

Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung

Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Förderkennzeichen 3707 33 302
UBA-FB 001276

Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung

**Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften
Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die
Umwelt und die Abfallentsorgung**

von

Lorenz Erdmann

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT gGmbH

Dr. Lorenz Hilty

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA

unter Mitarbeit von

**Hans-Jörg Althaus, Siegfried Behrendt, Roland Hischier, Christian
Kamburow, Britta Oertel, Dr. Patrick Wäger, Tobias Welz**

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Email: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 2.2
Hermann Keßler

Dessau-Roßlau, September 2009

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001276	2.	3. Abfallwirtschaft
4. Titel des Berichts Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) IZT: Dipl.-Ing. Lorenz Erdmann EMPA: Prof. Dr. habil. Lorenz Hilty	8. Abschlussdatum Oktober 2008	
	9. Veröffentlichungsdatum September 2009	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZTgGmbH Schopenhauerstr. 26 14129 Berlin	10. UFOPLAN-Nr. 3707 33 302	
	11. Seitenzahl 185	
	12. Literaturangaben 103	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	13. Tabellen und Diagramme 53	
	14. Abbildungen 26	
	15. Zusätzliche Angaben	
16. Kurzfassung Vor dem Hintergrund der rasant zunehmenden Verbreitung von Anwendungen der Radio Frequency Identification (RFID) untersucht das Forschungsprojekt mögliche zukünftige Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung. Der gegenwärtige Einsatz von RFID-Tags stellt die derzeitigen Entsorgungssysteme für Siedlungsabfall zwar vor keine nennenswerten Herausforderungen. Die dynamische Entwicklung der RFID-Märkte kann aber die Entsorgungssysteme in Zukunft vor Probleme Stellen, wenn nicht vorsorgend gehandelt wird. Neben der Ermittlung der aktuellen und zukünftig zu erwartenden Mengen eingesetzter RFID-Tags, der Beschreibung derzeitiger Entsorgungswege für RFID-Tags im Siedlungsabfall sowie der Erstellung und Quantifizierung von Zukunftsszenarien zielt das Projekt darauf, Handlungsempfehlungen für einen umweltverträglich optimierten Einsatz von RFID-Tags in Deutschland abzuleiten. Mit diesem Bericht liegt erstmalig eine systematische quantitative Darstellung des zukünftigen Einflusses von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung unter enger Einbeziehung der betroffenen Akteure vor. Der Untersuchungsrahmen erstreckt sich auf die Entsorgungssysteme für Siedlungsabfall in Deutschland mit einem Zeithorizont bis 2022. Das Vorhaben fokussiert auf den Eintrag passiver RFID-Tags in den Siedlungsabfall, die insbesondere auf Konsumgüter und deren Verpackungen angebracht sind. Die Eintragspfade Glas-, Papier/Pappe/ Karton- und Leichtverpackungs-Getrennsammlung sowie die Restabfallbehandlung, einschließlich des Eintrags von RFID-Tags in Ersatzbrennstoffe (EBS) und Sekundärbaustoffe werden umfassend analysiert. Bioabfall wird im Rahmen eines Exkurses diskutiert. Das Forschungsprojekt adressiert potenzielle <i>Risiken</i> von RFID-Tags in der Siedlungsabfallentsorgung. Mögliche Chancen zur Verbesserung des Recyclings durch den Einsatz von RFID-Tags, z.B. bei elektrischen und elektronischen Geräten, werden nicht behandelt.		
17. Schlagwörter RFID, Transponder, Tags, Radio Frequency Identification, Verpackungsabfälle, Recycling, Abfallentsorgung		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001276	2.	3. Waste Management
4. Report Title Impact of RFID tags on waste management Prognosis of potential impacts of a mass use of RFID-Tags in the area of consumer products on the environment and waste management		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) IZT: Dipl.-Ing. Lorenz Erdmann EMPA: Prof. Dr. habil. Lorenz Hilty	8. Report Date October 2008	9. Publication Date September 2009
6. Performing Organisation (Name, Address) Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZTgGmbH Schopenhauerstr. 26 14129 Berlin	10. UFOPLAN-Ref. No. 3707 33 302	11. No. of Pages 185
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	12. No. of Reference 103	13. No. of Tables, Diagrams 53
	14. No. of Figures 26	
15. Supplementary Notes		
16. Abstract Against the background of the fast market penetration of Radio Frequency Identification (RFID) the research project investigates potential future impacts of a mass use of RFID tags in the area of consumer products on the environment and the waste management. Today's use of RFID tags doesn't challenge current municipal solid waste management systems substantially. However, if no precautionary action is undertaken the dynamic growth of RFID markets could have adverse effects on these waste management systems in future. The project aims at the assessment of today's and future's RFID tag quantities, the characterisation of the fate of RFID tags in current municipal solid waste management systems, the building and quantification of future scenarios and policy recommendations for an environmentally sound use of RFID tags in Germany. This final report is the first systematic quantitative description of the future impacts of RFID tags on waste management, having involved the most important stakeholders closely. The project's scope is on municipal solid waste management systems in Germany for a time horizon of 2022. The project focuses on passive RFID tags, being attached to consumer products or their packaging. The separately collected waste fractions end-of-life glass, paper and cardboard, light packaging and residual waste are analysed downstream, including refuse derived fuels and secondary construction materials. Organic waste is treated in a brief digression. The R&D project addresses only potential <i>risks</i> of RFID tags in municipal solid waste management, i.e. packaging wastes. Opportunities to improve recycling processes, for example of WEEE, is not accounted for in this study.		
17. Keywords RFID, transponder, tags, Radio Frequency Identification, packaging wastes, recovery, recycling, waste management		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Vorwort.....	13
1 Einleitung.....	15
1.1 Aufgabenstellung	15
1.2 Untersuchungsrahmen.....	15
1.3 Methodologie.....	16
1.4 Gliederung.....	18
2 RFID-Tags heute und in Zukunft.....	19
2.1 Was sind RFID-Tags und wozu kann man sie nutzen?.....	19
2.2 Stoffliche Zusammensetzung.....	22
2.3 Anwendungen und Märkte	27
2.4 Fazit	34
3 Auswirkungen von RFID-Tags in der Siedlungsabfallentsorgung.....	35
3.1 Recycling von Glas	37
3.2 Recycling von Papier, Pappe, Karton (PPK)	41
3.3 Recycling von Leichtverpackungen (LVP).....	45
3.3.1 Verbundkarton.....	47
3.3.2 Kunststoffe	49
3.3.2.1 Polyethylenterephthalat (PET)	49

3.3.2.2	Polystyrol (PS)	52
3.3.2.3	Polyolefine (PE und PP).....	52
3.3.2.4	Mischkunststoffe	53
3.3.2.5	Auswirkungen der RFID-Tags auf das Kunststoffrecycling	54
3.3.3	Weißblech	59
3.3.4	Aluminium	62
3.4	Thermische Abfallbeseitigung, Verwertung als Ersatzbrennstoffe und Schlackeverwertung.....	66
3.4.1	Verwertung von Reststoffen als Ersatzbrennstoffe	67
3.4.2	Verwertung von Schlacken als Sekundärbaustoffe	68
3.4.3	Deponierte Fraktionen.....	69
3.5	Exkurs: RFID-Tags und Bioabfall	70
4	Zukünftige Stoffströme von RFID-Tags in der Siedlungsabfallentsorgung.....	73
4.1	Szenarien für RFID-Tags in der Abfallentsorgung.....	73
4.1.1	Ausgangslage 2007	74
4.1.2	Szenario <i>Referenzentwicklung</i>	75
4.1.3	Szenario <i>Technisch-ökonomischer Push</i>	76
4.1.4	Szenario <i>Staatliche Regulierung</i>	77
4.1.5	Szenario <i>Selbstregulierung</i>	79
4.1.6	Zusammenfassung und Ausblick	80
4.2	Quantifizierung der Stoffströme.....	80
4.2.1	Ausgangslage 2007	85
4.2.2	Szenario <i>Referenzentwicklung</i>	85
4.2.2.1	Eintrag von RFID-Tags in die Entsorgungssysteme.....	85
4.2.2.2	Verbleib von RFID-Antennenmaterialien	87
4.2.2.3	Potenzielle Probleme mit Qualitätsanforderungen für Sekundärrohstoffe.....	89
4.2.2.4	Bewertung der Dissipation	92
4.2.3	Die vier Szenarien im Vergleich	95

4.3	Exkurs: Extrembetrachtungen.....	104
4.3.1	Worst-Case-Eintrag von RFID-Tags in das Recycling	104
4.3.2	Verstärkte Metallextraktion bei der Schlackeaufbereitung	109
4.3.3	Eintrag von alternativen zukünftigen RFID-Tags in das Recycling.....	111
5	Mögliche Probleme durch den zukünftigen Eintrag von RFID-Tags in die Umwelt und die Abfallentsorgung	115
6	Handlungsempfehlungen	121
6.1	Aktivitäten.....	122
6.1.1	Monitoring	122
6.1.2	Forschung und Entwicklung	123
6.1.3	Separierung der RFID-Tags.....	125
6.1.4	Massenstromtaugliches Design	126
6.2	Adressaten	127
6.2.1	Multi-Stakeholder-Ansatz	128
6.2.2	Staatliche Einrichtungen	130
6.3	Fazit	131
7	Zusammenfassung	133
8	Referenzen.....	135
Anhang A:	Liste der Interviewpartner/-innen.....	143
Anhang B:	Liste der Teilnehmer/-innen am Fachgespräch	147
Anhang C:	Annahmen für die Quantifizierung der Stoffströme.....	149
Anhang D:	Ergebnistabellen für Stoffströme 2007 und die vier Szenarios bis 2022	159

Abkürzungsverzeichnis

ACP	Anisotropic Conductive Paste (anisotrope Leitpaste)
DSD	Duales System Deutschland
EAS	Electronic Article Surveillance (elektronische Artikelsicherung)
EBS	Ersatzbrennstoff
EPC	Electronic Product Code
EW	Einweg
HF	High Frequency (Hochfrequenz)
IC	Integrated Circuit (integrierter Schaltkreis)
ILT	Item-level-Tagging (Tagging auf Einzelartikelebene)
KS	Kunststoff
KW	Kraftwerk
LF	Low Frequency (Niedrigfrequenz)
LVP	Leichtverpackung
MBA	Mechanisch-biologische Anlage (zur Behandlung von Abfällen)
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	Mehrweg
OCR	Optical Character Recognition (Optische Zeichenerkennung)
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PEV	Privater Endverbrauch
Polytronik	Polmerelektronik (Elektronik mit Halbleitermaterialien aus Polymeren)
PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Karton

PS	Polystyrol
RFID	Radio Frequency Identification
SAW	Surface Acoustic Wave
SBS	Sekundärbrennstoffe
TS	Trockensubstanz
UHF	Ultra High Frequency (Ultrahochfrequenz)
VK	Verbundkarton
VP	Verpackung
WB	Weißblech

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Ziele, Aktivitäten und Methoden im F+E-Vorhaben.....	17
Abbildung 2-1:	Schematischer Aufbau eines RFID-Systems	19
Abbildung 2-2:	Roadmap für RFID-Tags in der EU bis 2022	25
Abbildung 2-3:	Screening der Umweltsensitivität von RFID-Nutzungsmustern	28
Abbildung 3-1:	Verwertbare Fraktionen aus den bezüglich eines Eintrags von RFID-Tags relevanten Abfallfraktionen	35
Abbildung 3-2:	Recyclingprozess für Glas	38
Abbildung 3-3:	Recyclingprozess für Papier, Pappe, Karton	42
Abbildung 3-4:	Recyclingfraktionen aus der Leichtverpackungssammlung	46
Abbildung 3-5:	Recyclingprozess für Verbundkarton	48
Abbildung 3-6:	Recyclingprozess für PET-Flaschen nach dem Vacurema- oder URRC-Verfahren.....	51
Abbildung 3-7:	Recyclingprozess für sortenreine PS-Fraktionen.....	52
Abbildung 3-8:	Recyclingprozess für sortenreine PE- und PP-Fraktionen.....	53
Abbildung 3-9:	Recyclingprozess für Mischkunststoffe	54
Abbildung 3-10:	Recyclingprozess für Weißblech.....	60
Abbildung 3-11:	Recyclingprozess für Aluminium.	63
Abbildung 4-1:	Netzwerk im Modell für das Projekt 'Referenz-Szenario 2022'	81
Abbildung 4-2:	Untersuchungsrahmen für die Quantifizierung der Stoffströme.....	83
Abbildung 4-3:	Verbleib von Antennenmaterialien im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022.....	88
Abbildung 4-4:	Verbleib von Antennenmaterialien im Referenz-Szenario 2012	89
Abbildung 4-5:	RFID-Tags im System in den Szenarien von 2007 bis 2022	96
Abbildung 4-6:	Entwicklung der Polymereinträge in das Mono-Kunststoffrecycling von 2007 bis 2022.....	98

Abbildung 4-7:	Entwicklung der Siliziumeinträge in das Glasrecycling für die vier Szenarien von 2007 bis 2022	99
Abbildung 4-8:	Entwicklung der Kupfereinträge in das Aluminiumrecycling für die vier Szenarien von 2007 bis 2022	101
Abbildung 4-9:	Entwicklung der Kupfereinträge in Sekundärbaustoffe aus Schlacke für die vier Szenarien von 2007 bis 2022	102
Abbildung 4-10:	Dissipationsgrad für Kupfer und Silber im Referenz- und Selbstregulierungsszenario von 2007 bis 2022	103
Abbildung 4-11:	Entwicklung der Metallwiedergewinnungsrate durch verstärkte Extraktion aus der Schlacke von 2007 bis 2022	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Ausgewählte Eigenschaften von heutigen RFID-Tags.....	21
Tabelle 2-2:	Stoffliche Zusammensetzung von heutigen passiven RFID-Tags	22
Tabelle 2-3:	Roadmap für sehr einfache passive RFID-Tags in den USA bis 2017 (Auszug)	24
Tabelle 2-4:	Referenzprojektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 [Mio. St.].....	33
Tabelle 4-1:	Eckpunkte der vier Szenarien	80
Tabelle 4-2:	Input/Output-Bilanz aus Umberto für die Ausgangslage 2007 (Auszug).....	84
Tabelle 4-3:	Aufteilung von RFID-Tags nach Anwendungsbereichen im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [Mio. St.].....	86
Tabelle 4-4:	Entwicklung des Eintrags von RFID-Tags in Entsorgungspfade für Siedlungsabfall im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [Mio. St.].....	86
Tabelle 4-5:	Stoffströme im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 und Qualitätsanforderungen an den Sekundärrohstoffinput (Auswahl)	90
Tabelle 4-6:	Bewertung der Dissipation von Metallen aus RFID-Tags im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 aus Ressourcensicht.....	93
Tabelle 4-7:	Treibhausgasemissionspotenzial durch RFID-Tags und Packstoffe für RFID-Bauformen im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [t CO ₂ -eq., 100a].....	94
Tabelle 4-8:	Humantoxizitätspotenzial durch RFID-Tags im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [t 1,4-DCB-eq., 100a].....	95
Tabelle 4-9:	Eintrag von RFID-Bestandteilen in das Behälterglas-Recycling	106
Tabelle 4-10:	Eintrag von RFID-Bestandteilen in das Flüssigkeitskarton-Recycling.....	107
Tabelle 4-11:	Eintrag von RFID-Bestandteilen in das PET-Recycling	109

Tabelle 4-12:	Zusammensetzung zweier hypothetischer Tags im Jahr 2022 [mg/Tag]	112
Tabelle 4-13:	Zusammensetzung dreier hypothetischer Aktiv-Zusätze im Jahr 2022 [mg/Aktiv-Zusatz]	112
Tabelle 4-14:	Eingebrachte Materialmengen in alternative RFID-Tags im Jahr 2022	113
Tabelle 5-1:	Mögliche Auswirkungen des Eintrags von RFID-Tags auf die Rezyklate	117
Tabelle 5-2:	Hauptwirkungsmuster der Szenarien auf die Stoffströme	118
Tabelle 6-1:	Mögliche Gestaltungsziele der zukünftigen Aufbringung von RFID auf Objekte	125
Tabelle Anhang A-1:	Liste der Interviewpartner/-innen	143
Tabelle Anhang B-1:	Teilnehmer/-innen am Fachgespräch	147
Tabelle Anhang C-1:	Referenzprojektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 im Referenz-Szenario und im Szenario Selbstregulierung [Mio. St.].....	149
Tabelle Anhang C-2:	Dynamische Projektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 im Push-Szenario [Mio. St.].....	150
Tabelle Anhang C-3:	Moderate Projektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 im Szenario Staatliche Regulierung [Mio. St.].....	151
Tabelle Anhang C-4:	Wiederverwendungsquote von Verpackungen im Großgewerbe von 2007 bis 2022 (als Kunststoffe).....	152
Tabelle Anhang C-5:	Stückzahlen an aktiven Tags für Kühlkettenmanagement von 2007 bis 2022 [Mio. St.].....	152
Tabelle Anhang C-6:	Anteile der Antennenmaterialien Aluminium, Kupfer und Silber von 2007 bis 2022 [Al-%/Cu-%/Ag-&]	152
Tabelle Anhang C-7:	Anteil an Polymer-Mikrochips an den gesamten Mikrochips von 2007 bis 2022.....	153
Tabelle Anhang C-8:	Separierquoten im Szenario Selbstregulierung von 2007 bis 2022.....	153
Tabelle Anhang C-9:	Schlackeverwertung in der Extrembetrachtung von 2007 bis 2022.....	153

Tabelle Anhang C-10: Allokation der RFID-Tags auf Verpackungen gemäß der Materialfraktionen	154
Tabelle Anhang C-11: Allokation der RFID-Tags auf Materialfraktionen in der LVP-Sortierung von Einwegverpackungen privater Endverbraucher.....	154
Tabelle Anhang C-12: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im PPK- und Verbundkartonrecycling	155
Tabelle Anhang C-13: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Glasrecycling.....	155
Tabelle Anhang C-14: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Weissblechrecycling.....	156
Tabelle Anhang C-15: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Aluminiumrecycling	156
Tabelle Anhang C-16: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Monokunststoffrecycling.....	156
Tabelle Anhang C-17: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten in der Müllverbrennung	157
Tabelle Anhang D-1: Input/Output-Bilanz für 2007	160
Tabelle Anhang D-2: Input/Output-Bilanz für das Referenz-Szenario 2012	162
Tabelle Anhang D-3: Input/Output-Bilanz für das Referenz-Szenario 2017	164
Tabelle Anhang D-4: Input/Output-Bilanz für das Referenz-Szenario 2022	166
Tabelle Anhang D-5: Input/Output-Bilanz für das Push-Szenario 2012	168
Tabelle Anhang D-6: Input/Output-Bilanz für das Push-Szenario 2017	170
Tabelle Anhang D-7: Input/Output-Bilanz für das Push-Szenario 2022	172
Tabelle Anhang D-8: Input/Output-Bilanz für das Szenario Staat 2012	174
Tabelle Anhang D-9: Input/Output-Bilanz für das Szenario Staat 2017	176
Tabelle Anhang D-10: Input/Output-Bilanz für das Szenario Staat 2022	178
Tabelle Anhang D-11: Input/Output-Bilanz für das Szenario Selbstregulierung 2012	180
Tabelle Anhang D-12: Input/Output-Bilanz für das Szenario Selbstregulierung 2017	182
Tabelle Anhang D-13: Input/Output-Bilanz für das Szenario Selbstregulierung 2022	184

Vorwort

Dieser Schlussbericht dokumentiert die Ergebnisse des F+E-Vorhabens „Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung“¹. Es wurde im Rahmen des UFOPLANs 2007 unter der Förderkennziffer 3707 33 302 vom Umweltbundesamt in Auftrag gegeben. Auftragnehmer waren das Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin und, in Form eines Unterauftrages, die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), St. Gallen. Die Laufzeit des F+E-Vorhabens war von November 2007 bis Oktober 2008.

Wir danken dem Umweltbundesamt für die Förderung und insbesondere Herrn Dr. Kessler (Leiter des Fachgebiets III 3.2), Frau Krause und Herrn Smetana (beide FG III 3.2) für die fachliche und organisatorische Begleitung.

Die Interviewpartner/-innen und Teilnehmer/-innen am Fachgespräch haben erheblich zum Gelingen des F+E-Vorhabens beigetragen (s. Anhang A bzw. B). Besonderer Dank gebührt auch der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM), die kostenlos statistische Daten über in Verkehr gebrachte Stückzahlen von Verpackungen in Deutschland zur Verfügung gestellt hat. Im Forschungsprozess ist Kontakt zum Normungsausschuss ISO JTC1/SC31 hergestellt worden. Die ISO/IEC-Norm „Recycling and RFID-Tags“ (TR 24729-2:2007) konnte deshalb schon im Entwurfsstadium berücksichtigt werden. Die Zwischenergebnisse des Projekts wurden im April 2008 auf der Jahrestagung des Arbeitskreises RFID vom Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (BITKOM) bei der Metro AG in Düsseldorf vorgestellt und diskutiert.

Mit dem Schlussbericht zum F+E-Vorhaben liegt erstmalig eine systematische und quantitative Darstellung des zukünftigen Einflusses von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung unter enger Einbeziehung der betroffenen Akteure vor. Vor dem Haupttext folgt für eilige Leser/-innen eine Kurzfassung in deutscher und englischer Sprache.

Berlin, Oktober 2008

Lorenz Erdmann (Projektleiter)

¹ Die Zwischenergebnisse der vertieften Analyse von RFID-Technologie, Marktentwicklung, RFID/Objekt-System und Entsorgung sind im Zwischenbericht vom 31.3.2008 ausführlich dokumentiert.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund der rasant zunehmenden Verbreitung von Radio Frequency Identification (RFID) – Anwendungen untersucht das Forschungsprojekt mögliche zukünftige Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung. Der gegenwärtige Einsatz von RFID-Tags stellt die derzeitigen Entsorgungssysteme für Siedlungsabfall zwar nicht vor nennenswerte Herausforderungen. Die dynamische Entwicklung der RFID-Märkte kann aber die Entsorgungssysteme in Zukunft vor Probleme stellen, wenn nicht vorsorgend gehandelt wird.

Bisher gibt es nur wenige fragmentarische Studien zu den Umweltwirkungen von RFID-Tags. Ausgelöst durch Schlussfolgerungen aus der Technikfolgenabschätzung und durch wachsende Bedenken seitens der Recyclingwirtschaft gewinnt das Forschungsfeld jedoch zunehmend an Bedeutung. Insgesamt ist der Forschungsstand zum zukünftigen Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung vorwiegend durch illustrative Beispiele und Plausibilitätsüberlegungen geprägt. Die Erstellung einer systematischen, validen Datengrundlage sowie ein transparentes Bewertungsverfahren unter Einbezug der wichtigen Stakeholder aus RFID- und Entsorgungsbranche steht deshalb im Vordergrund des hier gewählten handlungsorientierten Forschungsansatzes.

Neben der Ermittlung der aktuellen und zukünftig zu erwartenden Mengen eingesetzter RFID-Tags, der Beschreibung derzeitiger Entsorgungswege für RFID-Tags im Siedlungsabfall sowie der Erstellung und Quantifizierung von Zukunftsszenarien zielt das Projekt darauf, Handlungsempfehlungen für einen umweltverträglich optimierten Einsatz von RFID-Tags in Deutschland abzuleiten.

1.2 Untersuchungsrahmen

Das Projekt erstreckt sich auf die Entsorgungssysteme für Siedlungsabfall in Deutschland für einen Zeithorizont von rund 15 Jahren, also bis 2022. Folgende inhaltliche Fokussierungen sind vorgenommen worden:

- ▶ Für einen massenhaften Einsatz kommen aus heutiger Sicht nur passive RFID-Tags in Frage, in Zukunft möglicherweise auch semi-passive Tags².
- ▶ Die Einführung von RFID in den Konsumgüterbereich steht im Vordergrund des Interesses, da auch die Entsorgungssysteme für Siedlungsabfall vorwiegend auf Konsumgüter und deren Verpackungen ausgerichtet sind.
- ▶ Die Entsorgungsprozesse von Siedlungsabfall werden downstream verfolgt, andere Stoffströme wie das Ablösen der RFID-Tags vor der Entsorgung der Verpackungen und ihr Eintrag z.B. in die Abwasserentsorgung werden nicht behandelt.
- ▶ Die Analyse fokussiert auf die Entsorgungspfade Glas-, Papier/Pappe/Karton- und Leichtverpackungs-Getrennsammlung und die Restmüllbehandlung, einschließlich des Eintrags von RFID-Tags in Ersatzbrennstoffe und Sekundärbau- stoffe. Bioabfall wird im Rahmen eines Exkurses diskutiert. Die Getrennsamm- lung von Batterien, CDs, Elektroschrott, Textilien und Sperrmüll wird nicht be- trachtet³.

Das F+E-Vorhaben adressiert potenzielle Risiken von RFID-Tags in der Siedlungsab- fallentsorgung. Mögliche Chancen zur Verbesserung des Recyclings durch den Einsatz von RFID-Tags, z.B. bei Elektrischen und Elektronischen Gütern, werden nicht behan- delt.

1.3 Methodologie

Das Ziel der Untersuchung wird durch folgende Forschungsfragen konkretisiert:

- ▶ Welche Stoffströme an RFID-Tags werden heute und in Zukunft in die verschie- denen Entsorgungspfade eingetragen?
- ▶ Wo können zukünftig durch den Eintrag von RFID-Tags ins Recycling Probleme auftreten?
- ▶ Wie können RFID-Tags so gestaltet und auf die Produkte aufgebracht werden, dass sie für die Entsorgungsprozesse unschädlich sind?

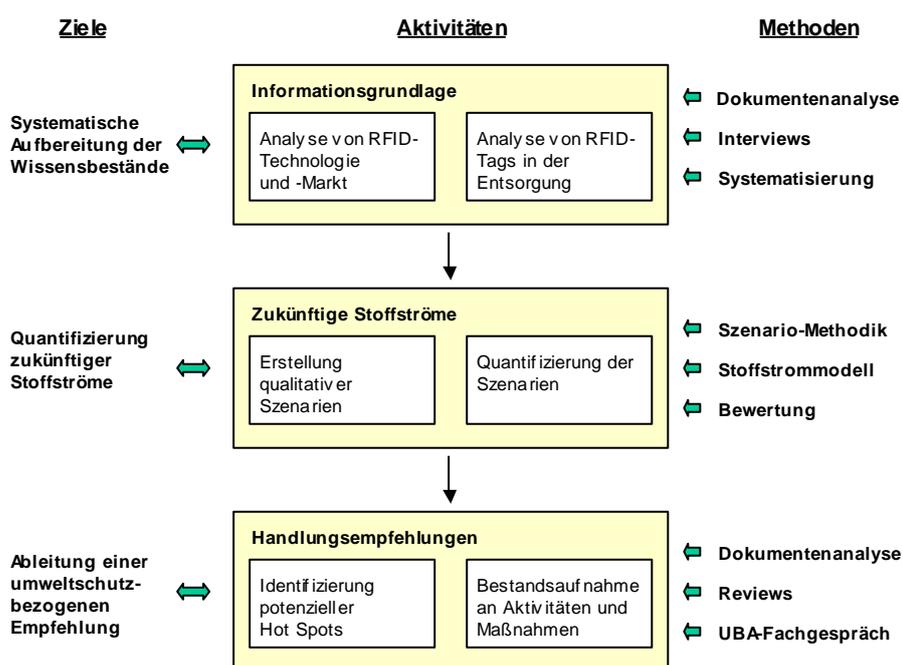
2 Passive RFID-Tags verfügen über keine eigene Energiequelle und sind ohne elektrische Aktivität, bis sie von dem (elektro-) magnetischen Feld eines Lesegerätes aktiviert werden. Semi-passive Systeme haben als Energiequelle eine Batterie, z.B. um periodisch Daten aufzuzeichnen, geben sie aber nur bei Aktivierung durch das Lesegerät ab.

3 Die zu erwartenden RFID-Tag Mengen in diesen Entsorgungspfaden sind angesichts an- derer Eintragsquellen, z.B. für Metalle, heute von untergeordneter Bedeutung und werden es auch in den nächsten fünf Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit bleiben.

- ▶ Durch welche Änderungen in den Aufbereitungs- und Verwertungsprozessen können mögliche Probleme entschärft werden?

Das Projekt integriert zur Beantwortung der Forschungsfragen u.a. Methoden der Dokumentenanalyse, Experten/-inneninterviews, Szenario-Methodik und Stoffstrommodellierung. Folgende Abbildung zeigt vereinfacht die Methodologie im F+E-Vorhaben:

Abbildung 1-1: Ziele, Aktivitäten und Methoden im F+E-Vorhaben



Quelle: Darstellung des IZT

Die wesentlichen Stakeholder aus Politik, Forschung, Industrie, Verbänden und Sekundärrohstoffwirtschaft sind in das F+E-Vorhaben eingebunden worden, um die Befunde zu bewerten und geeignete Maßnahmen vor allem gemäß des Vorsorgeprinzips vorzuschlagen.

Die vorläufigen Ergebnisse des F+E-Vorhabens wurden mit Experten/-innen beim UBA-Fachgespräch am 16. September 2008 im Umweltbundesamt diskutiert (s. Anhang B). Die Diskussionen und weitere Kommentierungen sind in diesem Schlussbericht berücksichtigt.

Details zu den verwendeten Methoden finden sich in den jeweiligen Fachkapiteln.

1.4 Gliederung

Die folgenden Kapitel dokumentieren die zentralen Ergebnisse des Forschungsvorhabens und - soweit zum Verständnis erforderlich – auch Hintergrundinformationen.

Kapitel 2 stellt RFID-Tags und ihre Anwendungen vor. Im Mittelpunkt stehen die stoffliche Zusammensetzung von RFID-Tags und ihre Marktdurchdringung sowohl heute, als auch in Zukunft.

Kapitel 3 untersucht die Auswirkungen des Eintrags von RFID-Tags in die Siedlungsabfallentsorgung. Dabei wird zwischen dem Eintrag von RFID-Tags in die Getrenntsammlung von Glas, Papier, Pappe und Karton (PPK) und Leichtverpackungen (LVP) sowie in die Restmüllsammlung unterschieden. Ihr Weg wird über die verschiedenen Sortierungs-, Aufbereitungs-, Verwertungs- und Beseitigungsprozesse der Fraktionen verfolgt.

In Kapitel 4 werden vier realistische Zukunftsszenarien für den Eintrag von RFID-Tags in die Siedlungsabfallentsorgung formuliert und in einem Stoffstrommodell quantifiziert. Über den Eintrag von RFID-Materialien in Recyclingprozesse hinaus werden weitere Wirkungsdimensionen diskutiert. Ein Exkurs zu Extrembetrachtungen schließt das Kapitel ab.

Kapitel 5 verdichtet die Aussagen aus den Kapiteln 3 und 4 zu Schlussfolgerungen über mögliche Problemen durch den zukünftigen Eintrag von RFID-Tags in die Umwelt und die Abfallentsorgung.

Kapitel 6 formuliert Handlungsempfehlungen, die sich aus Sicht der Autoren aus den gewonnenen Erkenntnissen ableiten lassen.

In Anhang A findet sich eine Liste von im Laufe des F+E-Vorhabens persönlich kontaktierten Personen, in Anhang B eine Liste der Teilnehmer/-innen am UBA-Fachgespräch.

Zur Erhöhung der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Quantifizierung der vier Szenarien sind in Anhang C zentrale Annahmen und in Anhang D ausführliche Ergebnistabellen zusammengestellt.

2 RFID-Tags heute und in Zukunft

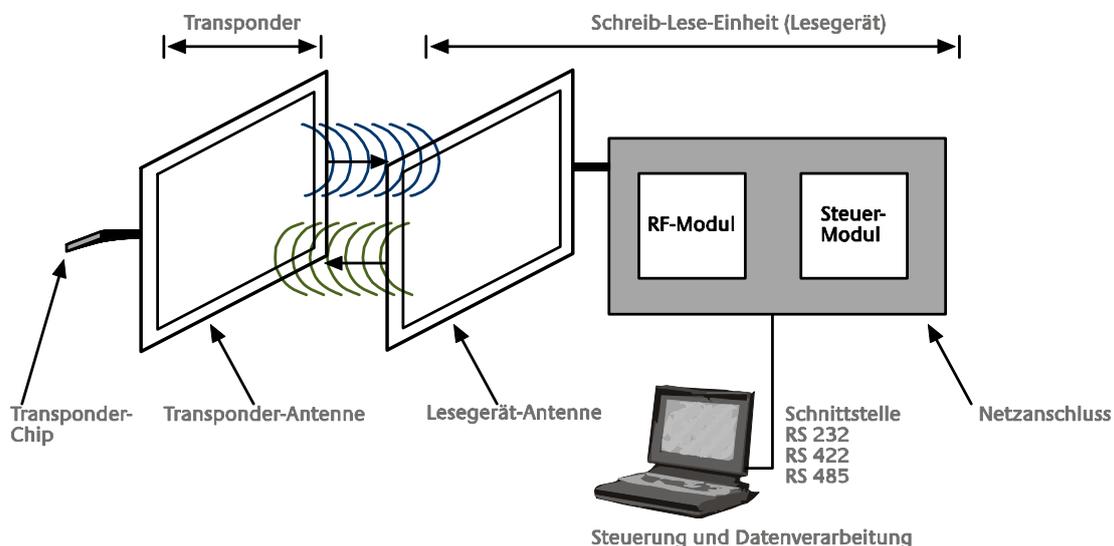
In diesem Kapitel werden die Grundlagen der RFID-Technologie erläutert und ihre stofflichen Dimensionen herausgearbeitet. Die zukünftige Marktdurchdringung hängt in hohem Maße davon ab, zu welchen Kosten RFID-Tags produziert werden können. Die stoffliche Beschaffenheit heutiger und zukünftiger RFID-Tags geht direkt in die Modellierung des zukünftigen Einflusses von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung ein.

2.1 Was sind RFID-Tags und wozu kann man sie nutzen?

Radio Frequency Identification (RFID) bezeichnet eine Transponder-Technologie zur Identifizierung von Objekten, Tieren oder Personen über Funk. Ein Transponder-System besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Transponder (mobiler Datenträger, auch „Tag“ genannt) und dem Lesegerät (kann die Daten vom Tag auslesen und ggf. auch verändern). Das Lesegerät ist meist mit einer weiteren Dateninfrastruktur verbunden. Der Tag besteht aus einem Mikrochip mit einem Schaltkreis für einen miniaturisierten Receiver/Transmitter und einer Antenne, die auf einem Substrat befestigt ist⁴.

Folgende Abbildung zeigt die Funktionsweise des RFID-Systems schematisch:

Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau eines RFID-Systems



⁴ Eine Besonderheit sind Chiplose 1-bit Tags. Es werden nur zwei Systemzustände differenziert: zwischen der An- und Abwesenheit eines Transponders. Einige Experten sehen Electronic Article Surveillance (EAS) - Systeme als 1-bit RFID-Systeme. Andere sehen EAS als andere Systemklasse an, weil EAS auch andere Technologien nutzen kann (CE RFID 2008).

Quelle: IZT, EMPA, BSI 2004

Die RFID-Technologie ist eine Querschnittstechnologie, deren Anwendungspotenziale in fast allen Wirtschafts- und Lebensbereichen liegen. Der Einsatz von RFID-Systemen eignet sich überall dort, wo automatisch gekennzeichnet, erkannt, registriert, gelagert, überwacht oder transportiert werden muss. Folgende Anwendungsgebiete von RFID sind im Hinblick auf den Eintrag von RFID-Tags in den Siedlungsabfall hervorzuheben (CE RFID 2008; IZT, EMPA, BSI 2004)⁵:

- ▶ Logistik – Tracking und Tracing (Post, Fluggepäck, etc.),
- ▶ Supply Chain Management und Inventory Management (Paletten, Kartons, etc.),
- ▶ Produktauthentifizierung und Diebstahlsicherung (Kleidung, Kosmetika, etc.),
- ▶ Produktbezogene Dienstleistungen (Mehrweg, Leihen, Archivieren etc.) und
- ▶ Personenbezogene Anwendungen (Authentifizierung, Zugang, Zutritts- und Routenkontrollen etc.).

RFID-Systeme erweitern die Funktionalitäten und Einsatzmöglichkeiten anderer Auto-ID-Systeme (Barcode-System, Chip-Karten⁶, Optical Character Recognition (OCR) und Biometrie) und bieten hohe Effizienzsteigerungspotenziale. Das Barcode-System ist das bislang dominierende Auto-ID-Verfahren in Produktion, Logistik und Handel. Es zeichnet sich durch Einfachheit und bislang konkurrenzlos günstige Anschaffungs- und Betriebskosten aus. Zu den Hauptvorteilen der RFID-Systeme im Vergleich zum Barcode System zählen die hohe Datendichte⁷, die Unempfindlichkeit gegenüber Nässe und Schmutz, die hohe Lesegeschwindigkeit⁸ und die berührungsfreie Ablesbarkeit bis hin zu mehreren Metern Distanz in Abhängigkeit von der Funkfrequenz, was die Möglichkeit zur Pulkerfassung bietet. Die hohe Datendichte bei RFID-Systemen ermöglicht über die Kennzeichnung von Produktklassen hinaus auch die Identifizierung von individuellen Objekten, Tieren und Menschen. Angesichts der massenhaften Durchdringung von Wirtschaft und Gesellschaft mit dem Barcode-System ist davon auszugehen, dass das Barcode-System noch längere Zeit parallel zur RFID-Technologie bestehen wird.

⁵ Weitere Funktionalitäten sind z.B. die Überwachung von Tieren oder der Umwelt.

⁶ Chip-Karten können mit RFID-Technologie als kontaktlose Chipkarten kombiniert werden. Sie werden überwiegend im Ticketing und zur Zutrittskontrolle eingesetzt.

⁷ Der geringen Datendichte kann durch 2-dimensionale Barcodes in gewissen Grenzen entgegengewirkt werden.

⁸ Die Lesegeschwindigkeit von RFID-Systemen hängt stark von der auszulesenden Datenmenge ab, was die Datendichte faktisch begrenzt.

Für die stofflichen Betrachtungen und die Marktdurchdringung sind insbesondere die Art der Energieversorgung, die Frequenz und die Kosten relevant. Folgende Tabelle fasst einige wesentliche Eigenschaften von RFID-Tags zusammen:

Tabelle 2-1: Ausgewählte Eigenschaften von heutigen RFID-Tags

Eigenschaft	Aktiv		Passiv			Semi-passiv
	Frequenz	433 MHz	2,4 GHz	125-135 kHz (LF)	13,56 MHz (HF)	860-960 MHz (UHF)
Reichweite	< 100 m	< 100 m	< 20 cm	< 3 m	< 7 m	< 20 m
Speichergröße	2 kbits	2 kbits	64-96 bits	64-128 bits	64-512 bits	ID Size Sensor Speicher
Leserate	-	-	1-20 Tags/s	30-300 Tags/s	30-300 Tags/s	-
Kosten	5-50 US-\$	5-50 US-\$	0,20-2,00 US-\$	0,20-0,80 US-\$	0,20-0,80 US-\$	Passiv-Tag, Batterie, Sensor

Quelle: iNEMI 2008, Informationsforum RFID 2006, Vermesan 2008

RFID-Tags werden hinsichtlich ihrer Energieversorgung unterschieden (IPTTS 2007). Passive RFID-Tags sind ohne elektrische Aktivität, bis sie durch das (elektro-) magnetischen Feld des Lesegerätes mit Energie versorgt werden. Aktive Systeme verfügen über eine eigene Energiequelle und ermöglichen im Vergleich zu passiven Systemen weitere Funktionalitäten, indem z.B. Sensoren integriert werden. Semi-passive Systeme haben eine Batterie als Energiequelle, z.B. um periodisch Daten aufzuzeichnen, geben sie aber nur bei Aktivierung durch das Lesegerät ab. Für den massenhaften Einsatz im Konsumgüterbereich kommen aufgrund der Kosten nur passive und in Zukunft ggf. semi-passive Tags in Frage. Aktive Transponder eignen sich aufgrund hoher Kosten, des Wartungsbedarfs und begrenzter Lebensdauer der Batterie nicht für einfache Kennzeichnungsaufgaben.

Passive Tags unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Funkfrequenz. LF-Transponder sind in der Herstellung relativ teuer; ihre Lesereichweite und Datenübertragungsrate sind relativ gering. HF-Transponder werden oft eingesetzt, wenn mittlere Datenübertragungsraten und Lesereichweiten gefragt sind. Das 13,56 MHz HF-Band kann weltweit genutzt werden. UHF-Transponder weisen ähnliche Leseraten wie HF-Transponder auf, ihre Reichweite ist jedoch größer⁹. Die Funktionsfähigkeit im UHF-Bereich ist aber aufgrund von Metallreflexionen und absorbierenden Effekten durch Flüssigkeiten erschwert.

⁹ Beim UHF-Band gibt es unterschiedliche Standards in der EU, in den USA und in Japan.

2.2 Stoffliche Zusammensetzung

Es gibt keine repräsentative Untersuchung zur stofflichen Zusammensetzung von heutigen passiven RFID-Tags. Wir stützen uns auf die Angaben zur stofflichen Zusammensetzung von passiven RFID-Tags gemäß des Technischen Reports ISO/IEC TR 24729-2:2007. Die stofflichen Angaben in dessen Annex B sollen explizit für eine theoretische Abschätzung dienen, ob der RFID-Fluss heutige Recyclingprozesse beeinträchtigen kann. Hinsichtlich der Funkfrequenz (LF, HF, UHF) oder der Antennengeometrie werden keine Differenzierungen vorgenommen.

Tabelle 2-2: Stoffliche Zusammensetzung von heutigen passiven RFID-Tags

Komponente	Material	Masse [mg]		
		76,2 mm * 76,2 mm Tag	15 mm * 97 mm Tag	15 mm * 148 mm Tag
Deckschicht	PP	270	65	100
	Papier	525	130	200
Klebstoff	Acrylat	115	30	45
IC	Silizium	0,5	0,5	0,5
ACP	Epoxy-basiertes Material	0,8	0,8	0,8
ACP Metall	Nickel	0,1	0,1	0,1
Klebstoff	Polyurethan	40	10	15
Antenne	Kupfer	340	105	140
	Aluminium	50	15	20
	Silber (gedruckt)	36,3*	10,9	14,5*
	Bonding Agent (gedruckt)	15,3*	4,6	6,1*
Substrat	PET	410	100	155
Klebstoff	Acrylat	155	40	60
Gesamt	Tag (ohne Deckschicht)	Cu: 1021,4 Al: 731,4 Ag: 733,0*	Cu: 286,4 Al: 196,4 Ag: 196,9	Cu: 401,4 Al: 281,4 Ag: 282,0*

Quelle und Anmerkungen: ISO/IEC TR 24729-2:2007; auch im Bonding Agent befindet sich nach FhG-IZM (2006) Silber; * Berechnungen des IZT in Analogie zu Aluminium und Kupfer

Die hauptsächlichen Massebestandteile eines RFID-Tags variieren beträchtlich. Das Gesamtgewicht der passiven RFID-Tags (ohne Deckschicht) wird wesentlich durch das Antennenmaterial und die Tag-Fläche bestimmt:

- ▶ Die Spurenbestandteile IC, ACP und ACP-Metall¹⁰ sind für alle Baugrößen gleich groß, während bei den anderen Materialien ein flächenbezogener Multiplikationsfaktor angesetzt ist¹¹.
- ▶ Das Gesamtgewicht des Transponders variiert je nach Antennenmaterial beträchtlich. Transponder mit Kupferantenne wiegen rund 30-40 % mehr als gleich große Transponder mit Aluminium- bzw. Silberantenne.

Es liegen nur wenige weitere Quellen zur stofflichen Zusammensetzung passiver RFID-Tags vor (FLOG 2007, AIM 2005, CEPI 2005, FhG-IZM et al. 2006)¹².

RFID-Tags sind in verschiedenen Bauformen erhältlich. Die Anhaftung am Objekt soll in der Regel fest sein. Bei den mengenmäßig in Zukunft dominierenden Smart Labeln wird die Ablösbarkeit vom Objekt durch die Eigenschaften des Klebstoffs bestimmt. Das Gewicht der Deckschicht liegt in der Größenordnung des eigentlichen RFID-Tags. RFID-Inlays werden auch direkt in Objekte, insbesondere Konsumgüter, integriert. Glas- und Kunststofftransponder sowie andere Sonderbauformen sind für einen massenhaften Einsatz im Konsumgüterbereich dagegen weniger relevant.

Der RFID-Tag wird häufig schwer ablösbar in das Objekt integriert:

- ▶ Beim Einschmelzen (Inmold) von RFID-Tags in Kunststoffe wie z.B. bei wiederverwendbaren Transportbehältern, ist der Tag mechanisch vor Beschädigung und ungewollter Abtrennung geschützt (Schreiner Group 2007).
- ▶ Durch Einschweißen eines RFID-Inlays, z.B. in die Smart Card, wird eine sehr dauerhafte Verbindung zwischen Tag und Objekt erzielt. Smart Tickets können als Smart Card oder als Papieretikett mit eingebettetem Inlay ausgeführt werden.
- ▶ RFID-Tags werden auch direkt in Zellulose-/Papier-Substrate integriert. Dies ist z.B. bei hohem Bedarf an Sicherstellung der Authentizität von Dokumenten wie bei Pässen oder wichtigen Dokumenten der Fall.

¹⁰ IC-Bumping ist nicht nur mit Nickel, sondern auch mit Chrom, Wolfram oder Titan möglich (Holmberg 2008).

¹¹ Die Werte des Tags mit den Dimensionen 76,2 mm * 76,2 mm ergeben sich überschlägig aus denen des Tags mit den Dimensionen 15 mm * 97 mm durch Multiplikation mit dem Faktor 4; diejenigen für den Tag mit 15 mm * 148 mm sind etwa mit 1 1/2 zu multiplizieren. Nur beim Antennenmaterial liegen die Verhältnisse bei einem Faktor 3 1/3 bzw. 1 1/3.

¹² Wesentliche Abweichungen von den Angaben der ISO/IEC Norm konnten durch Interviews erklärt werden (Helmigh 2008; Müller, Nissen 2008; Steiger 2008). Die Wahl der stofflichen Zusammensetzung gemäß ISO/IEC-Norm ist dadurch bekräftigt worden.

