileadmin/pdf/asphalt-02-2009_Taeube_Wiederverwendung.pdf, zuletzt geprüft am 10.03.2016.

11.3.3 Schlacken und Hüttensand

Achternbosch, M.; Bräutigam, K.-H. (2000): Herstellung von Zementklinker - Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt. Wissenschaftliche Berichte . FZKA 6508. <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/fzk/6508/6508.pdf>

AG Hüttenkalk (2016): Konverterkalk feucht-körnig. Arbeitsgemeinschaft Hüttenkalk e.V. Online verfügbar unter <http://www.hk-kalke.de/pinfo.php>, zuletzt geprüft am 29.02.2016.

Bialucha, R. et al. (2014): Verwendung von Stahlwerksschlacken in Landschaftsbaumaßnahmen und Lärmschutzparks. Verwendung von Stahlwerksschlacken. In: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, zuletzt geprüft am 03.03.2016.

Dehoust, G. et al (2008): Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut e.V.

FEhS-Institut (2016a): Düngemittel. FEhS - Institut für Baustoff Forschung e.V. (FEhS-Institut). Online verfügbar unter <http://www.fehs.de/eisenhuettenschlacken/anwendungsbereiche/duengemittel/>, zuletzt geprüft am 29.02.2016.

FEhS-Institut (2016b): Eisenhüttenschlacken. FEhS - Institut für Baustoff Forschung e.V. (FEhS-Institut). Online verfügbar unter <http://www.fehs.de/eisenhuettenschlacken/>, zuletzt geprüft am 26.02.2016.

FEhS-Institut (2016c): Stahlwerksschlacke. FEhS - Institut für Baustoff Forschung e.V. (FEhS-Institut). Online verfügbar unter <http://www.fehs.de/eisenhuettenschlacken/stahlwerksschlacke/>, zuletzt geprüft am 29.02.2016.

FEhS-Institut (2016d): Straßenbau. FEhS - Institut für Baustoff Forschung e.V. (FEhS-Institut). Online verfügbar unter <http://www.fehs.de/eisenhuettenschlacken/anwendungsbereiche/strassenbau/>, zuletzt geprüft am 29.02.2016.

FEhS-Institut (2016e): Wasserbau. FEhS - Institut für Baustoff Forschung e.V. (FEhS-Institut). Online verfügbar unter <http://www.fehs.de/eisenhuettenschlacken/anwendungsbereiche/wasserbau/>, zuletzt geprüft am 29.02.2016.

FEhS-Institut Schlacke (2007): Ein Produkt mit ungewöhnlicher Vielfalt. Schlacke empfiehlt sich für überraschend viele Anwendungsbereiche. Schlacke. Ökologie und Vernunft. Eine Information der Stahlindustrie in Nordrhein-Westfalen. Hg. v. FEhS - Institut für Baustoff Forschung e.V. (FEhS-Institut). Online verfügbar unter http://www.fehs.de/uploads/media/schlacke_deutsch.pdf.

Merkel, T. (2008 - 2016): Erhebungen zu Produktion und Einsatz von Hochofen- und Stahlwerksschlacke. In: Report, FEhS - Institut für Baustoff Forschung e.V. Online verfügbar unter <http://www.fehs.de/service/downloads/report/>.

Rheinkalk KDI (2016): Konverterkalk der silikatische Mehrwirkungskalk. Rheinkalk KDI GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <http://www.hk-kalke.de/pinfo.php>, zuletzt geprüft am 29.02.2016.

Schüler, S. et al. (2014): Metallurgische Maßnahmen zur Einstellung der Nachhaltigkeit von Elektroofenschlacke. In: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

SST/DIW (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steinen-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Aktualisierung der Studie SST/DIW (2012)

Stoll, R.-D. et al. (2013): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. Hg. v. BBS - Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.

VDZ (2015): Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie. Analyse des Status quo und Perspektiven.

Verkehrswege (2004): Stahlwerksschlacken im Straßen-, Wege- und Wasserbau. Fachverband Eisenhüttenschlacken e. V. Online verfügbar unter http://www.fehs.de/uploads/media/SWS_fuer_Verkehrswege.pdf, zuletzt geprüft am 03.03.2016.

Wendehorst, R. (1994): Baustoffkunde. Unter Mitarbeit von Dieter Vollenschaar. Hannover: Curt R. Vincentz.

11.3.4 Flugaschen und REA-Gips

Briese, D. et al. (2014): Markt für Sekundärrohstoffe in der Baustoffindustrie bis 2020 – Kraftwerksnebenprodukte, MVA-Schlacken und Recycling-Baustoffe In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 117-128.

Buchert et al. (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. UBA-Texte 33/2017.

Hamm, H. et al. (2004): 25 Jahre Betriebserfahrung mit der Verwendung von REA-Gips in der europäischen Gipsindustrie. Cement International Issue No.: 4/2004, pp. 92-102. http://www.gips.de/wp-content/uploads/downloads/2011/11/merkblatt_25jahre_betriebserfahrung_rea-gips.pdf

Recycling Technologies Bayern (2016): Flugaschen. <https://www.recycling-technologies-bayern.de/index.php/rtb/Recycling-Loesungen/Aschen-und-Staeube/Flugasche>

Schießl, P. (1990): Wirkung von Steinkohlenflugasche in Beton. Beton 40 (1990), H. 12, S. 519-523

SST/DIW (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steinen-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Aktualisierung der Studie SST/DIW (2012)

SST/DIW (2012): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steinen-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland.

Stock, U. et al. (2013): Zertifizierte Steinkohlenflugasche im Spannungsfeld zwischen Bauproduktenrecht und Abfallrecht. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Asche-Schlacke-Stäube aus Metallurgie und Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 659-676.

Universität der Bundeswehr München (ohne Jahrgang): Baustoffe aus Recyclaten und Nebenprodukten. Vorlesungsskript.

VGB Powertech (2016): Produktion und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten in Deutschland im Jahr 2011. <https://www.vgb.org/kwnebenprodukte.html>

VGB Powertech (2017): Produktion und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten in Deutschland verschiedener Jahre. Persönliche Kommunikation.

11.3.5 Verpackungsglas

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (1995): Ökoinventare für Verpackung.

Bundesverband der deutschen Glasindustrie (2014): Produktion von Glas und Glaswaren nach Branchensektoren: 2013 und 2014. http://www.bvglas.de/fileadmin/media/Presse/Jahresberichte/Produktion_Glas_Glaswaren_Branchensektoren_2013_2014.pdf

Bundesverband der deutschen Glasindustrie (2014): Importe von Glas und Glaswaren nach Branchensektoren: 2013 und 2014. http://www.bvglas.de/fileadmin/media/Presse/Jahresberichte/Einfuhr_Glas_Glaswaren_2013_2014.pdf

Bundesverband der deutschen Glasindustrie (2014): Exporte von Glas und Glaswaren nach Branchensektoren: 2013 und 2014. http://www.bvglas.de/fileadmin/media/Presse/Jahresberichte/Ausfuhr_Glas_Glaswaren_2013_2014.pdf

Flinke, E. et al. (2000) Ökobilanz für Getränkeverpackung II, UBA-Texte. 37/2000 (und dazugehörige Materialsammlungen).

Kaßmann, M. (2014): Grundlagen der Verpackung: Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung.

Lange, Joachim (1993): Rohstoffe der Glasindustrie.

Schüler, Kurt (2009): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2007. UBA-Texte 35/2009.

Schüler, Kurt (2010): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2008. UBA-Texte 58/2010.

Schüler, Kurt (2012a): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2009. UBA-Texte 13/2012.

Schüler, Kurt (2012b): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2010. UBA-Texte 53/2012.

Schüler, Kurt (2015a): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2011. UBA-Texte 49/2015.

Schüler, Kurt (2015b): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2012. UBA-Texte 50/2015.

Schüler, Kurt (2015c): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2013. UBA-Texte 101/2015.

Schüler, Kurt (2016): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2014. UBA-Texte 64/2016.

11.4 Kunststoffe

Arena, U. et al. (2003): Life Cycle Assessment of Plastic Packaging Recycling System. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 8(2), pp. 92-98.