- ▶ Mount-on-Metal RFID-Tags werden z.B. auf CDs/DVDs eingesetzt. In diesem Falle wird ein selbstklebendes Inlay um das Loch angebracht¹³.
- ▶ Im Pharmabereich werden RFID-Tags u.a. auf Blisterverpackungen mit Aluminiumfolie angewendet, um festzustellen wie viele Medikamente in einem Umkarton sind und um die Produkte zu authentifizieren (Kern 2008).
- ▶ Textil-integrierte RFID-Tags, z.B. im Pflegeetikett, können eine Antenne haben, die als Silberfaden ins Gewebe genäht ist. Ziele sind die Unterstützung der Logistik und die Authentifizierung¹⁴.

Konstruktive Separierungsmöglichkeiten des RFID-Tags vom Objekt bestehen insbesondere bei Smart Tickets sowie Verpackungen. In manchen Ausführungen von Smart Tickets ist der RFID-Tag im Abtrennbereich enthalten, so dass er leicht getrennt gesammelt werden kann. Auch die Einkapselung des RFID-Tags im Verschluss einer Verpackung, z.B. im Flaschendeckel, ist eine Möglichkeit, den Tag vom stofflichen Hauptstrom separieren zu können¹⁵.

Die iNEMI RFID-Roadmap differenziert zwei wesentliche Entwicklungsstränge für passive RFID-Tags bis 2017: sehr einfache vs. hochfunktionale passive Tags. Für einen massenhaften Einsatz kommen v.a. die erstgenannten in Frage (siehe Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Roadmap für sehr einfache passive RFID-Tags in den USA bis 2017 (Auszug)

Eigenschaft	2007	2012	2017
Reichweite	1-2 m	1-2 m	1-2 m
Speichergröße	64-128 bits	64-256 bits	64-256 bits
Leserate	100 Tags/s	300 Tags/s	600 Tags/s
Kosten	min. 12 US Cent	min. 5 US Cent	min. 1 US Cent

Quelle: iNEMI 2008

Hauptentwicklungsziele für sehr einfache passive RFID-Tags sind die Erhöhung der Speichergröße und Leserate, sowie die Verringerung der Kosten. Dagegen sind bei der Reichweite keine wesentlichen Veränderungen anvisiert.

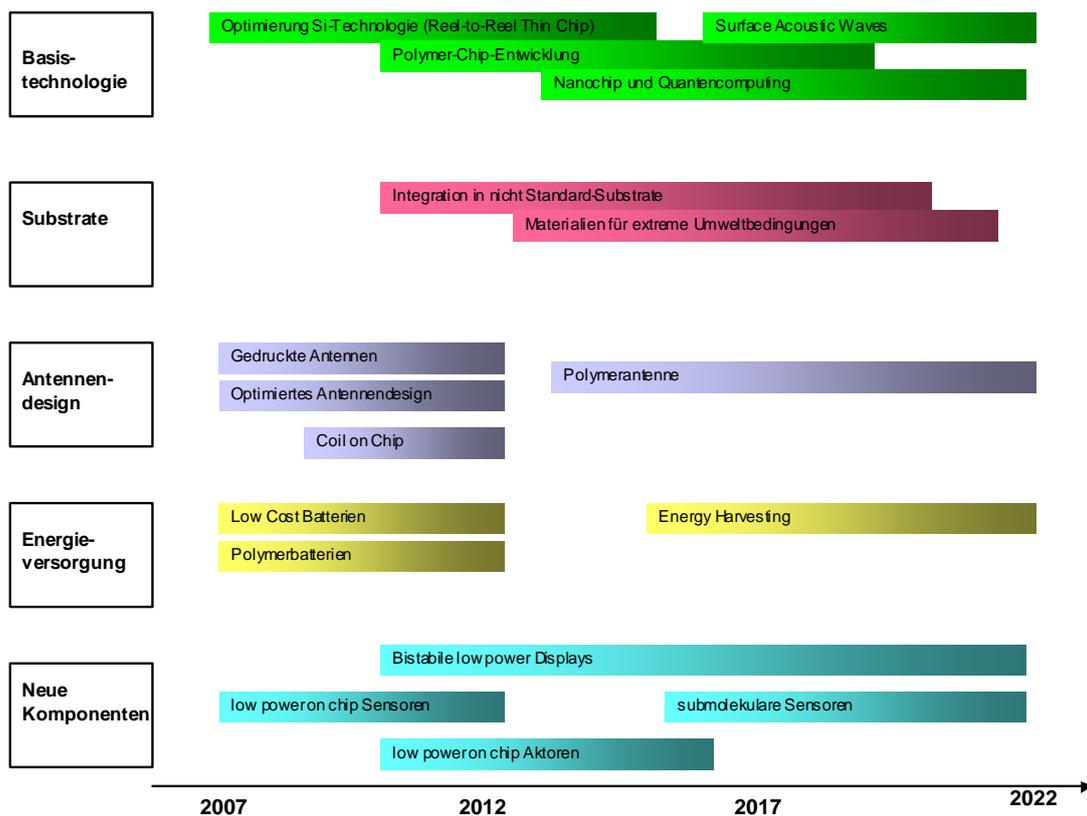
¹³ Das Metall der CD/DVD wird als Verstärker genutzt, weshalb die Antenne mit wenig Material auskommt (Kern 2008).

¹⁴ Das Etikett soll beim Waschen zerstört werden und wird dabei abgelöst und entweder vom Sieb aufgehoben oder ins Abwasser eingetragen (Kern 2008).

¹⁵ Allerdings muss der Tag dann sehr klein gemacht werden, was eine hohe Funkfrequenz erfordert (Müller, Nissen 2008).

Zu den Hauptentwicklungsfeldern von RFID-Tags mit stofflicher Relevanz gehören die Basistechnologie, das Antennendesign, neue Substratmaterialien und die Energieversorgung mit Integration weiterer Komponenten. Die Gestaltung von RFID-Tags unter Ecodesign-Gesichtspunkten ist in den wichtigsten Forschungsprogrammen eher ein Nebenaspekt¹⁶.

Abbildung 2-2: Roadmap für RFID-Tags in der EU bis 2022



Quelle: EPoSS 2007 und Bewertungen des IZT

Es wird weiter an der Optimierung der Silizium-Chip-Technologie gearbeitet. Gedruckte Mikroelektronik auf Polymerbasis soll zur drastischen Verringerung der Kosten führen; eine weitreichende Verdrängung der Silizium-Chip-Technologie ist jedoch nicht absehbar (Mildner 2008). Aus stofflicher Sicht würden kleine Mengen an Silizium und Dotiermaterialien durch Spezialpolymere ersetzt. Wesentlich unsicherer sind die Ent-

¹⁶ Lediglich in einzelnen Projekten ist das Ecodesign explizit thematisiert, z.B. im PolyApply Projekt (FHG-IZM et al. 2006).

wicklungslinien Nanochips und Quantencomputing sowie Surface Acoustic Waves (SAW)¹⁷.

Für das RFID-Substrat steht mit PET bereits ein preisgünstiger Massenkunststoff zur Verfügung. Weiterentwicklungen bei den Substratmaterialien auf Polymerbasis finden dennoch statt¹⁸. Der verstärkte Einsatz von Spezialpapieren für gedruckte Elektronik ist in Zukunft wahrscheinlich. Keramik- sowie Metall-Substrate werden im Konsumgüterbereich vermutlich keinen Durchbruch auf breiter Front erzielen. Dagegen haben textile Transponder vermutlich ein Massenmarktpotenzial.

Die Materialeinsparungspotenziale beim Antennendesign werden in naher Zukunft ausgereizt sein, da der Miniaturisierung durch die erforderlichen elektromagnetischen Eigenschaften enge Grenzen gesetzt sind (Müller, Nissen 2008). Auch zukünftig werden Kupfer und Aluminium als Antennenmaterial eine wichtige Rolle spielen. Silberbasierte Leitpasten werden jedoch bei gedruckter Elektronik zunehmend verwendet. Der Einsatz anderer metallbasierter Leitpasten ist eher unwahrscheinlich (Steiger 2008). Ein kostengünstiges polymeres Antennenmaterial mit ausreichenden elektrischen Eigenschaften ist derzeit nicht in Sicht.

Von der Realisierbarkeit neuer Energieversorgungskonzepte hängt auch die Integration weiterer Funktionalitäten und Komponenten in den RFID-Tag ab. Zu den marktnahen möglichen Massen Anwendungen gehört der Einsatz von Batterien und Sensoren für eine temperaturgeführte Logistik (Kriebel 2008). Weitaus unsicherer sind die anderen hier angesprochenen Konzepte, wobei aber bistabile polymere Displays aufgrund ihrer enormen funktionalen Möglichkeiten ggf. auch trotz gewisser Mehrkosten von den Marktteilnehmern in Kauf genommen würden. Flexible Batterien und Displays aus Polymeren könnten neue stoffliche Fragestellungen aufwerfen, ebenso die Integration von Materialien zum Energiebezug aus der Umwelt (energy harvesting) sowie Sensoren und Aktoren.

An den eher inkrementellen Verbesserungen beim RFID-Tag/Objektsystem wie spezielle Klebstoffe für Smart Label, der festen werkstofflichen Integration und innovativen konstruktiven Lösungen wird bereits gearbeitet. Weiter gehende Paradigmen wie die werkstoffliche Anpassung des RFID-Tags an die Verpackung oder die werkstoffliche Anpassung der Verpackung an die RFID-Technologie liegen noch in weiter Ferne. In

¹⁷ Als Substratmaterial für den piezoelektrischen Effekt bei SAW werden in der Regel Lithiumniobat (LiNbO_3) oder Lithiumtantalat (LiTaO_3) eingesetzt (Finkenzeller 2006).

¹⁸ Dazu gehören insbesondere das temperaturbeständigere, aber teurere Polyimid und Polyethylennaphthalat PEN (Holmberg 2008).

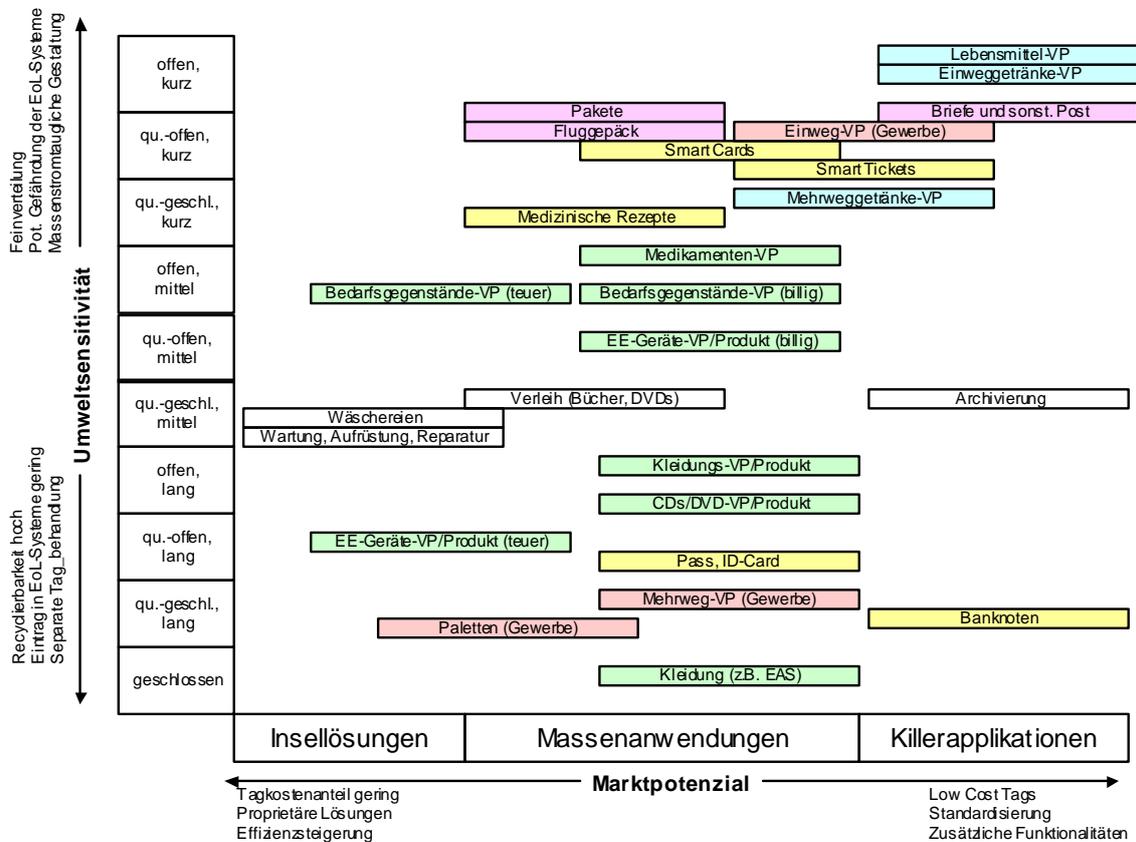
Zukunft ist wird es eventuell möglich sein, den RFID-Tag direkt auf ein Produkt oder eine Verpackung aufzudrucken, wobei dann eventuell kein Substrat mehr erforderlich ist.

2.3 Anwendungen und Märkte

Für das Screening der Umweltrelevanz der RFID-Anwendungsbereiche haben wir ein einfaches Anwendungsmodell entwickelt. Auf der vertikalen Achse steht die Umweltsensitivität des Nutzungsmusters. Sie ist ein Maß für den aus der Nutzungsphase stammenden Anpassungsdruck auf Entsorgungssysteme¹⁹. Die Nutzungsdauer kann kurz (bis zu einigen Tagen, z.B. Lebensmittel), mittel (bis zu einigen Monaten, z.B. Bedarfsgegenstände) oder lang (mehrere Jahre, z.B. textile Transponder in Kleidung) sein. Die Nutzung der RFID-Tags erfolgt geschlossen, quasi-geschlossen (starke Anreize zur Rückgabe des Objekts), quasi-offen (schwache Anreize zur Rückgabe des Objekts) oder offen. Auf der horizontalen Achse steht das Marktpotenzial. Zwischen Insellösungen einerseits und „Killerapplikationen“ andererseits liegen andere Massenanwendungen, die in ihrem Einsatzpotenzial von über einer Million bis hin zu einer Milliarde Tags pro Jahr reichen. Hierunter fallen viele marktnahe oder marktreife Anwendungen wie z.B. RFID-Tags für Fluggepäcklogistik, Buchausleihe und Smart Cards.

¹⁹ Die Vulnerabilität des Entsorgungssystems selbst ist in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Sie ist Gegenstand von Kapitel 3.

Abbildung 2-3: Screening der Umweltsensitivität von RFID-Nutzungsmustern



Quelle: Bewertungen des IZT, basierend auf IPTS 2007 und CE RFID 2008

Die heutigen RFID-Anwendungen befinden sich vorwiegend im linken Bereich des Modells. Hauptgründe dafür sind die Kosten für die RFID-Implementierung und die unzureichende Standardisierung. Zukünftige Anwendungen liegen im rechten Bereich, wobei die Kostenreduktion und die Standardisierung von der Industrie forciert werden. Die Umweltsensitivität des Nutzungsmusters ist in diesem Modell am höchsten für kurze und gleichzeitig offene Anwendungen. Neben den RFID-Tags auf Einwegverpackungen für Lebensmittel und Getränke gehören in diese Kategorie RFID-Tags zur Distribution von Paketen und Briefen, sowie Zeitungen und Zeitschriften.

In der Literatur werden schwerpunktmäßig folgende Treiber und Hemmnisse für die Marktdurchdringung von RFID genannt (IPTS 2007, Bridge 2007, iNEMI 2008):

- ▶ **Relativer Mehrwert:** Die Effizienzsteigerung oder die erweiterten Funktionalitäten durch RFID sind im Vergleich zu anderen automatischen Identifikationssystemen wie dem Barcode-System zu sehen.
- ▶ **Technologische Reife:** Die Radiowellen werden z.B. durch metallhaltige Verpackungen (z.B. Aluminium) und Flüssigkeiten (z.B. Wasser in Nahrungsmitteln)

gestört, was sich negativ auf die Leseraten auswirkt. Da es keine universelle RFID-Gesamtlösung gibt, erfordert es erhebliche Anstrengungen, zuverlässige RFID-Lösungen für spezielle Einsatzgebiete zu entwickeln.

- ▶ **Standardisierung:** Um die volle Funktionalität von RFID-Tags auszunutzen, bedarf es einheitlicher Standards hinsichtlich der Technologien, Frequenzbänder und Informationsformate. Mit ISO/IEC und EPCGlobal haben zwei Schlüsselaktoren weltweite Standards für Teilbereiche geschaffen. In einzelnen Bereichen gibt es aber noch erheblichen Vereinheitlichungsbedarf.
- ▶ **Implementierungskosten:** Die Amortisation der erheblichen Investitionen ist oft nur schwer darstellbar. Haupttreiber sind große Unternehmen; KMUs ziehen meist andere Investitionen vor. Die frühe Einführung wird eher durch Glaube als durch detaillierte Return-of-Investment-Analysen getrieben (iNEMI 2008).
- ▶ **Relative Tag-Kosten:** In den letzten Jahren sind die Kosten für RFID-Tags stark gesunken und sie fallen weiter. Besonders zur Reduzierung der Verluste hochpreisiger Güter ist RFID schon heute wettbewerbsfähig. Aber nur bei einem drastischen Preisverfall ist der Durchbruch von RFID-Tags auf niedrigpreisigen Gütern wie Lebensmitteln zu erwarten. Technologische Innovationen und ökonomische Skaleneffekte sollen die Kosten in Zukunft deutlich senken.
- ▶ **Verteilung von Kosten und Nutzen:** Die Verteilung der Kosten und des Nutzens z.B. zwischen Einzelhandel und Supply Chain kann sowohl ein Treiber, als auch ein Hemmnis für die Einführung von RFID sein. Dies erfordert ggf. die Entwicklung von Geschäftsmodellen, die Win-Win-Situationen ermöglichen, oder aber die Einführung von RFID wird durch Marktmacht (z.B. durch den Einzelhandel) vorangetrieben.
- ▶ **Schutz der Privatsphäre und Sicherheit:** In der kritischen öffentlichen Debatte über RFID dominieren die Themen Schutz der Privatsphäre und Sicherheit. Das Ausräumen dieser Bedenken hat wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz von RFID, sowohl bei Unternehmen, als auch bei Bürgern. Eine mögliche Lösung ist z.B. die Deaktivierung des RFID-Tags an der Kasse.
- ▶ **Staatliche Regulierung:** Da RFID-Tags einzelne Produkte — und nicht nur wie beim Barcode Produktklassen — identifizieren können, eignen sie sich für die Gewährleistung der Produktqualität und After Sales Services. Staatliche Regulierung kann in diesen Fällen die Einführung von RFID vorantreiben.

Wie sich die Markteinführung von RFID-Tags derzeit konkret gestaltet, ist in drei Fallstudien veranschaulicht²⁰:

RFID-Einführung bei der METRO Group

Die METRO Group zählt zu den frühen Anwendern von RFID-Systemen im Handel entlang der gesamten Prozesskette. Sie engagiert sich seit 2002 für die Einführung der RFID-Technologie im Handel. Ziele sind die Steigerung der Transparenz in der Lieferkette und die Realisierung von Kosteneinsparungspotenzialen.

Die Einführung von RFID auf Palettenebene ist in den Standorten weit fortgeschritten. Mehr als 180 Lieferanten beteiligen sich bereits an der Umstellung auf RFID, mit allen anderen werden Gespräche geführt. Die Prüfung der Potenziale von RFID-Tags auf Kisten- und auf Artikelebene ist Bestandteil der RFID-Strategie der Metro Group. Hier laufen Pilotvorhaben sowohl im Lebensmittelsektor (z.B. Kisten-Tagging im Tiefkühlager Hamm) als auch in Filialen der Bekleidungsindustrie (z.B. Artikel-Tagging in der Galeria Kaufhof Essen). Handelspartner der Metro Group bezifferten bei der CEBit 2008 die aktuellen Preise für RFID-Transponder auf zwischen 10 und 15 Euro Cent. Für die Auszeichnung auf Artikelebene sind diese Kosten weiterhin zu hoch.

Die RFID-Aktivitäten der METRO Group bilden derzeit den größten operativen Einsatz der Technologie im europäischen Handelssektor. Nach eigenen Angaben verfolgt die METRO Group bei der Einführung von RFID eine eher langfristige Strategie mit dem Ziel, Erfahrungswissen beim Umgang mit der RFID-Technologie zu gewinnen.

²⁰ Die drei Fallstudien (Stand: März 2008) basieren vorwiegend auf Unternehmensdarstellungen und Interviews. Während bei der CCE AG Herr Dr. Schütze und für die fashionGroup Herr Dr. Schneider als Interviewpartner zur Verfügung standen, war die METRO Group trotz mehrmaliger schriftlicher und mündlicher Anfragen über einen Zeitraum von mehr als einem halben Jahr nicht zu einem vertiefenden Interview bereit. Als Begründung wurde angegeben, dass die FLOG-Studie (2007) hinreichend aussagekräftig sei. Auch der Verweis auf zentrale Unterschiede zwischen den beiden Studien (u.a. differenzierte Quantifizierung von Szenarien, umfassende Stakeholder-Einbindung wie z.B. der Glasrecycling-Branche, belastbare Materialgehalte von RFID-Tags im UBA-Projekt) weckte keine Bereitschaft für ein Interview. Allerdings wurden die Zwischenergebnisse des F+E-Vorhabens auf der Jahrestagung des AK RFID des BITKOM bei der Metro AG in Düsseldorf am 3.4.2008 präsentiert und diskutiert sowie die Fallstudie schriftlich ergänzt.

RFID-Einführung bei der Coca-Cola Erfrischungsgetränke AG

Die Coca-Cola Erfrischungsgetränke (CCE) AG ist das größte Getränkeabfüllungsunternehmen in Deutschland. Die CCE AG prüft derzeit den Einsatz von RFID-Tags für Coca-Cola in Deutschland auf Palettenebene. Erste Tests laufen auch auf der Kistenebene, nicht aber auf Artekelebene.

Im Feldtest zeigen sich keine Probleme mit RFID-Tags auf der Palettenebene. Auf der Kistenebene weist der RFID-Einsatz bei Getränkedosen-Gebinden noch Fehler auf, wohingegen bei Glas- und Kunststoffflaschengebinden keine Probleme auftreten. Bei Umverpackungen werden PPK und verschiedene Lagen Kunststoff genutzt. Derzeit ist eine Integration des RFID-Inlays in das Papieretikett wahrscheinlich.

Zeitpunkt und Umfang der Einführung von RFID-Systemen in der Produktion und Distribution stehen noch nicht fest. Wesentliche Anforderungen an die Systemgestaltung kommen von Handel und hier insbesondere von der METRO Group. Auch die REWE testet derzeit den Einsatz von RFID. Derzeit entsorgt der Handel die Umverpackungen von den Herstellern. Sollte die Entsorgung von mit RFID-Tags versehenen Umverpackungen jedoch Probleme aufwerfen, könnte der Handel eine Rücknahme durch den Hersteller fordern.

RFID-Einführung bei der fashionGroup

Die fashionGroup RFID ist eine Plattform von Unternehmen zur Förderung von RFID an der Schnittstelle von Handel und Bekleidungsindustrie. Die Bekleidungsindustrie nähert sich bei sinkenden Preisen für RFID-Inlays der Schwelle, „an der sich die Ausstattung der Hangtags mit RFID bereits allein durch die Einsparungen in der Logistik und die Verbesserungen der Datenqualität rechnet“ (Schneider 2008).

Die fashionGroup RFID plant, den Einkauf von RFID-Inlays der Mitgliedsunternehmen zu bündeln, um so Einheitlichkeit und Preisvorteile zu realisieren. Die RFID-Systeme sollen von unterschiedlichen Warenhäusern und Unternehmen der Textilbranche gleichzeitig eingeführt werden. Laut Angaben von GCS ist der Einkauf von 800.000 Transpondern geplant. In der Startphase werden Logistik-Hangtags genutzt – später soll eine schrittweise Integration in Schmucketiketten (textile Transponder) erfolgen.

Die Mitglieder der fashionGroup RFID verpflichten sich beim RFID-Einsatz zu Transparenz gegenüber den Endverbrauchern. Daher wird aktuell an einem Logo auf den Hangtags gearbeitet, das den Verbraucher informiert und es dem Kassenspersonal erlaubt, RFID-getaggte Ware einfach und sicher zu identifizieren und die Hangtags auf Wunsch des Kunden bzw. entsprechend der derzeit noch in der Diskussion befindlichen zukünftigen rechtlichen Rahmenbedingungen zu entfernen.

In den letzten Jahren sind einige Marktanalysen und -prognosen für RFID-Systeme entstanden. Derzeit gibt es nach Auskunft der Verbände Informationsforum RFID (Japs 2007) und BITKOM (Kuhlmann 2008) keine belastbaren Marktstudien zum heutigen und zukünftigen RFID-Markt in Deutschland²¹. Zur Analyse des RFID-Marktes in Deutschland haben wir behelfsweise auf quantitative Studien zum globalen und europäischen Markt zurückgegriffen. Spezifiziert werden sie durch qualitative Informationen über den deutschen RFID-Markt.

Allen Marktstudien gemeinsam sind starke Wachstumsprognosen. Es bleibt festzuhalten, dass auch die differenzierteren Marktstudien über grobe Schätzungen des Anteils von mit RFID versehenen Produkten nicht hinausgehen. Die Spannbreite der Schätzungen ist erheblich, was großteils an der unterschiedlichen Einschätzung der wichtigsten Treiber und Hemmnisse liegt. Deshalb haben wir mehrere mögliche Projektionen vorgenommen. Auf Basis einer Referenzprognose wird zum einen eine dynamischere Entwicklung angenommen, d.h. dass die Marktdiffusion schneller erfolgt und ein größeres Ausmaß annimmt. Zum anderen bündelt eine eher zurückhaltende Projektion die bereits heute absehbaren Teilmärkte, ohne die weit reichenden Killerapplikationen auf 1-Cent-Basis zu inkorporieren (s. Kapitel 5 und Anhang C).

Folgende Tabelle zeigt ausgehend von 2007 die Referenzprojektion für 2012, 2017 und 2022, sowie das geschätzte theoretische Potenzial.

²¹ Ein Großteil der globalen Marktstudien mit Erhebung eigener Daten ist kostenpflichtig (u.a. ABI Research, Gartner Research, IDTechEX). Aus diesen Studien sind nur fragmentarische Informationen aus Pressemitteilungen, Web-Informationen und Konferenzpräsentationen berücksichtigt worden. Nur einzelne hochwertige Berichte, meist im öffentlichen Interesse erstellt, sind kostenlos verfügbar (Bridge 2007, VDI/VDE 2007).

Tabelle 2-4: Referenzprojektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 [Mio. St.]

Anwendung	2007	2012	2017	2022	Potenzial	geschätzt nach:
Distribution						
Pakete	5	100	250	1.000	3.000	BIEK 2007
Briefe und sonstige Post	0	0	900	3.000	20.000	Bundesnetzagentur 2007, KEK 2005
Fluggepäck	1	10	60	120	150	BMVBW 2008
Einwegverpackungen						
Großgewerbe	13,5	180	900	3.600	60.000	Schüler 2008
Lebensmittel PEV	0	180	1.800	10.000	170.000	Schüler 2008
Bedarfsgegenstände PEV	2,5	175	875	2.000	30.000	Schüler 2008
Medikamente PEV	1,5	60	400	1.500	4.000	Schüler 2008
Kleidung PEV	1	20	100	200	3.000	ITE 2008
EE-Geräte PEV	1	20	100	200	2.000	BITKOM/ ZVEI
CDs/DVDs PEV	0,5	10	50	100	3.000	Phono-News
Mehrwegsysteme						
Kühlkette	0	1	20	100	k. A.	
Großgewerbe (sonstige)	1,5	19	80	300	s.o.	
Büchereien	5	10	20	30	350	Stat. BuA 2008
Archivierung	0,3	10	500	1.000	k. A.	
Konsumgüter						
Kleidung	0	10	50	200	3.000	ITE 2008
EE-Geräte	0	10	50	200	2.000	BITKOM/ ZVEI
CDs/DVDs	0	5	25	100	3.000	Phono-News 2007
Personenbezogene Anwendungen						
Smart Cards	50	60	80	100	k. A.	
Smart Ticket Verkehr	0	10	60	600	4.000	BMVBW 2008
Smart Ticket Freizeit	10	10	20	150	1.000	Stat. BuA 2008
Gesamt	92,8	900	6.340	24.000		

Quelle und Anmerkungen: Abschätzungen des IZT basierend auf Bridge 2007 und IDTechEx 2007 und 2008 sowie andere (s. letzte Spalte) für die Abschätzung des theoretischen Potentials

2.4 Fazit

Es gibt eine Fülle von Größen, Inhaltsstoffen und Bauformen von RFID-Tags. Mit den Angaben zur stofflichen Zusammensetzung von heutigen passiven RFID-Tags gemäß dem Technischen Report ISO/IEC TR 24729-2:2007 steht eine verlässliche Quelle für Abschätzungen zur Verfügung, ob der RFID-Fluss heutige Recyclingprozesse beeinträchtigen kann. Aus Technologie-Roadmaps können nur ansatzweise Informationen zur stofflichen Zusammensetzung zukünftiger RFID-Tags abgeleitet werden.

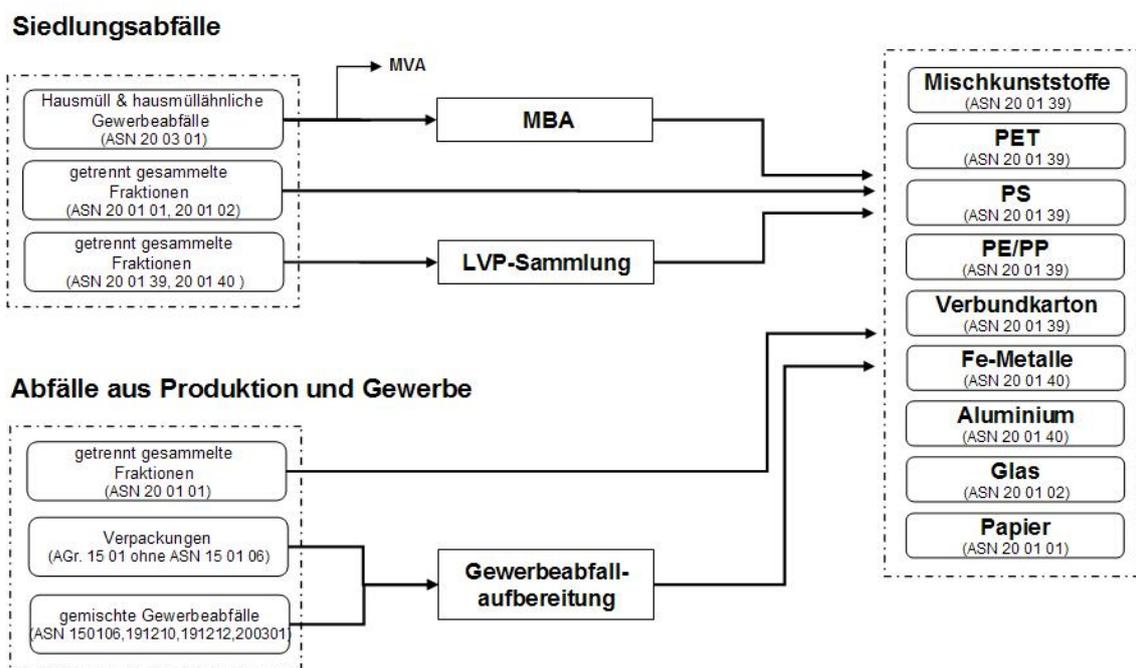
RFID-Tags haben das Potenzial, Produktions-, Logistik- und Konsumprozesse in großem Maße zu durchdringen. Die valideste uns vorliegende Marktanalyse ist im Bridge-Projekt für Europa entstanden. Sie dient uns als hauptsächliche Quelle für die Abschätzung der Marktentwicklung in Deutschland. Da die Autoren ihre Schätzungen für konservativ halten und wir diese aber als optimistisch bezüglich RFID-Diffusion ansehen, erstellen wir neben der Referenzprojektion zusätzlich eine dynamischere und eine moderatere Projektion (vgl. Anhang C).

In den zahlreichen Interviews und drei Fallstudien sind die heutige Situation und die zukünftigen Entwicklungen empirisch fundiert worden.

3 Auswirkungen von RFID-Tags in der Siedlungsabfallentsorgung

Bezüglich eines Eintrags von passiven RFID-Tags sind primär Siedlungsabfälle und in geringerem Maße auch Abfälle aus Produktion und Gewerbe relevant. Abbildung 3-1 zeigt, welche verwertbaren Fraktionen bei der Sortierung und Aufbereitung dieser Abfallfraktionen anfallen.

Abbildung 3-1: Verwertbare Fraktionen aus den bezüglich eines Eintrags von RFID-Tags relevanten Abfallfraktionen



Quelle: Darstellung der Empa

Im Folgenden werden die Auswirkungen von passiven RFID-Tags auf die Verwertung dieser Fraktionen untersucht. Die Untersuchungen beziehen sich dabei in erster Linie auf Smart Labels, da diese sich wesentlich besser zur massenhaften Kennzeichnung von Produkten im Konsumgüterbereich eignen als z.B. Inmould Tags²².

Die Struktur der heutigen Siedlungsabfallwirtschaft in Deutschland mit ihren Mengenströmen ist in Anhang C umrissen. Quantitative Abschätzungen der zukünftigen Auswirkungen von RFID-Tags werden in Kapitel 4 vorgenommen.

²² Die Auswirkungen von Inmould Tags werden bei der Diskussion der Mischkunststoffe mitberücksichtigt, da erwartet wird, dass Inmould Tags vor allem in dieser Fraktion anfallen.

Neben den in Abbildung 3-1 ausgewiesenen Fraktionen werden auch Ersatzbrennstoffe und Schlacken untersucht. Schlacken fallen u. a. bei der energetischen Verwertung oder thermischen Beseitigung von Rückständen an, welche bei der Verarbeitung der in Abbildung 3-1 rechts dargestellten Fraktionen entstehen.

Für jede Fraktion werden in den folgenden Abschnitten die zugehörigen Verwertungs- bzw. Beseitigungsprozesse beschrieben und die Prozessschritte identifiziert, in denen bei heutiger Technologie eine Absonderung der Bestandteile der RFID-Tags zu erwarten ist. Die Auswirkungen der RFID-Tags in der entsprechenden Fraktion werden jeweils nach folgendem Schema diskutiert:

- ▶ Auswirkungen auf die Prozesse
- ▶ Auswirkungen auf die Rezyklate
- ▶ Verbleib der Tag-Bestandteile

Die Untersuchungen nahmen den Wissensstand zum Ausgangspunkt, der hauptsächlich in den folgenden Literaturquellen dokumentiert ist:

- ▶ Die vom BMBF geförderte Studie „Auswirkung eines RFID-Masseneinsatzes auf Entsorgungs- und Recyclingsysteme“ des Fachgebiets Logistik der Universität Dortmund (FLOG 2007), nachfolgend auch als "FLOG-Studie" zitiert;
- ▶ Die von der Confederation of European Paper Industries (CEPI) in Auftrag gegebene Studie „Possible Issues Surrounding the Recycling of Boxes with RFID Tags“ (CEPI 2005), nachfolgend auch als "CEPI-Studie" zitiert;
- ▶ Zwei Publikationen der Empa (Kräuchi et al. 2005; Wäger et al. 2005), die auf Interviews mit Experten der Schweizer Recyclingindustrie beruhen, nachfolgend auch als "Empa-Studie" (Empa 2005) zitiert;
- ▶ Der ISO/IEC Normentwurf „Information technology — Radio frequency identification for item management — implementation guidelines — Part 2: Recycling and RFID tags“ (ISO/IEC TR 24729-2:2007), der nach Konsultation mit Verbänden der Verpackungsindustrie Richtlinien für die vorbeugende Minimierung von Problemen durch RFID in Recyclingprozessen formuliert, nachfolgend auch als "ISO-Norm" zitiert;
- ▶ Die Stellungnahme des Verbandes der Britischen Glashersteller „RFID Tags Present Challenge to Glass Industry“ (British Glass 2005), nachfolgend auch als "British-Glass-Studie" zitiert.

Die Hauptaussagen dieser Quellen wurden jeweils durch theoretische Überlegungen ergänzt und dann in Experteninterviews validiert, präzisiert und weiterentwickelt. Zur

Abklärung des Verhaltens von RFID-Tags in Verwertungs- und Sortierprozessen hat die Empa außerdem erste Labortests durchgeführt.

Außerhalb dieses Schemas folgt ein Exkurs über Bioabfälle (Abschnitt 3.5).

3.1 Recycling von Glas

Das Aufkommen an Glas für das Recycling stammt hauptsächlich aus getrennt gesammeltem Verpackungsglas der privaten Endverbraucher (PEV) und aus gewerblichen Quellen, wie z.B. Bruchglas aus der Flaschenabfüllung. Das Glas der privaten Endverbraucher wird in Sammelbehältern für Weiss-, Grün- und Braunglas erfasst.

Abbildung 3-2 zeigt den Recyclingprozess für Glas. Die Reinheit des Altglases ist eine zentrale Anforderung des Prozesses. Um diese zu erreichen, wird Altglas auf einem Fließband manuell von groben Verunreinigungen befreit. Mittels Siebung werden die Scherben in die geforderten Korngrößenklassen nach DIN ISO 3310/1 klassiert. Anschließend werden zu große Stücke in kleine Scherben gebrochen. Mittels Friktionswäscher werden die Scherben so bearbeitet, dass sie für den später folgenden Keramik-, Stein- und Porzellan-(KSP) Abscheider als Glas detektiert werden können. Die weitere Aussortierung von Fremdstoffen erfolgt in folgenden Schritten: Gelöste Etiketten, Folien und Verschlüsse werden über Luftabsaugungen dem Scherbenstrom entzogen. Für die Abtrennung der FE-Metalle wird ein Magnetabscheider, für die Abtrennung der NE-Metalle ein Wirbelstromabscheider eingesetzt, die metallene Bestandteile ab 0,6 mm Durchmesser erkennen. Unter Verwendung von optomechanischen Sensoren (KSP-Abscheider) werden die nicht schmelzbaren Keramik-, Stein- und Porzellananteile durch Druckluftimpulse aus dem Scherbenstrom entfernt. Anschließend werden die Scherben in einer Nachsortierung nochmals gesiebt und klassiert, um letzte Fehlerfarben und Fremdstoffe zu entfernen (Team Grüner Punkt 2008).

Der ganze Prozess kann aber auch in einer Sortiermaschine stattfinden (Zeiger 2005). Dort wird das ankommende Material z.B. über eine Rutsche vereinzelt. Anschließend passiert es in einer dünnen Schichtung (im Idealfall in einer Einzelschicht) einen Materialsensor (z.B. im freien Fall eine Zeilenkamera) mit Farbbildverarbeitung. Parallel dazu steht ein Metalldetektor, der FE- und NE-Metalle ab einer Größe von knapp unter einem Millimeter erkennt. Die Trennung oder Auslese der mit diesen beiden Sensoren detektierten Fremdstoffe erfolgt im Anschluss z.B. durch Druckluftimpulse.

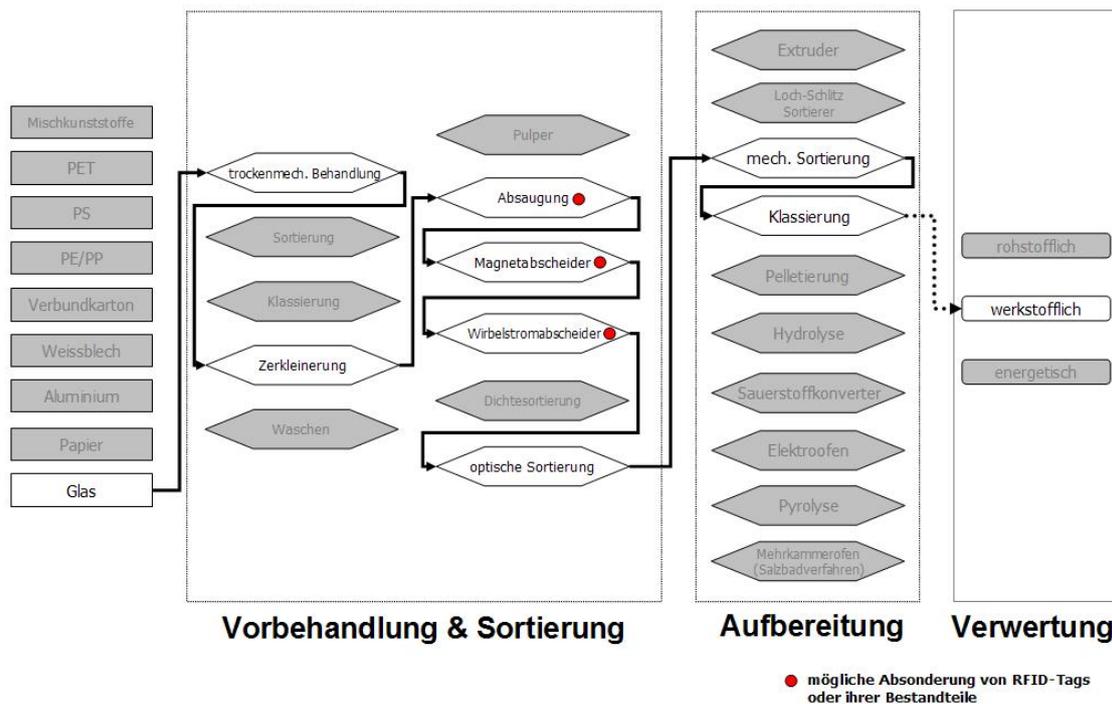
Beim Eintrag von RFID-Tags ist entscheidend, ob sich die Tags in der Vorbehandlung vom Glas ablösen. Abgelöste RFID-Tags können im Prozess ausgeschleust und entsprechend energetisch oder werkstofflich verwertet werden. Das Gros der nicht abge-

lösten RFID-Tags dagegen wird zu Einträgen in der Glasschmelze führen (Roger 2008).

Es ist sehr wahrscheinlich, dass auf dem Glas angebrachte RFID-Tags nicht abgelöst werden, denn auch der überwiegende Bestandteil der Etiketten geht in die Schmelze ein. Die Etiketten werden mittels Friktionswäscher nur soweit mechanisch zerstört, dass der optomechanische KSP-Abscheider diese nicht als KSP detektiert. Es ist deshalb zu vermuten, dass auch der Großteil der auf dem Glas direkt angebrachten RFID-Tags in die Schmelze eingetragen werden (Freydl 2008).

Als Maßnahme zur Vermeidung des Eintrags in die Schmelze würde sich das Tagging der Verschlüsse anbieten, da die Ausbeute der Abscheidung der Verschlüsse bei 95 % liegt.

Abbildung 3-2: Recyclingprozess für Glas



Quelle: Darstellung der Empa

Auswirkungen auf die Prozesse

Keine der genannten Studien geht davon aus, dass der Prozessablauf als solcher durch die RFID-Tags gestört wird. Als problematisch wird jedoch eingeschätzt, dass aus den Tags stammende anorganische Störstoffe eventuell nicht vollständig abgesondert werden können und in die Glasschmelze gelangen, wo sie schon in kleinen

Mengen die Qualität des Glases beeinträchtigen (Empa 2005, FLOG 2007, British Glass 2005). Ursachen für die unvollständige Aussonderung der Störstoffe sind:

- ▶ Die RFID-Tags werden mit sehr starken Klebstoffen angebracht, was zur Folge hat, dass sie in der Vorbehandlung nicht abgelöst werden, sondern im Brecher in teilweise sehr kleine Stücke zerfallen, die in den nachfolgenden Prozessschritten schwer zu detektieren und auszusortieren sind (British Glass 2005). Metalle werden im heute üblichen Verfahren erst ab einer Größe von 0.6 mm aussortiert (FLOG 2007).
- ▶ Die Sortierer könnten möglicherweise mit den großen Mengen von Störstoffen nicht fertig werden, wenn große Anteile der Hohlglasbehälter mit einem RFID-Tag versehen sind. Als Konsequenz wäre eine einschneidende Anpassung der Sortierprozesse an das höhere Störstoffaufkommen erforderlich (FLOG 2007, Empa 2005). Es wird jedoch immer dazu kommen, dass einzelne passive RFID-Tags nicht detektiert werden können, bedingt durch Überlagerungen der Glasschichten sowie durch Sortierfehler des Detektors (Roger 2008).
- ▶ Des Weiteren sammeln sich geschmolzene Metalle am Boden der Schmelzwannen an, und erhöhen die Korrosionsgefahr, was bei elektrischen beheizten Wannen zu Störungen führen kann (Höhne 2005). Dies gilt im Bezug auf RFID-Tags vor allem für Silber.

Die organischen Bestandteile der RFID-Tags stellen keine Beeinträchtigung dar, da sie in der Glasschmelze verbrennen, sofern sie nicht vorher abgesaugt wurden.

Auswirkungen auf die Rezyklate

Gelangen aus den oben genannten Ursachen Metalle und unlösliches Silizium in die Glasschmelze, führt dies zu folgenden Beeinträchtigungen der Glasqualität²³:

- ▶ Einschlüsse von Fremdstoffen, die die Bruchfestigkeit des Glases verringern, was besonders die Eignung für Druckbehälter herabsetzt: Das vom Mikrochip stammende Silizium (British Glass 2005) oder Reste von Aluminiumantennen

²³ Eine Untersuchung der Glass Technology Services Ltd. (GTS) von drei unterschiedlichen Smart-Labels aus dem Jahr 2005 hat ergeben, dass diese geringere Auswirkungen in der Glasschmelze erzeugen als die Tags aus einer Untersuchung von 2000. Die direkt auf dem Glas angebrachten Tags waren sowohl mit Kupfer-, als auch mit Aluminium-Antennen versehen und wurden unter Laborbedingungen einer Weißglasschmelze bei 1450°C zugeführt. Als Resultat gilt festzuhalten, dass alle beschriebenen Beeinträchtigungen – wie Einschlüsse und Eintrübungen – beobachtet werden konnten, diese jedoch nach einer Verweilzeit von mehr als vier Stunden bei einer konstanten Temperatur von 1450°C nicht mehr lokalisierbar waren (Marshall 2005).

(Empa 2005) können zu solchen Einschlüssen führen. Dies gilt im Falle von Silizium auch für Chips mit einem Silizium-Gehalt von 0,5 mg je Chip und Korngrößen kleiner als 1 mm. Durch die Einlagerung des unlöslichen Siliziums kommt es zu Sollbruchstellen, die sternförmige Risse im Glas verursachen. Auch für Aluminium trifft dies zu, da das Aluminium an der Oberfläche oxidiert und damit den Gehalt an organischem Siliziumdioxid mindert, was zu Änderungen in der Glas-Matrix führt (Roger 2008) ²⁴.