Bachhiesl, Mario et al. (2001): Untersuchungen zur thermischen Verwertung von Biomasse und heizwertreichen Abfallfraktionen als Sekundärbrennstoffe in Wärmekraftwerken. Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen. Forschung im Verbund Schriftenreihe Band 73. Hrsg. Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft (Verbund). Wien

Bothe, Dietmar (2017): Restabfallanalysen: Was steckt in unserem Müll?. Artikel in Müll und Abfall. Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Ausgabe 07 / 2017. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG

BUND (2010): Wege zu einer nachhaltigen Abfallwirtschaft. Bund Positionen Nr. 49.

CABKA (2016): Produktpalette der CABKA Group. <http://cabka.com/de/de/m/produkte/> aufgerufen am 07.09.2016

Consultic (2008-2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007 bis 2013. Consultic Marketing & Industrierberatung GmbH. Alzenau

Consultic (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011. Consultic Marketing & Industrierberatung GmbH. Alzenau

Consultic (2014a): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2013. Consultic Marketing & Industrierberatung GmbH. Alzenau

Consultic (2014b): Analyse der PVC-Produktion, Verarbeitungs-, Abfall- und Verwertungsströme in Deutschland 2013. Consultic Marketing & Industrierberatung GmbH. Alzenau

Dehne, Iswing (2015): Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen. Bearbeitung u.e.c. Berlin und Öko-Institut. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3712 93 312. Texte 18/2015. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Dehoust, Günter (2012): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe. Bearbeitung Öko-Institut e.V. und HTP GmbH. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3711 33 316. Texte 40/2012. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

EcoEnergy (2008): Chlor - unterschätzte Kostenexplosion in der EBS-Verbrennung. Beitrag beim Technikforum Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen VDI-Wissensforum. 28./29. April 2008

GVM (2015a): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2011. Bearbeitung Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (GVM). Umweltforschungsplan des BMU FKZ 21928. Texte 49/2015. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

GVM (2015b): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2012. Bearbeitung GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH Mainz. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3713 33 310. Texte 50/2015. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

GVM (2015c): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2013. Bearbeitung GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH Mainz. Texte 101/2015. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

IK (2015): Getränkeflaschen aus PET - Meister des Recyclings. Pressemitteilung der IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. Ergebnisse einer Studie in Bearbeitung der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (GVM).

http://www.kunststoffverpackungen.de/getraenkeflaschen_aus_pet___meister_des_recyclings_5657.html Bad Homburg. aufgerufen am 07.04.2016

PlasticsEurope (2017): An Eco-profile and Environmental Product Declaration of the PET Manufacturers in Europe. PET Bottle Grade.

PlasticsEurope (2014a): An Eco-profile and Environmental Product Declaration of the European Plastics Manufactures. HDPE, LDPE, LLDPE.

PlasticsEurope (2014b): An Eco-profile and Environmental Product Declaration of the European Plastics Manufactures. PP.

PlasticsEurope (2012): An Eco-profile and Environmental Product Declaration of the European Plastics Manufactures. GPPS, HIPS.

PlasticsEurope (2005): An Eco-profile and Environmental Product Declaration of the European Plastics Manufactures. PVC bulk.

PVC plus (2011): Alles über PVC - Von der Herstellung bis zum Recycling. Herausgeber PVC plus Kommunikations GmbH. Bonn

Statistisches Bundesamt (2009-2014): Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1 für die Jahre 2007 bis 2012. Wiesbaden

WRAP (2008): LCA of Management Options for Mixed Waste Plastics. Final Report.

Ye, L. et al. (2017): Life Cycle Assessment of Polyvinyl Chloride Production and its Recyclability in China. In: Journal of Cleaner Production No. 124, pp. 2965-2972.