- ▶ Verfärbungen durch metallene Verunreinigungen: Chromeisen, Kobalt und Kupfer können schon in geringen Konzentrationen starke Verfärbungen bewirken (British Glass, Empa-Studie). Kupfer erzeugt deutlich sichtbare braune Schlieren, Silber sedimentiert auf den Boden der Schmelze und erzeugt leichte graue Schlieren (Roger 2008). Am empfindlichsten bezüglich des Eintrages von Fehlfarben ist das Weissglas- vor dem Braunglas- und letztlich dem Grünglasrecycling.

Laut FLOG-Studie würden die metallenen Anteile der Tags unter der Annahme eines vollständigen Taggings bei allen drei Antennenarten (Aluminium, Kupfer, Silberleitpaste) den Grenzwert von 5 g/t NE- Metalle nach Produktspezifikationen der GGA Ravensburg (GGA 2002) im Altglas um 1-2 Größenordnungen überschreiten. Auch dies ist ein Hinweis darauf, dass mit den heutigen Sortierverfahren die Qualität des Recyclingglases nicht zu halten wäre, da der Grenzwert auf die heutigen Verfahren und Qualitätsanforderungen abstellt.

Allerdings ist dieser Grenzwert variabel, da es von der Marktlage abhängt, welche Qualitäten an Altglas beziehbar sind. Weiterhin werden die Altglasfraktionen soweit vermischt, dass die gewünschte Qualität der Glasschmelze erzeugt werden kann (Roger 2008).

24 Da die Einträge von Silizium und Aluminium in die Glasschmelze die gleichen Einschlüsse verursachen, stellt sich die Frage, welcher Tag-Bestandteil stärker zu dem Aufkommen an unlöslichem Silizium beiträgt. Das Reduktionsverhalten von Aluminium kann wie folgt beschrieben werden, wobei zu beachten ist, dass der folgende Reaktionsablauf idealisiert ist, und sich auf Grund der Reaktionskinetik in der Realität nicht exakt einstellen wird:



Idealisiert bedarf es 4 Aluminium-Moleküle, um bis zu 3 Silizium-Moleküle zu reduzieren, wobei diese homogen verteilt vorliegen müssten, was für stückige Aluminium-Antennen unwahrscheinlich ist. Weiterhin ist zu beachten, dass der Eintrag von reinem Silizium des Chips für jeden Tag-Typ gegeben wäre, wohingegen nur ein Teil der Tags mit Aluminiumantennen versehen ist.

Verbleib der Tag-Bestandteile

Bei der werkstofflichen Verwertung der Glasfraktion ist bei den heute üblichen Verfahren davon auszugehen, dass vom Glas abgelöste RFID-Tags mit den anderen Etiketten weitgehend abgesaugt werden. Das Tagging der Banderole würde die Separierung im Vergleich zum direkten Glas-Tagging erleichtern. Die dabei anfallende Fraktion wird heute thermisch beseitigt (Roger 2008). Sofern die vorgelagerte Metallseparation empfindlich genug ist, kann eine Abtrennung von RFID-Tags auch vor der Absaugung stattfinden. In diesem Fall würden die metallenen Inhaltsstoffe einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

British Glass schlägt als Lösung vor, die RFID-Tags generell in die Verschlüsse der Glasbehälter zu integrieren, so dass sie zerstörungsfrei ausgesondert werden können. Im heutigen Glasrecycling ist es kein Problem mehr, Deckel und Schraubverschlüsse von Flaschen und Gläsern in den Recyclinganlagen nahezu vollständig auszusortieren (Roger 2008).

Falls man jedoch auf eine direkte Aufbringung nicht verzichten kann, sollte versucht werden, RFID-Tags so zu gestalten, dass sie im Gegensatz zu Etiketten nicht mehr zerreißen, sondern möglichst duktil sind, damit sie nach der Brechung des Glases durch Abscherung vom Glas gelöst werden können (Roger 2008).

Fazit zur Fraktion Glas

Bei einer starken Zunahme der RFID-Tags auf Glasbehältern sind Beeinträchtigungen der Glasqualität wahrscheinlich. Dies gilt für Silizium-Chips und insbesondere auch bei Verwendung von Aluminium als Antennenmaterial. Um dem Anstieg des Störstoffeintrags entgegenzuwirken, wären erhebliche prozessuale Anpassungen notwendig. Das Problem kann vermieden werden, indem die RFID-Tags nicht direkt am Glas befestigt oder abtrennungsfreundlich gestaltet werden.

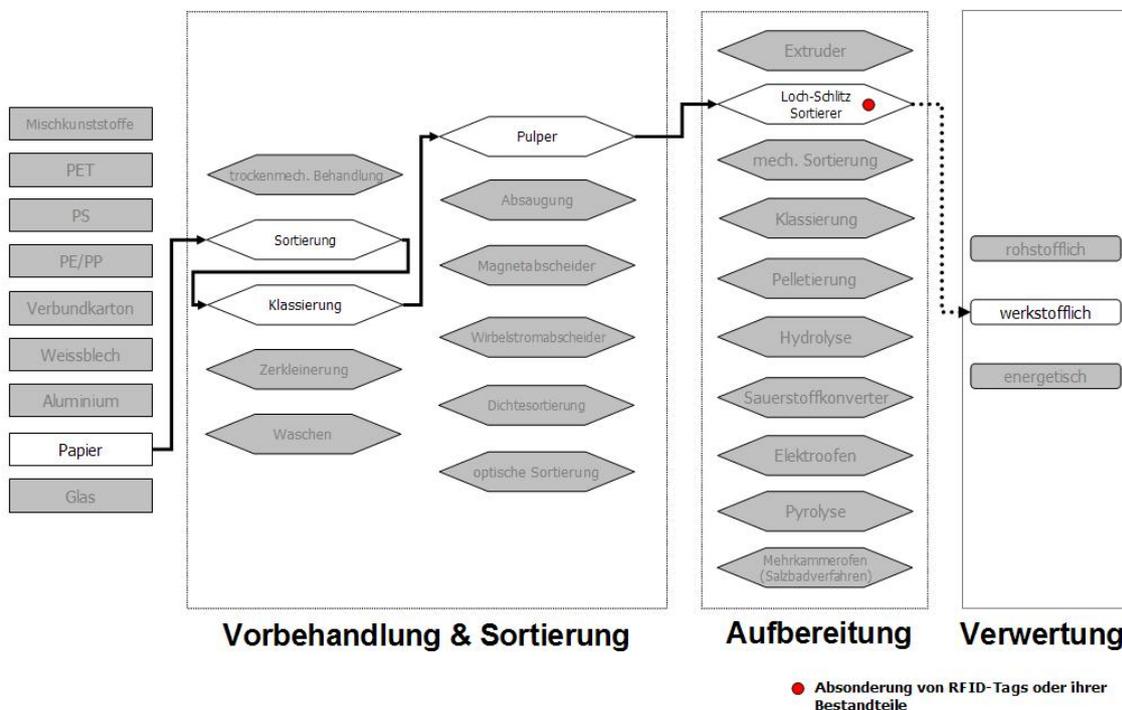
3.2 Recycling von Papier, Pappe, Karton (PPK)

Die Recyclingprozesse für PPK sind unterschiedlich je nach Ausgangsmaterial und Endprodukt. Hauptsächliche Endprodukte des PPK-Recyclings sind Grafische Papiere und Verpackungsmaterialien (u.a. Wellpappe, Karton), in geringerem Umfang auch Hygienepapiere und sonstige Papiere. Betrachten wir im folgenden den bezüglich RFID-Tags vorwiegend relevanten Verpackungsbereich, und – sofern erforderlich – auch den der Grafischen Papiere.

Alle eingesetzten Prozessschritte (siehe Abbildung 3-3) dienen dem Ziel, die Fasern von Verunreinigungen und Störstoffen zu separieren (IPPC 2000). In einem ersten

Schritt wird hierfür das gesammelte Material entweder in einem Pulper oder einer Auflösetrommel unter der Zugabe von Wasser aufgelöst; die Fasern werden in Suspension gebracht. Über eine Schmutzklappe werden dabei laufend Verunreinigungen sowie sich bildende Klumpen aus der Lösung abgeschöpft und aussortiert. Im zweiten Schritt werden über Loch- und Schlitzsortierer, mit Öffnungen von 1,2 mm und 0,5 mm, sowie mittels Hydrozyklonen die verbleibenden Verunreinigungen und Störstoffe mechanisch entfernt. Im nächsten Schritt (insbesondere bei grafischen Papieren) gelangt die Suspension mit den Fasern in die Deinking-Anlage, bevor das Wasser-Fasergemisch dann in den neuen Papierproduktionsprozess eingebracht wird.

Abbildung 3-3: Recyclingprozess für Papier, Pappe, Karton



Quelle: Darstellung der Empa

Die Durchdringung des Altpapiers mit Metall in Form von Büroklammern und Heftzwecken ist ein alt bekanntes Problem. Bei den Recyclingprozessen für PPK ist davon auszugehen, dass die meisten eingebrachten RFID-Tags über die Loch- und Schlitzsortierer ausgeschieden werden. Vereinzelt Einträge von Tag-Bestandteilen in die jeweilige Papiersorte sind aber möglich (Thiel 2008).

Auswirkungen auf die Prozesse

Die metallenen Elemente von RFID stellen kein Problem für den Recyclingprozess von Papieren dar. Eine Umfrage des Verbandes der Deutschen Papierfabriken (VDP) unter

seinen Mitgliedern bestätigt dies – man erwartet auch bei einer Zunahme von RFID-Tags keine Probleme in der Aufbereitung. Der VDP geht davon aus, dass Tags sich im Pulper von den Papierfasern lösen, aber zu klein sind, um dort bereits ausgeschieden zu werden. Sie würden stattdessen in den anschließenden Sieben und Hydrozyklonen ausgeschieden (Thiel 2008).

Jedoch können die eingesetzten Klebstoffe in den Produktionsprozess des Papiers gelangen (FLOG 2007, CEPI 2005, Thiel 2008)²⁵. Es sei dabei auch möglich, dass Alu-Antennen im leicht sauren Milieu gelöst werden – betreffend Kupfer und Silber ist dem Verband nichts bekannt (Thiel 2008).

Die CEPI-Studie berichtet von einer US-amerikanischen Papierfabrik²⁶, in welcher 50.000 RFID-Tags monatlich anfallen. Es konnten dort keine messbaren Einflüsse von RFID-Teilen auf den Prozess festgestellt werden (CEPI 2005). Laut CEPI-Studie wird der Metallanteil im Wasser-Faser-Gemisch durch den Eintrag von RFID-Tags um 0,5 % bis 10 % zunehmen. Die Tags heutiger Bauart lassen sich laut CEPI-Studie aber leicht durch die Loch- und Schlitzsortierer aus dem Faserbrei entfernen. Anders werden von der CEPI-Studie direkt auf Papier, Pappe resp. Karton *aufgedruckte* Smart Labels beurteilt. Hier wird ein Aufbrechen der metallenen Antennen vermutet, welches zu Verunreinigungen im Produkt, aber auch in Abfallfraktionen wie Schlamm oder Abwasser führen kann.

Dies hätte zur Folge, dass die verwendeten Druckkomponenten so gewählt werden müssen, dass es mit konventionellen Deinkingverfahren möglich ist, diese vom Zellstoff zu trennen. Falls sich jedoch die Druckbestandteile in der Deinking-Umgebung auflösen, bedarf es einer Sensorik, die an der chemischen Zusammensetzung die Druck-

25 Für semi-passive RFID-Tags, welche zusätzlich eine Zink-Kohle-Batterie enthalten und auf Transportverpackungen bereits heute Verwendung finden, sind die obigen Aussagen ebenfalls gültig. Die Batterie ist insofern unkritisch, als sie mittels Loch- und Schlitzsortierer ausgesondert und mit anderen Störstoffen des Papierrecyclings entsorgt werden kann. Allfällige Probleme durch defekte Batteriedichtungen sind bisher nicht aufgetreten (Thiel 2008).

26 In einer älteren Studie des Instituts für Papiertechnik an der Universität von Miami wurde durch Untersuchungen der Prozessabläufe in einer Papiermühle die Auswirkungen von Metallen in den einzelnen Prozessschritten betrachtet. Hinsichtlich RFID-Tags ist das Ergebnis relevant, dass Kupfer und Aluminium, wie auch die meisten anderen Metalle, zu 75-100 % über die Sortierreste ausgesondert wurden. Lediglich 1-12 % der in den Prozess eingebrachten Metalle wurden in die Produkte eingetragen, wobei der Eintrag von Aluminium größer war als der von Kupfer. Jedoch wurden beide Konzentrationen als nicht signifikant eingestuft. Die größten Konzentrationsschwankungen wurden durch die verschiedenen Typen von Altpapier verursacht (Souza 1998).

komponenten aufspürt und entsprechend getaggte Erzeugnisse aus dem Recyclingverfahren ganz ausschleust (Friedl 2007).

Die Empa-Studie weist darauf hin, dass das Trägermaterial des Tags das Verhalten im Prozess beeinflussen könnte; Tags mit Papier als Trägermaterial werden im Prozess aufgelöst, so dass die metallenen Antennen freigesetzt werden. Bei Kunststoff als Trägermaterial besteht eher die Möglichkeit, den Tag als Ganzes zu separieren.

Auswirkungen auf die Rezyklate

Qualitätsanforderungen für Papier und Pappe sind in der Europäischen Liste der Standardsorten für Altpapier und Pappe festgelegt (EN 643:2001). Für alle Sorten gilt, dass der Störstoffgehalt (u.a. Metalle, Plastik, Glas) insgesamt 3 % der Masse nicht überschreiten darf. RFID-Tag spezifische Anforderungen sind nicht definiert. Dieser Grenzwert ist ökonomisch motiviert, da sich der Anteil an Fremdstoffen im Altpapier direkt auf die Menge des verwertbaren Papiers auswirkt, den Aufwand für die Reinigung erhöht und die Kosten für die Entsorgung erhöht. Jedoch haben diese Fremdstoffe keinen direkten Einfluss auf die Qualität der Papierzeugnisse (Manoiu 2008).

Sowohl die FLOG-Studie wie auch die CEPI-Studie gehen davon aus, dass die Klebstoffe von passiven RFID-Tags in den Papierproduktionsprozess gelangen können und dort zur Bildung von sogenannten „Stickies“ durch das Verklumpen mit Füllstoffen und Fasern führen können. Die FLOG-Studie verweist darauf, dass das Thema Stickies nur bei der Karton- und Pappeproduktion aufgrund der höheren Anteile an Altpapier ein Thema sei, jedoch nicht zu akuten Qualitätsproblemen beim Produkt führe. Auch die CEPI-Studie geht davon aus, dass das Stickies-Problem durch RFID-Tags nicht verschärft wird. Alle Studien verweisen dabei auch auf die Tatsache, dass die Menge Altpapier im Input je nach Qualität des Produktes unterschiedlich ist – sowie qualitativ hochwertige Produkte hergestellt werden, wird weniger bzw. werden speziell ausgewählte Kategorien von Altpapier als Input benutzt. Dies wird von Seiten des VDP bestätigt (Thiel 2008).

Gemäß CEPI- und Empa-Studie ist davon auszugehen, dass kleine Kunststoff- und Metallteile von RFID-Tags (Durchmesser unter 1 mm) durch die verschiedenen Reinigungsstufen nicht vollständig ausgeschieden werden und zu einer Verringerung der Papierqualität führen können. Je nach Anwendung des Papiers kann dies ein Problem darstellen. Dem lässt sich aber durch eine sinnvolle Wahl der Inputmaterialien entgegenwirken. Die Verwendung von rezykliertem PPK mit Kontakt zu Lebensmitteln ist ohnehin nicht zulässig.

Verbleib der Tag-Bestandteile

Die RFID-Tags fallen nach den heute üblichen Verfahren in den Loch- und Schlitzsortierern aus. Dort werden anfallende RFID-Tags zusammen mit den anderen dort anfallenden Störstoffen energetisch verwertet (Thiel 2008). Eine Rückgewinnung der in RFID-Tags enthaltenen Stoffe wäre höchstens nachgelagert aus Schlacke möglich (siehe auch Kapitel 4.3.2).

In einer Untersuchung der bayerischen Papierindustrie für das Basisjahr 2004 (Simon 2008) wurden sämtliche Entsorgungsströme für die Papiererzeugung quantifiziert. In der Altpapiersortierung werden 63 % der Reststoffe einer energetischen Monoverwertung, 31 % der energetischen Mitverbrennung (Ziegelindustrie) und 6 % einer sonstigen Verwertung zugeführt. Lediglich 1 % der Rückstände aus der Sortierung wird deponiert. Schlamm-Rückstände werden dagegen zu 43 % einer energetischen Monoverwertung, zu 30 % einer energetischen Mitverbrennung (Ziegelindustrie) und zu 2 % einer sonstigen Verwertung zugeführt. Der Rest von 25 % wird kompostiert (Simon 2008).

Die CEPI-Studie geht davon aus, dass sich der Metallanteil im Abwasser und/oder Schlamm erhöhen kann. Es wird auf eine US-Untersuchung verwiesen, welche jedoch zeigt, dass die Grenzwerte kaum überschritten würden (CEPI 2005).

Fazit zur Fraktion Papier, Pappe, Karton

Auch bei einer starken Zunahme der RFID-Tags in der PPK-Fraktion ist keine nennenswerte Beeinträchtigung der Prozesse durch die eingebrachten Metalle zu erwarten, da die Metallteile weitgehend ausgeschieden werden. Allenfalls könnten größere Mengen Klebstoff zu einer rascheren Verstopfung der Siebe führen.

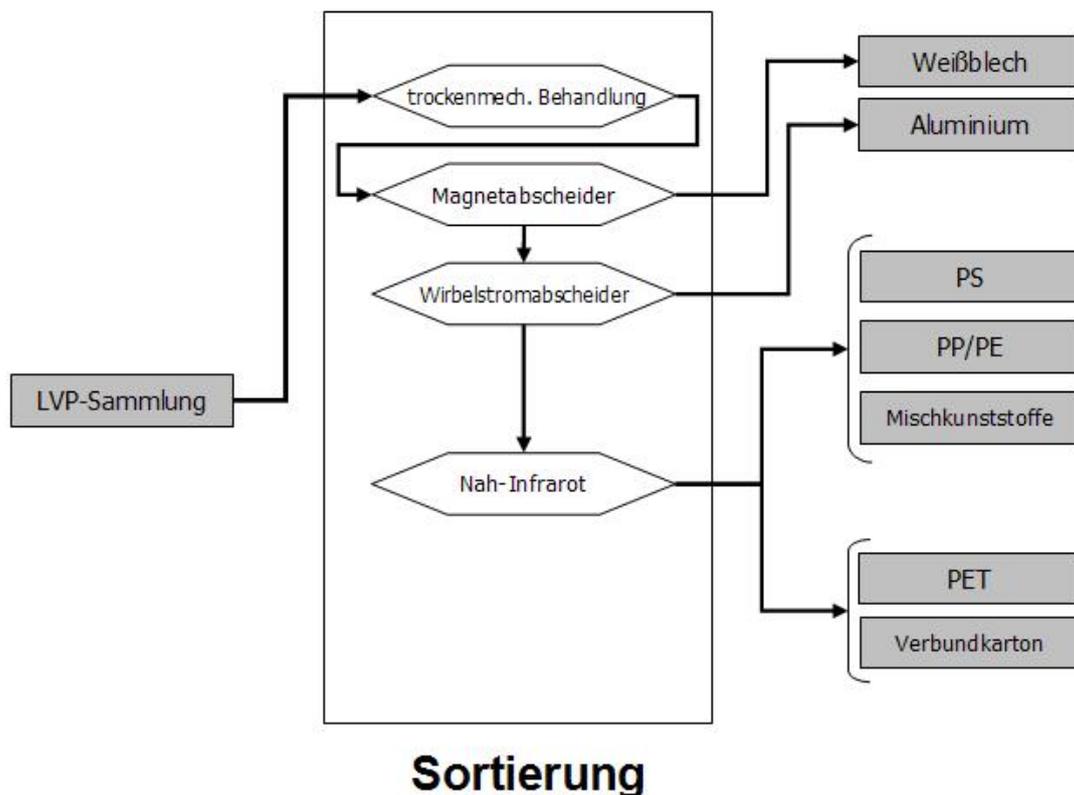
In Zukunft ist nicht völlig auszuschließen, dass aufgrund kleinerer Bruchstücke der RFID-Tags die Papierqualität beeinträchtigt wird.

3.3 Recycling von Leichtverpackungen (LVP)

Unter den Begriff der Leichtverpackungen fallen alle pfandfreien Verkaufsverpackungen, die im Rahmen der Dualen Systeme in Deutschland gesammelt, und nach den Anforderungen des § 6 VerpackV einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, mit dem Ziel die Auswirkungen von Abfällen auf die Umwelt zu verringern oder zu vermeiden. Dabei handelt es sich im speziellen um die Fraktionen der Verbundkarton, Kunststoffe, Weißblech und Aluminium.

Abbildung 3-4 zeigt den typischen Ablauf bei der Auftrennung der Leichtverpackungsfraction im Rahmen des DSD. Bei der DSD-Sortierung fallen die Fraktionen Weißblech, Aluminium, PS, PE/PP, Mischkunststoffe, PET und Verbundkarton an. Die Sortierung verläuft dabei in der Regel wie folgt: Nach Öffnung des Gebindes (gelber Sack) gelangt dessen Inhalt auf ein Förderband. Zunächst werden Fehlwürfe manuell aussortiert. Dann werden Weißblech und Aluminium mittels Magnetabscheider und Wirbelstromabscheider aussortiert. Anschließend werden PET und die Verbundkartons mittels NIR-Spektroskopie identifiziert und durch Luftdruckimpuls abgetrennt. Das verbleibende Material gelangt in eine Schwimm-Sink-Anlage, wo PE, PP und PS sowie übriggebliebenes PET als Schwimmfraktionen anfallen. Die Mischkunststoffe entsprechen der übriggebliebenen, nicht sortenreinen Kunststofffraktion. Auch andere Getrennsammlungen von Leichtverpackungen werden nach diesen Verfahrensschritten fraktioniert.

Abbildung 3-4: Recyclingfraktionen aus der Leichtverpackungssammlung



Quelle: Darstellung der Empa

Grundsätzlich könnten mit RFID-Tags beklebte Verpackungsteile im Laufe der LVP-Sortierung mittels spektroskopischer Detektierung oder Form- bzw. Oberflächenmerk-

malerkennung erkannt werden. Die Aussortierung dieser Verpackungsteile vor den weiteren Schritten der Aufbereitung würde allerdings die Ausschussquote massiv erhöhen, sobald die meisten Verpackungen mit einem Tag versehen wären. Um diesen Zielkonflikt zu vermeiden, müssten Wege gefunden werden, die Tags schon in der LVP-Sortierung von den Verpackungen abzulösen. Wir gehen davon aus, dass dies ohne eine sehr innovative Anpassung der LVP-Sortierung nicht geschehen wird und die RFID-Tags deshalb im Normalfall in die nachfolgenden Verfahrensschritte (z.B. Zerkleinerung der Kunststoffe) gelangen.

3.3.1 Verbundkarton

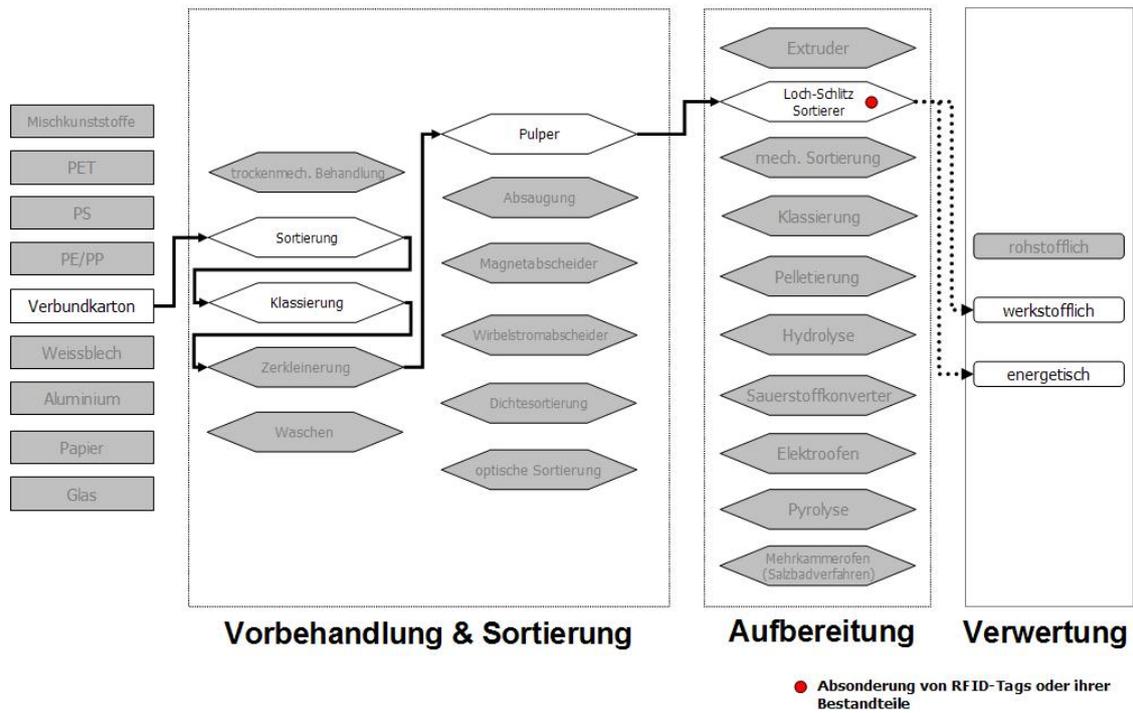
Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel (wie Milch, Fruchtsäfte, Suppen, usw.) bestehen aus Verbundkarton. Solche Kartons sind mit einer Beschichtung aus Kunststoff oder aus Kunststoff und Aluminium versehen und können deshalb nicht in den gleichen Recyclingprozess eingeschleust werden wie reine Kartonverpackungen.

In Deutschland wird Verbundkarton durch die ReCarton Gesellschaft für Wertstoffgewinnung aus Getränkekartons mbH in Wiesbaden dem DSD abgenommen und verwertet (FKN 2008). Hierzu hat die ReCarton GmbH mit drei Papierfabriken – zwei in Deutschland und eine in Finnland – Verwertungsverträge abgeschlossen.

Das Recyclingverfahren für den Kartonanteil ist grundsätzlich das gleiche wie im Falle von PPK (siehe Abschnitt 3.2). In einem vorausgehenden Schritt werden Verbundkartonagen jedoch meist in rund handtellergröße Stücke geshreddert, damit sie dem nachfolgenden Auflöseprozess die nötigen Angriffsflächen bieten²⁷. Dann gelangen diese Stücke zur Auflösung wie PPK in einen Pulper oder (häufiger) in eine Auflösetrommel. Hier werden die Papierfasern mit Wasser aus dem Material herausgelöst. In einem nachgeschalteten Loch- und Schlitzsortierer wird die aufgelöste Papierfaser vom übrigen Material getrennt. Über eine Reihe von Siebsortierschritten gelangt der Faserbrei auf die Papiermaschine. Das in der Sortiertrommel zurückbehaltene Material wird über das Ende dieser Trommel in eine Nachreinigung geschickt. Hier werden letzte Papierreste herausgelöst, aber auch metallene Verunreinigungen sowie Glas und andere Störstoffe abgetrennt, so dass ein möglichst sortenreiner Reststoff – bestehend aus den Kunststoff- und Aluminiumschichten des Verbundkartons – entsteht, welcher von den beiden deutschen Fabriken als Sekundärbrennstoff an die Zementindustrie geliefert wird.

²⁷ Verbundkartonagen sind komplett von Kunststoff bedeckt und können deshalb nicht aufgelöst werden.

Abbildung 3-5: Recyclingprozess für Verbundkarton



Quelle: Darstellung der Empa

Neben den Bestandteilen von Karton und Polyethylen können Getränk kartons 4-6 Massen-% Aluminium enthalten (FKN 2008). Da dieses mit einer Schichtdicke von 6 μm sehr dünn ist, eignet es sich nicht zum Einsatz in konventionellen Verfahren der Sekundäraluminiumerzeugung und wird energetisch verwertet (Krone 2000).

Die Anlage in Finnland gewinnt über einen Gasreaktor zusätzlich noch das Aluminium aus diesem Reststoff zurück. Bei einer Temperatur von 400 °C gehen dort die Polymere in einen gasförmigen Zustand über, während das Aluminium in fester Form erhalten bleibt. Es wird separiert und kann als Sekundäraluminium eingesetzt werden. Mit dem gasförmigen Kunststoff wird ein Dampfkessel vor Ort erhitzt. Diesbezüglich würden sich in diesem Verfahren die gleichen Auswirkungen wie durch den Eintrag der RFID-Tags in die Sekundäraluminiumerzeugung einstellen (siehe Abschnitt 3.3.4).

Auswirkungen auf die Prozesse

Siehe Abschnitt 3.2, Recycling von Papier, Pappe, Karton (PPK).

Auswirkungen auf die Rezyklate

Siehe Abschnitt 3.2, Recycling von Papier, Pappe, Karton (PPK).

Verbleib der Tag-Bestandteile

Beim Recyclingverfahren für Verbundverpackungen ist davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der eingebrachten RFID-Tags in der Sortiertrommel, als Reststoff, zusammen mit anderen Störstoffen aussortiert wird. Einträge von Tag-Bestandteilen in den Faserbrei sind jedoch möglich (Thiel 2008).

Je nach Aufbereiter wird auch die Polyethylenbeschichtung (20-21 Massen-%) energetisch verwertet, so dass enthaltene Tag-Bestandteile in das jeweilige Verfahren der energetischen Verwertung eingetragen würden. Falls jedoch die Polyethylenbeschichtung werkstofflich aufbereitet wird, muss davon ausgegangen werden, dass der überwiegende Teil der RFID-Bestandteile in die Kunststoffverwertung eingetragen wird.

Fazit zur Fraktion Verbundkarton

Auch bei einer starken Zunahme der RFID-Tags in der Verbundkarton-Fraktion ist keine Beeinträchtigung der Prozesse durch die eingebrachten organischen Bestandteile und Metalle zu erwarten.

Je nach der vorgesehenen stofflichen oder energetischen Verwertung der Papierfaser-, Kunststoff- oder Aluminiumanteile sind weitere Auswirkungen identisch mit denen, die für diese Fraktionen in den entsprechenden Abschnitten diskutiert werden.

3.3.2 Kunststoffe

In diesem Kapitel werden die in den Siedlungsabfällen bedeutendsten Kunststoffe betrachtet, die nach ihrer Nutzung einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Es wird unterschieden zwischen sortenreinen und gemischten Kunststofffraktionen. Für die sortenreinen Fraktionen gelten die Produktspezifikationen des DSD (Stand 04/2007). Falls die Spezifikationen und/oder Geometrien der entsprechenden Produkte nicht eingehalten werden können, werden diese wie gemischte Kunststofffraktionen behandelt. Weitere Merkmale für die Fraktion der Mischkunststoffe ergeben sich aus Verschnitten oder anderen Mischungen sortenreiner Kunststoffe.

Die Auswirkungen der RFID-Tags werden nicht für jede Fraktion einzeln (PET, PS, Polyolefine und Mischkunststoffe), sondern gesamthaft in Abschnitt 3.3.2.5 besprochen.

3.3.2.1 Polyethylenterephthalat (PET)

PET-Flaschen werden, seit in Deutschland das Einwegpfand auf Getränkeverpackungen erhoben wird, gesondert gesammelt.

Die prinzipiellen Verfahrensschritte beim PET-Recycling einschließlich der Orte, an denen RFID-Tags oder ihre Komponenten ausgeschieden werden können, sind in Abbildung 3-6 dargestellt. Die in Deutschland verwendeten PET-Recycling-Verfahren weichen dadurch voneinander ab, dass sie je nach eingehendem Material (PET-Flaschen, PET aus DSD-Sammelsystem) und Verwertungsziel die Verfahrensschritte unterschiedlich implementieren (d.h. verschiedene Verfahrenstypen einsetzen) und kombinieren. Eine spezifische Darstellung aller existierenden PET-Recycling-Verfahren wäre deshalb für die Zwecke dieser Studie zu aufwändig. Verfahrensspezifika, die unter dem Aspekt der RFID-Auswirkungen relevant sind, werden jedoch an geeigneter Stelle erwähnt.

Die typische Vorgehensweise bei der werkstofflichen Verwertung von PET sieht folgendermaßen aus²⁸: Nach Entleerung bzw. Öffnung der angelieferten Gebinde werden die groben Störstoffe – wie z.B. Holz aus Palettenresten, Sammelsäcke – entfernt (trockenmechanische Behandlung). Anschließend werden die PET-Abfälle zerkleinert und gewaschen, häufig in einem Friktionswäscher; danach folgt eine Dichtesortierung, in der Regel mittels Schwimm-Sink-Verfahren (Heyde 2008). Die getrockneten Flakes bzw. der Fluff werden schließlich extrudiert und zu neuen Werkstoffen verarbeitet.

Nachfolgend wird das PET-Recycling in zwei repräsentativen Verfahren dargestellt, wobei zwischen späteren Food- und Non-Food-Anwendungen unterschieden wird. Für die Anwendung im Lebensmittelbereich soll hier das URRC-Verfahren dargestellt werden, im Gegensatz dazu das Vacurema-Verfahren, das für Rezyklate des Non-food-Bereichs Verwendung findet (Domininghaus 2008). Die Firma Cleanaway PET International GmbH verarbeitet jährlich je 15.000 t PET-Flaschen aus Deutschland mit dem URRC- und dem Vacurema-Verfahren (Bockmühl 2008).

Im URRC-Verfahren werden PET-Flaschen aus dem Zwei-Wege-Modell²⁹, die als Ballen oder Briketts angeliefert werden, so weit aufbereitet, dass das Material wieder für die Lebensmittelindustrie verwendbar ist. Die Ballen oder Briketts werden dabei zunächst aufgetrennt, die groben Bestandteile entfernt, die Flaschen zerkleinert, das zerkleinerte Material (die Flakes) gewaschen, wobei die Etiketten von den Flaschen gelöst, die Verschlüsse in einer Schwimm-Sink-Anlage abgetrennt und die Etiketten im

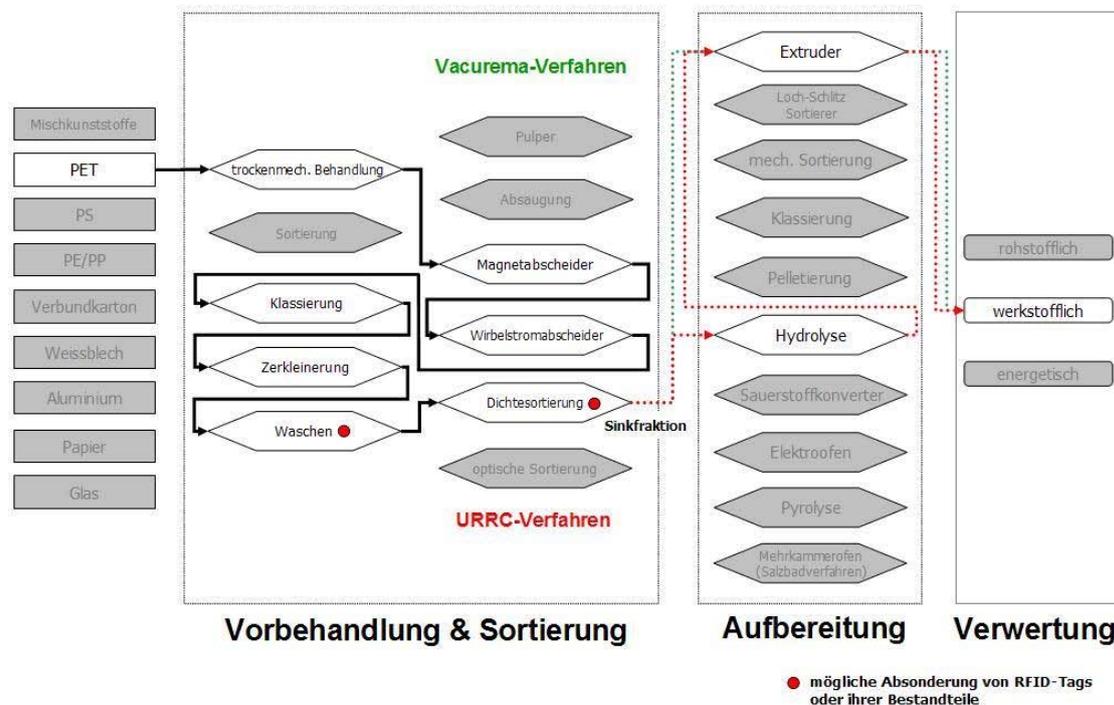
²⁸ Bei der in Deutschland seltenen Ganzflaschenvorwäsche werden die stückigen Flaschen zuerst gereinigt und im nächsten Schritt zerkleinert. Normalerweise werden aber die Flaschen zuerst zerkleinert und dann gereinigt, mit dem Nachteil, dass die Sortierquote geringer ausfällt und eine Sortierung im weiteren Verfahrensverlauf erschwert wird (Christiani 2008).

²⁹ Das Zwei-Wege-Modell umfasst ausgediente Einweg- und Mehrwegflaschen, welche werkstofflich zu Einwegflaschen verwertet werden.

Windsichter ausgesondert werden. Charakteristisch ist, dass die Etiketten und Verschlüsse in der Schwimmfraktion und das PET in der Sinkfraktion verbleiben. Anschließend werden die Flakes mittels Hydrolyse durch Natronlage dekontaminiert und die gereinigten Flakes schließlich zu neuen Flaschen verarbeitet (Bockmühl 2008).

Das Vacurema-Verfahren ist in seinen Grundzügen dem URRC-Verfahren sehr ähnlich. Jedoch findet keine Hydrolyse statt, sondern direkt eine Extrusion. Aus diesem Grund ist im Gegensatz zum URRC-Verfahren keine Wiederverwendung des PET in der Lebensmittelindustrie möglich.

Abbildung 3-6: Recyclingprozess für PET-Flaschen nach dem Vacurema- oder URRC-Verfahren



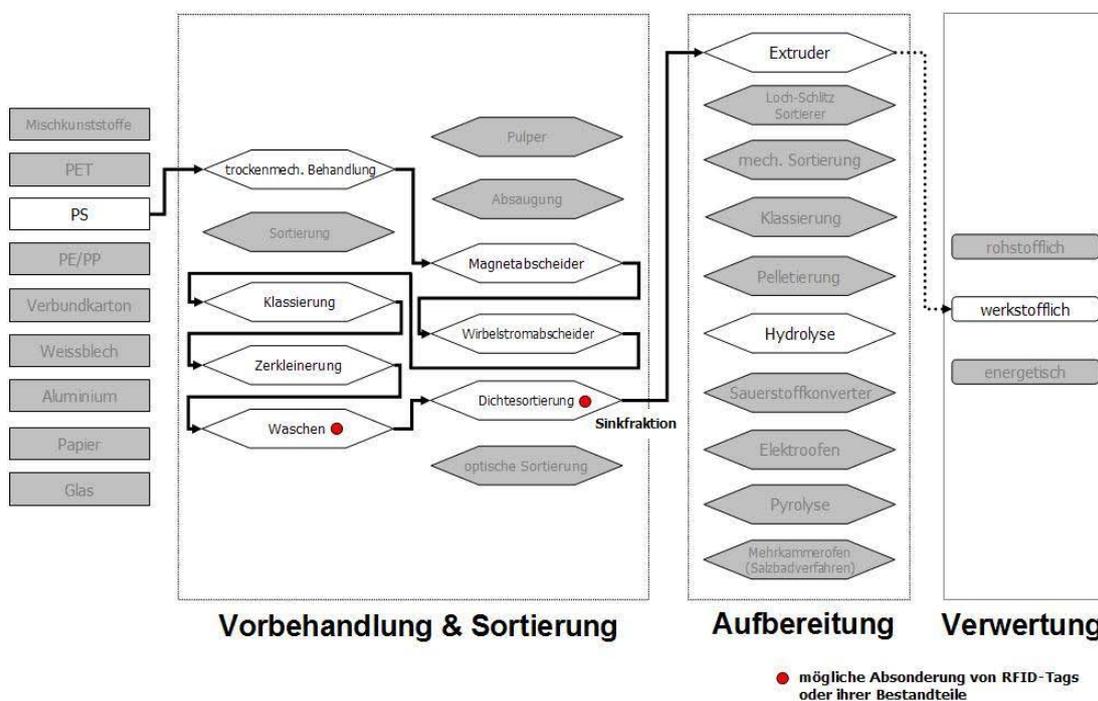
Quelle: Darstellung der Empa

Bei den PET-Recyclingprozessen ist davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der eingebrachten RFID-Tags bei der Dichtesortierung vom zerkleinerten PET abgetrennt und ausgeschieden wird. Vereinzelt können Tag-Bestandteile in die jeweilige Aufbereitung gelangen (Bockmühl 2008). Gemäß DKR (Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling) ließe sich die Effizienz der Abtrennung von RFID-Tags dadurch verbessern, dass die Tags so gestaltet würden, dass sie mit heute üblicher Sensorik (Nahinfrarot, Röntgen, Mustererkennung) detektierbar wären (Heyde 2008). Das Verfahren der Nahinfrarot-Detektion wird heute für alle Massenkunststoffe des LVP-Recyclings und für Verbundkarton eingesetzt.

3.3.2.2 Polystyrol (PS)

Die typische Vorgehensweise bei der werkstofflichen Verwertung von sortenreinen PS-Fractionen sieht folgendermaßen aus (s. auch Abbildung 3-7): Nach Entleerung bzw. Öffnung der angelieferten Gebinde werden die groben Störstoffe (z.B. Holz aus Palettenresten, Sammelsäcke, etc.) entfernt (trockenmechanische Behandlung). Anschließend werden die Kunststoffabfälle zerkleinert und gewaschen, häufig in einem Friktionwäscher; danach kommt es zu einer Dichtesortierung, in der Regel mittels Schwimm-Sink-Verfahren (Heyde 2008). Die getrockneten Flakes bzw. der Fluff werden nach Aufschmelzung zu neuen Werkstoffen verarbeitet.

Abbildung 3-7: Recyclingprozess für sortenreine PS-Fractionen



Quelle: Darstellung der EMPA

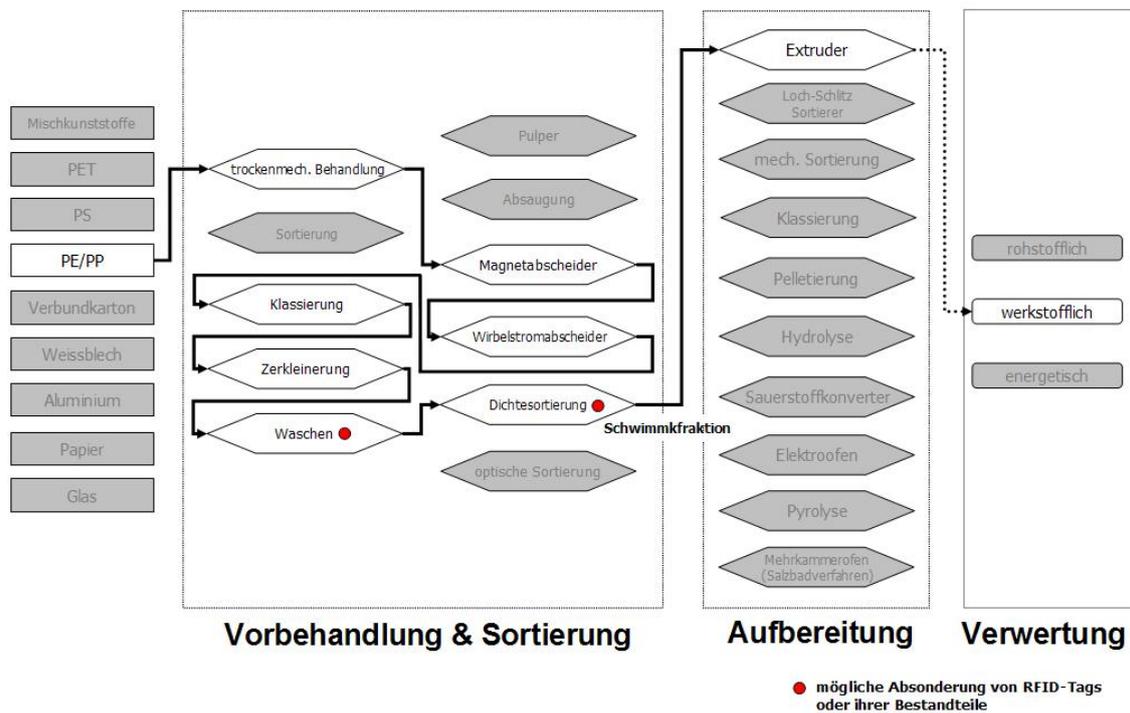
Polystyrol (PS) wird werkstofflich verwertet und verhält sich hinsichtlich der Auswirkungen von RFID-Tags ähnlich wie PET, da es durch seine charakteristische Dichte von $> 1 \text{ kg/dm}^3$ in den angewendeten Dichtesortierungen in der Sinkfraktion verbleibt.

3.3.2.3 Polyolefine (PE und PP)

Die sortenreinen Fraktionen von Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) werden werkstofflich verwertet, mit der Besonderheit, dass deren Bestandteile im Gegensatz zu PET und PS in den Verfahren der Dichtesortierung in der Schwimmfraktion verblei-

ben. Das weitere Vorgehen für die Mahlguterzeugung entspricht jedoch dem gleichen Vorgehen wie für die werkstoffliche Verwertung der anderen Kunststoffe. Die Fraktionen werden von groben Störstoffen befreit, zerkleinert und gewaschen. Nach Dichtesortierung und Trocknung ist der Sekundärrohstoff für eine weitere Verarbeitung geeignet.

Abbildung 3-8: Recyclingprozess für sortenreine PE- und PP-Fraktionen



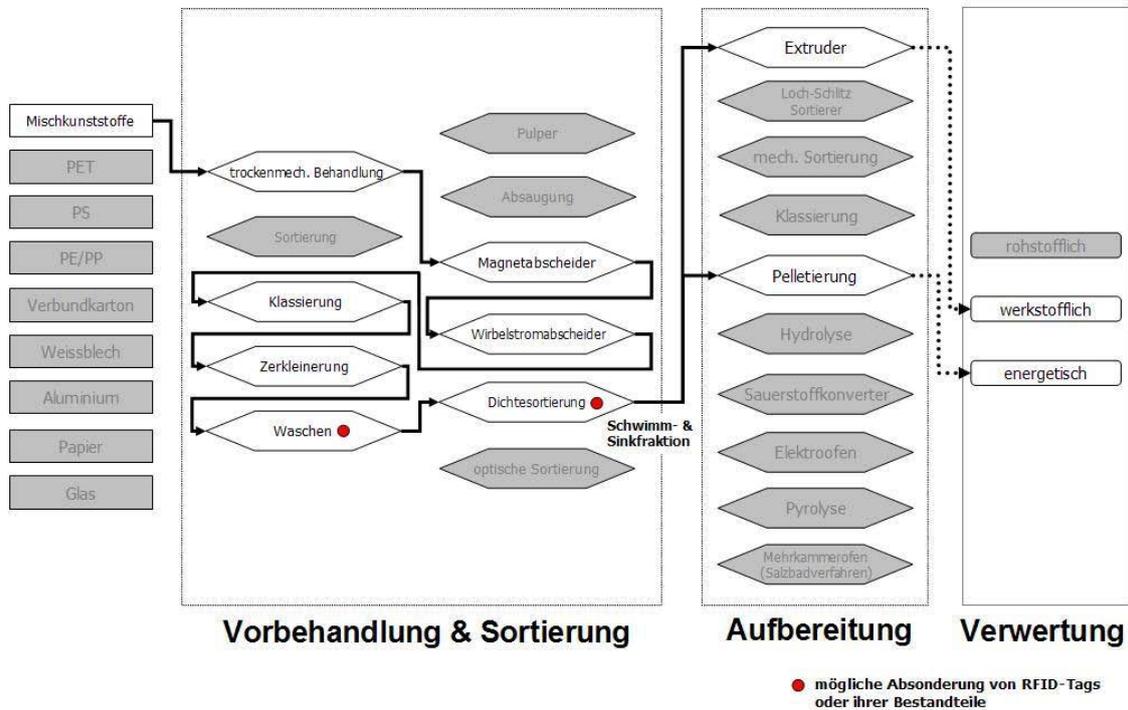
Quelle: Darstellung der EMPA

RFID-Tags mit PET-Substrat gelangen in der Dichtesortierung in die Sinkfraktion und lassen sich deshalb leicht von dem PE und PP in der Schwimmfraktion separieren.

3.3.2.4 Mischkunststoffe

Soweit die Fraktionen der Mischkunststoffe werkstofflich verwertet werden, gelten die grundlegenden Verfahrensschritte des Kunststoffrecycling, wobei die Spezifikationen für die finale Produktqualität in der Regel weniger anspruchsvoll sind.

Abbildung 3-9: Recyclingprozess für Mischkunststoffe



Quelle: Darstellung der EMPA

Bei den Recyclingprozessen für Mischkunststoffe ist wie beim PET-Recycling davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der eingebrachten RFID-Tags bei der Dichtesortierung von den zerkleinerten Kunststoffen abgetrennt und ausgeschieden wird. Vereinzelt können Tag-Bestandteile in die jeweilige Aufbereitung gelangen.

3.3.2.5 Auswirkungen der RFID-Tags auf das Kunststoffrecycling

Auswirkungen auf die Prozesse

Bei den in Deutschland eingesetzten Kunststoff-Recycling-Verfahren ist davon auszugehen, dass die RFID-Tags zusammen mit der Kunststoffabfallfraktion in den Zerkleinerungsschritt gelangen und anschließend, allenfalls zusammen mit anderen Etiketten, weitgehend aussortiert werden (Heyde 2008)³⁰.

Probleme könnten grundsätzlich entstehen, wenn RFID-Tags bei der Vorbehandlung (Zerkleinern, Waschen) in ihre Komponenten zerfallen oder wenn Teile von Tags sich

³⁰ Dies gilt insbesondere auch für PET-Flaschen, welche in den neuen Rücknahmeautomaten zurückgegeben (FLOG 2007) und z.B. nach dem URRC- oder dem Vacurema-Verfahren verwertet werden.

bei der anschließenden Dichtesortierung durch Schwimm-Sink-Technik unter die Flakes mischen.

Gemäß Cleanaway PET International GmbH kann das Vorhandensein von Rückständen mit einem Durchmesser größer als 25 µm dazu führen, dass die Düsen im URRC bottle-to-bottle Verfahren verstopfen könnten. Dieses Problem ist bisher nicht im Zusammenhang mit RFID-Tags aufgetreten (Bockmühl 2008).

Im Rahmen erster Labortests der Empa mit RFID-Tags auf PET-Flaschen konnte festgestellt werden, dass auch nach der chemischen Ablösung der Tags vom Trägermaterial alle Bestandteile mit dem Substrat verbunden bleiben, die Tags also nicht in ihre Bestandteile zerfallen³¹. Auch im Zerkleinerungsprozess zerschnittene Tags bleiben mit dem Substrat verbunden, d.h. der Chip oder Antennenteile werden nicht freigesetzt. Auch die auf Methylmethacrylat basierenden Klebstoffe, mit denen die Tags befestigt werden, blieben am Tag-Substrat haften. Es ist davon auszugehen, dass Epoxyd Kleber aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften ähnlich wirken.

Wenn es generell gelingt, das Zerfallen der Tags in der Vorbehandlung zu vermeiden, so ist das Auftreten weiterer Probleme davon abhängig, wie gut die anschließende Dichtesortierung die Tags separieren kann. Nach ISO 24729-2:2007 bestehen die Tag-Substrate aus PET. Unter dieser Voraussetzung sind die Tags problemlos von Polyolefinen (PE und PP) zu separieren, da diese bei der Dichtesortierung in der Schwimmfraktion verbleiben, die Tags aufgrund der höheren Dichte von PET dagegen absinken. Im PET- und PS-Recycling dagegen gehören die erwünschten Stoffe zur Sinkfraktion, so dass die Separierung der Tags schwieriger wird. Werden Aluminium-Tags auf PE- oder PP-Bänderolen statt direkt auf PET-Flaschen befestigt, so gehen sie mit den

³¹ Für diese Tests wurden die getaggtten und zerkleinerten Probenkörper in eine Natronlauge (1 Masse-%) bei 80° C und 400 Umdrehungen verbracht, ähnlich der im PET-Recycling praktizierten Umgebungen. Die Verweilzeit der getaggtten Materialien bis zur Ablösung betrug in diesem Versuch über 10 Stunden.

Banderolen zusammen in die Schwimmfraktion ein und können somit vom PET separiert werden³².

Bei der rohstofflichen oder energetischen Verwertung von Mischkunststoffen ist davon auszugehen, dass der heutige Eintrag von RFID-Tags keine signifikanten negativen Auswirkungen auf die Verwertungsprozesse hat.

Falls Verpackungen aus Mischkunststoffen mit Inmould Tags versehen sind, ist nicht auszuschließen, dass es zu einer Beeinträchtigung des Extrusionsprozesses durch Metallteile kommt.

Auswirkungen auf die Rezyklate

Im PET-Recycling ist nicht auszuschließen, dass RFID-Tags bei der Zerkleinerung und beim Waschprozess zerstückelt werden bzw. in ihre Komponenten zerfallen, die Zerstückelungsreste bzw. die Komponenten (Trägermaterial, Chip, Antenne) sich in der anschließenden Dichtentrennung durch Schwimm-Sink-Technik unter die Flakes mischen und zu unerwünschten Auswirkungen auf die Rezyklate führen. Gemäß Empa-Studie und FLOG-Studie besteht die Möglichkeit, dass das Kunststoffträgermaterial beim Recycling von PET-Flaschen zu Materialunverträglichkeiten führt und die Inhaltsstoffe von Lötlegierungen Kontaminationen und letztlich auch eine Überschreitung der Grenzwerte der europäischen Verpackungsrichtlinie (EU 94/62/EC 20.12.994) verursa-

³² In einer explorativen Versuchsreihe der Empa wurde das Verhalten getaggtter PET-Behälter in einer Dichtesortierung untersucht. Dabei wurde zwischen Behälter- und Etiketten-Tagging unterschieden. Für die Etikettierung wurden die drei Materialien Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Papier verwendet. Unter den Smart Labels waren sowohl mit Kupfer- als auch Aluminium-Antennen versehene. Für die Dichtesortierung wurden zwei Medien mit einer Dichte von 1 g/cm^3 (entmineralisiertes Wasser) bzw. $1,13 \text{ g/cm}^3$ (gesättigte Natriumchlorid-Lösung) getestet. In beiden Medien wurden alle PET-Fractionen, also auch die getaggtten, in die Sinkfraktion überführt. Gleiches konnte auch für die getaggtten Papier-Banderolen beobachtet werden. Alle ungetaggtten Kunststoff-Banderolen gingen in die Schwimmfraktion ein. Bei den getaggtten Kunststoff-Banderolen ergab sich ein uneinheitliches Bild.

Die getaggtten PP-Banderolen gingen bei Wasser hauptsächlich in die Sinkfraktion über. Die mit Aluminium-Tags beklebten PP-Banderolen gingen in der Salzlösung in die Schwimmfraktion über, wenn der beklebte Taganteil kleiner als 30% war.

Ein eindeutiges Bild zeigte sich für PE-Banderolen. Alle Banderolen mit Kupferanteilen gingen in die Sinkfraktion, sowohl für die Wasser-, als auch in der Natriumchlorid-Umgebung. Die aluminiumhaltigen Banderolen gingen in der Wasser-Umgebung in die Sinkfraktion und bei der gesättigten Salzlösung in die Schwimmfraktion.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass mit Aluminium-Antennen versehene RFID-Tags auf PE- oder PP-Banderolen ohne Rückstände sowohl aus den Fraktionen der reinen PE-bzw. PP-Banderolen, als auch aus der PET-Fraktion, durch Verwendung einer zusätzlichen Dichtentrennung, zu separieren sind.

chen. Gemäß Cleanaway PET International GmbH sind allerdings im Zusammenhang mit RFID-Tags bisher keine diesbezüglichen Probleme aufgetreten (Bockmühl 2008).

Die Qualitätskriterien gemäß Produktspezifikationen des Dualen Systems Deutschland für DSD-Fraktionen besagen, dass metallene Störstoffe für PE-, PP- und PS- Fraktionen hier ebenfalls (wie für PET) höchstens 0.5 % der Masse ausmachen dürfen. Bei Mischkunststoffen ist eine Obergrenze an metallenen Störstoffen von 5.0 Masse-% einzuhalten.

Verbleib der Tag-Bestandteile

Bei der werkstofflichen Verwertung der PET-Fraktion ist bei den heute üblichen Verfahren davon auszugehen, dass RFID-Tags in die bei der Dichtesortierung anfallenden festen Rückstände ausgetragen werden.

Beim PET-Flaschen-Recycling enthalten die festen Rückstände u.a. abgelöste Kunststoffetiketten, welche anschließend werkstofflich verwertet werden (Bockmühl 2008). Gemäß Produktspezifikationen des DSD dürfen die Metallanteile in Kunststoffen, welche zur Verwertung bestimmt sind, höchstens 0.5 % der Masse ausmachen (Grüner Punkt 2008). Inwieweit ein RFID-Eintrag bei der heute üblichen Verfahrensweise zu einer Überschreitung dieses Grenzwertes führen könnte, bleibt zu überprüfen.

Eine Abtrennung der RFID-Tags von den anderen festen Rückständen ist verfahrenstechnisch nicht ohne weiteres machbar. Gemäß Cleanaway PET International GmbH ist es beim Recycling von PET-Flaschen bei der heute in PET-Recyclinganlagen angewandten Sortiertechnologie mit einem Arbeitsabstand von mindestens 60 cm nicht möglich, RFID-Tags von den anderen festen Rückständen abzutrennen (Bockmühl 2008). Hinzu kommt, dass die empfindlichste Sortierung zu Beginn der Verfahrenskette stattfindet, bevor PET-Flaschen überhaupt zu PET-Flakes zerkleinert werden. Damit würden – vorausgesetzt, dass die Metallmengen in einem RFID-Tag für eine Erkennung ausreichen – PET-Flaschen mit RFID-Tags gar nicht erst in das Recyclingverfahren gelangen. Da dies die Wertschöpfung des Recyclers vermindert, müssen gemäß Cleanaway PET International GmbH unbedingt Lösungen gefunden werden, die ein Ausschleusen von PET-Flaschen mit RFID-Tags verhindern.

Inwieweit die Produktspezifikationen für Ersatzbrennstoff-Vorprodukte³³ der DSD GmbH vom April 2007 bei einem Eintrag von RFID-Tags in den festen Rückstand aus der Dichtentrennung eingehalten werden können, wird in Abschnitt 3.4 diskutiert.

Hier wurde der Fall des Smart Label-Taggings von Kunststoffen betrachtet. Insbesondere beim Inmould von RFID-Tags ist die Trennung aber erheblich erschwert. In Zukunft ist möglicherweise eine Direktdruck des RFID-Tags möglich, so dass kein Substrat mehr erforderlich ist. Die Zusammenhänge in der Dichtentrennung der Antennen-Chip-Einheit sind dann neu zu bewerten.

Beim Standard-Tag aus ISO/IEC TR 24729-2:2007 ist der Chip mit nickelhaltiger anisotroper Leitpaste mit der Antenne verbunden. Es sind jedoch auch andere Verbindungstechniken möglich, wie z.B. die Verwendung des Standardlotes $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0,5}$, die beim Kunststoffverarbeitungsprozess aufschmelzen und so ins Rezyklat gelangen können.

Fazit zur Fraktion Kunststoffe

Probleme mit dem Eintrag von RFID-Tags ins Kunststoff-Recycling sind bisher nicht aufgetreten. Bei einem höheren Aufkommen von RFID-Tags sind insbesondere die PET- und PS-Recyclingprozesse so anzupassen, dass die Tags vom Wertstoff abgelöst und in der anschließenden Dichtesortierung separiert werden. Die Verwendung von Aluminium- statt Kupferantennen und das Aufbringen der Tags auf Banderolen erleichtert ihre Separierung von PET und PS. Die Separierung von PE und PP ist für die heute üblichen Tags (mit PET-Substrat) aufgrund der unterschiedlichen Dichten problemlos möglich.

Für das Recycling getaggtter Kunststoffe ist insgesamt entscheidend, dass die Tags sich zwar vom Wertstoff, aber nicht von ihrem Substrat lösen, also nicht in ihre Bestandteile zerfallen. Probleme für den Prozess (Verstopfung der Düsen) und eine Überschreitung von Grenzwerten für Metallanteile im Rezyklat sind sonst nicht auszuschließen.

³³ Gebrauchte, restentleerte, systemverträgliche Artikel aus verpackungstypischen Kunststoffen (PE, PP, PS, PET) sowie Papier, Pappe, Kartonagen und Papierverbunde inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüssen, Etiketten usw. als Ersatzbrennstoffe können z.B. in Zementwerken eingesetzt werden, sofern den in den Produktspezifikationen für Ersatzbrennstoff-Vorprodukte festgelegten Spezifikationen (Grüner Punkt 2008) bezüglich chemisch-physikalischer Parameter, Lieferform und Störstoffen entsprochen wird. Systemverträglich heißt, dass ausschließlich unzerkleinerte Produkte, die aus einer Sortierung von Leichtverpackungen aus haushaltsnahen Sammelsystemen entstammen akzeptiert werden, die durch Vertragspartner der DSD GmbH betrieben werden.

Die Rückstände aus der Dichtesortierung könnten in Zukunft erhöhte Konzentrationen an Kupfer, Aluminium bzw. Silber aufweisen.

3.3.3 Weißblech

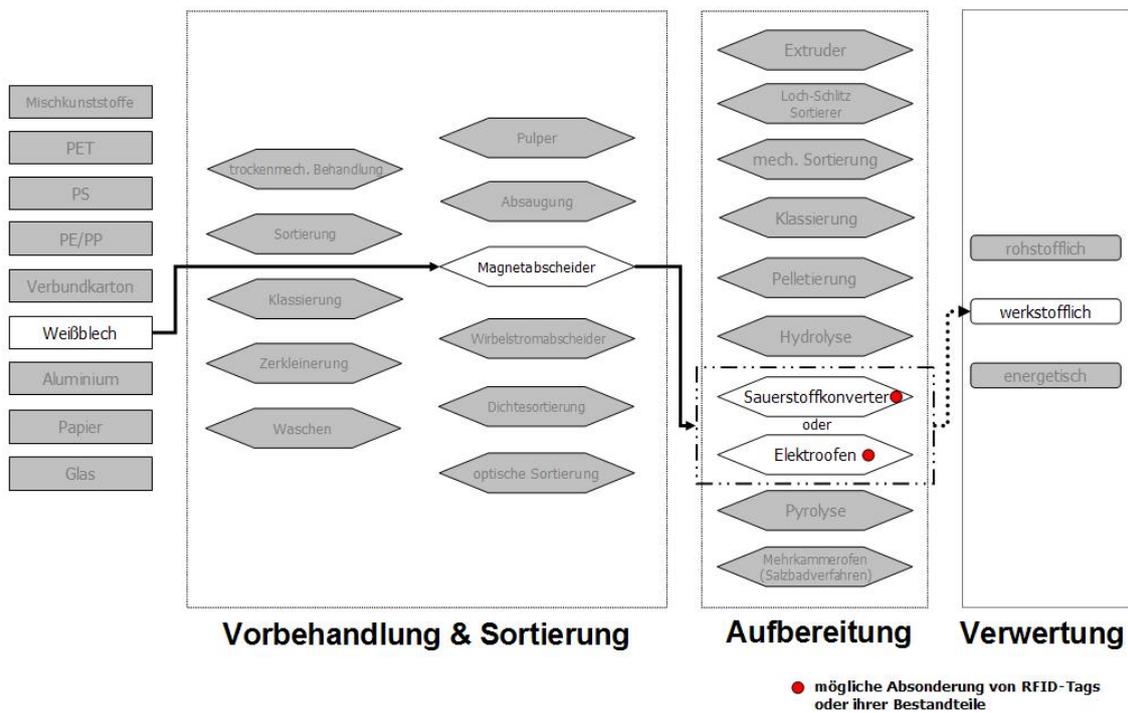
Weißblech gelangt in die Leichtverpackungsfraction als Getränkedose, Konserve oder Verschluss von z.B. Glasverpackungen. Für die Fraktion der FE-Metalle aus Konsumgütern werden die Betrachtungen auf Weißblech beschränkt, da nur bei diesem Material von einem Item-level-Tagging ausgegangen werden kann, womit es beim Weißblech innerhalb der FE-Metalle aus Konsumgütern zum größten RFID-Eintrag kommt.

Weißblech wird im Magnetabscheider (zusammen mit anderem Eisen- und Stahlschrott) von anderen Reststoffen getrennt, zu Ballen verpresst und so dem Recycling zugeführt.

Ausgehend von den 1996er Produktionszahlen von Elektro- und Hochofenstahl in Deutschland (ca.10 bzw. 30 Mt/Jahr) und bei einer durchschnittlichen Zugabe von 20% Schrott (IPPC 2001) im Sauerstoffkonverter kann davon ausgegangen werden, dass in Deutschland knapp 60 % des Eisen- und Stahlschrottes im Elektroofen und entsprechend 40 % im Sauerstoffkonverter rezykliert werden. In beiden Prozessen werden bei über 1500 °C organische Verunreinigungen durch den eingeblasenen Sauerstoff oxidiert. Metallische Elemente im Schrott werden entweder oxidiert und in die Schlacke überführt (z.B. Aluminium und Silizium), oder sie gehen mit dem Eisen eine Legierung ein (z.B. Kupfer). Auf beide Prozesse folgt im Allgemeinen ein Schritt der Sekundärmetallurgie, in dem die Schmelze homogenisiert, entgast und desoxidiert wird. In diesem Schritt wird durch gezieltes Zulegieren oder Verdünnen auch die gewünschte Konzentration an Legierungselementen eingestellt.

Die mit dem Weißblech eingebrachten RFID-Tags gelangen vollständig in den Sauerstoffkonverter oder Elektroofen.

Abbildung 3-10: Recyclingprozess für Weißblech



Quelle: Darstellung der EMPA

Auswirkungen auf die Prozesse

Auswirkungen von organischen Bestandteilen von RFID-Tags auf die Weißblech-Recyclingprozesse von können aus dem genannten Grund vernachlässigt werden. Auch die metallenen Elemente der Tags beeinträchtigen die Prozesse nicht (FLOG 2007).

Auswirkungen auf die Rezyklate

Organische Bestandteile sowie die Metalle Aluminium und Silizium aus RFID-Tags verändern die Eigenschaften der Rezyklate nicht, da sie bzw. ihre Oxide in der Schlacke verbleiben. Kupfer und Silber hingegen werden im flüssigen Stahl gelöst. Silber wird als unproblematisch betrachtet. Ist jedoch die Konzentration an Kupfer zu hoch, reichert sich dieses beim Erstarren der Stahlschmelze an den Korngrenzen an und führt so zu einer Versprödung des Recyclingstahls.

Gemäß FLOG-Studie sind die Mengen an Weißblech im Schrott so gering, dass erstens die Kupfereinbringung aus anderen Quellen relevanter ist und zweitens durch Verdünnung mit kupferfreiem Stahl eine problemlose Legierung erreicht werden kann. Die Empa-Studie hingegen kommt (für die Situation in der Schweiz) zum Ergebnis,

dass bis im Jahr 2012 der Anteil an RFID-Tags mit Kupferantennen auf maximal 8 % limitiert werden müsste, falls dann alle rezyklierten Weißblechdosen mit Tags ausgerüstet sein sollten. Allerdings beruht diese Abschätzung auf der pessimistischen (und heute nicht mehr in Betracht gezogenen) Annahme von 1.0 g Kupfer pro RFID-Tag. Der ISO-Normentwurf gibt Antennenmassen typischer RFID-Tags zwischen 105 und 340 mg an³⁴. Ein weiterer Unterschied erklärt die Abweichungen der Aussagen der Empa-Studie und der FLOG-Studie: In der Schweiz werden 100 % des Eisenschrotts in Elektroöfen rezykliert. In Deutschland hingegen werden ca. 40 % zusammen mit neuem, kupferfreiem Roheisen in Sauerstoffkonvertern verarbeitet, was eine größere Verdünnung des Kupfers zur Folge hat. Somit kann für Deutschland davon ausgegangen werden, dass der Einsatz von RFID auf das Recycling von Weißblech selbst dann keine relevanten negativen Auswirkungen auf das Rezyklat hätte, wenn alle Weißblechdosen mit Kupferantennen-Tags ausgerüstet wären.

Allerdings ist Kupfer im Stahlrecycling ein kontroverses Thema; jeder neue Kupfereintrag in den Stahlschrott wird von der Industrie als problematisch gesehen (Leuning 2008). Heute gehen Weißblech-Recycler davon aus, dass die Stahlwerke einen mit 1 % Kupfer belasteten Schrott nicht zum Recycling annehmen würden (Stosch 2008).

Insgesamt ist festzuhalten, dass Kupfer der problematischste Stoff aus RFID-Tags im Weißblechrecycling ist. Tags ohne Kupfer scheinen für das Weißblechrecycling kein Problem darzustellen.

Weißblechschrott entspricht der Sorte E6 in der Europäischen Stahlschrottliste. Für E6 darf der Anteil an Kupfer, Zinn, Chrom, Nickel und Molybdän insgesamt 0,3 % der Masse nicht überschreiten (BDE 2007, Anhang).

Verbleib der Tag-Bestandteile

Weder die FLOG- noch die Empa-Studie machen Angaben zu möglichen Auswirkungen auf die Rückstände. Die Metalle Aluminium und Silizium, die als Oxide in die Rückstände gelangen, sind jedenfalls unproblematisch.

Die Materialien können nur zurückgewonnen werden, wenn die Tags vor dem Einschmelzen vom Weißblech getrennt werden. Theoretisch wäre eine thermische Behandlung denkbar, während der die organischen Teile der Tags verbrennen. Danach könnten die Tag-Metalle magnetisch vom Stahl getrennt werden. Alternativ wären ein

³⁴ Geht man davon aus, dass aufgrund der zu erwartenden Reduktion der Antennengröße im Jahr 2012 noch maximal 100 mg Kupfer pro RFID-Tag benötigt werden, wird die Limite für Kupfer im Recyclingstahl erst bei 80 % der Tags mit Kupferantenne erreicht.

relativ feines Mahlen des Schrottes und eine Trennung durch Sieben denkbar. Allerdings dürften logistische und ökonomische Faktoren beide Varianten ausschließen.

Fazit zur Fraktion FE-Metalle (speziell Weißblech)

Kupfer ist der einzige potenziell problematische Stoff, der durch RFID-Tags in den Stahlkreislauf gelangen könnte. Dieses Problem würde erst bei relativ hohen Konzentrationen (1 % Kupfer im Abfallstrom) akut. Bei Tags ohne Kupferantennen sind keine Probleme für das Weißblechrecycling zu erwarten.

3.3.4 Aluminium

Die bei der Erzeugung von Sekundäraluminium wichtigen Hauptunterscheidungsmerkmale zwischen Guss- und Knetlegierung sind primär durch den Gehalt von Kupfer in den Aluminiumschrotten bestimmt. Andere Hauptlegierungselemente wie z.B. Silizium spielen eine eher untergeordnete Rolle. Allgemein weisen Aluminium Altschrotte unterschiedlichste Verunreinigungsspektren auf. Für die RFID-relevanten Metalle Silizium und Kupfer sind (ohne RFID-Tags) Verunreinigungen im Bereich von 0,15 – 14 Massen-% Silizium sowie 0,01 – 4 Massen-% Kupfer üblich (Krone 2000).

Die Qualitätskriterien für die durch RFID-Tags beeinflussten Schrotte sind nach DIN EN 13920:2003 in den Teilen 10, 14 und 15 geregelt. Es handelt sich hierbei um Altschrotte aus Alu-Getränkedosen sowie beschichteten oder unbeschichteten Aluminiumverpackungen.

Aus der gesammelten Metallfraktion werden zuerst die magnetischen Metalle (Eisen, Stahl) abgeschieden. Die übrigen Metalle werden im Schwimm-Sink-Verfahren oder im Wirbelstromabscheider separiert. Da Alu-Getränkedosen in Deutschland mit Pfand belegt sind, werden sie nicht mehr über das DSD gesammelt und kommen so ausschließlich mit Weissblechdosen vermischt zu den Recyclern.

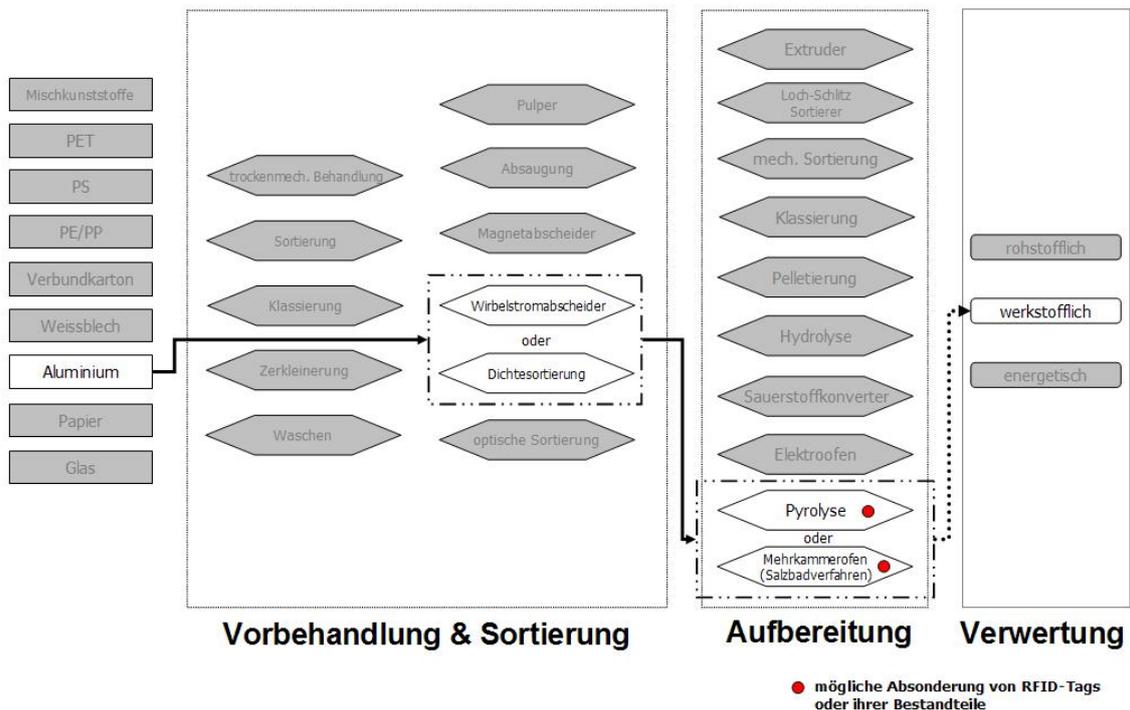
Damit ist das Schwimm-Sink-Verfahren für Getränkedosen nicht mehr nötig. Gemäß BAT-Report (IPPC 2001) hängt der anschließende Recyclingprozess des Aluminiumschrotts stark vom Schrott selber ab. Es werden in Abhängigkeit von z.B. der Größe, dem Oxidgehalt und der Art und Menge organischer Kontamination unterschiedliche Verfahren, Öfen und Flussmittel eingesetzt.

Während unverschmutzte Schrottfractionen oft im Induktionsofen rezykliert werden, kann man bei Aluminiumschrott aus Verpackungen davon ausgehen, dass dieser im Salzbadverfahren im Trommelofen eingeschmolzen wird. Diese Schrottfraction muss man teilweise thermisch vorbehandeln, um Beschichtungen und Öl zu entfernen, da solche Verunreinigungen zu erhöhtem Abbrand, Energiebedarf und zusätzlichen Emis-

sionen beim Aufschmelzen führen. Die Vorbehandlung geschieht nach dem Shreddern des Schrottes, meist in einem Rotationsofen. Die Abgase werden bei über 850 °C nachverbrannt. Anstelle der Kombination von Rotationsofen und Trommelofen kann auch ein Mehrkammerofen eingesetzt werden.

Die mit dem Aluminiumschrott eingebrachten RFID-Tags gehen vollständig in die Aluminiumschmelze ein (Kirchner 2008).

Abbildung 3-11: Recyclingprozess für Aluminium.



Quelle: Darstellung der Empa

Auswirkungen auf die Prozesse

Gemäss FLOG-Studie hat das Einbringen von organischem Material mit RFID-Tags ins Aluminiumrecycling keine Auswirkungen. Dies setzt aber voraus, dass eine thermische Vorbehandlung vor dem Aufschmelzen stattfindet.

Ohne Vorbehandlung wird durch das organische Material der Tags die Effizienz des Aufschmelzprozesses in geringem Maße verringert (höherer Energiebedarf, höherer Verbrauch an Flussmaterialien, höhere Emissionen, geringere Aluminiumausbeute). Mit thermischer Vorbehandlung führt das Vorhandensein der Tags zu erhöhten Emissionen dieses Prozessschrittes.

Es wurden keine Hinweise gefunden, dass die metallenen Elemente in den RFID-Tags den Schmelzprozess beeinträchtigen.

Auswirkungen auf die Rezyklate

Es ist zwischen der Aufbereitung gebrauchter Aluminiumverpackungen und von Getränkedosen zu unterscheiden.

Aufbereitung gebrauchter Aluminiumverpackungen (DIN EN 13920-14/15:2003):

Die organischen Materialien sowie Aluminium wirken sich auf die Rezyklate nicht aus. Silizium und die anderen Metalle im RFID-Tag gehen mit dem Aluminium eine Legierung ein. Nach den Spezifikationen für Schrotte aus gebrauchten Aluminiumverpackungen der DIN EN 13920-14/15:2003 darf der Gehalt von Silizium 1,0 Massen-% und von Kupfer 2,5 Massen-% betragen (Krone 2000). Ist die Konzentration dieser Elemente für die gewünschte Legierung zu hoch, muss mit „reinem“ Aluminium verdünnt werden. Gemäß FLOG-Studie ist der Anteil des Aluminiums aus Verpackungstoffen so gering, dass zu hohe Konzentrationen an Legierungselementen kein Problem darstellen dürfte. Die Empa-Studie hingegen verweist darauf, dass für gewisse Legierungen schon relativ geringe Konzentrationen an Schwermetallen problematisch sind.

Aufbereitung von Getränkedosen (DIN EN 13920-10:2003):

Nach dem Hot-Crush Verfahren werden die Getränkedosen auf 540-580°C erhitzt und einer Brechanlage zugeführt, wobei die Gusslegierungen verspröden und in der nachgeschalteten Sortierung ausgesiebt werden, während die Knetlegierungen duktil bleiben (Boin 2000). Es gelten die Qualitätsanforderungen der DIN EN 13920-10:2003 für Schrotte aus Getränkedosen, die Grenzen für den Eintrag von Silizium bis 0,3 Massen-% und 0,2% Massen-% für Kupfer erlauben (Krone 2000). Mögliche Überschreitungen der angegebenen Werte müssen entsprechend durch den Verschnitt mit anderen Chargen substituiert werden.

Gemäß Auskunft von Aleris (Scheid 2008) werden in Deutschland Dosen zu Dosen recycelt. Für solche Legierungen darf der Kupfergehalt 0.03 % nicht übersteigen. Würde durch einen breiten Einsatz von RFID-Tags die Kupferkonzentration wesentlich höher, müsste entweder mit kupferfreiem Schrott verdünnt werden, oder die Dose müsste (mit wirtschaftlichem Verlust) zu einer Druckgusslegierung recycelt werden. Druckgusslegierungen können bis zu 3 % Kupfer enthalten.

Generell gilt, dass das Vorliegen einer Beeinträchtigung von der produzierten Legierung abhängt. Bei der Gusslegierung 226 beispielsweise ist ein gewisser Anteil an Kupfer und Zinn erforderlich; bei der Produktion von Aluminium für Verpackungsfolien

können diese Verunreinigungen dagegen nicht toleriert werden (Wäger et al. 2005). Daher wird schon heute Aluminium aus „altem Schrott“ praktisch ausschließlich für Druckgusslegierungen verwendet.

Verbleib der Tag-Bestandteile

Aus dem BAT-Report (IPPC 2001) kann abgeleitet werden, dass im Schrott vorhandene RFID-Tags, die nicht durch eine Vorbehandlung oxidiert wurden, dazu führen würden, dass die Schmelze stärker oxidiert wird und damit mehr Rückstände entstehen. Wird der Schrott aber vorbehandelt, sind keine Auswirkungen der Tags auf die Rückstände zu erwarten.

Es ist denkbar, dass nach der thermischen Vorbehandlung des Schrottes Kupfer oder Silber aus der Antenne der RFID-Tags in einem Wirbelstromabscheider oder durch Schwimm-Sink-Trennung vom Aluminium getrennt werden. Gehen wir davon aus, dass jede Aludose von knapp 10 g Masse mit einem RFID-Tag mit einer gut 100 mg schweren Kupferantenne versehen wäre und dass das Aluminium aus der Hausmüllentsorgung zum größten Teil aus Aludosen stammt, ergäbe sich eine Konzentration von ca. 1 % Kupfer im Aluschrott. Bei dieser Konzentration dürfte ein solcher Schritt ökonomisch sinnvoll werden.

Fazit zur Fraktion Aluminium

Kupfer ist der einzige Stoff, der durch RFID-Tags in den Aluminiumrecyclingprozess gelangen und dort negative Auswirkungen haben könnte. Bei einer thermischen Vorbehandlung, die auch aus anderen Gründen sinnvoll ist, ließe sich der Kupferanteil jedoch abscheiden und verwerten. Bei Tags ohne Kupferantennen sind auch bei hohem Aufkommen keine Probleme für das Aluminiumrecycling zu erwarten.

Aus Sicht des Recyclings von Aluminiumschrotten würde die Verwendung von Aluminium-Antennen vorteilhaft sein, da sie aus den gleichen Bestandteilen wie die betrachteten Schrotte bestehen. Falls Kupfer-Antennen zum Einsatz kommen würden, so sind die Anforderungen nach DIN EN 13920 zu beachten, wobei bei überhöhten Konzentrationen gezielt mit Aluminiumschrotten verschnitten (gattiert) werden muss.

Der Einfluss des eingetragenen Siliziums ist aufgrund seines im Verhältnis zu den Grenzwerten geringen Massenanteils vernachlässigbar.

3.4 Thermische Abfallbeseitigung, Verwertung als Ersatzbrennstoffe und Schlackeverwertung

Rückstände aus der stofflichen Verwertung gehen in die thermische Abfallbeseitigung oder werden als Ersatzbrennstoffe energetisch verwertet. Auf diesem Weg können auch abgeschiedene Bestandteile von RFID-Tags in diese Prozesse gelangen. Ferner können RFID-Tags direkt über den Restmüll in die thermische Abfallbeseitigung gelangen, z.B. als Ergebnis von Fehlwürfen oder aufgrund getaggtter Güter, die nicht separat gesammelt werden.

In diesem Abschnitt werden hauptsächlich die Auswirkungen von RFID-Tags auf die Qualität der Schlacken aus der thermischen Abfallbeseitigung und der energetischen Verwertung betrachtet. Einflüsse des Eintrags von RFID-Tags und ihrer Komponenten auf den Verwertungs- bzw. Beseitigungsprozess selber (z.B. eine mögliche vermehrte Dioxinbildung durch zusätzlichen Kupfereintrag) werden in diesem Vorhaben nicht behandelt.

Als Ersatzbrennstoffe (EBS) werden Abfallfraktionen bezeichnet, die nicht einer stofflichen Verwertung zugeführt werden und in den Verfahren der thermischen Abfallbehandlung mit dem Hauptzweck der Einsparung von natürlichen Ressourcen genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Aussagen aus KrW-AbfG § 4 Abs. 4 eingehalten werden. Bei der Verwertung von Ersatzbrennstoffen wird grob zwischen hoch- und niederenergetischen Heizwerten unterschieden. Im speziellen müssen verschiedene Qualitätsanforderungen für Vorprodukte sowie Aufbereitungsformen der Ersatzbrennstoffe berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden die Produktspezifikationen des DSD für Ersatzbrennstoff-Vorprodukte (Stand 04/2007), und die Qualitätsanforderungen an Sekundärbrennstoffe nach RAL-GZ 724 für die Bewertung der Einträge durch RFID-Tags herangezogen³⁵.

Grundlegend wird zwischen den Einsatzbereichen der Mitverbrennung in Industrieheizungen und der Verwertung in Monoverbrennungsanlagen differenziert, wobei in allen Verfahren unterschiedliche Anforderungen an den Brennstoff spezifiziert sind.

- ▶ In der Monoverbrennung werden weiterhin die Verfahren der Müllverbrennung (MVA) und EBS-Heizkraftwerke, in der Mitverbrennung die Zement-/Kalkwerke sowie Braun-/Steinkohlekraftwerke unterschieden (Puch 2008).

³⁵ Weiterhin dürfen die Emissionsgrenzwerte der 17.BImSchV in den jeweiligen Verfahren nicht überschritten werden.

- ▶ In den Verfahren der Mitverbrennung sind Beimischungen von Ersatzbrennstoffen bis zu 30% üblich (Rehn 2007, Reichenberger 2008).

Wir werden in den weiteren Ausführungen nur die Schlacke aus der Müllverbrennung bezüglich Stoffeintrag durch RFID-Tags in Schlacken näher betrachten, weil nur in diesem Bereich die Datengrundlagen gegeben sind.

3.4.1 Verwertung von Reststoffen als Ersatzbrennstoffe

Die für den RFID-Eintrag relevanten Abfallfraktionen sind Abfälle aus der Altpapieraufbereitung, gemischte Verpackungen und grob aufbereitete heizwertreiche Fraktionen aus gemischten Siedlungsabfällen.

Abfälle aus der Altpapieraufbereitung

Bei den anfallenden Reststoffen der Altpapieraufbereitung nach Abfallschlüssel 03 03 07 sind es vor allem die Sortierrückstände (Spuckstoffe, siehe Abschnitt 3.2) die durch den Eintrag an RFID-Tags betroffen würden, wobei die Beschaffenheit der Sortierrückstände stark vom Sortierprozess abhängt (Verfahrensschritte, Trennprinzip). Die Spuckstoffe setzen sich überwiegend aus Metallklammern, Kunststofffolien, Klebstoffen und schwer zerkleinerbaren Papieren zusammen (Pfaff, 2001). Die RFID-Tags, die im PPK-Recycling ausgesondert werden, tragen hier zur Erhöhung des Metall- und Kunststoffanteils bei. Sie werden durch die Metallabscheidung bei der Sekundärbrennstoffaufbereitung nicht erfasst, da ihre Fläche zu gering ist, um detektiert zu werden. Quantitative Aussagen sind nur auf Grundlage von Szenarien möglich (siehe Kapitel 4.2.2.3).

Gemischte Verpackungen

Die Fraktion wird dem Abfallschlüssel 15 01 06 zugeordnet, wobei unter vorheriger Abtrennung von FE-, NE-Metallen und anderer Schwerstoffe der Sekundärbrennstoff aufbereitet worden ist. Die Bestandteile setzen sich aus 75% Kunststoff, 10% Papier und je 5% FE, NE- Metalle und Textilien zusammen (Flamme 2002). Wenn diese Verpackungen mit RFID-Tags versehen sind, werden diese durch die Metallabscheidung nicht erfasst, da ihre Fläche zu gering ist, um detektiert zu werden.

Grob aufbereitete heizwertreiche Fraktionen aus gemischten Siedlungsabfällen

Diese Abfallfraktion resultiert aus Anlagen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA), wobei die heizwertreichen Anteile der Fraktionen Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, Sperrmüll und Bauabfall Verwendung finden. Bezüglich der RFID-Thematik sind die beiden erstgenannten Fraktionen relevant. Auch hier werden

RFID-Tags bei der Sekundärbrennstoff-Aufbereitung nicht erfasst, da ihre Fläche zu gering ist, um detektiert zu werden.

Für Ersatzbrennstoffe gibt es nach RAL-GZ 724 einen Grenzwert von 350 g Kupfer pro Tonne Trockensubstanz. Es ist anzumerken, dass die hier betrachteten Zusammensetzungen auf Grund von Unterschieden in Sammlungssystem und Einzugsgebieten erheblich variieren können. Es ist daher ausschlaggebend, ob überwiegend Hausmüll mit nur geringen Anteilen hausmüllähnlicher Gewerbeabfälle oder reine Gewerbeabfälle verarbeitet werden (Langen 2003). Eine orientierende Abschätzung findet sich in Abschnitt 4.2.2.3.

3.4.2 Verwertung von Schlacken als Sekundärbaustoffe

In 2006 wurden bereits 85 % der Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen verwertet, lediglich 15% deponiert (IFEU 2008). Eine Verwertung als Sekundärbaustoff findet in den Bereichen Straßen-/Wegebau, Deponiebau und Bergversatz statt. Sind die Aufbereitungskosten zu hoch, dann wird die Schlacke stabilisiert und abgelagert.

Rechtliche Grundlage für die Anforderungen an die Verwertung von Schlacken stellte bisher das LAGA Merkblatt 20 dar, welches durch die Ersatzbaustoff-Verordnung des Bundes ersetzt werden wird. Um die Verwertbarkeit zu gewährleisten müssen entsprechende Vorgaben, wie bauphysiologische Eignung und Umweltverhalten von löslichen Verbindungen und Feststoffgehalten eingehalten werden, wozu es verschiedener Aufbereitungsschritte bedarf.

Für Anwendungen im Bereich des Straßenbaus ist eine dreimonatige Schlackealterung notwendig, da diese nach LAGA Merkblatt 20 geregelte Vorgehensweise zur höheren Inertisierung der Rohschlacke beiträgt. Es werden vor allem die Feinkornanteile karbonatisiert bzw. hydratisiert. Eine hochwertige Verwertung wird durch den nach Korngrößenverteilungen aufgearbeiteten Ersatzbaustoff möglich, da dieser bauphysikalischen Anforderungen genügt.

Schlacken sowohl aus der thermischen Beseitigung als auch aus der energetischen Verwertung, welche als Sekundärbaustoffe im Tiefbau stofflich verwertet werden, müssen entsprechend den Anforderungen für die jeweilige Anwendung aufbereitet werden. Die Abtrennung – und somit Rückgewinnung – von Metallstücken ist seit längerer Zeit Stand der Technik und kommt aus ökonomischen Interessen ausgedehnt zum Einsatz

(IFEU 2008). Prinzipiell werden Bestandteile aus Kupfer und Aluminium zurückgewonnen³⁶:

- ▶ Restgehalte von Aluminium in der Rohschlacke wirken sich qualitätsmindernd aus, was besonders für den Bergversatz gilt (niederwertige Verwertung). Denn metallisches Aluminium führt zur katalytischen Bildung von Wasserstoffgas, die Schlacke wäre daher ohne Metallabscheidung nicht für den Versatz geeignet.
- ▶ Aus der Befragung eines EBS-Heizkraftwerkbetreibers (Plepla 2008) ging hervor, dass das Aufkommen an Kupfer in der Rohschlacke 0,12 Masse-% beträgt. Generell wird durch den steigenden Einsatz von Ersatzbrennstoffen ein höheres Aufkommen an Kupfer erwartet (Flamme 2002). Für Kupfer gibt es einen Grenzwert von 400 mg/kg TS für die Verwertung von Schlacke aus MVA im Tiefbau³⁷. Eine Erhöhung des Kupferanteils in der unbehandelten Schlacke muss deshalb Maßnahmen zur verstärkten Abscheidung von Kupfer aus Schlacke nach sich ziehen.

Es ist umstritten, ob die Menge und die Form der metallenen Rückstände von RFID-Tags für eine Detektierung und wirtschaftliche Separierung der metallischen Bestandteile aus RFID-Tags ausreichen. Die metallischen RFID-Bestandteile werden je nach Position entweder bei der Zerkleinerung der Schlacke auf eine Korngröße von 0.32 mm ausgeschieden (Spohn 2008), oder aber sie sind mit der Schlacke so agglomeriert, dass die nicht ausgeschieden werden.

Für Silber ist kein Grenzwert bezüglich der Verwertung von Schlacke definiert. Eine Zurückgewinnung des Silbers aus der unbehandelten Schlacke wäre jedoch im Vergleich zum Kupfer wesentlich aufwendiger, da das Silber gemäss ISO/IEC TR 24729-2 in RFID-Tags als Partikel und nicht kristallin vorliegt.

Eine Erhöhung der Konzentrationen von Silizium, welches in der Schlacke als Oxid vorliegt, wird grundsätzlich als unproblematisch erachtet.