11.5 Organische Abfälle

11.5.1 Altholz

Dehoust, G. et al. (2010): Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Bearbeitung Öko-Institut e.V. und IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3708 31 302. Texte 06/2010. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Erbreich, M. (2004): Die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF). Dissertation an der Universität Hamburg Fachbereich Biologie. Hamburg

Egger (2016): Auskunft zur Verwertung von Altholz bei der Herstellung von MDF-Platten. Egger GmbH & Co. OG. E-Mail vom 06.09.2016

Gärtner, S. et al. (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz. Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg

Glunz (2016): Auskunft zur Verwertung von Altholz bei der Herstellung von MDF-Platten. Glunz AG. E-Mail vom 05.09.2016

Kuntz (2011): Untersuchungen zur Erweiterung der Rohstoffbasis für die Herstellung von Holzspanplatten durch Recycling von Produktionsreststoffen und Gebrauchtholzspanplatten. Durchführung Lud. Kuntz GmbH. Morbach

LfU Bayern (2012): Altholz. infoBlatt Abfallwirtschaft. Herausgeber Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg

Lüdtke, J. (2012): Innovative Ansätze für Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Fachtagung - Materialauswahl und Ressourceneffizienz. Hamburg

Mantau, U. et al. (2012a): Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring. Altholz im Entsorgungsmarkt – Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg

Mantau, U. (2012b): Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg

Mantau, U. et al. (2017): Holzwerkstoffindustrie 2015. Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung. Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg

Simon, R. et al. (2008): Untersuchung von Biomasse- und Altholz(heiz)kraftwerken im Leistungsbereich 5 bis 20 MW_{el} zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Abschlussbericht Phase 1. Transferstelle für Rationelle und Regenerative Energienutzung Bingen (TSB). Bingen

Statistisches Bundesamt (2009-2014): Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1 für die Jahre 2007 bis 2012. Wiesbaden

UBA (2006): Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung. Bearbeitung Institut für Energetik und Umwelt gGmbH und Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 204 41 133. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Weimar, H. (2011): Der Holzfluss in der Bundesrepublik Deutschland 2009. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft 2011/06. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Hamburg

11.5.2 PPK

BBS (2016): bbs-Zahlenspiegel 2016. Struktur- und Konjunkturdaten der Baustoff-, Steine- und Erden-Industrie. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. Berlin. 2016

Borschke, D. et al. (1997): Papierherstellung aus der Sicht eines optimierten Reststoff- und Wassermanagement. Das Papier. 21. Jahrg. Nr. 6A. Seiten 146-153. 1997. Auszugsweise im BVT-Merkblatt zur Zellstoff- und Papierindustrie

Gaggl, W. (2012): Die Verwendung von Ton in der Ziegelindustrie. Präsentation 23.11.2012

Höke, U. (2013): Forderungen der Papierfabriken an die Qualität des Altpapiers für die Herstellung grafischer Papiere. Erschienen in Recycling und Rohstoffe Band 6. 2013

PTS (2014): Rückstandsumfrage 2013. Aufkommen und Verbleib der Rückstände aus der Zellstoff- und Papierindustrie. Papiertechnische Stiftung und Verband Deutscher Papierfabriken. Wochenblatt für Papierfabrikation 10/2014

PTS (2015): Wasser- und Rückstandsumfrage in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie. Papiertechnische Stiftung und Verband Deutscher Papierfabriken. Aktuelle Papier-Rundschau Nr. 01/2015

Schüler, K. (2015): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2012. Bearbeitung GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH Mainz. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3713 33 310. Texte 50/2015. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Scur, P. (2013): Mineralische Sekundärrohstoffe für die Verwertung in der Zementindustrie. Beitrag in Asche-Schlacke-Stäube aus Metallurgie und Abfallverbrennung. Hrsg. Thomé-Kozmiensky, K. J. TK Verlag. Neuruppin

Sommer, J. et al. (2009): Reststoffverwertung in der Papierindustrie am Beispiel des Heizkraftwerkes Wörth der Papierfabrik Palm. Beitrag in Energie aus Abfall Band 6. Hrsg. Thomé-Kozmiensky, K. J. TK Verlag. Neuruppin

Statistisches Bundesamt (2009-2014): Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1 für die Jahre 2007 bis 2012. Wiesbaden

PMV (2008): Quality properties of the most important recovered paper grades in dependence of sorting conditions. TU Darmstadt Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV). Präsentation beim COST E 48 Meeting in Budapest. 16.05.2008

UBA AT (2009): Porosierungsmittel in der österreichischen Ziegelindustrie. Auftraggeber Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Österreich

VDP (2009-2015): Papierkompass der Jahre 2009 bis 2015. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn

VDP (2015): Papierkompass 2015 - Angaben zum Jahr 2013. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn

VDP (2015b): Leistungsbericht Papier 2015. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn

VDP (2017): Leistungsbericht Papier 2017. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. Bonn

VDZ (2016): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015. Verband deutscher Zementwerke. Düsseldorf 2016

11.5.3 Lebensmittel und Gartenabfälle

ASA (2010): MBA-Steckbriefe 2010/2011. Aktuelle Daten von MBA-, MBS- und MPS-Anlagen und Kraftwerken für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung. Ennigerloh

BGK (2010): BGK-Statistik 2010: Kompost und Gärprodukte. Bundesgütegemeinschaft Kompost. www.kompost.de

BGK (2015): Jahresstatistik der BGK: Verwertung auf hohem Niveau. Bundesgütegemeinschaft Kompost. www.kompost.de

BGK (2016): Vermarktung von RAL-gütesichertem Kompost im Jahr 2014. Bundesgütegemeinschaft Kompost. <http://www.kompost.de/ueber-uns/zahlen-und-fakten/markt/>

Bifa (2015): Eigenverwertung von Bioabfällen - Eigenkompostierung, Eigendeponierung, illegale Eigenentsorgung. bifa Umweltinstitut. Auftraggeber Gütegemeinschaft Kompost Region Bayern. bifa-Text Nr. 65. Augsburg

Fricke, K. et al. (2013): Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe. Endbericht zu Förderprojekt 03KB022. Bearbeitung Technische Universität Braunschweig, Bauhaus-Universität Weimar und Fraunhofer-Institut UMSICHT.

IVA (2014): Wichtige Zahlen. Düngemittel Produktion, Markt, Landwirtschaft. Industrieverband Agrar e.V. Frankfurt am Main

Jauch, M. (2012): Die Kompostierung im Garten - vom Abfall zum Dünger. Beitrag in der Schriftenreihe des BDG Heft 223, Berlin

Kern, M. et al. (2010): Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz. Bearbeitung Witzenhausen-Institut. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 3707 33 304. Texte 43/2010. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Kern, M.; Raussen, T. (2015): Biogas-Atlas 2014/2015. Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und Europa. Witzenhausen-Institut

Kranert, M. et al. (2012): Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. Bearbeitung Universität Stuttgart und Universität für Bodenkultur Wien. Umweltforschungsplan des BLE FKZ 2810HS033. Stuttgart

Krause, P. et al. (2014): Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfälle. Bearbeitung u.e.c. Berlin und GAVIA. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 371233328. Texte 84/2014. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Pohl, M. et al. (2013): Die Energieeffizienz der Bioabfallbehandlung in Abfallverbrennungsanlagen - energetische Bilanzierung. Hrsg. Thomé-Kozmiensky: Energie aus Abfall - Band 10. Neuruppin

Raussen, T. et al. (2015): Technische Ansätze zur optimierten Behandlung flüssiger Gärreste - Leitfaden Baden-Württemberg. Veröffentlichung in Biomasse-Forum 2015. Hrsg. Witzenhausen-Institut

Statistisches Bundesamt (2009-2014): Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1 für die Jahre 2007 bis 2012. Wiesbaden

StBA 2014: Produzierendes Gewerbe Düngemittelversorgung. Wirtschaftsjahr 2013/2014. Fachserie 4 Reihe 8.2. Statistisches Bundesamt. Erschienen 15.10.2014. Wiesbaden

UBA (2012): Handbuch Bioabfallbehandlung. Erfassung des Anlagenbestands Bioabfallbehandlung. Bearbeitung Ingenieurgruppe RUK und Dr. Müsken + Partner. Umweltforschungsplan des BMU FKZ 3709 33 343. Texte 54/2012. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Wagner, J. et al. (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. Bearbeitung INTECUS GmbH. Umweltforschungsplan des BMU FKZ 3709 33 316. Texte 14/2012. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

Witzenhausen (2008): Optimierung der biologischen Abfallbehandlung in Hessen. Witzenhausen-Institut. Auftraggeber Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz. Witzenhausen

11.5.4 Altreifen

Conti (2008): Schwarz sieht einfach gut aus. http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/contisoccerworld/themes/03_presscenter/02_conti_and_soccer/02_continental_einblicke/einblicke_continental_2008_02_bunte_reifen_de.html Continental. aufgerufen am 12.04.2016