3.4.3 Deponierte Fraktionen

Einer Deponierung werden nur Fraktionen zugeführt, die nicht weiter verwertet werden können. Dies sind für die hier betrachteten Abfallgruppen die unverbrannten, nicht ver-

³⁶ Dabei werden anteilmäßig rund 10 Massen-% FE-Metalle sowie 2-3 Massen-% NE-Metalle aus der Schlacke aussortiert und anschließend werkstofflich verwertet. Der nicht verwertbare Teil der Schlacke (die unverbrannten Bestandteile), welcher rund 2 % der aufzubereitenden Masse ausmacht, wird deponiert (Spohn 2008).

³⁷ Gemäß LAGA-Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen. Teil II: Technische Regeln für die Verwertung. 1.2 Bodenmaterial (TR Boden).

wertbaren Rückstände aus den thermischen Behandlungsprozessen (Deponieklasse I), sowie die inerte aerobe Rotte der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (Deponieklasse II). Da davon auszugehen ist, dass nur ein kleiner Anteil an Metallen in die Deponie gelangt - nämlich diejenigen Metalle, welche mit den unverbrannten Bestandteilen der Schlacke agglomeriert vorliegen - werden die deponierbaren Fraktionen nicht weiter untersucht.

Fazit zur thermischen Abfallbeseitigung, energetischen Verwertung und Schlackeverwertung

Sollten in Zukunft größere Mengen an RFID-Tags in die thermische Abfallbeseitigung gelangen oder über Verwertungsprozess in Ersatzbrennstoffe eingetragen werden, ist nicht auszuschließen, dass es zu einer deutlichen Erhöhung von Metallkonzentrationen (insbesondere Kupfer, Aluminium und Silber) in der unbehandelten Schlacke kommt. Sofern diese Metalle nicht anschließend abgetrennt und in den Kreislauf zurückgeführt werden können, kann dies einerseits zu einem Verlust an Wertstoffen durch Dissipation führen, andererseits aber auch eine Verwertung der Schlacke im Tiefbau verhindern.

Da davon auszugehen ist, dass nur ein sehr kleiner Anteil an Metallen in unverbrannten Bestandteilen von Schlacken aus der energetischen Verwertung oder thermischen Abfallbeseitigung in die Deponie gelangt, sind die Auswirkungen eines Metalleintrags durch RFID-Tags in deponierte Fraktionen mit großer Wahrscheinlichkeit zu vernachlässigen.

3.5 Exkurs: RFID-Tags und Bioabfall

Wir haben uns in diesem Kapitel 3 systematisch auf jene Abfallfraktionen konzentriert, bei denen mit einem relativ hohen Eintrag an RFID-Tags zu rechnen ist. Die kompostierbaren Bioabfälle gehören nicht dazu, sollen aber aufgrund ihrer Sensibilität für den Eintrag an Metallen im Sinne eines Exkurses kurz behandelt werden.

In die kompostierbaren Bioabfälle können Bestandteile aus gesammeltem Altpapier, Rückstände der Altpapiersortierung und biologisch abbaubare Kunststoffe eingehen.

Für den Eintrag aus dem Bereich des Altpapiers werden etwa 0,7%, dies entspricht in 2005 41,5 kt an Altpapier, aus der PPK-Monosammlung in die Kompostierung eingetragen (Schüler 2005). Des Weiteren werden auch etwa 25% der Schlamm-Rückstände aus der Altpapieraufbereitung kompostiert (Simon 2008). Eine mögliche Eintragsquelle von RFID-Tags sind Eierkartons. Das massenhafte Tagging von Eierkartons mit RFID-Tags ist in den nächsten fünf Jahren aber nicht zu erwarten.

Für die biologisch abbaubaren Kunststoffe ist zu beachten, dass im Zuge der Umsetzung der EU-Deponierichtlinie und der deutschen Strategie zur Verringerung der Deponierung biologisch abbaubarer Abfälle, basierend auf Juli 2006 mit 21,3 Mio. t bis Juli 2016 nur noch 9,9 Mio. t dieser Verpackungen deponiert werden dürfen. Dies bedeutet neben einer getrennten Sammlung auch die Zuführung dieser Verpackungen in Anlagen der Kompostierung oder Vergärung. Falls es durch Item-level-Tagging zur Verwendung von entsprechenden RFID-Tags kommen sollte, werden diese auch in die genannten Verfahren eingetragen.

In beiden Fällen ist davon auszugehen, dass es zu Einträgen von RFID-Bestandteilen aus den benannten Fraktionen kommen kann. Im Rahmen dieser Untersuchung können sie nicht abgeschätzt werden. Eine Beobachtung der zukünftigen Entwicklung wird aber empfohlen.

4 Zukünftige Stoffströme von RFID-Tags in der Siedlungsabfallentsorgung

Ausgehend von der Analyse der potenziellen Probleme durch den Eintrag von RFID-Tags in die Entsorgung nimmt dieses Kapitel quantitative Abschätzungen für die zukünftigen Stoffströme vor, um realistische Bandbreiten der tatsächlichen stofflichen Einträge in das Recycling zu erhalten.

Zur Abbildung der künftigen Situation ist die Szenario-Methodik verwendet worden. Die Quantifizierung der Szenarien erfolgt mit Hilfe eines Stoffstrommodells. Schwerpunkt der Betrachtungen ist der Eintrag von Fremdstoffen in werkstoffliche Recyclingverfahren, aber auch weitere Wirkungsdimensionen wie der Wertstoffverlust und die Humantoxizität werden behandelt.

Ein Exkurs mit Extrembetrachtungen schließt das Kapitel ab, um die Konsequenzen ganz anderer möglicher Entwicklungen zu veranschaulichen.

4.1 Szenarien für RFID-Tags in der Abfallentsorgung

Szenarien haben den Zweck, die Bandbreiten zukünftiger Entwicklungen auszuloten. Sie adressieren in diesem F+E-Vorhaben explizit die Komplexität und Unsicherheit, die das Verhältnis zwischen der Entwicklung von RFID-Systemen und der Abfallentsorgung bis 2022 charakterisieren. Damit heben sich Szenarien von Ansätzen, die nur *eine* mögliche zukünftige Entwicklung betonen, deutlich ab³⁸. Die Spreizung der einzelnen Szenarien und ihre Interpretation im Dialog mit den beteiligten Kreisen erlauben es, den Gestaltungsspielraum für eine Systemoptimierung auszuloten und zu bewerten.

Zeitliche, räumliche und sachliche Differenzierungen geben den Szenarien wichtige Konturen:

- ▶ Als Zeithorizont ist 2022 gewählt worden. Die wichtigsten FuE-Roadmaps und Marktstudien zu RFID sowie Zukunftsstudien zur Abfallentsorgung haben einen Zeithorizont von 10-15 Jahren. Die hinsichtlich der Abschätzung von Stückzahlen hauptsächlich verwendete Marktstudie (Bridge 2007) nennt Zahlen für die Jahre

³⁸ Dazu gehören Trendextrapolationen, Prognosen und Forecasts, die meist auch beanspruchen, die wahrscheinlichste Entwicklung nachzuzeichnen. Auch in der Szenario-Methodik wird die wahrscheinlichste Entwicklung oft zur Kontrastierung anderer Entwicklungen verwendet. Sie heißen dann Status Quo Szenario, Business as Usual Szenario oder Referenz-Szenario. Andere Szenariotypen betonen neben explorativen, stärker auch normative Aspekte (IZT 2008).

2007, 2012, 2017 und 2022. Diese Untergliederung wird auch für die Szenarien verwendet.

- ▶ Geografisch beziehen sich die Szenarien auf die Entsorgungssysteme in Deutschland³⁹. Räumliche Differenzierungen könnten z.B. in der Einführungsphase von RFID-Tags relevant sein (z.B. Nordrhein-Westfalen); die Frage, wo zunächst Entsorgungsprobleme auftreten könnten, steht aber nicht im Vordergrund der Untersuchung.
- ▶ Es werden ausschließlich Szenarien gebildet, die wir aufgrund der Analyse der Wissensbestände für realistisch halten. Variiert werden insbesondere die RFID-Technologie- und die Marktentwicklung sowie das Verhalten der Stakeholder, wohingegen die Rahmenbedingungen des Entsorgungssystems in den Szenarien konstant gehalten werden. Worst-Case-Entwicklungen werden als Extrembetrachtungen separat behandelt.

Eine weit verbreitete Methodik zur Erstellung von Szenarien umfasst die Schritte Identifizierung von Schlüsselfaktoren, Formulierung von Rohszenarien, Identifizierung von Variablen, logische⁴⁰ und partizipative Validierung sowie das Schreiben der Szenario-Texte (IPTTS 2004). Aufbauend auf dem Jahr 2007 wurden vier realistische Szenarien gebildet:

- ▶ Szenario *Referenzentwicklung*, kurz: Referenz,
- ▶ Szenario *Technisch-ökonomischer Push*, kurz: Push,
- ▶ Szenario *Staatliche Regulierung*, kurz: Staat und
- ▶ Szenario *Selbstregulierung*.

Die folgenden Szenario-Texte sind in weiteren Schritten quantifiziert worden. Sie liefern das logische und konsistente Gerüst für realistische Annahmen.

4.1.1 Ausgangslage 2007

Im Jahr **2007** haben RFID-Tags nur in einzelnen Teilmärkten Einzug gehalten. Ein passiver RFID-Tag kostet zwischen 10 und 20 €-Cent. Für die Abfallentsorgung relevante Teilmärkte sind Smart Cards, Smart Tickets, Verpackungen im Großgewerbe

³⁹ Die Entsorgungssysteme in Deutschland entsorgen derzeit vorwiegend in Deutschland in Verkehr gebrachte Güter. Dies kann sich bis 2022 vor dem Hintergrund der europäischen Marktintegration ändern. Die Produkte selbst und auch die RFID-Tags stammen aus aller Welt, ebenso wie Deutschland Produkte und RFID-Tags in alle Welt exportiert.

⁴⁰ Erfolgte durch Cross-Impact Analysen mit Hilfe der Software MICMAC (Godet 2001).

(Einweg und Mehrweg), die Einzelkennzeichnung von hochwertigen Konsumgütern (u.a. Kleidung), Fluggepäcklogistik sowie Paketsendungen.

Die Zusammensetzung der RFID-Tags entspricht den Angaben aus ISO/IEC TR 24729-2. Es sind bisher keine nennenswerten Probleme im Entsorgungsbereich aufgetreten.

4.1.2 Szenario Referenzentwicklung

Im Jahr **2012** dominieren nach Stückzahlen die stark gewachsenen Teilmärkte Verpackungen im Großgewerbe und die Einzelkennzeichnung von hochwertigen Konsumgütern (u.a. Kleidung). Kräftiges Wachstum hat es auch im Bereich der Paketsendungen gegeben. Nur einzelne Großunternehmen führen RFID ein; weniger weil ein klarer Return of Investment darstellbar ist, als vielmehr aus der Überzeugung, sich mit der RFID-Technologie strategische Erfolgspotenziale zu erarbeiten.

Angesichts der hohen gesundheitlichen Bedeutung von Lebensmitteln und Medikamenten wird die RFID-Einführung in diesen Bereichen durch regulative Maßnahmen vorangetrieben (u.a. Überwachung der Kühlkette und Kennzeichnung der Herkunft). Für die Überwachung der Kühlkette kommen semi-passive RFID-Tags mit Temperatursensor und Batterie auf Mehrwegverpackungen zum Einsatz.

In der Gestaltung der RFID-Tags stehen die Funktionalität im Gesamtsystem und Wirtschaftlichkeitsaspekte im Vordergrund. Die benötigten Materialmengen für die einzelnen RFID-Tags entsprechen denjenigen von ISO/IEC TR 24729-2, aber der Anteil von Tags mit gedruckter Antenne hat aufgrund der geringeren Produktionskosten zugenommen. Ein passiver RFID-Tag kostet unter 10 €-Cent.

Recyclingfragen wird aufgrund der geringen Mengen keine große Aufmerksamkeit geschenkt.

Bis **2017** steht die Kostenreduktion zur stärkeren Erschließung der Segmente Item-Level-Tagging von Lebensmitteln und Konsumgütern sowie Verpackungen im Großgewerbe im Vordergrund. Durch eine moderate Materialeinsparung beim Antennenmaterial und Polymerchips können die passiven RFID-Tags für weniger als 5 €-Cent im kontinuierlichen Prozess hergestellt werden. Dadurch werden auch die Teilmärkte Post (Briefe, Zeitungsversand, etc.), archivierte Dokumente und Medikamente in der Breite erreicht. Semi-passive RFID-Tags auf Mehrwegverpackungen zur Überwachung der Kühlkette breiten sich weiter aus.

Die gesunkenen Produktionskosten verringern Anreize zur Kreislaufführung der RFID-Tags, so dass die RFID-Tags auch 2017 größtenteils in die Recyclingprozesse gelangen und dort punktuell zu Problemen führen können.

Bis in das Jahr **2022** gelangen weitere Kostenreduktionen auf unter 3 €-Cent pro passivem RFID-Tag. Treiber hierfür sind ausgereifere Polymerchip-Technologien und verbesserte Aufbringungstechniken für Antennenmaterialien. Die technischen Probleme mit Interferenzen auf Wasser und Metall sind inzwischen weitgehend gelöst.

Auf die Segmente Item-Level-Tagging von Lebensmitteln und sonstigen Konsumgütern sowie Postsendungen und Verpackungen im Großgewerbe entfallen rund 90 % der in Verkehr gebrachten RFID-Tags. Die Tag-Kosten lassen sich durch Standardisierungseffekte und systemische Verbesserung der Gesamtlogistik so weit reduzieren, dass sich die Investitionen amortisieren. RFID-Tags mit erweiterter Funktionalität zur Überwachung der Kühlkette sind weit verbreitet.

Hinsichtlich des Eintrags von RFID-Tags in die Abfallentsorgung setzen sich die Entwicklungen aus dem Jahr 2017 auch bis 2022 fort. Auf etwaige Probleme im Recycling wird verspätet reagiert. Die hohen Investitionen in die RFID-Technologie sorgen dafür, dass der Anpassungsdruck auf die Entsorgungswirtschaft gerichtet ist.

4.1.3 Szenario *Technisch-ökonomischer Push*

Durch Kosteneinsparungen im Produktionsprozess werden bis **2012** einzelne Massenmärkte für RFID-Tags erschlossen. Polymerchips und gedruckte UHF-Antennen haben bereits signifikante Marktanteile. Die Kosten pro passivem Tag liegen um die 5 €-Cent. Der Antennenmaterialverbrauch steigt moderat, um höhere Funkreichweiten zu erzielen.

Neben dem Segment der Postsendungen ist das Item-Level-Tagging auf Lebensmitteln und sonstigen Konsumgütern, Verpackungen im Großgewerbe und archivierten Dokumente dominierend. Einzelne Großunternehmen können aufgrund ihrer Marktmacht die RFID-Einführung weitgehend diktieren, so dass auch die Wettbewerber nachziehen müssen. Deutsche Unternehmen aus dem Einzelhandel und der Logistik sind europaweit führend. Insbesondere das Know-how für Lösungen der Wasser- und Metallproblematik ist gefragt. Das Tracking und Tracing von Medikamenten und Lebensmitteln mit semi-passiven Tags nimmt stark zu.

Die Prozesseffizienz der RFID-Nutzung steht im Vordergrund der Entwicklungsaktivitäten. Die RFID-Tags gelangen weitgehend ungehindert in die Recyclingprozesse.

Bis **2017** sind RFID-Tags mit Polymerchip und gedruckter Antenne Stand der Technik. Die Produktion erfolgt inline und kostengünstig, so dass die passiven Tags für unter 3 €-Cent angeboten werden. Bei definierter Funkreichweite ist der Materialverbrauch für die Antennen aus Kostengründen so weit wie möglich reduziert worden.

Bei den Einsatzgebieten dominiert 2017 das Item-Level-Tagging von Lebensmitteln vor Postsendungen, sonstigen Konsumgütern, Verpackungen im Großgewerbe, Smart Tickets und archivierten Dokumenten. Auf Kistenebene findet die Temperaturkontrolle von Lebensmitteln und Medikamenten mit semi-passiven RFID-Tags weit verbreitet statt.

Neue Integrationsmethoden von RFID-Tags werden vor allem für den Kopierschutz von CDs/DVDs, sowie für Textilien und EE-Geräte verwendet. Die Interferenzproblematik mit Wasser und Metallen ist durch Einzellösungen, die RFID-Tags an das etikettierte Objekt intelligent anpassen, weitgehend gelöst.

Aufgrund der geringen Kosten für RFID-Tags ist die Wiederverwendung nur noch marginal. Schon im Jahr 2017 stellt sich eine Entsorgungssituation von RFID-Tags im Recycling dar, wie es bei der Referenzentwicklung erst 2022 der Fall ist.

Im Jahr **2022** ist die RFID-Technologie volkswirtschaftlich nicht mehr wegzudenken. Der Barcode existiert nur noch in Teilbereichen parallel, ansonsten ist er überflüssig geworden. Ermöglicht wurde dieser RFID-Durchbruch durch drastische Kostensenkung auf unter 1 €-Cent pro passivem Tag. Der Direktdruck eines Chip/Antennen-Moduls auf die Objekte ist möglich geworden.

1 €-Cent Tags haben die Segmente Item-Level-Tagging von Lebensmitteln, Konsumgütern, Postsendungen und archivierte Dokumente durchdrungen. Auch auf Verpackungen im Großgewerbe, Medikamenten und als Smart Tickets werden sie massenhaft eingesetzt. Temperaturkontrolle von Lebensmitteln und Medikamenten auf Einzelverpackungsebene ist flächendeckende Praxis.

Es treten vermehrt Recycling-Probleme auf, aber die Akteure reagieren verspätet. Weil die Anpassung jetzt teuer geworden ist, sind die Recycling-Prozesse durch den Eintrag von RFID-Tags bedroht.

4.1.4 Szenario Staatliche Regulierung

Die Einführung von RFID verläuft bis **2012** schleppend. Staatliche Regulierung zum Schutz der Privatsphäre und zur Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus bremst zunächst die Markteinführung. Durch staatliches Handeln sind aber RFID-Lösungen zur Überwachung der Kühlkette von Lebensmitteln und Medikamenten for-

ciert worden. Aus unternehmerischer Sicht bremsen die fehlende technische Reife und die hohen Implementierungskosten wegen der unzureichenden Amortisation der Investitionen die Einführung. Es herrscht eine abwartende Haltung der meisten Firmen vor, die auch unternehmensübergreifende Standardisierungslösungen und Win/Win-Geschäftsmodelle in der Wertschöpfungskette blockieren. Nur auf Verpackungen im Großgewerbe sowie zur Diebstahlsicherung und Produktauthentifizierung auf hochwertigen Konsumgütern werden RFID-Tags in größeren Mengen verwendet.

In diesem eher vorsichtigen und Technologie-skeptischen Umfeld setzen die führenden Unternehmen beim Design der RFID-Tags auf die Vermeidung vermutlich kritischer Stoffe, ohne dass die Schädlichkeit praktisch erwiesen ist. Dazu zählt das Vermeiden bestimmter Antennenmaterialien in Teilbereichen (z.B. Kupfer auf Metallverpackungen; Aluminium auf Glasverpackungen).

Aus dem Entsorgungssystem kommt aufgrund der geringen Mengen und der weitgehend unkritischen Stoffe kein nennenswerter Problemdruck.

Erst **2017** werden massenhaft passive RFID-Tags für unter 10 €-Cent produziert. Die zögerlichen Investitionen in effiziente Produktionsanlagen und die damit verbundene geringe Nutzbarkeit von Skaleneffekten haben die Kostensenkung für RFID-Tags verzögert. Neben Verpackungen im Großgewerbe und hochwertigen Konsumgütern ist das Tagging von Lebensmitteln zum dritten bedeutsamen Marktsegment geworden. Die Wasser- und Metallinterferenzproblematik ist technisch-ökonomisch noch nicht hinreichend gelöst. Die RFID-Tags werden vorwiegend zur Verbesserung des Supply Chain Managements, insbesondere auf der Kistenebene in der Kühlkette von Lebensmitteln, und zur Authentifizierung von Produkten verwendet.

Die Entsorgungswirtschaft vertritt ihre Interessen gegen eine Verunreinigung ihrer Sekundärrohstoffe wirksam. Die im Einzelfall sehr unterschiedlich gelagerten Probleme führen dazu, dass die wenigen auf dem Markt verfügbaren RFID-Tags für den Masseneinsatz generell so gestaltet werden, dass sie für die Entsorgungsprozesse weitgehend unkritisch sind. Dies betrifft insbesondere die Wahl des Antennenmaterials.

2022 dominiert schließlich das RFID-Tagging von Lebensmitteln. Auch RFID-Tags für Verpackungen im Großgewerbe, Konsumgüter und Postsendungen haben eine hohe Relevanz. Möglich wurde dies durch Kostensenkungen auf unter 5 €-Cent pro RFID-Tag und durch das durch die vorsorglichen Maßnahmen langsam wachsendes Vertrauen in die Technologie, sowohl bei den Unternehmen als auch in der Öffentlichkeit. Semi-passive RFID-Tags für Verpackungen in der Kühlkette von Lebensmitteln und Medikamenten sind breit im Einsatz.

Die Möglichkeiten der RFID-Technologie sind aufgrund der zögerlichen Einführung und der geringen Investitionssicherheit nicht ausgereizt worden. Insbesondere die gedruckte Elektronik, Polymerchips und innovative Antennenproduktionsverfahren, haben keinen Durchbruch erlangt.

Das Tag-Design gemäß des Vorsorgeprinzips setzt auf massenstromtaugliche RFID-Tags und weniger auf Separierbarkeit.

4.1.5 Szenario *Selbstregulierung*

Bis **2012** haben die praktischen Tests mit RFID-Tags in Recyclinganlagen zu einer frühzeitigen Reaktion der Hersteller und zu Neuentwicklungen des RFID-Tag/Objekt-Systems geführt. Wichtigste Maßnahmen zur Separierung der RFID-Tags vom sonstigen Abfall sind innovative Klebstoffe (Smart Label auf Papier, Pappe, Karton), detektierbare RFID-Tags in der LVP-Sortierung, konstruktive Lösungen (Integration in den Deckel, nicht in den Glaskörper) und Separatabschnitte bei Smart Tickets.

Die ökonomischen Auswirkungen sind im Vergleich zur Referenzentwicklung marginal, da passgenau wirksame Maßnahmen getroffen werden können. Auf der anderen Seite wird die technische Standardisierung durch die Kooperationskultur gefördert. Die Marktentwicklung im Szenario *Selbstregulierung* entspricht deshalb dem Szenario *Referenzentwicklung*.

Die Entsorgungssysteme werden durch den verbleibenden geringen Störstoffeintrag nicht wesentlich belastet.

Bis **2017** müssen die Stakeholder aus RFID-Industrie, Anwendern und Entsorgungswirtschaft v.a. Antworten auf die steigenden Massenströme finden. Effektive Separation von RFID-Tags ist 2017 in einigen Recyclingbranchen (u.a. Glas) Stand der Technik.

Die Separation von RFID-Tags hat in Teilbereichen zu ökonomisch lukrativen Recyclingmaßnahmen zur Wiedergewinnung von Kupfer und Silber geführt. Der Eintrag von RFID-Tags in Recycling-Prozesse steht aufgrund des geringen Problemdrucks im Schatten von anderen Fragen der Kreislaufwirtschaft.

Bis **2022** diversifiziert sich das durch RFID-Tags eingetragene Stoffgemisch weiter und die Mengen steigen. Die etablierte Kooperationskultur zwischen den Stakeholdern fördert mögliche Probleme frühzeitig zu Tage.

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Separierbarkeit durch die Aufbringung und Gestaltung der RFID-Tags sind weitgehend ausgereizt, so dass der Druck zur Separie-

nung auf die Recyclingwirtschaft fällt. Neben Kupfer und Silber werden aus dem Nebenstrom auch andere Wertstoffe wiedergewonnen.

4.1.6 Zusammenfassung und Ausblick

Folgende Tabelle zeigt die Eckpunkte der vier Szenarien im Überblick:

Tabelle 4-1: Eckpunkte der vier Szenarien

	Referenz	Push	Staat	Selbst-regulierung
Technologie	Technologie-Roadmaps	Durchbrüche gelingen rasch	Entwicklung gebremst	Technologie-Roadmaps
Antennenmaterial	Träge Verschiebung	zunächst zu Silber, dann zu Aluminium	langfristig zu Aluminium	Träge Verschiebung
Marktvolumen	Referenzprojektion	dynamischere Entwicklung	Moderatere Entwicklung	Referenzprojektion
Entsorgung	wie heute	wie heute	wie heute	punktueller Anpassung durch Stakeholder

Quelle: Zusammenstellung des IZT

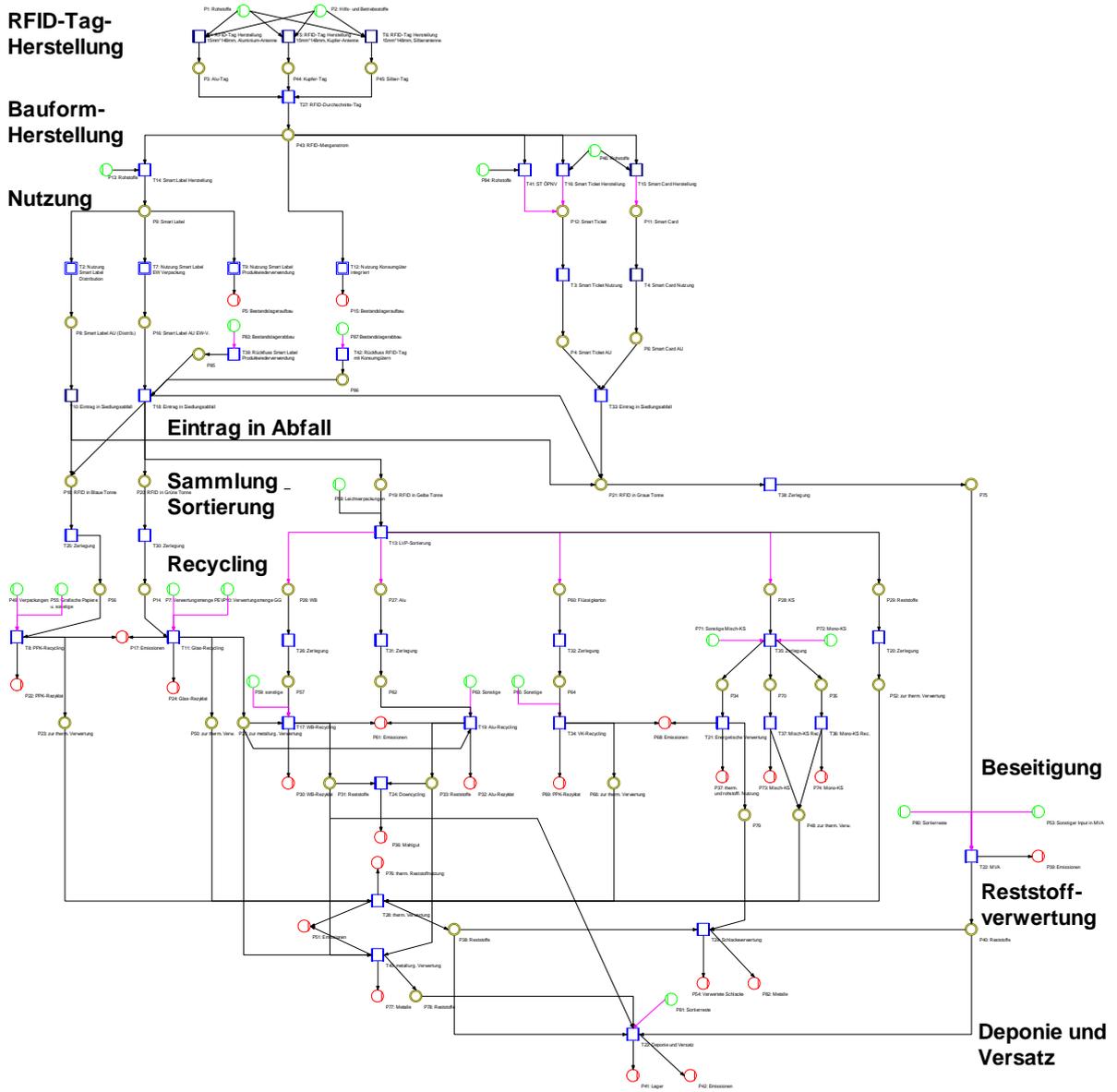
Die Szenarien spiegeln möglichst realitätsnah die Entwicklungen bis 2022 wieder. Die RFID-Technologie und das Entsorgungssystem orientieren sich dabei eng an dem heute bekannten Wissensstand, wohingegen die Marktentwicklungen eine große Bandbreite umfassen. Um auch andere mögliche Entwicklungen und ihre Implikationen zu skizzieren werden im Exkurs (Kapitel 4.3) deshalb hypothetische zukünftige Entwicklungen der RFID-Tags und des Entsorgungssystems diskutiert.

4.2 Quantifizierung der Stoffströme

Für die Quantifizierung der Stoffströme von RFID-Tags in der Abfallentsorgung in Deutschland wurde ein Stoffstrommodell mit Hilfe der Modellierungssoftware Umberto erstellt. Das Modell simuliert den Stofffluss der RFID-Tags und ihrer Inhaltstoffe über den gesamten Lebenszyklus, von der Herstellung der Tags über die Bauform-Herstellung (z.B. Smart Label), die Nutzung, den Eintrag in den Siedlungsabfall, Sammel- und Sortierprozesse, das Recycling und die Reststoffverwertung und schlussendlich die Beseitigung.

Dieses komplexe Stoffstrommodell erlaubt die Berechnung zahlreicher Szenarien und Varianten in überschaubarer Zeit⁴¹. Folgende Abbildung zeigt das Netzwerk des Modells anhand des Projektes Referenzentwicklung 2022.

Abbildung 4-1: Netzwerk im Modell für das Projekt 'Referenz-Szenario 2022'



Quelle: Darstellung des IZT als Stoffstromnetz in Umberto

41 Aus Gründen der Übersichtlichkeit mussten zahlreiche Subtransitionen spezifiziert werden.

Hauptzweck des Modells ist die Quantifizierung der Stoffströme in den vier Szenarien. Dazu waren eine Reihe von Basisannahmen erforderlich, wovon die zentralen hier zusammengefasst sind:

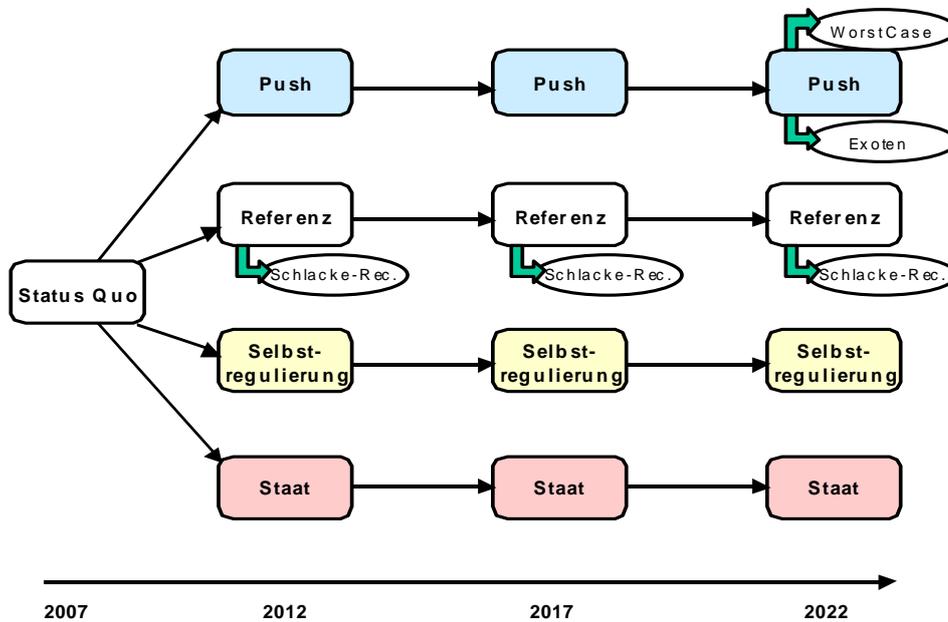
- ▶ Die RFID-Tags haben den Stoffinhalt der mittleren Größe gemäß ISO/IEC-Norm. Durch die konstanten Mengenverhältnisse zwischen den Größen können leicht auch die Stoffflüsse des kleineren und des größeren Tags simuliert werden. Wir halten die stoffliche Zusammensetzung des mittleren RFID-Tags aus heutiger Sicht für am plausibelsten. Das Antennenmaterial variiert in den Szenarien, vor allem in Abhängigkeit ökonomischer und ökologischer Einflussfaktoren.
- ▶ Die Marktentwicklung ist in den Szenarien gemäß einer Referenzprojektion, sowie einer moderateren und einer dynamischeren Entwicklung simuliert worden. Die Referenzprojektion nimmt die häufig zitierten Mengenaussagen aus dem Bridge-Projekt beim Wort. Die Autoren des Berichtes (Bridge 2007) halten ihre Schätzungen für konservativ.
- ▶ Das Entsorgungssystem ist anhand hochwertiger Studien zur Siedlungsabfallentsorgung in Deutschland simuliert worden⁴². Die volkswirtschaftlichen Stoffströme wurden weitgehend BMU (2007) und GVM (2007) entnommen. Einzelne Recycling- und Verbrennungsprozesse wurden gemäß der Ökoinventardatenbank Eco-invent V. 2.0 (insb. Doka 2007) und Verbrennungsprozesse gemäß der Transferkoeffizienten vom Netzwerk Lebenszyklusdaten (2007) bilanziert und gemäß der Erkenntnisse aus Kapitel 3 auf den Eintrag von RFID-Tags spezialisiert.

In Anhang C sind wesentliche Annahmen der Quantifizierung im Detail dokumentiert.

Der Untersuchungsrahmen erstreckt sich auf die Abbildung der Situation im Jahre 2007 und die Entwicklung in den vier Szenarien (s. Abbildung 4-2).

⁴² Die ausführliche Ergebnistabelle für das Jahr 2007 (Tabelle Anhang D-1) zeigt auch den Abfall- und Reststoffinput sowie den Sekundärrohstoffinput, wie er in den o.g. Studien abgebildet ist. Auf der Output-Seite sind z.T. Annahmen zur Umwandlung getroffen worden, die nicht exakte reale Materialmengen widerspiegeln, aber als überschlägige Erfahrungswerte für diese Abschätzungen ausreichen.

Abbildung 4-2: Untersuchungsrahmen für die Quantifizierung der Stoffströme



Quelle: Darstellung des IZT

Kern der Betrachtungen in Kapitel 4.2 ist aufbauend auf der Ausgangslage 2007 das Referenz-Szenario in den Jahren 2012, 2017 und 2022. Das Referenz-Szenario wird anschließend mit den anderen Szenarien vergleichend betrachtet. Im Vordergrund stehen die Stoffflüsse gemäß der Input/Output-Bilanz. Zusätzlich werden Wirkungsdimensionen wie die Humantoxizität und der Wertstoffverlust behandelt.

Kapitel 4.3 ist einem Exkurs vorbehalten. Entwicklungen wie Worst Case im Push-Szenario, verstärkte Rückgewinnung von Antennenmaterialien aus Verbrennungsschlacke und aus heutiger Sicht exotische RFID-Tags im Push-Szenario halten wir zwar für weniger wahrscheinlich als die in den Szenarien skizzierten Entwicklungen, aber sie sind ebenfalls möglich.

Im Ergebnis der Berechnungen im Stoffstrommodell erhält man für jede Berechnung eine Input/Output-Bilanz, die in Tabelle 4-2 für 2007 als Auszug dargestellt ist.

Tabelle 4-2: Input/Output-Bilanz aus Umberto für die Ausgangslage 2007 (Auszug)

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
RFID Materialien			Deponie und Versatz		
Kupfer (Antenne)	6.496,00	kg	Kupfer in Deponie	1.193,20	kg
Packstoffe			Metall-Rückgewinnung		
Papier (Smart Lab.)	6.560,00	kg	Sekundärkupfer	3,24	kg
PP (Smart Lab.)	3.280,00	kg	Schlackeverwertung		
Bestandslageränderungen			Kupfer in Straßenbaumaterial	4.802,33	kg
Rückfluss aus dem Bestand	0,00	item	Bestandslageränderungen		
Abfall- und Reststoffbehandlung			Smart Label (in Bestand)	6.800.000,00	item
u.a. Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00	kg	Sekundärrohstoffe		
Sekundärrohstoffe			Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00	kg
u.a. Altglas (PEV)	2.039.500.000,00	kg	Zusatz RFID-Komponenten		
Gewerbeglas - Bruch- und Flachgla	566.900.000,00	kg	Kupfer in Alu (RecEintrag)	12,50	kg
			Kupfer in Glas (RecEintrag)	0,03	kg
			Kupfer in Misch-KS (RecEintrag)	0,09	kg
			Kupfer in Mono-KS (RecEintrag)	0,04	kg
			Kupfer in PPK (RecEintrag)	0,05	kg
			Kupfer in Stahl (RecEintrag)	8,52	kg
			Emissionen		
			Treibhausgase	1.643.364,96	kg

Quelle: Darstellung des IZT in Umberto als Balance Sheet

Auf der Input-Seite stehen die in den RFID-Tags gebundenen Materialien sowie Packstoffe, die für Herstellung der RFID-Bauformen (z.B. PP für Smart Label) erforderlich sind. Auch die Abfall- und Reststoffströme sowie die Sekundärrohstoffe sind als Input behandelt worden. Durch den Zeitverzug in der Nutzungsphase erfolgt zudem ein Bestandsab- (Input) und -aufbau (Output)⁴³.

Auf der Output-Seite steht die Wiedergewinnung von großvolumigen Sekundärrohstoffströmen, aber auch von RFID-Materialien. Nicht werkstofflich rezyklierte RFID-Materialien werden entweder in die Umwelt emittiert (z.B. als Treibhausgase), oder aber in der Technosphäre dissipiert. Hauptkategorien der Dissipation sind der Eintrag in Deponien oder als Versatz, der Eintrag in Schlackeverwertungsprodukte wie Straßenbaumaterial und der Eintrag in die Rezyklate gemäß Kapitel 3.

Nicht dargestellt ist in dieser Input/Output-Bilanz der Eintrag von RFID-Materialien in Ersatzbrennstoffe, da diese weder am Anfang noch am Ende des Lebensweges stehen

⁴³ Vereinfacht ist in den Berechnungen eine Nutzungsdauer von 5 Jahren angenommen worden. Dieser Wert liegt in einer realistischen Größenordnung, sowohl für die Integration in langlebigere Konsumgüter (CDs/DVDs, Kleidung und EE-Geräte) als auch für Mehrwegsysteme (Kunststoffkisten im Großgewerbe, Büchereibücher und Archivierung von Dokumenten).

und deshalb nicht als Input oder Output klassifiziert werden. Als Stoffflüsse können sie jedoch ohne weiteres abgebildet werden.

4.2.1 Ausgangslage 2007

Auf eine genaue Wiedergabe der Ergebnisse für 2007 wird an dieser Stelle verzichtet, da es in der derzeitigen Situation keine nennenswerten Probleme in der Siedlungsabfallentsorgung gibt. Wie gering die derzeitigen Stoffströme sind zeigt ein Blick in Tabelle 4-2 und ausführlicher in Anhang D-1:

- ▶ Insgesamt sind 2007 gerade einmal 33 t RFID-Tags in Deutschland in Verkehr gebracht worden. Zum Vergleich: allein die Restmüllmenge beträgt knapp 11 Mio. t (BMU 2007).
- ▶ Mit den 2007 eingesetzten RFID-Tags geht ein Kupferstoffstrom von weniger als 6,5 t einher. Unter Berücksichtigung des Kupfergehaltes im Restmüll ergibt sich ein Kupferfluss in Höhe von rund 17.000 t im Siedlungsabfall in Deutschland (IZT 2004).

Die ausführlichen Ergebnisse für 2007 sind in Anhang D als Tabelle dargestellt.

Doch wie stellt sich die Situation im Referenz-Szenario 2012, 2017 und 2022 dar? Die Berechnungen ergaben folgende Ergebnisse.

4.2.2 Szenario Referenzentwicklung

Zunächst wird abgeschätzt, welche Mengen an RFID-Tags sich im Entsorgungssystem befinden und in welche Entsorgungspfade sie eingetragen werden. Darauf verfolgen wir den Verbleib der Antennenmaterialien Aluminium, Kupfer und Silber. Im Zentrum des Interesses stehen dann mögliche Kollisionen der Stoffströme mit quantitativen Qualitätsanforderungen von Seiten der Recyclingprozesse. Abschließend wird die Disposition von RFID-Tag Stoffen grundsätzlich bewertet.

4.2.2.1 Eintrag von RFID-Tags in die Entsorgungssysteme

In der Referenzentwicklung teilen sich die RFID-Tags wie folgt auf die verschiedenen Anwendungsbereiche (s. Tabelle 2-4 im Detail) auf:

Tabelle 4-3: Aufteilung von RFID-Tags nach Anwendungsbereichen im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [Mio. St.]

Anwendungsbereich	2007	2012	2017	2022
Distribution	6	110	1.210	4.120
Einwegverpackungen	20	645	4.225	17.600
Mehrwegsysteme				
Bestandsaufbau	6,8	40	620	1.430
Rückfluss	-	6,8	40	620
Konsumgüter				
Bestandsaufbau	0	25	125	500
Rückfluss	-	0	25	125
Personenbezogene Anwendungen	60	80	160	850
RFID-Tags im System	86	840	5.700	23.300

Quellen und Anmerkungen: Berechnungen des IZT basierend auf Bridge 2007 und IDTechEx 2008; RFID-Tags im System zuzüglich Rückfluss, ohne Aufbau; gerundete Werte

Tabelle 4-3 zeigt, dass die Einwegverpackungen und der Distributionssektor den Gesamteintrag von RFID-Tags in die Abfallentsorgung (letzte Zeile) zunehmend dominieren werden. Der Einsatz von RFID-Tags in Mehrwegsystemen und langlebigeren Konsumgütern induziert einen um 5 Jahre versetzten Rückfluss, der angesichts der hohen Wachstumsraten in den anderen Anwendungsbereichen nur wenig ins Gewicht fällt.

Der Eintrag von RFID-Tags in die Abfallentsorgung steigt von 86 Mio. Stück 2007 über ca. 840 Mio. Stück 2012 und 5,7 Mrd. Stück 2017 auf über 23 Mrd. Stück im Jahr 2022. Das heißt, dass sich die Abfallentsorgungssysteme auf exponentiell wachsende RFID-Stoffströme einzustellen haben.

Folgende Tabelle zeigt, welche Pfade in welchem Maße betroffen sein werden:

Tabelle 4-4: Entwicklung des Eintrags von RFID-Tags in Entsorgungspfade für Siedlungsabfall im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [Mio. St.]

Fraktion	2007	2012	2017	2022
PPK-Getrennsammlung	18,2	439	3.020	11.500
Glas-Getrennsammlung	0,04	11,3	98,0	496
LVP-Getrennsammlung	3,04	155	1.170	5.410
Restmüll	64,7	239	1.370	5.930
RFID-Tags im System	86	840	5.700	23.300

Quellen und Anmerkungen: Berechnungen des IZT basierend auf GVM 2007 und Schüler 2008; RFID-Tags im System zuzüglich Rückfluss, ohne Aufbau; gerundete Werte

Heute gelangt ein Großteil der RFID-Tags aus dem Siedlungsabfallaufkommen in die Restmüllbehandlung. Auch in der PPK- und LVP-Getrennsammlung finden sich nennenswerte Mengen, in der Glas-Getrennsammlung dagegen nur verschwindend geringe Mengen. Hauptgrund für diesen Unterschiede ist insbesondere, dass RFID-Tags heute in großem Umfang für Verpackungen im Großgewerbe eingesetzt werden, die überwiegend aus PPK und Kunststoffen sind. Das Artikel-Tagging auf Glasverpackungen ist ökonomisch bislang kaum darstellbar.

Im Jahr 2012 wird der größte Teil der RFID-Tags in die PPK-Getrennsammlung eingetragen, was am starken Wachstum des RFID-Einsatzes bei den getrennt gesammelten Verpackungen im Großgewerbe und auch der großen Anzahl von Verpackungen für den privaten Endverbraucher auf PPK-Basis liegt. Dieser Trend setzt sich bis 2022 fort. Aufgrund der hohen Stückzahlen im Verpackungsbereich nähert sich die Menge an RFID-Tags in der LVP-Getrennsammlung den Eintragungsmengen in den Restmüll. Die RFID-Tag-Einträge in die Getrennsammlung von Glas liegen dagegen dauerhaft um mindestens eine Größenordnung unter den Werten für LVP.

RFID-Materialien werden hauptsächlich in folgende Stofffraktionen eingetragen:

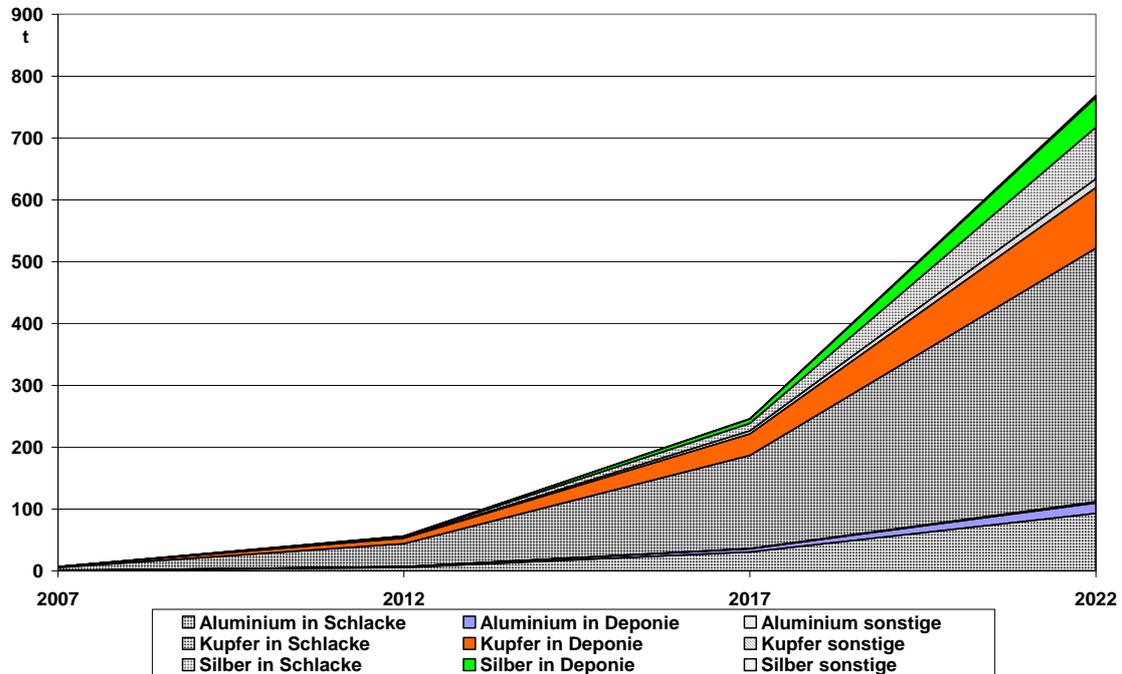
- ▶ Schlackeverwertungsprodukte, kurz: Schlacke
- ▶ Deponie und Versatz, kurz: Deponie
- ▶ Verunreinigung von Rezyklaten und Ersatzbrennstoffen (EBS), kurz: Rezyklate
- ▶ Recycling der RFID-Materialien.

Im folgenden wird zunächst der Verbleib der Antennenmaterialien diskutiert, dann werden mögliche Probleme durch Verletzung von Qualitätskriterien für Rezyklate und Verwertungsprodukte (EBS) erörtert und abschließend wird als übergeordnete Kategorie die Dissipation von RFID-Materialien unter den Aspekten des Wertstoffverlustes und von Umwelteigenschaften bewertet.

4.2.2.2 Verbleib von RFID-Antennenmaterialien

Aus stofflicher Sicht ist gemäß Kapitel 3 insbesondere der Verbleib der Antennenmaterialien interessant. Zunächst wird die gesamte Entwicklung im Referenz-Szenario bis 2022 gezeigt. Anschließend wird die Betrachtung für 2012 als Nahperspektive vertieft.

Abbildung 4-3: Verbleib von Antennenmaterialien im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022



Quellen und Anmerkungen: Berechnungen des IZT; 'sonstige' – Eintrag in Rezyklate bzw. Wiedergewinnung des Metalls

Die Mengen an Antennenmaterialien steigt von 7 t im Jahr 2007, über 56 t (2012) und 245 t (2017), bis auf 770 t im Jahre 2022. Die Eintragpfade der Antennenmaterialien werden von der Schlackeverwertung, deutlich vor dem Eintrag auf die Deponie, dominiert. Die Kategorie 'sonstige' umfasst den unerwünschten Eintrag in Rezyklate und Verwertungsprodukte sowie die Wiedergewinnung des Metalls selbst. Im Vergleich zu den anderen Eintragpfaden sind 'sonstige' mengenmäßig von nachgeordneter Bedeutung.

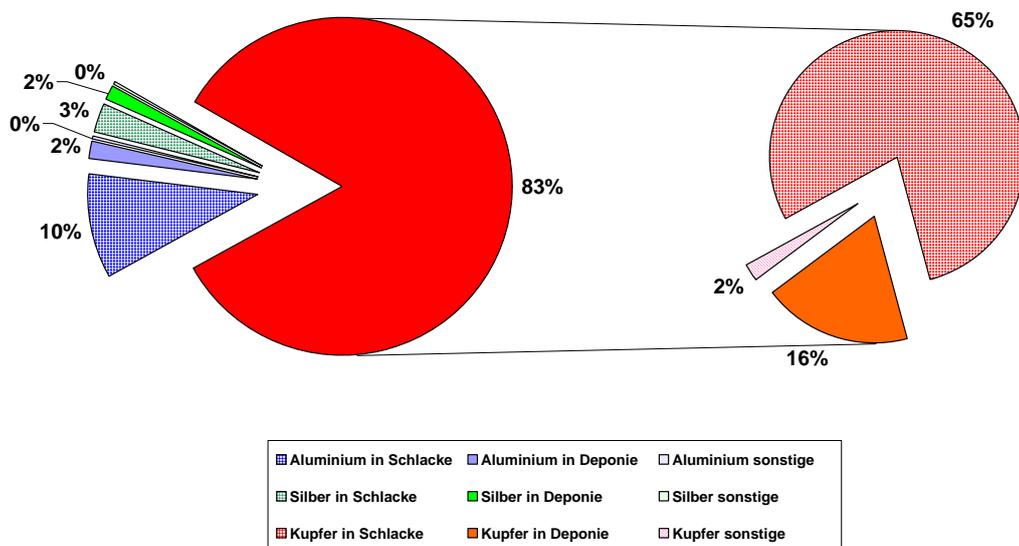
- ▶ Ausgehend von minimalen Stoffströmen der Antennenmaterialien im Jahr 2007 wird im Jahr 2012 der Kupfereintrag in Schlackeverwertungsprodukte am deutlichsten sichtbar (zentral im Bild). Auch der Kupfereintrag auf die Deponie zeigt sich merklich.
- ▶ Bis 2017 steigen die Stoffströme insgesamt deutlich an, obwohl es einen Marktverschiebungstrend weg von den relativ schweren Kupferantennen hin zu den leichteren Silberantennen gibt. Der Kupferstrom in Schlackeverwertungsprodukte bleibt am größten, aber auch der Aluminiumstrom in Schlackeverwertungsprodukte ist inzwischen gut sichtbar (unten im Bild).

- ▶ Bei weiterem starkem Marktwachstum bis 2022 dominieren nach wie vor die Kupfereinträge in Schlackeverwertungsprodukte, aber neben den Aluminiumstoffströmen sind inzwischen auch die Silbereinträge in Schlackeverwertungsprodukte und auf die Deponie sichtbar (oben im Bild).

Wenn der Marktanteil an Kupferantennen nicht drastisch einbricht, wird Kupfer die Stoffströme der Antennenmaterialien mengenmäßig auch in Zukunft dominieren.

Ein genauerer Blick auf 2012 zeigt (Abbildung 4-4), dass von den insgesamt rund 56 t Antennenmaterialien 83 % auf Kupfer entfallen. Alleine 65 % gelangen in Schlackeverwertungsprodukte und 16 % auf die Deponie, wohingegen ‚sonstige‘ mit 2 % vernachlässigbar sind (rechts im Bild).

Abbildung 4-4: Verbleib von Antennenmaterialien im Referenz-Szenario 2012



Quellen und Anmerkungen: Berechnungen des IZT; Basis: 56,3 t Antennenmaterialien

4.2.2.3 Potenzielle Probleme mit Qualitätsanforderungen für Sekundärrohstoffe

Im Hinblick auf die Qualität von Rezyklaten spielen die Antennenmaterialien von RFID-Tags eine wichtige Rolle. Aber auch der Mikrochip mit seinem Halbleitermaterial aus

Silizium, das Substrat aus PET oder die Klebstoffe können Probleme in einzelnen Recyclingverfahren verursachen (vgl. Kapitel 3).

Bei einigen Sekundärrohstoffen existieren Grenzwerte für Fremdstoffanteile. Die folgenden Abschätzungen sollen illustrieren, dass in der Referenzentwicklung bei einigen Stoffeinträgen durch RFID-Tags Größenordnungen erreicht werden, bei denen Probleme für das Recycling nicht ausgeschlossen werden können. Im Anschluss an die Berechnung der Stoffströme wird eine Bewertung der Aussagekraft vorgenommen.

Tabelle 4-5: Stoffströme im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 und Qualitätsanforderungen an den Sekundärrohstoffinput (Auswahl)

	Einheit	2007	2012	2017	2022	Grenzwert
Glas-Recycling						
Aluminium	g/t	0,00012	0,032	0,22	0,85	< 5,0 g/t
Silizium	g/t	7,6 E-06	0,0020	0,016	0,044	< 0,01 g/t
Mono-Kunststoff-Recycling						
andere Polymere	ppm	0,0205	1,0	5,6	35	< 10-500 ppm
Metalle	ppm	0,0087	0,36	1,4	6,3	< 10-50 ppm
Aluminium-Recycling						
Kupfer	Gew.-%	1,7 E-05	0,00069	0,0031	0,0097	< 0,03 Gew.-%
Weißblech-Recycling						
Kupfer	Gew.-%	1,9 E-06	7,9 E-05	0,00036	0,0011	< 0,3 Gew.-%
Ersatzbrennstoffe						
Kupfer in Spuckstoffen	mg/kg TS	0,48	9,3	39	98	< 350 mg/kg TS
Kupfer in Kunststoffresten	mg/kg TS	0,63	25,4	115	351	< 350 mg/kg TS
Sekundärbaustoffe						
Kupfer	mg/kg TS	1,2	9,0	37	100	< 400 mg/kg TS

Quellen und Anmerkungen: Berechnungen des IZT; Qualitätskriterien von GGA (Glas), RAL-GZ (Verbundkarton, PET, PS, PE, PP, Ersatzbrennstoffe), Herstellerspezifikation (Aluminium), Europäische Stahlschrottliste (Weißblech) und LAGA (Sekundärbaustoffe); Spuckstoffe aus dem Papier- und Verbundkarton-Recycling, Kunststoffreste aus der LVP-Sortierung und dem werkstofflichen Kunststoffrecycling, TS – Trockensubstanz; Glasrecycling: Silizium klassifiziert im Hinblick auf den Grenzwert von nicht schmelzbaren Materialverbindungen; Aluminiumrecycling: Dose-zu-Dose-Recycling; Weißblechrecycling: Grenzwert gilt auch u.a. für Nickel (Menge vernachlässigbar)

Keiner der volkswirtschaftlichen Durchschnittswerte überschreitet die quantitativen Qualitätskriterien für Sekundärrohstoffe im Jahr 2007 und auch nicht im Jahr 2012.

- ▶ Beim Glasrecycling wird der Grenzwert von 0,01 g/t durch den Siliziumeintrag von RFID-Tags zwischen 2012 und 2017 überschritten.
- ▶ Beim Mono-Kunststoffrecycling von PE, PP und PS wird der Grenzbereich des Eintrages von Fremdpolymeren zwischen 2017 und 2022 überschritten⁴⁴. Allerdings ist hier einzuschränken, dass im Stoffstrommodell die verschiedenen Kunststofffraktionen nur aggregiert dargestellt sind; die im konkreten Fall vorliegenden Dichteverhältnisse zwischen Fremdpolymer und Rezyklat können die Trennbarkeit und damit die tatsächlichen Stoffströme stark beeinflussen, wie in Kapitel 3 erläutert.

Es handelt sich bei diesen Betrachtungen um Zusatzfrachten durch Inhaltstoffe von RFID-Tags, d.h. dass der Spielraum durch andere Fremdstoffe bereits teilweise ausgeschöpft sein kann. Darüber hinaus handelt es sich hier um volkswirtschaftliche Durchschnittswerte. Recyclingunternehmen für Verpackungs- und andere Siedlungsabfälle beziehen ihre Sekundärrohstoffe jedoch in der Regel aus begrenzten Regionen. Deshalb können bei einzelnen Verfahren auch bei deutlicher Unterschreitung der volkswirtschaftlichen Frachten durch lokale Spitzen Probleme im Recycling auftreten.

Zieht man zudem die Unsicherheiten der Verteilungsfunktionen der einzelnen Tag-Bestandteile in den Prozessen und der Entwicklung der Antennenmärkte in Betracht, so sind in der Referenzentwicklung zusätzlich mindestens folgende Stoffströme auch als kritisch einzuschätzen⁴⁵:

- ▶ Aluminium im Glasrecycling,
- ▶ Metalle in Mono-Kunststoffrecycling,
- ▶ Kupfer im Aluminiumrecycling,
- ▶ Kupfer in Ersatzbrennstoffen und
- ▶ Kupfer in Sekundärbaustoffen.

Hier wurden nur die Stoffe und Verfahren betrachtet, für die auch Grenzwerte existieren. Dies ist z.B. aber bei Kupfer und Silber im Glasrecycling nicht der Fall. Schon im ppm-Bereich kommt es zu Verfärbungen durch Kupfer und Silber im Glas – Werte, die

⁴⁴ Sollten andere Polymere als PET als Substratmaterialien eingesetzt werden, wäre auch das PET-Recycling gefährdet, sofern diese Substrate nicht so gewählt sind, dass sie die Ausscheidung durch Dichtesortierung erleichtern. Das PET-Substrat wirkt im PET-recycling

⁴⁵ Maximalwert nur um einen Faktor 3 - 6 unterhalb des Schwellwertes.

in der Referenzentwicklung durchaus erreicht werden können. Auch die LAGA-Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen hat zwar einen Grenzwert für Kupfer, aber keinen für Silber. In einigen Rezyklaten kommt es zu langfristigen Akkumulationen von Fremdstoffen, die die Qualität des Sekundärrohstoffes schleichend, aber dauerhaft mindern können. Prominentestes Beispiel ist die Akkumulation von Kupfer in Stahl. Auch Probleme mit Klebstoffen im PPK-Recycling sind nicht durch Grenzwerte geregelt.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf verwiesen, dass hier nur die Referenzentwicklung betrachtet wurde. Die Zukunft kann faktisch jedoch auch wie im Szenario Technisch-ökonomischer Push, im Szenario Staatliche Regulierung oder im Szenario Selbstregulierung verlaufen.

4.2.2.4 Bewertung der Dissipation

Zentrales Wirkungsmuster des Eintrags von RFID-Tags in die Abfallentsorgung ist die Dissipation. Unter Dissipation wird die Feinverteilung von Stoffen verstanden, die dadurch jeder hochwertigen stofflichen Nutzung entzogen werden. Im hier betrachteten System zählen dazu der Eintrag in Schlackeverwertungsprodukte, Deponie und Versatz, die Verunreinigung von Rezyklaten und Verwertungsprodukten (EBS) sowie Emissionen. Der Dissipationsgrad eines Stoffes lässt sich berechnen als das Verhältnis der Summe dieser dissipativen Einträge bezogen auf die gesamte im System befindliche Menge eines Stoffes (m_0). Nicht dissipiert werden lediglich die Mengen aus dem Recycling der RFID-Materialien (m_R). Der Dissipationsgrad (δ) eines Stoffes errechnet sich also wie folgt:

$$(1) \quad \delta = (1 - m_R) / m_0$$

Die Dissipation hat aus Ressourcensicht den Verlust von Wertstoffen zur Folge und aus Umweltsicht wirken die Stoffeinträge durch RFID-Tags in Wasser, Boden und Luft. Im F+E-Vorhaben ist jedoch keine vollständige Ökobilanz erstellt worden, die eine fundierte Bewertung des Ressourcenbedarfs und der Umweltwirkungen ermöglichen würde. Die Stoffstromanalyse erlaubt lediglich orientierende Aussagen zum Ressourcenbedarf und den Umweltwirkungen der in den RFID-Tags gebundenen Stoffmengen. Der Ressourcenbedarf wird anhand des monetär bewerteten Wertstoffverlustes und des Verbrauchs strategischer Ressourcen beurteilt. Die Umweltwirkungen werden anhand der Treibhausgasemissionen und der Humantoxizität diskutiert.

Folgende Tabelle zeigt die Entwicklung des Verlustes an Wertstoffen und strategischer Ressourcen für die Referenzentwicklung⁴⁶:

Tabelle 4-6: Bewertung der Dissipation von Metallen aus RFID-Tags im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 aus Ressourcensicht

	Faktor	2007	2012	2017	2022
Wertstoffverlust	US-\$/t	1000 US-\$	1000 US-\$	1000 US-\$	1000 US-\$
Aluminium	2.646	1,82	17,6	94,3	291
Kupfer	7.370	44,3	346	1.400	3.830
Silber	425.900	52,8	1.020	8.250	56.500
Sonstige (Nickel, Zink)	-	0,175	1,61	13,3	93,3
Weltproduktion	t	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]	Anteil [%]
Aluminium	38.000.000	1,81E-06	1,75E-05	9,38E-05	0,000289
Kupfer	15.600.000	3,86E-05	0,000301	0,00121	0,00333
Silber	20.500	0,000605	0,0117	0,0945	0,647
Sonstige (Nickel, Zink)	-	5,42E-08	5,00E-07	2,21E-05	0,000388

Quellen und Anmerkungen: Berechnungen des IZT; Preise 2008 für Barzahler an der LME, für Silber bei taxfreegold.co.uk, Kupfer – Grade A, Zink – Special High Grade Zinc; Angaben zur Weltproduktion aus USGS (2008) für 2007; Bezugsmenge: dissipierter Anteil der RFID-Produktion

Der Verbrauch strategischer Ressourcen durch RFID ist mit einer Ausnahme nicht relevant. Für Silber in RFID-Tags werden in dieser Modellrechnung bereits 2017 nahezu 1 Promille der heutigen Weltproduktion nur in Deutschland dissipiert. 2022 würden 6,5 Promille der Silberproduktion durch RFID-Tags in Deutschland dissipiert. Unter der Annahme eines stärkeren RFID-Wachstums und höherer Silberantennenanteile könnte diese Abschätzung deutlich zu niedrig liegen. Im globalen Maßstab könnte die Silbernachfrage bis 2030 durch RFID-Tags signifikant zur Einschränkung der Silberverfügbarkeit beitragen (FhG-ISI, IZT 2008). Insbesondere für gedruckte Antennen gibt es derzeit keine kostengünstige und funktionale Alternative zu Silber (IZT, EMPA 2008).

Der heutige Wertstoffverlust durch die Dissipation liegt unter 100.000 US-\$, überschreitet nach 2012 aber die Millionengrenze. 2017 ist der Wertstoffverlust mit knapp 10 Mio. und 2022 mit fast 60 Mio. US-\$ zu beziffern. Ähnlich wie beim Verlust strategischer Ressourcen dominiert der Wertstoffverlust von Silber das Gesamtergebnis. Der Wert-

⁴⁶ Der Bezug erfolgt nicht auf die Größe ‚RFID-Tags im System‘, sondern auf den dissipierten Anteil der jährlichen Produktion.

stoffverlust durch Kupfer spielt heute relativ gesehen noch eine Rolle, nimmt aber wegen sinkender Antennenanteile bei steigendem Silberanteil zukünftig deutlich ab.

Die Treibhausgasemissionen der gesamten in Verkehr gebrachten RFID-Tag-Stoffe ist durch die Klassifikation einzelner Komponenten berechnet worden (vgl. Anhang C). Hierzu wurden die kumulierten stoffspezifischen Daten aus Ecoinvent V. 2.0 angesetzt. Die gesamten Treibhausgasemissionen durch RFID-Tags werden in Tabelle 4-7 denen der Packstoffe gegenübergestellt, die für die Bauformherstellung (insbesondere der Deckschichten) erforderlich sind.

Tabelle 4-7: Treibhausgasemissionspotenzial durch RFID-Tags und Packstoffe für RFID-Bauformen im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [t CO₂-eq., 100a]

Komponente	2007	2012	2017	2022
RFID-Tags	105	1.050	6.920	29.000
Packstoffe für Bauformen (Summe)	746	1.290	4.480	16.100
PPK-Deckschicht für Smart Label	8,17	198	1.510	5.760
PP-Deckschicht für Smart Label	8,95	217	1.650	6.320
KS-Schichten für Smart Cards	634	762	1.049	1.279
PPK-Umhüllung für Smart Tickets	95	116	316	2.695
Gesamtsumme	851	2.340	11.400	45.100

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT mit Treibhausgaspotenzialen aus Ecoinvent V. 2.0; Silber ist aus Bleigewinnung angesetzt worden.

2007 und 2012 liegen die Treibhausgasemissionen der RFID-Tag-Bestandteile unter denen der Packstoffe für die Deckschichten (Smart Label, Smart Card, Smart Ticket) zusammen. Der hohe Treibhausgasemissionsanteil der Packstoffe liegt am hohen Anteil von Smart Cards, die mit einem RFID-Inlay (ca. 200-300 mg) und Kunststoffschichten (ca. 4.500 mg) versehen sind. Deren relativer Marktanteil sinkt allerdings, so dass die eigentlichen RFID-Materialien in Relation zu den Packstoffen immer wichtiger werden.

Bei den RFID-Komponenten dominieren 2022 die durch das PET-Substrat verursachten Treibhausgasemissionen (35,7 %) vor den Treibhausgasemissionen des Antennensilbers (25,3 %) und des Acrylat-Klebstoffs (24,2 %). Auch im Jahr 2022 liegt der Bedarf an PPK für Smart Tickets und für Smart Label mit rund als 8.000 t bei deutlich gut 0,5 Promille des dem Recycling zugeführten PPKs (14,4 Mio. t). Bei Kunststoffen für Smart Cards und Smart Label stehen im Jahr 2022 weniger als 3.000 t den etwa 1,1 Mio. t dem Recycling zugeführten Kunststoffen gegenüber, also rund 2,7 Promille.

Insgesamt ist die Treibhausgasemissions-Problematik durch direkten Eintrag von RFID-Tags und ihren assoziierten Packstoffen sehr gering. Die Steuerung der großen Packstoffmengen für Verpackungen und andere (erwünschte) indirekte Effekte durch die RFID-Anwendung sind für die Treibhausgasemissionen vermutlich wesentlich relevanter.

Tabelle 4-8: Humantoxizitätspotenzial durch RFID-Tags im Referenz-Szenario von 2007 bis 2022 [t 1,4-DCB-*eq.*, 100a]

Stoff	2007	2012	2017	2022
Aluminium	36,1	349	1870	5780
Kupfer	2.670	20.900	84.200	231.000
Silber	7,76	151	1.210	8.310
Acrylat	10	97,4	686	2.650
PET	14,8	144	1.010	3.910
Sonstige	1,53	14,5	114	639
Summe	2740	21700	89100	252000

Quelle und Anmerkungen Berechnungen des IZT mit Humantoxizitätspotenzialen aus Ecoinvent V. 2.0, Silber ist aus Bleigewinnung angesetzt worden. Sonstige: PUR, Nickel, Zink

Schon 2007 liegt das Humantoxizitätspotenzial der RFID-Tags (Tabelle 4-8) um fast eine Größenordnung über demjenigen der Packstoffe für RFID-Bauformen. Trotz abnehmendem Kupferantennenanteil dominiert Kupfer das Humantoxizitätspotenzial bis 2022 deutlich. Vergleicht man mit der Kupferfracht im Restmüll, 17.000 t (IZT 2004), so stellt man fest, dass RFID-Tags auch aus humantoxikologischer Sicht eine zusätzliche wichtige Eintragsquelle werden können. Der dissipierte Kupferanteil steigt von heute rund 6,5 t über 47 t im Jahr 2012 und 189 t im Jahr 2017 auf 520 t Kupfer im Jahr 2022 (vgl. Abbildung 4-3).

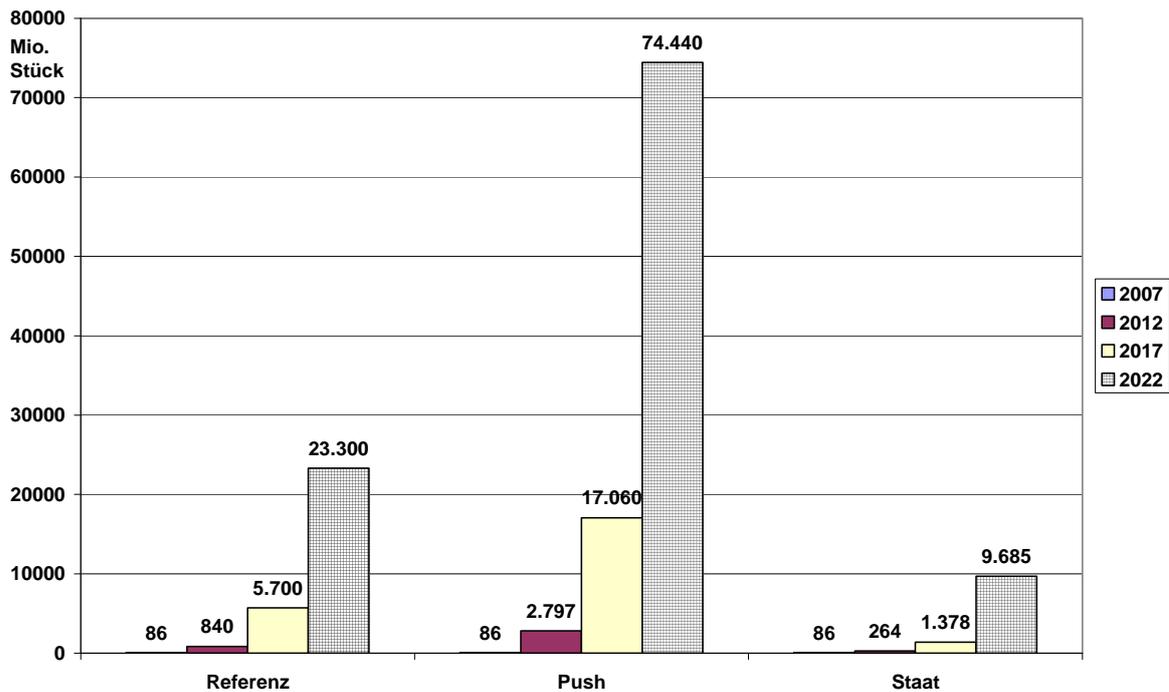
4.2.3 Die vier Szenarien im Vergleich

Die in Kapitel 4.1 beschriebenen Szenarien rufen Stoffströme an RFID-Tags hervor, die sich um Größenordnungen unterscheiden. Das Referenz-Szenario (kurz: Referenz) beschreibt dabei eine mittlere Mengenentwicklung. Da die anderen Szenarien, Technisch-ökonomischer Push (kurz: Push), Staatliche Regulierung (kurz: Staat) und Selbstregulierung, nicht unbedingt unwahrscheinlicher als das Referenz-Szenario sind, werden zentrale Aspekte im Vergleich der Szenarien dargestellt.

Zunächst werden die Mengen an RFID-Tags im System miteinander verglichen. Daraufhin werden anhand eines Beispiels, den Fremdpolymereinträgen in das Mono-

Kunststoffrecycling von 2007-2022, die Konsequenzen der verschiedenen Szenarien illustriert. Weitere mögliche Recyclingprobleme, die bis 2022 akut werden können, schließen sich an. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung zum Dissipationsgrad, einer der Hauptstellgrößen für das Gesamtsystem.

Abbildung 4-5: RFID-Tags im System in den Szenarien von 2007 bis 2022



Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT unter Berücksichtigung des Bestandsauf- und -abbaus.

Links im Bild ist das Referenz-Szenario dargestellt, dessen Mengengerüst and RFID-Tags auch für das Szenario Selbstregulierung gültig sind. Das exponentielle Mengenwachstum zeit sich deutlich in der Menge an RFID-Tags im System (vgl. Tabelle 4-3).

Im Jahr 2012 befinden sich in Push-Szenario mehr als drei Mal so viele RFID-Tags im Entsorgungssystem wie im Referenz-Szenario. Beim Szenario Staatliche Regulierung sind es dagegen weniger als ein Drittel. Die Bandbreite der RFID-Tags, die das Entsorgungssystem 2012 zu bewältigen hätte, umfasst also eine ganze Größenordnung zwischen 264 Mio. Stück und 2.797 Mio. Stück.

Bis zum Jahr 2017 wachsen die RFID-Tag-Mengen im Vergleich zu 2012 um einen Faktor 5-7 in den Szenarien. Im Szenario Staatliche Regulierung befinden sich 2017 gerade einmal knapp halb so viele RFID-Tags im Entsorgungssystem wie im Push-

Szenario bereits im Jahr 2012. Das Referenz-Szenario hat mit 5.700 Mio. RFID-Tags im Jahre 2017 mehr als das Doppelte des Push-Szenarios im Jahre 2012 erreicht.

Im Jahr 2022 erreicht auch das Szenario Staatliche Regulierung die 10.000 Mio. Stück-Marke. In der Referenzentwicklung sind mit 23.300 Mio. Stück mehr als doppelt so viel RFID-Tags im Entsorgungssystem. Im Push-Szenario sind es gar fast 75.000 Mio. Stück.

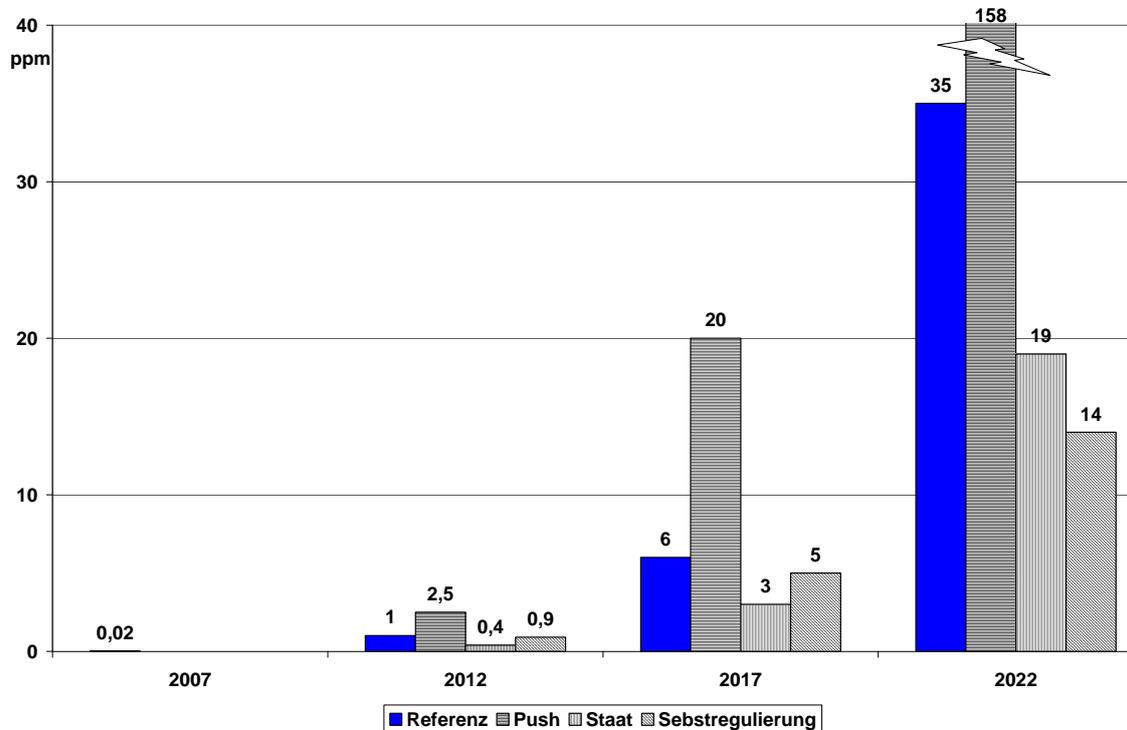
Allen Szenarien gemeinsam ist das exponentielle Mengenwachstum, allerdings in unterschiedlicher Geschwindigkeit. Doch welche Konsequenzen ergeben sich aus diesen großen Spreizungen für die Stoffströme im Recycling?

Die Aufteilung der RFID-Tags nach der Art ihres Eintrags in den Siedlungsabfall ist in den Szenarien nur marginal variiert worden⁴⁷, weshalb die absoluten Mengen an RFID-Tags in den Entsorgungspfaden im wesentlichen durch die veränderte Verwendungsstruktur in den Szenarien bestimmt werden (s. Anhang C).

Beleuchten wir den Aspekt der möglichen Überschreitung von Qualitätsanforderungen beim Mono-Kunststoffrecycling näher. Wie in Kapitel 4.2.2.3 ausgeführt wird in der Referenzentwicklung der Grenzbereich des Eintrages von Fremdpolymeren in das Mono-Kunststoffrecycling zwischen 2017 und 2022 überschritten. Im Vergleich der Szenarien stellt sich die Situation wie folgt dar:

⁴⁷ Im Szenario Staatliche Regulierung liegt die Mehrwegquote bei Verpackungen im Großgewerbe bei 20 statt 10 % und im Szenario Selbstregulierung erfolgt eine teilweise Separatsammlung von Smart Tickets, so dass sie getrennt verwertet werden können.

Abbildung 4-6: Entwicklung der Polymereinträge in das Mono-Kunststoffrecycling von 2007 bis 2022



Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT; die Größenachse ist aus Gründen der Übersichtlichkeit für 2022 beim Push-Szenario abgeschnitten

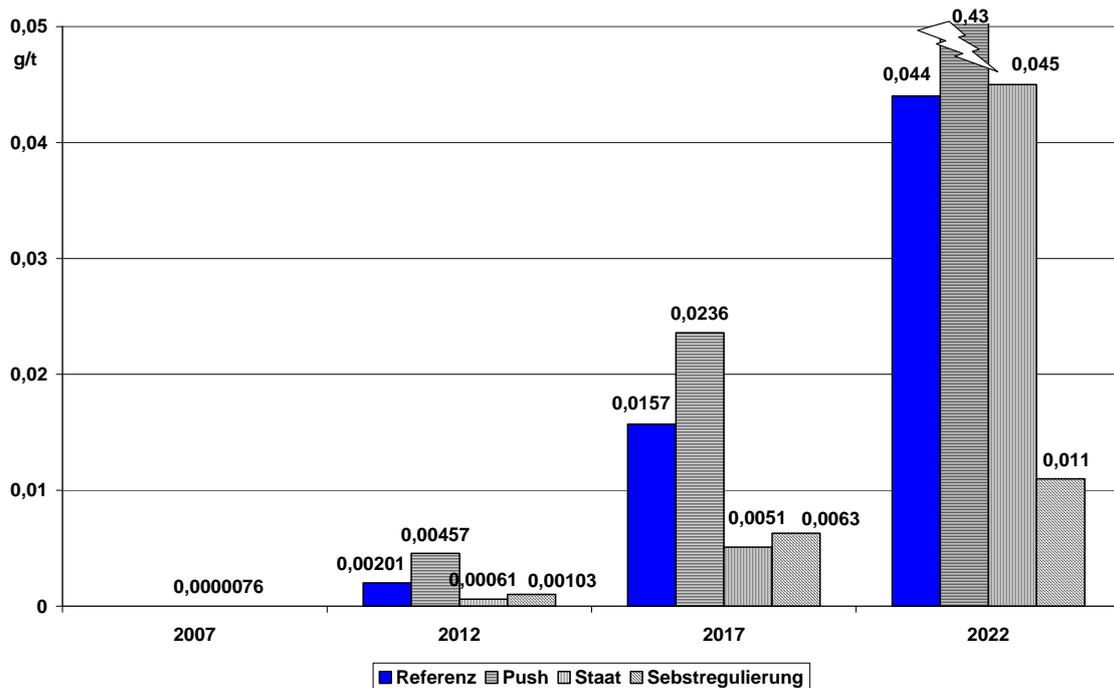
Im Push-Szenario wird der Schwellwert von 10 ppm Fremdpolymere im Mono-Kunststoffrecycling bereits zwischen 2012 und 2017 überschritten, also ein Zeitintervall vor der Überschreitung im Referenz-Szenario. Auch im Staats-Szenario wird wie im Referenz-Szenario und im Szenario Selbstregulierung der Schwellwert zwischen 2017 und 2022 erreicht. Interessant ist aber, dass es im Szenario Selbstregulierung gelingt, die Zusatzfracht im Vergleich zum Referenz-Szenario deutlich zu senken und zwar unter das Niveau des Staats-Szenarios. Dies bedeutet, dass die tatsächliche Belastung der Recyclingsysteme nicht ausschließlich an die Marktentwicklung gekoppelt ist und dass sie durch punktuelle Maßnahmen der Stakeholder wirksam eingedämmt werden kann.

Wir betonen hier noch einmal, dass die Modellrechnung an dieser Stelle hoch aggregiert ist. RFID-Tags mit PET-Substrat lassen sich in der Dichtentrennung leichter von PE und PP separieren, als von PET und PS. Durch den Eintrag von PET-Substraten in das PS- und PET-Recycling besteht denn auch eine höhere Gefahr des Eintrags unerwünschter Metalle aus Antennenmaterialien. Bei verstärktem Inmould der RFID-Tags oder zukünftigem Direktdruck des RFID-Tags ohne Substrat können sich die Verhältnisse in der Dichtentrennung wieder ändern (vgl. Kapitel 3.3.2.5).

Ist das Substratmaterial des RFID-Tags aus PET, so ergibt sich auch ein nicht unbedingt beabsichtigter 'Düngeneffekt' im PET-Recycling. Ähnlich kann der Eintrag von RFID-Tags in das Aluminium-Recycling wirken, sofern die Antennen aus Aluminium sind. Beim Eintrag bestimmter Metalle, wie z.B. Nickel aus der Mikroelektronik, ist ein Legierungseffekt zu beobachten. Die zu erwartenden Stoffströme der Komponenten aus RFID-Tags sind jedoch sehr klein im Vergleich zu den Hauptsekundärrohstoffströmen.

Werfen wir einen Blick auf die weiteren in Kapitel 4.2.2.3 identifizierten Problemlagen. Zunächst wird der Eintrag von Silizium in das Glasrecycling für die Szenarien abgebildet, dann wird der Eintrag von Kupfer in verschiedenen Verwertungsprozesse und –produkte untersucht (Abbildung 4-7 und folgende).

Abbildung 4-7: Entwicklung der Siliziumeinträge in das Glasrecycling für die vier Szenarien von 2007 bis 2022



Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT; die Größenachse ist aus Gründen der Übersichtlichkeit für 2022 beim Push-Szenario abgeschnitten

Der Grenzwert von 0,01 g/t wird 2012 in allen vier Szenarien unterschritten. Im Push-Szenario wird allerdings bereits fast die Hälfte ausgeschöpft. 2017 haben die Werte im Szenario Staatliche Regulierung und im Szenario Selbstregulierung das Niveau des Push-Szenarios im Jahr 2012 übertroffen, so dass in allen Szenarien mit Qualitätsproblemen durch den Eintrag von Silizium in das Glasrecycling gerechnet werden muss.

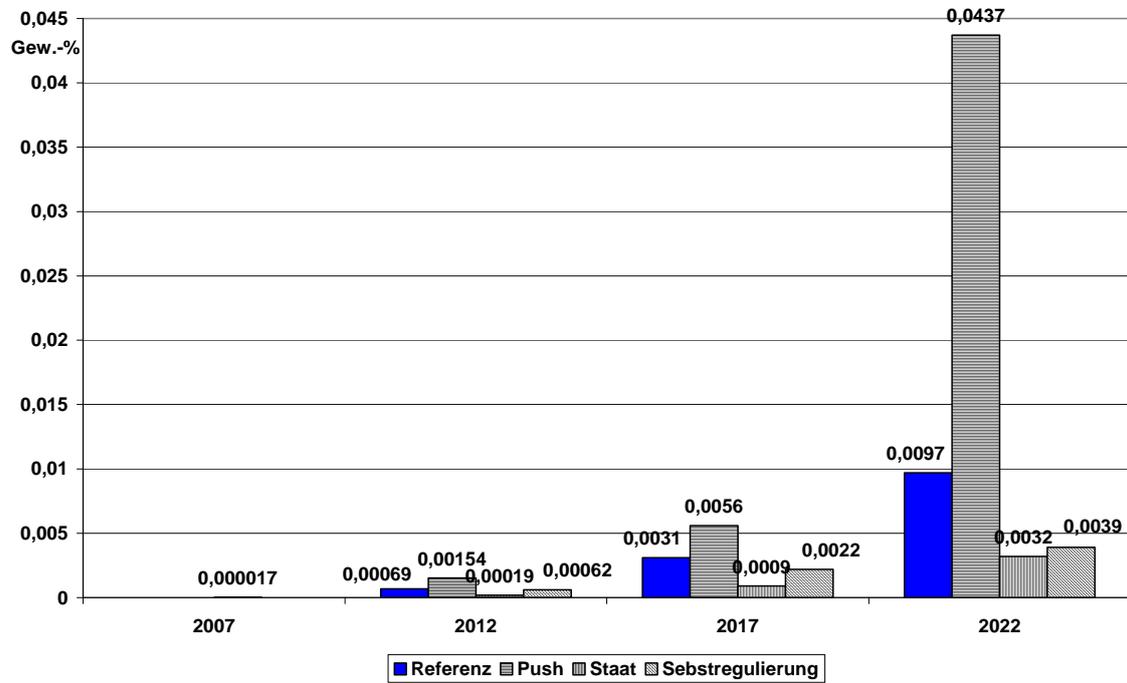
Im Szenario Selbstregulierung gelingt ab 2012 im Vergleich zum Referenz-Szenario eine deutliche Reduzierung des Eintrags von Silizium in das Glasrecycling durch z.B. die Integration des RFID-Tags in den Deckel. 2017 wird der Grenzwert im Gegensatz zur Referenzentwicklung gar unterschritten.

2022 liegen nur die Werte für das Szenario Selbstregulierung in einem vertretbaren Bereich, die Siliziumeinträge im Referenz- und im Szenario Staatliche Regulierung liegen um einen Faktor 4 und mehr über dem Grenzwert, im Push-Szenario gar um einen Faktor 40. Der Silizium-Eintrag im Jahre 2022 für das Szenario Staatliche Regulierung und das Referenz-Szenario liegen nahezu gleichauf. Die Quellen für das Silizium sind in etwa gleichrangig die Mikrochips für den RFID-Tag und die Temperatursensoren zur Überwachung der Kühlkette. Im Referenz-Szenario befinden sich zwar deutlich mehr RFID-Tags im System, aber sie verfügen in großem Ausmaß über Polymerchips – eine technische Entwicklung, die im Szenario Staatliche Regulierung gehemmt ist und deshalb nicht in den Massenmarkt gelangt.

Analog kann für den Aluminiumeintrag in das Glasrecycling gezeigt werden, dass der Grenzwert von 5,0 g/t bei hoher RFID-Marktdurchdringung und hohem Aluminiumantennenanteil überschritten wird. Dies ist beim Push-Szenario 2022 der Fall. Trotz geringerer Stückzahlen im Jahr 2022 tritt im Staats-Szenario gegenüber dem Referenz-Szenario kaum Entlastung ein, da der Aluminiumantennenanteil deutlich höher liegt.

Auch die Überschreitung der Qualitätskriterien für Kupfer ist stark vom Szenario abhängig, wie es deutlich beim Eintrag in das Aluminiumrecycling und in Sekundärbau-
stoffe aus Schlacke gezeigt werden kann:

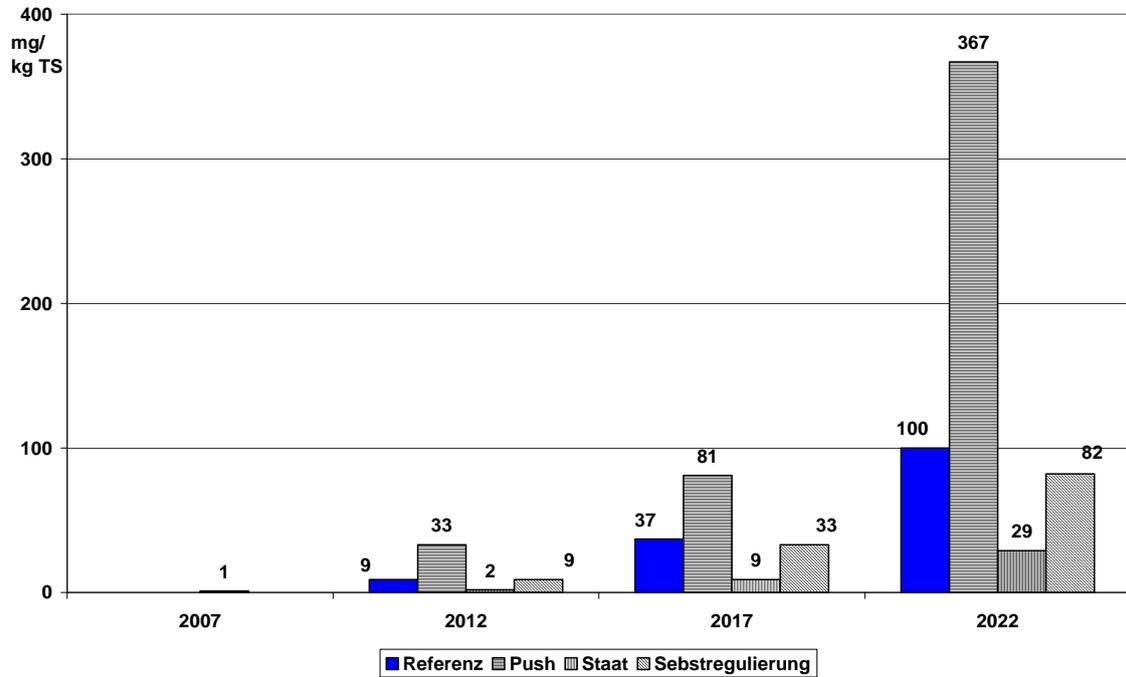
Abbildung 4-8: Entwicklung der Kupfereinträge in das Aluminiumrecycling für die vier Szenarien von 2007 bis 2022



Quelle: Berechnungen des IZT

Der Schwellwert von 0,03 Gew.-% Kupfer für das Dose-zu-Dose-Aluminiumrecycling wird im Push-Szenario 2022 überschritten, nicht aber in den anderen Szenarien.