Cop (2009): Ökobilanzieller Vergleich zweier Verwertungsalternativen für Altreifen: Stoffliche Verwertung und Mitverbrennung im Zementofen. Kurzfassung. Verfasser Copenhagen Resource Institute, FORCE Technology und Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

- GAVS (2015): Geringeres Altreifenaufkommen in Deutschland. Gesellschaft für Altgummi-Verwertungs-Systeme mbH (GAVS). Veröffentlichung auf Reifenpresse.de. <http://www.reifenpresse.de/2015/06/19/geringeres-altreifenaufkommen-in-deutschland/> aufgerufen am 26.08.2016
- LfU Bayern (2013): Gebrauchte- und Altreifen. infoBlatt Abfallwirtschaft. Herausgeber Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg
- Reschner, K. (2012): Recycling von Altreifen und anderen Elastomeren. Altreifen- und Gummirecycling
- Statistisches Bundesamt (2009-2014): Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1 für die Jahre 2007 bis 2012. Wiesbaden
- Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft, UBA-Texte 10/99
- UBA (1999): Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft. Texte 10/1999. Hrsg. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-bilanzen-in-abfallwirtschaft>
- UBA (2004): Informationssammlung: Best Practice Municipal Waste Management. Altreifen. <https://www.umweltbundesamt.de/informationssammlung-best-practice-municipal-waste> aufgerufen am 18.04.2016
- VDZ (2016): Zahlen und Daten. Zementindustrie in Deutschland 2016.
- wdk (2013): Altreifenverwertung in Deutschland. Fachgespräch Verwertung von Altreifen. Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V. Präsentation im Umweltbundesamt. 28. Juni 2013
- wdk (2014): Die Kautschukindustrie 2014. Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V. Frankfurt am Main
- ### 11.5.5 Alttextilien
- BR (2014): Neue Chancen für alte Stoffe? Faszination Wissen. Fernsehsendung des Bayerischen Rundfunks vom 28.04.2014. <http://www.ardmediathek.de/tv/Faszination-Wissen/Neue-Chancen-f%C3%BCr-alte-Stoffe/Bayerisches-Fernsehen/Video?documentId=20986580&bcastId=14912700> aufgerufen am 15.04.2016
- BVSE (2012): Textilrecycling - Wie geht das? Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse).
- FNR (2006): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow 2006. Herausgeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR)
- FTR (2015): Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland. Fachverband Textilrecycling (FTR). Bearbeitung Julia Korolkow RWTH-Aachen. Auftraggeber Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse)
- IVC (2016): Weltproduktion von Chemiefasern und anderen Fasern 2015. Industrievereinigung Chemiefaser e.V. <https://www.ivc-ev.de/> aufgerufen am 31.08.2016
- IVC (2015): Weltproduktion von Chemiefasern und anderen Fasern 2014. Industrievereinigung Chemiefaser e.V. <https://www.ivc-ev.de/> aufgerufen am 18.04.2016
- Kimberly (2016): Kimberly-Clark. Wischtücher. <http://www.kcprofessional.de/produkte/wischtcher> aufgerufen am 31.08.2016
- Klenatex (2016): Produkte. <http://klenatex.de/produkte/vorrein-pro-5090-wischtuecher/> aufgerufen am 31.08.2016
- Lechtenböhmer, S. et al. (2006): Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Bearbeitung Wuppertal Institut und EEFA GmbH. Umweltforschungsplan des BMUB FKZ 204 42 203/02. Texte 07/2006. Auftraggeber Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- LfU Bayern (2013b): Gebrauchte Kleidung und Textilien. infoBlatt Abfallwirtschaft. Herausgeber Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg
- Spohn, C. (2013): Thermische Abfallbehandlung in Deutschland. Beitrag im Recycling Almanach 2013. S. 146. Carsten Spohn - Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland (ITAD)
- Statistisches Bundesamt (2009-2014): Abfallentsorgung. Fachserie 19 Reihe 1 für die Jahre 2007 bis 2012. Wiesbaden
- Texaid (2016): Katalog Putz- und Reinigungstücher. Fa. Texaid. <http://www.texaid-putzlappenshop.de/> aufgerufen am 20.04.2016.