Abbildung 4-9: Entwicklung der Kupfereinträge in Sekundärbaustoffe aus Schlacke für die vier Szenarien von 2007 bis 2022

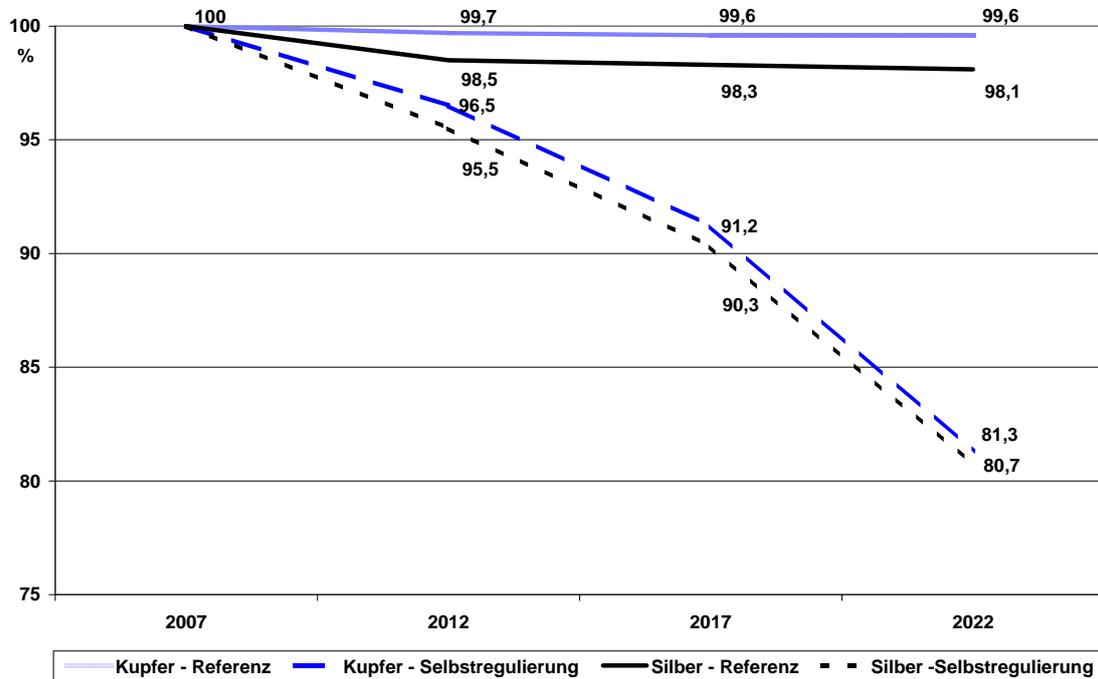


Quelle: Berechnungen des IZT

Zwar wird der Schwellwert von Kupfer in Sekundärbaustoffen von keinem der Szenarien übertroffen, aber im Push-Szenario wird 2022 der Schwellwert von 400 mg/kg TS fast erreicht. Ähnlich stellen sich die Verhältnisse beim Eintrag von Kupfer in Ersatzbrennstoffe dar. Hier ist angesichts des hohen Aggregationsniveaus zu berücksichtigen, dass es bei einzelnen Fraktionen durchaus zur Überschreitung des Grenzwerts in Höhe von 350 mg/kg TS kommen kann.

Grundlegender Steuerungsmechanismus im Szenario Selbstregulierung ist die Verringerung des RFID-Eintrags in Rezyklate durch vorige Separierung der RFID-Tags. Die verschiedenen Maßnahmen (s. Anhang C) bewirken eine Verringerung des Dissipationsgrades und erleichtern auch eine stoffliche Wiedergewinnung der metallischen Bestandteile aus den Antennenmaterialien:

Abbildung 4-10: Dissipationsgrad für Kupfer und Silber im Referenz- und Selbstregulierungsszenario von 2007 bis 2022



Quelle: Berechnungen des IZT

Der Dissipationsgrad von Kupfer und Silber aus dem Antennenmaterial kann durch punktuelle Maßnahmen, wie im Szenario Selbstregulierung beschrieben, von 100 % auf rund 80 % gesenkt werden. Dies verringert den Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt und ermöglicht die Wiedergewinnung der Wertstoffe Kupfer und Silber.

Fazit:

Die Berechnungen wurden mit dem RFID-Tag mittlerer Größe durchgeführt. Die Mengen für den großen oder den kleinen Tag ergeben sich durch einfache Multiplikation der Bestandteile mit konstanten Faktoren (vgl. Tabelle 2-2). Wir halten die Werte für den mittleren RFID-Tag für am realistischsten. Die Stoffinhalte für den großen Tag werden für Worst-Case-Betrachtungen in einem Exkurs zugrundegelegt (Kapitel 4.3.1).

Die Stoffströme von RFID-Tags heute sind gering und werden es wahrscheinlich auch in naher Zukunft, im Jahr 2012, sein. Exponentielle Wachstumsraten können die Stoffströme in wenigen Jahren drastisch ansteigen lassen. Das Mengenwachstum im Szenario Technisch-ökonomischer Push entscheidet am stärksten von allen variierten Faktoren über den Eintrag in die Recyclingprozesse.

Im Vergleich der Szenarien ist deutlich geworden, dass die Qualitätskriterien für Sekundärrohstoffe, die im Referenz-Szenario noch nicht überschritten werden, im Push-

Szenario sehr wohl überschritten oder zumindest knapp erreicht werden können. Die RFID-Tag-Mengen an für sich sind jedoch nicht hinreichend zur Erklärung von Qualitätsproblemen. Am Beispiel des Silizium-Eintrags im Szenario Staatliche Regulierung und im Referenz-Szenario wurde deutlich, dass trotz dynamischerer Marktentwicklung im Referenz-Szenario die Silizium-Einträge in das Glasrecycling nicht signifikant höher liegen, weil u.a. zunehmend Polymerchips eingesetzt werden. Ähnliche Betrachtungen können für die Antennenmaterialien angestellt werden. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass im Szenario Selbstregulierung die Einträge von RFID-Tag-Bestandteilen in Rezyklate durch Maßnahmen zur Separierung wirksam minimiert werden können. Der Dissipation von Wertstoffen kann perspektivisch ggf. durch verbesserte Schlackeverwertung entgegengewirkt werden (Exkurs in Kapitel 4.3.2).

Für besonders kritisch halten wir angesichts der Qualitätskriterien für Sekundärrohstoffe die zu erwartenden Fremdstoffeinträge aus RFID-Tags in das Glasrecycling und das Monokunststoffrecycling. Erhebliche Wissensdefizite bestehen beim Verbleib von Silber und exotischeren Stoffen wie Tantal im Recycling und in den thermischen Prozessen (Illustration der Thematik als Exkurs in Kapitel 4.3.3), aber auch die Verteilungsfunktionen der RFID-Tags als Ganzes und der bekannteren Stoffe lassen sich nur überschlägig abschätzen (Anhang C).

4.3 Exkurs: Extrembetrachtungen

Die Szenarien bilden aus heutiger Sicht realistische Entwicklungen des Eintrages von RFID-Tags in die Abfallentsorgung ab. Es sind jedoch prinzipiell auch andere Entwicklungen möglich, die in diesem Exkurs im Sinne von Eckpfeilern des Möglichkeitsraumes thematisiert werden sollen.

Unter dem Worst-Case-Eintrag von RFID-Tags in das Recycling werden Glasverpackungen, Flüssigkeitskartons und PET-Flaschen näher betrachtet. Darauf werden die stofflichen Konsequenzen einer verstärkten Metallextraktion aus der Schlacke diskutiert. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf mögliche stoffliche Konsequenzen eines Eintrags alternativer zukünftiger RFID-Tags.

4.3.1 Worst-Case-Eintrag von RFID-Tags in das Recycling

Obschon das Tagging auf Artekelebene mit den großen Tag-Mustern nicht realistisch ist, soll dies als Extrembetrachtung durchdacht werden, weil eine Belastung durch RFID-Tags über dieses Niveau hinaus nahezu ausgeschlossen ist. In einem weiteren Gedankenstrang wird die Wirkungsweise einfacher konstruktiver Gegenmaßnahmen

betrachtet, um zu zeigen in welchem Ausmaß sich die Worst-Case-Belastungen mit geringem Aufwand reduzieren lassen.

Worst Case bei Glasverpackungen

Basierend auf den Zahlen für Glasverpackungen der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung für 2005 (GVM 2007) und deren Stückgewicht soll unter Worst Case-Bedingungen dargestellt werden, welchen Einfluss ein vollständiges Item-level-Tagging mit großen passiven RFID-Tags auf das Recycling von Glasverpackungen hätte.

Die gesammelten Glasverpackungen gehen ausschließlich in die werkstoffliche Verwertung ein, dies entspricht einer Menge von 2,0511 Mio. t mit 2,0395 Mio. t Glasanteil, die mit RFID-Tags versehen würden. Unter Annahme des durchschnittlichen Gewichts von 240 g je Behälter (BV Glas 2008) würden 4.167 Stück/t in die Verwertung eingehen.

Es sollen des Weiteren zwei verschiedene Arten der Aufbringung des Tags angenommen werden. Zum einen soll der Tag wie heute üblich direkt auf den Glasbehälter aufgebracht werden (Glas-Tagging) und zum anderen in den Verschlüssen (Metall-Tagging). Mit dieser Methode soll eine zukünftige Applikationsform für Tags betrachtet werden⁴⁸.

Die Unterschiede dieser beiden Applikationen liegen in der möglichen Separierbarkeit der Tags (Collins 2008). Basierend auf den Interviews mit Experten aus dem Glasrecycling wird angenommen, dass über die Variante des Glas-Tagging 8 %, bei Metall-Tagging 95 % der Tag-Bestandteile durch vorgeschaltete Prozesse aus dem Altglas separiert werden.

Bei dieser Betrachtung wurde der Anteil der in der Praxis üblichen Beimengungen an Altglasscherben mit einbezogen. Danach werden Weißglas 70 %, Grünglas 90 % und Braunglas 80 % an Altglasscherben beigemischt (GGA 2003). Möglichen Beimischungen von Flachgläsern in Höhe von 5-10 % wurden nicht berücksichtigt, da dies nur in Ausnahmefällen praktiziert wird (Streubel 2008).

Unter Verwendung des großen RFID-Tags nach ISO 24729-2:2007 (76,2 mm x 76,2 mm) und entsprechenden Antennen aus Aluminium oder Kupfer stellen sich die Auswirkungen auf die Prozessschritte des Altglasrecycling wie in folgender Tabelle dar.

⁴⁸ Die Integration in den Deckel erfordert eine Miniaturisierung und muss Lösungen für die Metallreflexionen finden.

Tabelle 4-9: Eintrag von RFID-Bestandteilen in das Behälterglas-Recycling

	Glas-Tagging		Metall-Tagging	
	Kupfer- antenne	Aluminium- antenne	Kupfer- antenne	Aluminium- antenne
Eintrag in Glas- schmelze				
Weißglas	912,33 g/t	134,17 g/t	29,75 g/t	4,38 g/t
Grün Glas	1173,00 g/t	172,50 g/t	38,25 g/t	5,63 g/t
Braunglas	1042,67 g/t	153,33 g/t	34,00 g/t	5,00 g/t
Eintrag in Reststoffe				
unspezifisch	113,30 g/t	16,70 g/t		
Weißblech			1042,50 g/t	158,00 g/t
Aluminium			331,70 g/t	50,30 g/t

Quelle: Berechnungen der Empa

Die Auswirkungen des Item-Level-Taggings von Glasverpackungen auf die Glas-schmelze bedeuten, dass die Produktspezifikationen für Hohlglasscherben im Worst Case Fall weder bei Kupfer- noch bei Aluminium-Antennen realisiert werden könnten. Der Grenzwert von 5 g/t Nichteisen-Metalle würde deutlich überschritten.

Merkliche Entlastung könnte durch die Integration des RFID-Tags in den Metalldeckel erreicht werden. Bei Kupferantennen würden die Grenzwerte zwar weiterhin überschritten, aber bei Aluminium ist eine Unterschreitung im Durchschnitt möglich.

Gleichwohl können diese Konzentrationen zu den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfärbungen (durch Kupfer) bzw. Einschlüssen (durch das reduzierende Verhalten von Aluminium) führen. Da der erhebliche Anteil der Tags in die Reststoffe gelangt, fallen die Auswirkungen in die jeweiligen werkstofflichen Verwertungswegen an. Die damit einhergehende Aufkonzentrierung der RFID-Tag-Bestandteile birgt an dieser Stelle Möglichkeiten zur Wiedergewinnung der Wertstoffe, wie Kupfer oder Silber.

Worst Case bei Flüssigkeitskartons

Basierend auf den Zahlen für Flüssigkartonagen der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung für 2005 (GVM 2007)⁴⁹ soll unter Worst-case-Bedingungen dargestellt

⁴⁹ Bei der Fraktion der Verbundverpackungen werden Flüssigkeitskartons (auf Grund des DSD-Monitoring) in einer separaten Statistik geführt, andere Verbunde auf Papierbasis gehen zu einem überwiegenden Anteil in die Papier-Monosammlung ein.

werden, welchen Einfluss ein vollständiges Item-level-Tagging mit großen passiven RFID-Tags auf das Recycling von Flüssigkartons hätte.

Die gesammelten Flüssigkartonagen werden ausschließlich werkstofflich verwertet, dies entspricht einer Menge von 0,1455 Mio. t die mit RFID-Tags versehen würde. Unter Annahme des durchschnittlichen Gewichts von 28 g je Karton (FKN 2008) würden 35.714 Stück/t in die Verwertung eingehen.

Es sollen nachfolgend zwei verschiedene Arten der Aufbringung des Tags angenommen werden. Zum einen soll der Tag wie heute üblich auf die äußere Polyethylen-Beschichtung (PE-Tagging) aufgebracht werden und zum anderen zwischen Aluminium- und der äußeren Polyethylen-Beschichtung positioniert werden (Inlay-Tagging). Mit dieser Methode soll eine zukünftige Applikationsform für Tags betrachtet werden⁵⁰.

Die Unterschiede dieser beiden Applikationen liegen in der möglichen Separierbarkeit der Tags. Basierend auf den Interviews mit Experten/-innen wird angenommen, dass über die Variante des PE-Tagging bis 95 %, bei Inlay-Tagging bis zu 97 % der Tag-Bestandteile aus dem Faserbrei separiert werden⁵¹.

Unter Verwendung eines RFID-Tags nach ISO 24729-2:2007 (76,2 mm x 76,2 mm) und entsprechenden Antennen aus Aluminium oder Kupfer stellt sich dies wie in folgender Tabelle dar:

Tabelle 4-10: Eintrag von RFID-Bestandteilen in das Flüssigkarton-Recycling

	PE-Tagging		Inlay-Tagging	
	Kupfer-antenne	Aluminium-antenne	Kupfer-antenne	Aluminium-antenne
Faserstoff-Eintrag	0,61 kg/t	0,09 kg/t	0,36 kg/t	0,05 kg/t
Reststoff-Eintrag	11,54 kg/t	1,70 kg/t	11,78 kg/t	1,73 kg/t

Quelle: Berechnungen der Empa

Entsprechend beider Applikationsformen ist davon auszugehen, dass die metallenen Tag-Bestandteile fast ausschließlich in die Reststoffe eingetragen werden. Somit würden sich die Auswirkungen im Kartonagenrecycling auf die Verfahren der energeti-

⁵⁰ Diese Lösung erfordert unter Umständen spezielle Maßnahmen im Hinblick auf die Metallreflexion.

⁵¹ Durch das Einlaminieren des RFID-Inlays gelangt es je nach Trennungsmittel eher in die Sinkfraktion. Die Ab- und Auflösung ist beim Inlay-Tagging durch die geringere Wasserexposition im Vergleich zum PE-Tagging verringert.

schen Verwertung verlagern (siehe Abschnitt 3.4.1). Insbesondere die Kupferkonzentrationen machen ggf. auch eine metallurgische Aufbereitung ökonomisch attraktiv.

Worst Case bei PET-Flaschen

Basierend auf den Zahlen für bepfandete Kunststoff-Einweg-Flaschen der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung für 2005 (GVM 2007) und deren Stückgewicht, soll unter Worst-Case-Bedingungen dargestellt werden, welchen Einfluss ein vollständiges Item-level-Tagging mit großen passiven RFID-Tags auf das Recycling von bepfandete Kunststoff-Einweg-Flaschen erzeugt.

Die gesammelten bepfandeten Einwegflaschen gehen ausschließlich in die werkstoffliche Verwertung ein, dies entspricht einer Menge von 1,845 Mio t., die mit RFID-Tags versehen würden. Unter Annahme des durchschnittlichen Gewichts von 28 g je Behälter⁵² würden 35.714 Stück/t in die Verwertung eingehen.

Des Weiteren werden zwei verschiedene Arten der Aufbringung des Tags angenommen werden. Zum einen soll der Tag wie heute üblich direkt auf der Flasche aufgebracht werden (PET-Tagging) und zum anderen in den Banderolen oder Etiketten (Folien-Tagging). Mit dieser Methode soll eine zukünftige Applikationsform für Tags betrachtet werden.

Die Unterschiede dieser beiden Applikationen liegen in der möglichen Separierbarkeit der Tags. Es wird basierend auf den Interviews angenommen, dass über die Variante des PET-Tagging bis 96%, bei Folien-Tagging bis zu 98 % der Tag-Bestandteile aus dem Kunststoff separiert werden⁵³.

Unter Verwendung eines RFID-Tags nach ISO 24729-2:2007 (76,2 mm x 76,2 mm) und entsprechenden Antennen aus Aluminium oder Kupfer stellen sich die Auswirkungen auf die Prozessschritte des Altglasrecycling wie in folgender Tabelle dar:

⁵² Entspricht dem Gewicht einer 0,5 l Flasche (Christiani 2008).

⁵³ Der Wert für das Folien-Tagging liegt über dem des PET-Tagging, da die Folie als ganzes, einschließlich RFID-Tag, leichter von der PET-Flasche separiert werden kann.

Tabelle 4-11: Eintrag von RFID-Bestandteilen in das PET-Recycling

	PET-Tagging		Folien-Tagging	
	Kupfer-Antenne	Aluminium-Antenne	Kupfer-Antenne	Aluminium-Antenne
Eintrag in Recyclingprozess	485,71 g/t	71,42 g/t	242,86 g/t	35,71 g/t
Eintrag in Reststoffe	11657,14 g/t	1714,29 g/t	11900,00 g/t	1750,00 g/t

Quelle: Berechnungen Empa

Nach RAL-GZ 717 für Rezyklate aus Standardpolymeren dürfen maximal 10-50 g/t an Metallen in dem Rezyklat enthalten sein. Je nachdem, wie groß der Transferfaktor des Aluminiums oder Kupfers in das Rezyklat ist, werden die Grenzwerte überschritten. Die Kupferfracht liegt deutlich über der Aluminiumfracht. Das Folien-Tagging senkt die Frachten in den Recyclingprozess um etwa die Hälfte. Der hohe Kupfergehalt im Reststoff erschwert eine energetische Verwertung, macht aber eine metallurgische Aufbereitung attraktiv.

Allgemein gilt, dass die Spezifikationen für Granulate und Mahlgut aus PET am restriktivsten gegenüber Kontaminationen sind. Die für PET getroffenen Aussagen haben auch für andere sortenreine Kunststoffe weitgehend Gültigkeit.

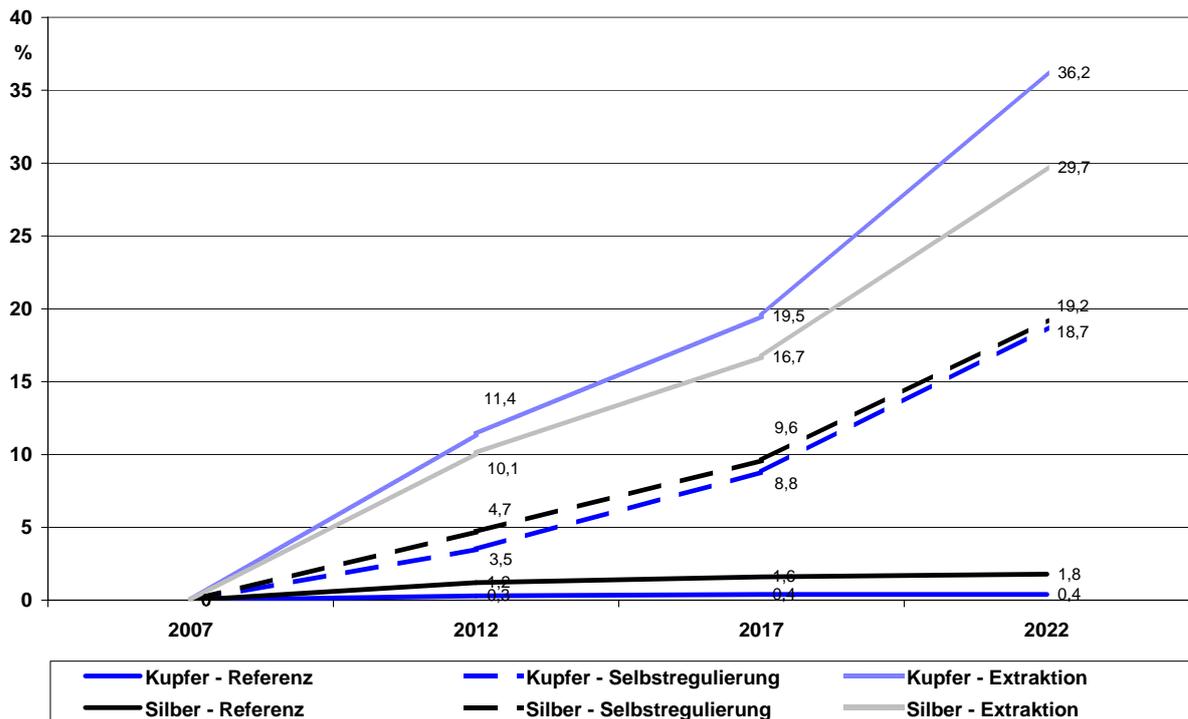
4.3.2 Verstärkte Metallextraktion bei der Schlackeaufbereitung

Der überwältigende Anteil an RFID-Tags gelangt in thermische Prozesse. Die Umwandlungsprozess von RFID-Tags in der Verbrennung sind weitgehend unbekannt. Je nach RFID-Tag, Verbrennungsparametern, wie Verweildauer, Temperatur und Sauerstoffgehalt, sowie Umgebungsmatrix dürften die organischen Bestandteile größtenteils verbrennen und die metallischen Bestandteile überwiegend in die Schlacke bzw. den Flugstaub eingetragen werden.

Nach Angaben von IFEU (2008) wurden 2006 bereits 50 % der Schlacke aus MVA aufbereitet und etwa die Hälfte der NE-Metalle extrahiert. Die heutigen Verfahren sind nicht darauf ausgelegt, solch kleine Metallfragmente wie aus RFID-Antennen aus der Schlacke zu separieren. Dies könnte sich jedoch aus verschiedenen Gründen - insbesondere bei weiterhin steigenden Rohstoffpreisen - in Zukunft ändern. So steigt die dissipative Verwendung nicht nur von RFID-Tags, sondern z.B. auch von andere Mikroelektronik in Alltagsgegenständen (EMPA, IZT et al. 2003) und von Silber für biozide Zwecke in Textilien und Kunststoffen (FhG-ISI, IZT 2008).

Bis 2022 und darüber hinaus ist zu erwarten, dass der Anteil der Schlackeverwertung weiter steigen wird und dass der Restabfall noch stärker als bisher thermisch verwertet wird (UBA, ecologic 2007). Welche Auswirkungen ergäben sich für die Wertstoffgewinnung, wenn die Schlacke vermehrt und mit besserer Metallextraktion aufbereitet würde?

Abbildung 4-11: Entwicklung der Metallwiedergewinnungsrate durch verstärkte Extraktion aus der Schlacke von 2007 bis 2022



Quelle: Berechnungen des IZT

Eine verstärkte Extraktion von Kupfer und Silber aus der Schlacke könnte zu einer sehr effektiven Wiedergewinnung der beiden Metalle führen. Schon 2012 könnten über 10 % des Kupfers und des Silbers aus RFID-Tags rezykliert werden - dies ist mehr als doppelt so viel wie im Szenario Selbstregulierung. Die Recyclingquote würde von rund 10 % im Jahr 2012 auf 30 % und mehr im Jahr 2022 steigen. Im Jahr 2022 würden über 45 Tonnen Silber wiedergewonnen werden, was eine volkswirtschaftlich relevante Menge ist.

Diese Form der Outputsteuerung durch verstärkte Metallextraktion aus Schlackeverwertung ist eine prüfungswürdige Option im Hinblick auf die Minderung des Wertstoffverlustes. Die Einträge der Metalle in die Recyclingprozesse werden durch diese Maß-

nahmen jedoch nicht berührt. Dessen ungeachtet, lässt sich diese Option mit den Maßnahmen im Szenario Selbstorganisation kombinieren.

4.3.3 Eintrag von alternativen zukünftigen RFID-Tags in das Recycling

Die Stoffströme bis 2022 sind mit RFID-Tags simuliert worden, die den heutigen sehr ähnlich sind. Angesichts der technologischen Entwicklungsdynamik muss dies aber nicht zwangsläufig zu bleiben. Nur vereinzelt sind gänzlich alternative RFID-Tags in stofflicher Hinsicht charakterisiert worden⁵⁴.

Zur Illustration möglicher stofflicher Implikationen andersartiger RFID-Tags sind hier zwei hypothetische RFID-Tags formuliert worden, die es so nicht gibt, die aber aus heutiger Sicht möglich erscheinen. Des weiteren wird hier simuliert, welche stofflichen Implikationen ein drastischer Preisverfall bei der Energieversorgung und aktiven RFID-Tag-Komponenten hätte.

- ▶ Als hypothetische Tags sind zwei Varianten formuliert worden, einer mit einer Kupferoxid-Leitpaste und der Surface Acoustic Wave Tag, der zur Nutzung des piezoelektrischen Effekts über 10 mg Tantal pro Tag verfügt.
- ▶ Die aktiven Komponenten verfügen entweder über eine Energiequelle als Zink-Kohle- oder als Lithium-Ionen-Batterie, oder aber auch eine Einheit zum Energiebezug aus der Umwelt (Energy Harvesting). Die Energieversorgung ermöglicht neue Funktionen die durch Komponenten wie Sensoren und Aktoren oder bistabile Displays ermöglicht werden.

Die Zusammensetzung der hypothetischen Tags und der Aktiv-Zusätze für das Jahr 2022 wird in den folgenden beiden Tabellen gezeigt:

⁵⁴ u.a. ein Ultra dünner passiver Transponder und ein Polymer-Demonstrator (vgl. u.a. FhG-IZM et al. 2006)

Tabelle 4-12: Zusammensetzung zweier hypothetischer Tags im Jahr 2022 [mg/Tag]

Komponente	CuO-Tag	SAW-Tag
Klebstoff	100	100
Mikroelektronische Verbindungstechnik	0,15	0,15
Spezialpolymer (Chip)	1,35	1,35
Kupfer (in Kupferoxid-Leitpaste)	20	
Tantal (piezoelektrischer Effekt)		20
Substrat	100	0
Summe	221,5	121,5

Quelle: Annahmen des IZT

Tabelle 4-13: Zusammensetzung dreier hypothetischer Aktiv-Zusätze im Jahr 2022 [mg/Aktiv-Zusatz]

Komponente	Zink-Kohle-Batterie	Lithium-Ionen-Batterie	Energy Harvesting
Zink	500		
Kohlenstoff	250		
Lithium		200	
Sensor	50	50	50
Aktor		50	
Energy Harvesting			50
Spezialpolymere für bistabile Displays			100
Summe	800	300	200

Quelle: Annahmen des IZT

Der Marktanteil des Kupferoxid-Leitpasten-Tags liegt bei 80 %, der des SAW-Tags bei 20 %. Die Energieversorgung des Aktiv-Zusatzes besteht zu 30 % aus Zink-Kohle- und zu 30 % aus Lithium-Ionen-Batterie. 40 % der Aktiv-Zusätze verfügen über eine Energy Harvesting-Einheit.

Folgende Mengen an RFID-Materialien würden in die 2022 produzierten alternativen RFID-Tags eingebracht, wenn die Mengenentwicklung wie im Szenario Technisch-ökonomischer Push erfolgt:

Tabelle 4-14: Eingebraachte Materialmengen in alternative RFID-Tags im Jahr 2022

RFID-Tag	Menge [t]	Aktiv-Komponenten	Menge [t]
Kupfer	1.544	Zink (Kohlenstoff)	38 (19)
Tantal	386	Lithium	15
Mikroelektronik (unbestimmt)	14	Energy Harvesting (unbestimmt)	5
Spezialpolymere (unbekannt)	130	Sensor (unbestimmt)	12
Substrat (unbestimmt)	7.719	Aktor (unbestimmt)	4
Klebstoff (unbekannt)	9.649	Spezialpolymere	10

Quelle: Berechnungen des IZT

Bei einem massenhaften Einsatz der aktiven Komponenten können neue stoffliche Fragestellungen durch die Verwendung von gedruckten Folienbatterien auftauchen, sei es, dass sie auf Zink-Kohle, Lithium-Ionen oder den hier nicht dargestellten Silber-Zink-Legierungen basieren. Darüber hinaus sind die stofflichen Eigenschaften der Komponenten für Energy Harvesting, Aktoren und Sensoren, sowie bistabile Displays heute noch unbestimmt. Mögliche Recyclingprobleme durch Stoffeinträge sind:

- ▶ Lithium schmilzt bei niedrigen Temperaturen im Kunststoffrecycling,
- ▶ Zink legiert Stahl und Aluminium,
- ▶ Silizium in Temperatursensoren verschärft die Problematik des Silizium-Eintrags ins Glasrecycling und
- ▶ Spezialpolymere für bistabile Displays stören im Kunststoffrecycling.

Bei den eigentlichen RFID-Tags ist festzuhalten, dass Kupfer auch in Zukunft massenhaft eingesetzt werden könnte. Gelingt es funktionsfähige Kupferoxid-Leitpasten herzustellen, so ist es sehr wahrscheinlich, dass die Silber- und Aluminiumproblematik entschärft wird, aber die Kupferproblematik in modifizierter Form bestehen bleibt.

Ein Surface-Acoustic Wave Tag benötigt zur Nutzung des piezoelektrischen Effekts aus heutiger Sicht Tantal, das in den Sekundärstahl (3,9 t) und in Sekundäraluminium (7,1 t) eingetragen wird. Die Minenproduktion von Tantal liegt heute bei 1.400 t (USGS 2008), so dass durch die Nachfrage von 368 t alleine für SAW-Tags in Deutschland eine massenhafte Nachfrage entstehen würde.

5 **Mögliche Probleme durch den zukünftigen Eintrag von RFID-Tags in die Umwelt und die Abfallentsorgung**

Dieses Kapitel bündelt die möglichen Probleme durch den zukünftigen Eintrag von RFID-Tags in die Abfallentsorgung und die Umwelt, indem es die Perspektiven aus Kapitel 3 und 4 zusammenführt.

Im F+E-Vorhaben ist es gelungen den dokumentierten Wissensbestand zu RFID in der Entsorgung zusammenzutragen und zu bewerten, praktische Problemlagen zu identifizieren und mögliche zukünftige Probleme abzuschätzen. Es verbleiben naturgemäß Unsicherheiten, die sich in den Handlungsempfehlungen im Bedarf nach Beobachtung und weitere Untersuchung der Thematik manifestieren.

Zentrale Grenzen der Aussagekraft sind:

- ▶ Das Wachstum der RFID-Märkte ist ein sehr starker Faktor für den Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung. Das Ausmaß des Wachstums der RFID-Märkte ist jedoch unsicher.
- ▶ Die Gestaltung von RFID-Tags, u.a. Materialwahl und Aufbringung auf Objekte, prägt den Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung wesentlich mit. Ihre Realisierung hängt stark vom Handeln der Wirtschaftsakteure im Innovationssystem ab.
- ▶ Vordringlich bewertet wurden in diesem F+E-Vorhaben diejenigen Stoffe, über deren Auswirkungen in der Abfallentsorgung bereits Erfahrungswerte vorliegen. Der Einfluss von RFID-Tags hängt aber auch von Inhaltsstoffen wie Silber, Spezialpolymeren, Tantal und Lithium ab, über deren Auswirkungen in der Abfallentsorgung nur wenig bekannt ist.

Ein Anliegen des Vorhabens war es, realistische Szenarien zu formulieren und Extrembetrachtungen auch als solche zu benennen. Die Bandbreiten möglicher Entwicklungen konnten so sinnvoll eingegrenzt und durch systematische Integration der RFID-Branche und der Entsorgungsbranche validiert werden.

Aus der empirisch gestützten Analyse der Entsorgungsprozesse konnte die Verträglichkeit einzelner Tag-Bestandteile in den Recyclingprozessen und –produkten ermittelt werden.

Im Recycling gelingt es in unterschiedlichem Maße, die RFID-Tags als Ganzes in vorgeschalteten Sortierschritten zu separieren. Abgeschiedene RFID-Tags gelangen in Reststoffe zur thermischen oder metallurgischen Verwertung, nicht abgetrennte RFID-

Tags in die Recyclingprozesse. In den Recyclingprozessen wiederum werden die verbleibenden RFID-Tags in das Rezyklat eingetragen, oder sie gelangen in Reststoffe, Abfälle oder Emissionen.

Beim Recycling von PPK und Verbundkarton werden zwar 100 % der RFID-Tags in den Pulper eingetragen, mindestens 98 % gelangen jedoch in die Reststoffe. Auch beim Kunststoffrecycling gelingt eine weitgehende Abtrennung der RFID-Tags in der Dichtentrennung. Aus dem hohen Eintrag von RFID-Tags in Reststoffe zur thermischen Verwertung bei PPK/Verbundkarton und Kunststoffen folgt eine starke Beladung der thermischen Verwertung mit RFID-Tags und als Konsequenz auch der Sekundärbaustoffe aus Schlacke mit RFID-Bestandteilen.

Auch für das Glas-, Aluminium- und Weißblechrecycling ist charakteristisch, dass der überwiegende Anteil der RFID-Tags in die Hochtemperatur-Recyclingprozesse eingetragen wird. Größere Anteile an RFID-Tags werden beim Glasrecycling aussortiert und gelangen in die metallurgische und thermische Verwertung.

Was passiert mit den in den Recyclingprozess eingetragenen RFID-Tags?

Im Glas- und Kunststoffrecycling kommt es zum teilweisen Bruch der Tags in vorge-schalteten Aufbereitungsprozessen. Auch die Anhaftung der Tags am Sekundärrohstoff kann in diesen Aufbereitungsprozessen zu einem Rohstoffverlust führen.

Die RFID-Tags werden im PPK/Verbundkarton-Recycling und – sofern sie nicht zerbrochen sind – auch im Kunststoffrecycling durch Dichtentrennung als Ganzes abge-schieden. Das Substrat bzw. Trägermaterial der RFID-Tags kann je nach Dichte in der Dichtentrennung die Abscheidungsrate der RFID-Tags vom Sekundärrohstoff verringern.

Wichtige Auswirkungen auf den Prozess sind, dass im PPK-Recycling Siebe durch den Eintrag von Klebstoffen verstopfen können. Bei den Kunststoffen sind die Verarbei-tungsprozesse ggf. durch den ganzen RFID-Tag bzw. durch die Metallantenne behin-dert.

Beim Aluminium- und Weißblech-Recycling treten keine nennenswerten Auswirkungen der RFID-Komponenten auf die Recyclingprozesse auf – die organischen Anteile der RFID-Tags verbrennen im Prozess. Bei thermischer Verwertung von Ersatzbrennstof-fen und der Schlackeaufbereitung wurden die Auswirkungen nicht näher untersucht. Vermutlich sind sie aber vernachlässigbar.

Folgende Auswirkungen auf die Rezyklate sind möglich:

Tabelle 5-1: Mögliche Auswirkungen des Eintrags von RFID-Tags auf die Rezyklate

Stoff	Glas	PPK und Verbundkarton	Kunststoffe	Aluminium und Weißblech	EBS und SBS
Silizium	Bruch	Verunreinigung	Verunreinigung	Verunreinigung	keine
Kupfer	Verfärbungen	Verunreinigung	Verunreinigung	Verunreinigung	Verunreinigung
Aluminium	Bruch	Verunreinigung	Verunreinigung	Düngung/keine	Verunreinigung
Silber	Verfärbungen	Verunreinigung	Verunreinigung	?	Verunreinigung
PET	keine	keine	Verunreinigung, Düngung (PET)	keine	Brennstoff/keine
Acrylat	keine	Verklumpungen („Stickies“)	Verunreinigung	keine	Brennstoff/keine
Sonstige	Verfärbungen (ggf. Lote)	Verunreinigung	Eintrag von Loten	Legierung (ggf. Nickel)	-

Quelle und Anmerkungen: Bewertungen der Empa, Sonstige: Verbindungsmaterialien – Nickel, Epoxy-basiertes Material, Polyurethan, Bonding Agent, Lote

Die möglichen Auswirkungen von RFID-Tags im Recycling sind vielfältig. Generell sind Verunreinigungen des Sekundärrohstoffs unerwünscht, insbesondere bei Glas ist aber durch Bruch und Verfärbungen eine drastische Qualitätsverschlechterung des Rezyklates möglich. Die Verklumpungen durch „Stickies“ beim PPK-Recycling sind eine alt bekannte Problematik, die nicht spezifisch für den Eintrag von RFID-Tags ist.

Sowohl beim Eintrag von Aluminiumantennen ins Aluminiumrecycling, als auch beim Eintrag von PET-Substraten ins PET-Recycling entsteht ein isoliert gesehen wünschenswerter Eintragseffekt (nicht beabsichtigte „Düngung“). PET und Acrylat-Klebstoff sind auch in Ersatzbrennstoffen als Energieträger erwünscht.

Forschungsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen besteht insbesondere bei größeren Einträgen von Silber in das Aluminium- und Weissblechrecycling.

Dies alles sind *mögliche* Auswirkungen eines zukünftigen massenhaften Einsatzes von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung. Doch wie verhält es sich mit realistischen Entwicklungen; welche Auswirkungen sind unter gegebenen Bedingungen zu erwarten?

Folgende Abbildung zeigt die zentralen Wirkungsmuster der vier gebildeten Szenarien mit einem Zeithorizont von 2022 für den Einfluss von RFID-Tags auf die Siedlungsabfallentsorgung in Deutschland:

Tabelle 5-2: Hauptwirkungsmuster der Szenarien auf die Stoffströme

Szenario	Hauptwirkungsmuster	Mögliche Grenzwertüberschreitungen für Sekundärrohstoffe
Referenz	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Eintreten heute absehbarer Technologie- und Marktentwicklungen ▶ Keine Anpassungen des Entsorgungssystems an den RFID-Eintrag ▶ Belastungen der Recyclingprozesse durchweg zwischen den Extremen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Glasrecycling (Si, Al) ▶ Kunststoffrecycling (Fremdpolymerer, Metalle) ▶ Kupfer im Aluminiumrecycling, in EBS und SBS
Technisch-ökonomischer Push	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Stückzahlen stärkster Faktor für die Eintragsmengen in die Rezyklate ▶ größerer Anteil an Silber-Antennen und Polymerchips ▶ durchgängig die höchsten Belastungen für die Recycling-Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ früher und deutlicher ▶ ggf. neue Probleme durch andere Stoffe (u.a. Spezialpolymere, Tantal, Lithium)
Staatliche Regulierung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ gehemmte technologische Entwicklung verringert Stückzahlen ▶ keine Entlastung des Glasrecyclings von Siliziumchips durch Polymerchips ▶ doppelte Wiederverwendungsquote für Verpackungen im Großgewerbe entlastet PPK- und KS-Recycling 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ später oder gar nicht
Selbstregulierung	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Getrenntsammlung Smart Tickets entlastet PPK-Recycling ▶ Ausschleusung von RFID-Tags aus Glasrecycling durch konstruktive Maßnahmen ▶ Abtrennung der RFID-Tags in der LVP-Aufbereitung entlastet alle LVP-Recyclingprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Entschärfung beim Glasrecycling (Si, Al) ▶ Entschärfung beim Kunststoffrecycling (Fremdpolymerer, Metalle) ▶ Entschärfung beim Kupfer im Aluminiumrecycling ▶ Kupfer in EBS und SBS mittelbar entlastet

Quelle: Bewertungen des IZT

Im Szenario Selbstregulierung sind Maßnahmen zur vorbeugenden Entschärfung des Problemdrucks formuliert und im Stoffstrommodell quantifiziert worden. Die Maßnahmen erwiesen sich in der Modellrechnung als effektiv.

Die Analyse möglicher Maßnahmen hat grundsätzlich ergeben, dass die möglichen Probleme eines massenhaften Eintrags von RFID-Tags in das Recycling mit vergleichsweise einfachen Strategien wirksam entschärft werden können:

- ▶ Durch Ecodesign können die RFID-Tags separierbar und/oder massenstromtauglich gestaltet werden.
- ▶ Die Recyclingprozesse können so angepasst werden, dass sie die RFID-Tags besser detektieren und ausschleusen.
- ▶ Wie in der Sekundärrohstoffverwertung üblich kann die Konzentration von Fremdstoffeinträgen durch Verschnitte mit unbelasteten Fraktionen verringert werden. Bei einem zukünftigen ubiquitären Einsatz von RFID-Tags wird diese Option aber erschwert.

Je nach Recyclingprozess sind verschiedene Maßnahmen auszuwählen und zu kombinieren.

Beim Glasrecycling sind die Optionen für ein massenstromtaugliches Design aus heutiger Sicht begrenzt, da es zu Silizium-Mikrochips keine Alternative gibt und alle drei Antennenmaterialien, vor allem Aluminium, aber auch Kupfer und Silber, negative Auswirkungen auf das Glas-Rezyklat haben. Als konstruktive Maßnahmen zur besseren Separierung stehen die Integration in den Behälterdeckel, das Tagging der Banderole und die Erhöhung der Duktilität des Tags zur Verfügung. Am besten geeignet scheint das Tagging der Banderole zu sein, da die Integration in den Behälterdeckel heute noch nicht möglich ist und auch die Erhöhung der Duktilität zur Abscheidung durch Scherkräfte ohne Bruch der RFID-Tags nur schwer realisierbar ist. Geeignete Maßnahmen zur Prozessanpassung schätzen wir als relativ aufwändig ein.

Der Problemdruck durch RFID-Tags im Recycling von PPK und Verbundkarton ist derzeit gering und wird es auch in naher Zukunft weiterhin sein. Durch Verwendung von Kunststoffen statt Zellulose als Trägermaterial kann die Abtrennung der RFID-Tags in der Dichtentrennung erleichtert werden. Die Integration des RFID-Tags in Zellulose wird aber z.B. zur Authentifizierung von Dokumenten bevorzugt. Maßnahmen zur Eliminierung des geringen zusätzlichen Metalleintrages aus Antennenmaterialien sind aufwändig und können nur im Zusammenhang mit anderen Fremdstoffeinträgen bewertet werden. Sollten RFID-Tags in Zukunft direkt auf Verpackungen gedruckt werden, so käme dem Deinking im Verpackungsbereich gegebenenfalls eine neue Bedeutung zu.

Bei Leichtverpackungen besteht die Möglichkeit, RFID-Tags so zu gestalten, dass sie durch optische Verfahren detektiert (z.B. spektroskopische oder Muster-Erkennung) und anschließend separiert werden können. Dies könnte die Recyclingprozesse von

Verbundkarton, Aluminium, Weißblech und Kunststoffen entlasten. Wie dies im Einzelnen umgesetzt werden kann, bedarf weiterer Prüfungen.

Beim Tagging von Kunststoffverpackungen mit Smart Labels besteht die Möglichkeit des Taggings der Banderole, bei verschiedener Materialdicke auch des Deckels und die Verwendung von Materialien, die eine Dichtentrennung erleichtern, wie z.B. Aluminiumantennen. Hier ist insbesondere das Recycling von PET und PS zu adressieren, da das Standardsubstrat PET aufgrund seiner Dichte als Carrier für die Metallbestandteile in den Kunststoff wirkt und auch das PET im PS-Recycling stört. Beim Inmould von RFID-Tags in Kunststoffverpackungen ist im Vergleich zur Verwendung von Smart Labels die Trennung deutlich erschwert.

Beim Weißblech- und Aluminiumrecycling gilt es, das potenziell schädliche Kupfer als Antennenmaterial zu vermeiden. Die Möglichkeiten zur Separierung der RFID-Tags und der Prozessanpassung sind eingeschränkt.

Bei der Verwertung von Ersatzbrennstoffen ist insbesondere der Kupfereintrag zu minimieren. Die Vermeidung von Kupfer als Antennenmaterial oder die vorherige Separierung von Kupfer aus den Ersatzbrennstoffen ist auf dieser Analyseebene nur schwer begründbar. Intelligent zusammengestellte Verschnitte mit anderen Fraktionen können den Kupfereintrag unter den Grenzwert senken. Auch bei der Verwertung der Verbrennungsschlacken als Sekundärbaustoffe ist der Kupfergehalt zu adressieren. Eine Ex-Post-Wiedergewinnung von Kupfer, und auch von Silber, aus der Verbrennungsschlacke ist nicht nur im Hinblick auf die Schlackequalität wünschenswert, sondern auch zur Wiedergewinnung der Wertstoffe.

6 Handlungsempfehlungen

Insgesamt entscheidet das Zusammenspiel von RFID-Tags, Verpackung/Objekt und Entsorgungssystem über die Auswirkungen der RFID-Technologie auf das Entsorgungssystem. Es bestehen große Unsicherheiten über die tatsächlichen zukünftigen Auswirkungen der RFID-Technologie auf das Entsorgungssystem. Es konnte gezeigt werden, dass die Bandbreite realistischer Entwicklungen von 'vernachlässigbar' bis hin zu 'konkreter Bedrohung von Recyclingprozessen und -verfahren' reicht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die durch ein hohes Aufkommen von RFID-Tags im Entsorgungssystem zu erwartenden Probleme beherrschbar sind, wenn vorsorgende Maßnahmen ergriffen werden. Das Engagement der beteiligten Branchenverbände aus der Informations- und Kommunikationsbranche und der Entsorgungswirtschaft ist eine vielversprechende Basis zur Vermeidung und Begrenzung der potenziellen Probleme.

Die Problemlage legt deshalb eine Behandlung nach dem Vorsorgeprinzip nahe. Das Vorsorgeprinzip dient dem Umgang mit Risiken in Situationen, in denen keine akute Gefährdung gegeben ist. Die Anwendung des Vorsorgeprinzips dient dazu, auch solche Risiken zu minimieren, die sich möglicherweise erst langfristig manifestieren und Freiräume für mögliche zukünftige Entwicklungen zu erhalten (EMPA, IZT et al. 2003).

Das Vorsorgeprinzip ist ein sehr offenes Prinzip, das der Auslegung und Präzisierung im Kontext der konkreten Thematik bedarf. Im Laufe des F+E-Vorhabens haben wir vier Basisstrategien herausgearbeitet, die wir aus heutiger Sicht für hinreichend, aber auch für notwendig halten, um das Vorsorgeprinzip zu operationalisieren:

- ▶ **Beobachten:** Die dynamische Entwicklung der RFID-Technologie und der Märkte für RFID-Tags hat uns zu dem Schluss geführt, dass die Thematik RFID-Tags in der Abfallentsorgung nicht – auch nicht mit dieser Studie - abschließend bis zum Jahr 2022 behandelt werden kann. Die Entwicklungen der RFID-Technologie und -Märkte müssen deshalb gemäß des Vorsorgeprinzips beobachtet werden.
- ▶ **Untersuchen:** Im F+E-Vorhaben konnte der für die Fragestellung relevante aktuelle Wissensstand weitgehend zusammengestellt, gebündelt und bewertet werden. Es verbleiben erhebliche Kenntnislücken, wie z.B. über den Verbleib von verschiedenen RFID-Tag-Komponenten in Verbrennungsprozessen. Vorsorgliches Handeln ist aus verschiedenen Gründen⁵⁵ in Teilbereichen auf die Behebung solcher Wissensdefizite angewiesen.

⁵⁵ u.a. Verhältnismäßigkeitsgebot, Opportunitätskosten, praktische Durchsetzbarkeit.

- ▶ Getrennt halten: Trotz bestehender Wissensdefizite hat das F+E-Vorhaben deutlich gezeigt, dass eine Separierung der RFID-Tags von den Recyclingstoffströmen aus ökologischen Gründen wünschenswert ist. Grundsätzlich ist in Recyclingprozessen und Rezyklaten jeder Fremdstoff unerwünscht. Der Fremdstoffgehalt hat wiederum erhebliche Auswirkungen auf die ökonomische Rentabilität des Recyclings.
- ▶ Massenstromtauglich gestalten: Die Feinverteilung der potenziell ubiquitären RFID-Tags erschwert eine gezielte Adressierung der RFID-Tags in der Entsorgung. Ohne im Einzelfall zu wissen, ob bestimmte RFID-Tags in bestimmte Entsorgungsprozesse gelangen und diese schädigen, ist die massenstromtaugliche Gestaltung ein wichtiger Ansatz zur weitreichenden Operationalisierung des Vorsorgeprinzips.

Diese vier Basisstrategien können in konkrete Aktivitäten überführt werden, die im Laufe des F+E-Vorhabens identifiziert, bewertet und präzisiert worden sind.

6.1 Aktivitäten

6.1.1 Monitoring

Die zukünftigen RFID-Tags werden mit den heutigen stofflich nicht identisch sein. Komponenten zum Energiebezug aus der Umwelt oder bistabile Displays können neue stoffliche Fragestellungen aufwerfen. Auch können die Marktprognosen schnell von der Realität überholt werden. Angesichts der dynamischen Technologie- und Marktentwicklungen von RFID-Tags sollte deren möglicher Einfluss auf das Recycling beobachtet und turnusmäßig neu bewertet werden.

Für Deutschland gibt es kein Monitoring, welche RFID-Tags in welchen Stückzahlen und Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Grundsätzlich erfolgt das Monitoring von Technologie- und Marktentwicklungen meist aus betriebs- und volkswirtschaftlichem Interesse. Aus Sicht des Umweltschutzes ist eine Integration in bestehende Monitoring-Aktivitäten zu prüfen⁵⁶, wobei sich insbesondere die Frage nach der Erhebung stofflicher Parameter stellt.

Das Monitoring der Technologie- und Marktentwicklung von RFID-Tags wird sowohl von Seiten des BITKOM, als auch von Seiten von Recyclingverbänden (u.a.

⁵⁶ Für die Adaption von RFID in der unternehmerischen Praxis gibt es zwar ein Monitoring auf europäischer Ebene (E-Business Watch 2007), die erhobenen Parameter sind allerdings nicht geeignet für die Behandlung stofflicher Fragestellungen.

HVG/DGG, BVSE) für sinnvoll erachtet. Das im F+E-Vorhaben gewählte Vorgehen mit der Formulierung verschiedener Zukunftsszenarien und der Stakeholdereinbindung als Frühwarnsystem wurde von den Teilnehmer/-innen am Fachgespräch ausdrücklich begrüßt.

6.1.2 Forschung und Entwicklung

Im Laufe des F+E-Vorhabens sind zahlreiche Wissensdefizite zu Tage gekommen. Der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf kann grob in drei Bereiche eingeteilt werden: praktische Erprobung, ganzheitliche Bewertung und innovatives Tag-Design.

Praktischer Erprobungsbedarf besteht insbesondere in der vertieften Analyse der Wechselwirkungen zwischen Detektionsverfahren, Aufbereitungs- und Verwertungsprozessen einerseits und der Beschaffenheit von RFID-Tags und ihrer Aufbringungsart andererseits. Nur durch Feldversuche in Zusammenarbeit mit den betroffenen Akteuren können die Auswirkungen des Eintrags von RFID-Tags in die Entsorgung zweifelsfrei geklärt werden:

- ▶ Im PPK-Verpackungsbereich gibt es keine Druckfarbenentfernung wie bei grafischen Papieren; d.h. wenn RFID-Tags in Zukunft inline auf die Verpackung gedruckt werden, dann gibt es keine Erfahrungen zum Verbleib der Metalle.
- ▶ Im Glasrecycling ist zu testen, wie sich das massenhafte Bekleben von Glasverpackungen mit RFID-Tags quantitativ auf den nicht rezyklierten Glasausschuss auswirkt.
- ▶ Beim Mono-Kunststoffrecycling, insbesondere beim PET-Recycling, sind praktische Versuche zu den Auswirkungen des Fremdpolymer-, Metall- und Klebstoffeintrags durch RFID-Tags in das Rezyklat durchzuführen.
- ▶ Brandversuche könnten Aufschluss über die Auswirkungen von RFID-Tags in thermischen Prozessen liefern. Diese Versuche mit repräsentativen RFID-Tags sollten die Realbedingungen⁵⁷ in thermischer Verwertung von Ersatzbrennstoffen und in der MVA simulieren.
- ▶ Weiterer praktischer Erprobungsbedarf besteht im Falle des Verbleibs von Metallen in der Schlacke hinsichtlich der Verwertbarkeit der Schlacke und langfristig

⁵⁷ Temperatur, Verweilzeit, Mitverbrennung, Scherkräfte, ...

auch bei Verfahren zur Rückgewinnung von fein verteilten Wertstoffen aus Schlacke (z.B. Silber)⁵⁸.

Die praktische Erprobung des Einflusses von RFID-Tags in Aufbereitungsverfahren sollte realistische Szenarien des RFID-Eintrags unter Einbeziehung von Wirtschaftlichkeitsaspekten aufgreifen.

Das F+E-Vorhaben fokussiert auf mögliche Auswirkungen eines massenhaften Eintrags von passiven RFID-Tags in die Abfallentsorgungssysteme. Im Sinne einer ganzheitlicheren Bewertung sehen wir folgenden zusätzlichen Forschungsbedarf:

- ▶ Bei einem massenhaften Einsatz von RFID-Tags auf Textilien sind auch die möglichen Auswirkungen auf die Abwasserentsorgungssysteme in Deutschland in Betracht zu ziehen. In textile Transponder kann man Silberfäden als Antennenmaterial einnähen. Auch aus hygienischen Gründen wird aufgrund seiner bioziden Wirkung zunehmend Silber (u.a. als Nanosilber) in Textilien eingesetzt.
- ▶ Ein weiterer, in diesem F+E-Vorhaben nicht behandelter Downstreamprozess sind Bioabfälle, die durch den Eintrag von RFID-Tags z.B. auf Eierkartons aber erst mittel- bis langfristig mit Metallen belastet werden könnten.
- ▶ Aktive und semi-passive RFID-Tags verfügen zusätzlich über eine Energiequelle und meist auch über andere Komponenten wie Sensoren. Sie werfen damit zusätzliche stoffliche Fragestellungen auf. Die Auswirkungen alternativer Materialien (Lötverbindungen, Tantal, Lithium, Spezialpolymere, etc.) in der Abfallentsorgung konnten in diesem Vorhaben nur grob charakterisiert werden.
- ▶ Es sind keine Ökobilanzen für die Anwendung von RFID-Systemen bekannt. Dazu wäre auch die summengleiche Prozessbilanzierung, einschließlich von Transferkoeffizienten und Verteilungsfunktionen der RFID-Materialien, erforderlich. Im Sinne einer ganzheitlichen Umweltbewertung von RFID-Tags sind auch die indirekten Umwelteffekte durch die RFID-Anwendung (z.B. effizientere Logistik) einzubeziehen.

Der zukünftige Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung und die Umwelt kann durch das Design der RFID-Tags wesentlich beeinflusst werden. Prioritärer Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der Gestaltung der RFID-Tags selbst und ihrer Separierbarkeit vom Objekt:

⁵⁸ Die Extrahierbarkeit hängt u.a. von der Schlackeabkühlung und -alterung sowie von der Stückigkeit des RFID-Metallinhalts bzw. Agglomeration ab. Ziel sollte die Erhöhung der Extraktionsraten und die Ausweitung auf weitere Wert- bzw. umweltschädliche Stoffe sein.

- ▶ Die Entwicklung von alternativen Antennenkonzepten sollte neben funktionellen und ökonomischen Faktoren zum Ziel haben, den aus Ressourcensicht kritischen Silberbedarf für gedruckte Antennen zu minimieren oder zu ersetzen, sowie die aus Umweltsicht teilweise kritischen Antennenmaterialien Aluminium und Kupfer von speziellen Applikationen fern zu halten.
- ▶ Die konstruktiven Möglichkeiten zur Separation der RFID-Tags vom Objektstrom stehen noch ganz am Anfang. Sie sind weiter auszuloten und in die Praxis umzusetzen. Tabelle 6-1 illustriert, wie eine solche F+E-Roadmap zur Aufbringung von RFID-Tags auf Objekte aus unserer Sicht aussehen könnte.

Tabelle 6-1: Mögliche Gestaltungsziele der zukünftigen Aufbringung von RFID auf Objekte

Option	Erläuterung	Marktreife
spezielle Klebstoffe für Smart Label	starke Anhaftung, aber verfahrenstechnische Abtrennung	2007-2012
feste werkstoffliche Integration	nur bei Verwendung unkritischer Stoffe, z.B. Inmould eines RFID-Inlays oder textile Transponder	2007-2012
innovative konstruktive Lösungen	Erhöhung der Separierbarkeit durch Integration in bestimmte Komponenten (Deckel, Banderolen, etc.)	2007-2012
werkstoffliche Anpassung des Tags an das Objekt	z.B. Aluminium-Antenne auf Aluminium(verbund)-Verpackungen wie Tetrapack für Milch	2012-2017
werkstoffliche Anpassung der Objekte an den Tag	z.B. Umhüllung von Verpackungen mit zusätzlichen Packstoffen wie Metallen oder leitfähigen Kunststoffen	2012-2017
Direktdruck	z.B. Druck auf die Verpackung wie eine Druckfarbe, kein Substrat und Klebstoff erforderlich	2017-2022

Quelle: Bewertungen des IZT

Die Verankerung solcher F+E-Aktivitäten wird in Kapitel 6.2 thematisiert.

6.1.3 Separierung der RFID-Tags

Grundsätzlich können die Einträge von RFID-Tags in das Recycling durch verbesserte Separierbarkeit minimiert und durch massenstromtaugliche Gestaltung der RFID-Tags entproblematisiert werden. Die verbesserte Separierbarkeit ist meist eine Anforderung mit geringerer Eingriffstiefe als die massenstromtaugliche Gestaltung.

Die Getrennthaltung der RFID-Tags vom restlichen Objekt- oder Stoffstrom kann an einigen Stellen mit vermutlich geringem Aufwand erfolgen, in anderen Bereichen ist dies sehr aufwändig. Aus dem F+E-Vorhaben ergibt sich folgende Hierarchie:

- ▶ Bei einigen quasi-offenen RFID-Tag Anwendungen mit klar lokalisierter Anfallstelle, wie z.B. Smart Cards, Smart Tickets im ÖPNV und RFID-Tags für die Fluggepäcklogistik, ist darauf hinzuwirken, dass separate Sammelsysteme geschaffen werden.
- ▶ Konstruktive Lösungen wie die Integration des Tags in den Deckel von Kunststoff- oder Glasflaschen (z.B. Smart Corque, Weinkapsel), in die Banderole oder in andere separierbare Teile von Verkaufsverpackungen sind zu bevorzugen, wenn separate Sammelsysteme für RFID-Tags nicht möglich sind.
- ▶ Leicht lösliche Klebstoffe für Tags verbessern die Separierbarkeit und eignen sich für die Aufbringung auf Kunststoff-, Weißblech-, Aluminium- und Glasverpackungen; der Abtrennungsprozess wird dadurch vereinfacht und einer Qualitätsverschlechterung wird vorgebeugt.
- ▶ Insbesondere bei Inmould von RFID-Tags in Kunststoffe ist die Separierung erheblich erschwert. Eine Materialzusammensetzung von RFID-Tags, die die spektroskopische Detektierbarkeit in der LVP-Sortierung begünstigt, könnte für die Ausscheidung von Tag-Bestandteilen aus den Flakes sortenreiner Kunststoffe grundsätzlich von Vorteil sein.

Realistische Möglichkeiten zur partiellen Rückgewinnung der in RFID-Tags enthaltenen Metalle bestehen nur, wenn durch weiter stark steigende Metallpreise die Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Ansonsten sind die metallischen Wertstoffe durch Dissipation verloren.

6.1.4 Massenstromtaugliches Design

Die zielsicherste Maßnahme für eine – aus Sicht des Recyclingprozesses – Best Case Situation wäre ein massenstromtaugliches Design. Wie unter den Bedingungen des Worst Case Eintrags von RFID-Tags in das Recycling beschrieben (Kapitel 4.3.1), lassen sich ebenso Bedingungen formulieren, unter denen die Recyclingprozesse nahezu überhaupt nicht von schädlichen Stoffeinträgen berührt werden. Der Best Case kann beschrieben werden als das Ausschließen der stofflichen Brennpunkte, zum anderen aber auch als das aktive Fördern stofflich konsistenter Einträge.

Aus heutiger Sicht sollten folgende stoffliche Brennpunkte vordringlich entschärft werden:

- ▶ Aluminium auf Objekten aus Glas,
- ▶ Kupfer auf Objekten aus Aluminium und

- ▶ Substrat-Polymere, die sich von den Polymeren des etikettierten Kunststoff-Objekts in ihrer Dichte nur wenig unterscheiden (erschwerter Dichtesortierung).

Zu Silizium-Mikrochips als störendem Eintrag ins Glasrecycling gibt es derzeit keine gangbare Alternative, da die Alternativen entweder unverhältnismäßig teuer sind (z.B. Galliumarsenid) oder sich noch im Entwicklungsstadium befinden (insb. Polymer-Mikrochips).

Positiv ausgedrückt sollten folgende Verwendungsmuster gefördert werden:

- ▶ Ein Smart Label auf einem Verbundkarton könnte beispielsweise mit einem RFID-Tag aus einem Massenkunststoffsubstrat und einer Aluminiumantenne versehen sein.
- ▶ Auch auf Aluminiumverpackungen wäre die Verwendung von Aluminiumantennen eine mögliche Verwendungsempfehlung.

Das Design der RFID-Tags, und damit auch die Wahl des Antennenmaterials, unterliegt jedoch vorwiegend funktionalen und ökonomischen Anforderungen. Zum Eintrag größerer Mengen an Silber in die Abfallentsorgung liegen zudem keine praktischen Erfahrungen vor, weshalb diese Empfehlungen nur vorläufigen Charakter haben können.

6.2 Adressaten

Derzeit gibt es keine explizite Adressierung des Eintrags von RFID-Tags in Siedlungsabfälle im umweltrechtlichen Regelwerk. Gemäß WEEE, Elektroaltgerätegesetz und einschlägiger Rechtsprechung gehören zwar die RFID-Lesegeräte zum Elektroschrott, nicht aber produktintegrierte RFID-Tags in Verpackungen oder Konsumgütern (außer EE-Geräte), da der Primärzweck auch der RFID-getagten Verpackung und des RFID-getagten Konsumgutes durch RFID-Tags nicht geändert wird.

Zur Umsetzung der im F+E-Vorhaben identifizierten vorrangigen Aktivitäten müssen die geeigneten Adressaten identifiziert werden. Gegenüber den Einzeladressaten, wie Staat, Unternehmen und ihren Verbänden, FuE-Einrichtungen, sind insbesondere Multi-Stakeholder-Verfahren vorrangig auszusetzen. Anstrebenswert ist eine Einbettung der vorgeschlagenen Aktivität in möglichst hochwertige und effiziente Aktivitäten, die bereits laufen.

Besonders elaboriert ist der Multi-Stakeholder-Ansatz in der ISO/IEC-Norm TR 24729-2:2007 'Recycling and RFID-Tags'. Auch die staatlichen Aktivitäten im Bereich der Forschungsförderung und des Umweltschutzes bieten gute Anknüpfungsmöglichkeiten,

wohingegen sich die Verankerung eines institutionalisierten Monitoring derzeit noch nicht abzeichnet.

6.2.1 Multi-Stakeholder-Ansatz

Für die Behandlung möglicher zukünftiger Probleme durch den Eintrag von RFID-Tags in das Recycling ist ein Handlungsrahmen zur punktuellen Problemminimierung geschaffen worden. Das Technische Komitee ISO/IEC JTC 1, 'Information technology, Subcommittee SC 31, Automatic identification and data capture techniques' schlägt in seinem Technischen Bericht ISO/IEC TR 24729-2:2007 folgendes Vorgehen für eine Zusammenarbeit mit den relevanten Fachverbänden vor:

1. Theoretische Beurteilung, ob der RFID-Input bestehende Recyclingprozesse beeinträchtigen wird.
2. Durchführung von Pilotversuchen, mit denen überprüft wird, ob die bestehenden Prozesse ausreichen oder ob vorgeschlagene Prozessänderungen für bestehende RFID-Tags genügen.
3. Entwurf von Richtlinien, welche durch die RFID-Industrie und die Abfallwirtschaft verwendet werden können. Vorlegen der Richtlinien an sachkundige Dritte wie z.B. Universitäten mit Sachverstand für den betreffenden Abfallstrom.
4. Vorlegen der durch einen Dritten bereinigten Richtlinien an nationale oder regionale Umweltbehörden zur Freigabe.
5. Veröffentlichung von Richtlinien an die Fachverbände und die RFID-Tagging Geschäftswelt, welche den Nutzen von RFID maximieren und negative Auswirkungen auf das Recycling minimieren.
6. Dafür sorgen, dass entweder die RFID-Fachverbände, AIM Global oder EPC Global bestätigen, dass einzelne RFID-Tags die Richtlinien erfüllen (Konformitätserklärung).

Darüber hinaus sollten bei einem Erstkontakt zwischen RFID-Industrie und Entsorgungswirtschaft Angaben zu Mengen und der Bestandteilen der RFID-Tags übermittelt werden.

Dieses F+E-Vorhaben versteht seinen Beitrag vor allem darin, durch Szenarien und Modelle zu den theoretischen Abschätzungen und durch die Erhebung und Bewertung potenzieller Recyclingprobleme zur Konkretisierung der Problemstellungen gemäß ISO/IEC beizutragen. Das ISO/IEC-Verfahren sieht u.a. auch konkrete Tests mit RFID-Tags in Recyclingprozessen vor. Solche Feldversuche können auch Erkenntnisse über die Wirksamkeit vorbeugender Gegenmaßnahmen liefern. In den Interviews mit den

Experten/-innen wurde deutlich, dass auch an der Stufe 2, der Durchführung von Pilotversuchen, teilweise starkes Interesse besteht⁵⁹.

Mögliche Inhalte eines solcher Richtlinien wären z.B. klar geregelte Informationsflüsse zwischen RFID-Industrie und Entsorgungswirtschaft oder spezifische Ergänzungen der Annahmekriterien für Sekundärrohstoffe, differenziert nach Fraktion und Verfahren. Sie müssten jedoch Bestandteil eines Maßnahmenkatalogs sein, der auf die Optimierung des Gesamtsystems abzielt. Eine Schwierigkeit bei der Umsetzung solcher Richtlinien dürfte das Vermeiden von wettbewerbsverzerrenden Diskriminierungen zwischen einzelnen Packstoffen sein⁶⁰.

Dieses Vorgehen wurde anlässlich der durchgeführten Interviews mit Vertreter/-innen aus der RFID-Branche und der deutschen Entsorgungsbranche diskutiert. Alle einschlägigen Sekundärrohstoffverbände sind bereit, an einem Verfahren gemäß *ISO/IEC TR24729-2 Recycling of RFID-Tags* mitzuwirken, darunter⁶¹

- ▶ Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft (BDE),
- ▶ Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (BVSE),
- ▶ Deutsche Gesellschaft für Kunststoff-Recycling mbH (DKR),
- ▶ Verband der Aluminiumrecycling-Industrie (VAR),
- ▶ Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V. (HVG) und Deutsche Glastechnische Gesellschaft (DGG),
- ▶ Süddeutsche Altglas-Rohstoff GmbH,
- ▶ Gesamtverband Deutscher Papierfabriken (VDP),
- ▶ Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD) und
- ▶ Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA).

Gleiches gilt für den IKT-Branchenverband BITKOM mit seinem Arbeitskreis RFID.

Das Interesse dieser Akteure ist jedoch teilweise an Bedingungen geknüpft, insbesondere die folgenden:

⁵⁹ u.a. UPM Raflatac, Glasrecycler

⁶⁰ Z.B. könnten die Anforderungen an das Tagging von Glas- oder PET-Flaschen so formuliert werden, dass eine der beiden Verpackungen einen Wettbewerbsvorteil erzielen würde.

⁶¹ Zusätzlich auch einzelne Firmen wie die Cleanaway PET International GmbH und Lobbe Entsorgung GmbH.

- ▶ Die zu diskutierenden Probleme bezüglich der Prozesse oder Rezyklate müssen vorgängig klar definiert worden sein;
- ▶ Der Aufwand für die Mitarbeiter muss sich bei allfälligen Versuchen in Grenzen halten;
- ▶ Die Initiative für die Mitarbeit muss von den Verbandsmitgliedern kommen; eine Mitarbeit des Verbandsvorstandes ist nicht möglich;
- ▶ Es muss gewährleistet sein, dass die von der Arbeitsgruppe verabschiedeten Forderungen effizient umgesetzt werden.

Hauptkritikpunkt einiger kontaktierter Verbände an der ISO/IEC-Norm ist der hohe Aufwand, insbesondere durch die Gremienarbeit und – laut BITKOM – die unter Stufe 6 vorgesehene Konformitätserklärung.

BITKOM schlägt vor, wie beim Erstkontakt in der ISO/IEC-Norm vorgesehen, die Informationen über Mengen und Bestandteile der RFID-Tags den Recyclingbetrieben zur Verfügung zu stellen und darüber hinaus eine Best-Practice-Sammlung für die Hersteller zu erarbeiten.

Die Verbände aus der Entsorgungswirtschaft sehen ihre Rolle vordringlich in der Verbreitung von Informationen und auch der Vermittlung von Kontakten zu Herstellern, die Sekundärrohstoffe einsetzen.

Insgesamt gesehen schätzen wir die Chancen zumindest für einen abgespeckten Multi-Stakeholderansatz für sehr gut ein. Eine solche Zusammenarbeit zwischen Siedlungsabfallwirtschaft und Industrie wäre beispielhaft, ggf. auch für weitere Themen.

6.2.2 Staatliche Einrichtungen

Angesichts des lediglich potenziell vorhandenen Handlungsdrucks setzten die staatlichen Organe aus gutem Grunde auf weiche Maßnahmen und die Selbstregulierung der Marktteilnehmer.

Da die Umweltaspekte von RFID-Tags sehr stark auch technische, ökonomische und soziale Aspekte der Technologieentwicklung berühren, empfehlen wir, die Umweltaspekte zu bündeln und so weit wie möglich in übergeordnete F+E-Roadmaps zu integrieren⁶².

⁶² Ein geeigneter Adressat könnte die European Platform on Smart Object Systems (EPoSS), oder aber auch die International Electronics Manufacturers Industry (iNEMI) sein.

Die Forschungsförderung zu RFID ist in Deutschland vor allem im BMBF angesiedelt. Im Programm Mikrosystemtechnik, das noch bis 2009 läuft, werden auch F+E-Vorhaben zu RFID gefördert. Aus Sicht dieses F+E-Vorhabens sollte geprüft werden, inwiefern die Umweltaspekte in die Forschungsförderung integriert werden können. Die Fortführung des Programms für den Zeitraum von 2010-2014 bietet ggf. die Möglichkeit Umweltaspekte von RFID-Tags über Begleitprojekte und Bewilligungsaufgaben zu verankern.

Das Umweltbundesamt hat mit der Förderung dieses Vorhabens im Rahmen des UFOPLANs 2007 einen ersten Aufschlag zur turnusmäßigen Evaluierung des Einflusses von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung gemacht. Vorbehaltlich weiterer Prüfungen und Abstimmungen mit dem BMU empfehlen wir, die Thematik ggf. um das Jahr 2010 in modifizierter Form neu zu bewerten.

Angesichts des geringen akuten Handlungsdrucks wären Verwendungsbeschränkungen unangemessen. Sie sind perspektivisch nur in Erwägung zu ziehen, wenn die Feinsteuerung der Marktteilnehmer versagt und die Entsorgungssysteme akut gefährdet wären, was aber derzeit und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in naher Zukunft nicht der Fall ist. Verwendungsbeschränkungen scheinen aus heutiger Sicht nur dann prüfenswert zu sein, wenn es die Stakeholder aus der Entsorgungswirtschaft selbst für notwendig halten und keine Maßnahmen mit geringerer Eingriffstiefe zur Verfügung stehen.

6.3 Fazit

Grundsätzlich ist sowohl in der RFID-Branche, als auch in der Entsorgungsbranche Bereitschaft vorhanden, potenzielle Probleme durch RFID-Tags im Recycling in einem kooperativen Verfahren zu entschärfen. Etwaige Maßnahmen fallen deshalb derzeit in ein günstiges Zeitfenster.

Die Verbände sehen ihre Rolle vor allem in der Verbreitung von Informationen und der Sensibilisierung ihrer Mitgliedsfirmen. Es ist auch Bereitschaft zur Übernahme klar definierter Aufgaben, u.a. im Rahmen eines Monitorings, vorhanden. Unklar ist derzeit allerdings die Initiative und Organisation des Hersteller-, Anwender-, Entwickler- und Entsorger-Dialogs. Ggf. sind hier auch europäische Lösungen zu suchen.

7 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der rasant zunehmenden Verbreitung von Anwendungen der Radio Frequency Identification (RFID) untersucht das Forschungsprojekt mögliche zukünftige Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung. Das Vorhaben bezieht sich auf Deutschland und hat einen Zeithorizont von 2022.

Das Projekt integriert als Methodologie u.a. Methoden der Dokumentenanalyse, Experten/-inneninterviews, Szenario-Methodik und Stoffstrommodellierung. Die wesentlichen Stakeholder aus Politik, Forschung, Industrie, Verbänden und Sekundärrohstoffwirtschaft sind in das F+E-Vorhaben eingebunden worden, um die Befunde zu bewerten und geeignete Maßnahmen vor allem gemäß des Vorsorgeprinzips vorzuschlagen.

Der gegenwärtige Einsatz von RFID-Tags stellt die derzeitigen Entsorgungssysteme für Siedlungsabfall zwar vor keine nennenswerten Herausforderungen. Die dynamische Entwicklung der RFID-Märkte kann aber die Entsorgungssysteme in Zukunft vor Probleme stellen, wenn nicht vorsorgend gehandelt wird.

Insgesamt entscheidet das Zusammenspiel von RFID-Tags, Verpackung/Objekt und Entsorgungsprozessen über die Auswirkungen der RFID-Technologie auf das Entsorgungssystem. Grundsätzlich ist jede Verunreinigung im Recyclingprozess und –produkt auch durch RFID-Tags unerwünscht.

Potenzielle Probleme im Glas-, Papier/Pappe/Karton- und Leichtverpackungsrecycling können durch massenstromtaugliches Design der RFID-Tags und Maßnahmen zur Separierung wirksam entschärft werden. Die teilweise unsicheren Befunde legen ein Monitoring der Thematik, vertiefende und weiter gehende Forschung und insbesondere praktische Erprobung nahe.

8 Referenzen

- AIM 2005: Association for Automatic Identification and Mobility (Rich Vossel): RFID Experts Group. Presentation at eWaste: Environmental & Recycling Issues 27 October 2005.
- BIEK 2007: KEP-Studie 2007. Untersuchung für den Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V.
- BMU 2007: Statistiken zur Abfallwirtschaft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2007
- BMVBS 2008: Verkehr in Zahlen 2007/2008. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung. 2008
- Bockmühl, S. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn S. Bockmühl von Cleanaway PET international, 26. März 2008
- Boin, U. 2000: Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC – Richtlinie, Wien 2000
- Bridge 2007: LogicaCMG und GS1: European Passive Smart Label Market Sizing 2007-2022. Bridge Project:
- British Glass 2005: The British Glass: RFID Tags Present Challenge to Glass Industry; www.britglass.org.uk, Abruf: 27.8.07
- Bundesnetzagentur 2007: Jahresbericht 2007. Post.
- BV Glas 2008: Fachvereinigung Behälterglasindustrie e.V., Düsseldorf, <http://www.glasaktuell.de>, Abruf am 18. September 2008
- CE RFID 2007: Coordinating European Efforts for Promotion the European RFID Value Chain. CE RFID: RFID Reference Model. Version 2007-2-1 as of 01.10.2007
- CEPI 2005: Pira International for CEPI : Possible Issues Surrounding the Recycling of Boxes with RFID Tags. Confederation of European paper Industries, London, December 2005
- Christiani, J. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. J. Christiani von der Ingenieurgesellschaft [http](http://www.ingenieurgesellschaft.de), 15. August 2008
- Collins, J. 2008: Wine Bottles Get Corked With RFID. <http://www.rfidjournal.com/article/articleview/2117/1/1>, Abruf am 19. Mai 2008

- DIN EN 13920:2003: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Schrott: Berlin, 2003
- Doka, G. 2007: Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. ecoinvent report No. 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Dezember 2007
- Domininghaus, H.; et. al. 2008: Kunststoffe. S.850 – 852, Berlin 2008
- E-Business Watch 2007: RFID adoption. table Report No. 06-2007. European Commission, DG Enterprise & Industry, November 2007
- Elz, H. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. H. Elz vom Deutschen Asphaltverband, 5. August 2008
- EMPA, IZT et al. 2003: Hilty, L., Behrendt, S. et al.: Das Vorsorgeprinzip in der Informationsgesellschaft – Auswirkungen des Pervasive Computing auf Gesundheit und Umwelt. TA Swiss 46/2003
- EN 643:2001: Papier und Pappe - Europäische Liste der Standardsorten für Altpapier und Pappe; Deutsche Fassung EN 643:2001
- EPCglobal 2008: Elektronischer Product Code Global: EPCglobal Spezifikationen. Download unter http://www.gs1-germany.de/internet/content/produkte/epcglobal/downloads__service/downloads/
- EPoSS 2007: European Technology Platform on Smart Systems Integration: Strategic Research Agenda. Version 1.3, November 30, 2007
- Erdmann, L.; Hilty, L.: Zwischenbericht zum F+E-Vorhaben „Einfluss von RFID-Chips auf die Abfallentsorgung“. Gefördert vom Umweltbundesamt, Berlin 2008
- EU 94/62/EC 20.12.994: Directive on packaging and packaging waste, 31994L0062, 1994. Available at: [http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber &lg=en & type_doc=Directive & an_doc=1994 & nu_doc=62](http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=en&type_doc=Directive&an_doc=1994&nu_doc=62); accessed April 21, 2005.
- FhG-ISI, IZT 2008: Rohstoffbedarf durch Zukunftstechnologien. Im Auftrag des BMWi. Abschlussbericht, Berlin 2008 (im Erscheinen)
- FhG-IZM et al. 2006: Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration Berlin, Hueck-Foils, Motorola & Zeiler: Analysis Methods and First Results of Si-based Transponders. PolyApply IST-IP-507143, WP D5.1.1 final.
- Finkenzeller 2006: Finkenzeller, Klaus: RFID Handbuch. Hanser, 4. Auflage, 2006

- FKN 2008: Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V., Wiesbaden, <http://www.getraenkekarton.de>, Abruf am 25. März 2008
- Flamme, S. 2002: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Wuppertal 2002
- Flamme, S. 2008: Persönliche Mitteilung von Frau Prof. Dr. S. Flamme von der Gütegemeinschaft für Sekundärbrennstoffe (BGS), 12. August 2008
- FLOG 2007: Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund: Auswirkung eines RFID-Masseneinsatzes auf Entsorgungs- und Recyclingsysteme. Gefördert durch BMBF. Dortmund 2007
- Freydl, D. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. D. Freydl von Binder + Co, 24. Juli 2008
- Friedl, C. 2007: Altpapier-Recycling kämpft zunehmend mit Schwierigkeiten: Kreislaufstörungen. Entsorga, Frankfurt 2007
- GGA 2002: Produktionsspezifikation für schmelzfertig aufbereitete Hohlgläser, Gesellschaft für Glasrecycling und Abfallvermeidung (GGA), Ravensburg 2002
- GGA 2003: Beprobungshandbuch für aufbereitete Scherben der Behälterglassammlung. S.20, Gesellschaft für Glasrecycling und Abfallvermeidung (GGA), Ravensburg 2003
- Godet 2001: Godet, M: Manuel de prospective stratégique, Tome 2. Dunod 2001 – Godet, M.: Creating Futures Szenarios Planning as a strategic Management Tool. Economica
- Grüner Punkt 2008: Produktspezifikationen Kunststoffverwertung: <http://www.gruenerpunkt.de/index.php?id=1766>, Abruf 26.März 2008
- GVM 2007: Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung: Entwicklung des Verpackungsverbrauchs 1991 bis 2005, 2006 Vorausschätzung. September 2007
- Helmigh 2008: Interview mit Herrn Martin Helmigh vom Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund am 31.1.2008
- Heyde, M. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. M. Heyde von der Deutschen Gesellschaft für Kunststoffrecycling mbH (DKR), 29. Februar 2008
- Höhne, D.; et al. 2005: Herstellung von Glaserzeugnissen aus industriellen Reststoffen. Freiberg 2005

- IDTechEX 2007 und 2008: IDTechEx: RFID Market projections 2007-2017 und 2008-2018. Download unter www.idtechex.com am 5.3.2008
- IFEU 2008: Fehrenbach, H. et al.: Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter Berücksichtigung der Klimarelevanz. Gefördert durch das Umweltbundesamt. IFEU. UBA-Texte 16/08 Heidelberg 2008
- iNEMI 2008: International Electronics Manufacturing Initiative: RFID Roadmap for Item-Level Tag. Draft. February 2008.
- Informationsforum RFID 2006: Informationsforum RFID: Basiswissen RFID. 2006
- IPPC 2000: Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Best Available Technique Reference Document on the Pulp and Paper Industry, July 2000.
- IPPC 2001: Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel mit ausgewählten Kapiteln in deutscher Übersetzung, Dezember 2001.
- IPTS 2004: Erdmann et al.: The future impact of ICTs on environmental sustainability. Hrsg.: Institute for Prospective Technology Studies. Sevilla 2004
- IPTS 2007: Institute for Prospective Technology Studies: RFID Technologies: Emerging Issues, Challenges and Policy Options. Sevilla 2007
- ISO/IEC TR 24729-2:2007E: Information Technology – Radio frequency identification for item management – Implementation guidelines – Part 2: Recycling and RFID tags. Technical report, First edition, Proof/epreuve
- ITE 2008: Eine Information aus dem Institut des Deutschen Textileinzelhandels. März 2008
- IZT 2004: Erdmann et al.: Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen. Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei. gefördert von der Volkswagen-Stiftung. IZT-Werkstattbericht Nr. 68, Berlin 2004
- IZT 2008: Kosow et al.: Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Gutachten im Auftrag des Deutschen Instituts für Entwicklungspolitik (DIE), Bonn (unveröffentlicht).

- IZT, EMPA 2008: Erdmann et al.: Zwischenbericht zum Vorhaben „Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung“. i.A. des Umweltbundesamtes, UFOPLAN 2007 FKZ 3707 33 302, Berlin 2008
- IZT, EMPA, BSI 2004: Oertel et al.: Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Eidgenössische Materialprüfungs- und -forschungsanstalt und Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Bonn 2004
- Japs 2007: Interview mit Herrn Japs vom Informationsforum RFID. 2007
- KEK 2005: Tageszeitungen. Daten zum Zeitungsmarkt insgesamt. www.kek-online.de
- Kern 2008: Interview mit Herrn Kern, Geschäftsführer von TBN Identifikation und Netzwerke GmbH 2008
- Kirchner, G. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. G. Kirchner vom Verband der Aluminiumrecycling-Industrie, 18. April 2008
- Kräuchi et al. 2005: Impacts of Pervasive Computing: are RFID-tags a Threat to Waste Management Processes. In: IEEE Technology & Society Magazine, Special Issue "Sustainable Pervasive Computing", 2005
- Kriebel 2008: Interview mit Herrn Kriebel, Projektkoordinator UHF-Sensor-Etikett der Firma KSW Microtec
- Krone, K. 2000: Aluminiumrecycling – Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung: Vereinigung Deutscher Schmelzhütten e.V., Düsseldorf 2000
- Kuhlmann 2008: Interview mit Herrn Dr. Kuhlmann von BITKOM, Arbeitskreis RFID 2008
- Langen, M. 2003: Qualitätsdifferenzierte Brennstoffherzeugung im mechanischen Teil MBA/MA-Anlagen, Ingenieurgesellschaft htp, Aachen 2003
- Leuning 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Leuning von der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV), 25. März 2008
- Manoiu, A. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn A. Manoiu von der Papiertechnischen Stiftung, 29. Mai 2008
- Marshall, M. 2005: RFID Tags Glass Melting Investigation. Glass Technology Services, Capeltown 2005
- Mildner 2008: Interview mit Herrn Mildner von PolyIC am 13.3.2008

- Müller, Nissen 2008: Interview mit Jutta Müller und Andreas Nissen vom Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration Berlin am 1.2.2008
- Netzwerk Lebenszyklusdaten 2007: Stand der Darstellung von Abfallverbrennung in Stoffstromanalysen. Projektbericht des Arbeitskreises End-of-Life im Deutschen Netzwerk Lebenszyklusdaten. Berlin, Kassel, Karlsruhe 2007
- Pfaff, D. 2001: Spuckstoffe aus der Papierindustrie – Mengen und Entsorgungsmöglichkeiten. München 2001
- Phono-News 2007: Musik – Motor für Milliarden. Phono-News 2007
- Plepla, K. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn K. Plepla von Nehlsen, 9.August 2008
- Puch, K. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn K. Puch von VGB-Powertech, 11. August 2008
- RAL-GZ 717: Recyclate aus Standardpolymeren. Berlin, 2005
- RAL-GZ 724: Sekundärbrennstoffe. Berlin, 2005
- Rehn, R. 2007: EBS als Alternative zur Verwertung von Mischabfällen. Entsorga 1-2/2007 S.17-19, Frankfurt 2007
- Reichenberger, H. 2008: Feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen. Müll und Abfall 9/2008 S.468-472, Berlin 2008
- Roger, U. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. U. Roger von der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie und Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, 3. April 2008
- Scheid 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Scheid von Aleris-Recycling, 27. März 2008
- Schneider 2008: Interview mit Herrn Dr. Schneider der fashionGroup im März 2008
- Schreiner Group 2007: Schreiner Group GmbH & Co. KG: „Inmold“ oder des Transponders neue Kleider. In: ISIS RFID Special Report 2007/2008
- Schüler 2007: Schüler, K.: Entwicklung des Verpackungsverbrauchs in Deutschland. Vortrag 2007
- Schüler 2008: Interview mit Herrn Schüler von der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung am 25.2.2008

- Schüler, K. 2007b: Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2005. Umweltbundesamt, Dessau 2007
- Schütze 2008: Interview mit Herrn Dr. Schütze von der Coca Cola Erfrischungsgetränke AG im März 2008
- Simon, H. 2008: Reststoff-Verwertung in der Papierindustrie: Gigantisches Effizienz-Potential. Entsorga 6/2008 S.19-22, Frankfurt 2008
- Souza, V. 1998: Concentration of metals in recycled papers. TAPPI Proceedings Recycling Symposium, New Orleans 1998
- Spohn, C. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn C. Spohn von der Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland, 10. April 2008
- StaBua 2008: Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2008
- Steiger 2008: Interview mit Herrn Steiger vom Science to Business Center Druckbare Elektronik der Firma evonik am 13.3.2008
- Stosch 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Stosch von der Deutschen Gesellschaft für Weißblechrecycling (DWR), 27. März 2008
- Team Grüner Punkt 2008: Recycling von Glas, <http://www.asfh-berlin.de/uploads/media/glasrecycling.pdf>, Abruf 27.3.2008
- Thiel, R. 2008: Persönliche Mitteilung von Herrn Dr. R. Thiel von Verband Deutscher Papierfabriken, 25. Februar 2008
- UBA 2007: Schüler, K. (GVM) Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2005. Umweltbundesamt, UBA-Texte 35/07
- UBA, Ecologic 2005: Strategie für die Zukunft der Siedlungsabfallentsorgung. Kurzfassung zu FuE.-Vorhaben 201 32 324 im Rahmen des UFOPLANS 2003
- USGS 2008: Mineral Commodity Summaries 2008. U.S. Geological Survey. Washington 2008
- VDI/VDE 2007: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH: RFID: Potenziale für Deutschland. 2007

- VDP 2008: Kennzahlen deutscher Zellstoff- und Papierfabriken des VDP (Verband Deutscher Papierfabriken e.V.) http://www.vdp-online.de/zahlen_fakten.html, Ab-ruf 25.3.2008
- Vermesan 2008: Vermesan, O.: RFID Sensing and Interacting Technology Fusion. SINTEF. Presentation at Joint EC/EpoSS Expert Workshop 2008 Beyond RFID – The Internet of Things, Brüssel, 11.-12. Februar 2008
- Wäger et al. 2005: Wäger, P. et al 2005: Smart labels in municipal solid waste – a case for the Precautionary Principle? Environmental Impact Assessment Review 25 (2005) 567-586
- Zeiger, E. 2005: Glasrecycling mit Mogensen Sortier- und Siebtechnik, in: Aufberei-tungs Technik 46 (6), pp. 1-7

Anhang A: Liste der Interviewpartner/-innen

Tabelle Anhang A-1: Liste der Interviewpartner/-innen

Name	Institution	Datum	Schwerpunkt
Herr Dr. Reinhardt Thiel	Verband der Deutschen Papierfabriken (VDP) (Geschäftsführer)	25.2.2008	Recycling von PPK und Verbundkarton
Herr Dr. Michael Heyde	Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling mbH (DKR)	29.2.2008	Recycling von PET und anderen Kunststoffen
Herr Ulrich Leuning	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV)	25.3.2008	Recycling von Metallfraktionen
Herr Stephan Bockmühl	Cleanaway PET International GmbH	26.3.2008	Recycling von PET
Frau Ursula Stosch	Deutsche Gesellschaft Weißblechrecycling mbH (DWR)	27.3.2008	Recycling von Weißblech
Herr Daniel Rohring	Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen (ANS)	27.3.2008	Aufbereitung von Hausmüll/hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen
Herr Herbert Breese	Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM)	27.3.2008	Recycling von Weißblech
Herr Hans-Jörg Scheid	Aleris Recycling	27.3.2008	Recycling von Aluminium
Herr Guido Winsel	Gesamtverband Aluminiumindustrie (GDA)	27.3.2008	Recycling von Aluminium
Herr Dr. Ulrich Roger	Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) Deutsche Glastechnische Gesellschaft (DGG)	03.4.2008	Recycling von Glas
Frau Sandra Giern	Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft (BDE)	04.4.2008	Deutsches Entsorgungssystem Mechanisch-biologische Aufbereitung
Herr Carsten Spohn	Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD)	10.4.2008	Thermische Abfallbehandlung
Herr Dr. Günter Kirchner	Verband der Aluminiumrecycling-Industrie (VAR)	18.4.2008	Recycling von Aluminium

Herr Walter Gerhard	Gesellschaft für Glasrecycling und Abfallvermeidung (GGA)	28.5.2008	Recycling von Glas
Herr Adrian Manoiu	Papiertechnische Stiftung (PTS)	29.5.2008	Recycling von PPK und Verbundkarton
Herr Michael Kleene	Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel (FKN)	04.7.2008	Recycling von Verbundkarton
Herr Dr. Diego Freydl	Binder + Co	24.7.2008	Recyclingtechnologie von Glas, Papier und Kunststoff
Herr Dr. Thomas Probst	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (BVSE)	28.7.2008	Recycling von Kunststoffen Thermische Abfallbehandlung
Herr Heribert Streubel	Saint Gobain Oberland Süddeutsche Altglas Rohstoff (SAR)	29.7.2008	Recycling von Glas
Herr Dr. Heinrich Elz	Deutscher Asphaltverband	05.8.2008	Verwertung von Sekundärbaustoffe
Herr Ingo Schulz	Bundesgütegemeinschaft Recycling Baustoffe	06.8.2008	Verwertung von Sekundärbaustoffe
Herr Karl-Heinz Plepla	Nehlsen	09.8.2008	Thermische Abfallbehandlung
Herr Karl-Heinz Puch	VGB Powertech	11.8.2008	Thermische Abfallbehandlung
Frau Prof. Sabine Flamme	Gütegemeinschaft Sekundärberennstoffe und Recyclingholz (BGS)	12.8.2008	Thermische Abfallbehandlung
Herr Jochen Ebbing	Lobbe	12.8.2008	Recycling von Kunststoffen Thermische Abfallbehandlung
Herr Dr. Joachim Christiani	htp	15.8.2008	Recycling von Kunststoffen Thermische Abfallbehandlung
Frau Jutta Müller, Herr Andreas Nissen	Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM	1.2.2008	Zusammensetzung RFID Tags (PolyApply 2007)
Herr Martin Helmigh	Universität Dortmund Fachgebiet Logistik	30.1.2008	Zusammensetzung und EoL von RFID
Herr Kurt Schüler	Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung	25.2.2008	Verpackungstrends und RFID
Frau Eike Langkabel	Fraunhofer-Einrichtung Polymermaterialien und Composite PYCO	13.2.2008	Klebstoffe

Herr Simon Japs	Informationsforum RFID e.V.	4.12.2007	RFID-Einführung in Deutschland, Aktivierung von Verbänden
Herr Dr. Kai Kuhlmann	BITKOM	27.2.2008	RFID-Einführung in Deutschland, Aktivierung von Verbänden
Herr Dr. Jürgen Steiger	Evonik	13.3.2008	Gedruckte Antennen
Herr Wolfgang Mildner	PolyIC GmbH & Co. KG (Geschäftsführer)	13.3.2008	RFID-Tags auf Polymerbasis Stellungnahme zu ISO/IEC 27729-2 wird nachgereicht
Herr Peter Kern	TBN GmbH (Geschäftsführer)	14.3.2008	Mount-on-Metall, Textile Transponder
Herr Dejan Stojanovic	etifix Etikettiersysteme	11.3.2008	Klebstoffe
Herr Dr. Andreas Schütze	Coca Cola Erfrischungsgetränke GmbH (Dep. Supply Chain Innovation)	13.3.2008	Getränkeindustrie (Fallstudie)
Herr Dr. Andreas Schneider	Gesellschaft für Consulting und Synergie GmbH	18.3.2008	Bekleidungsindustrie (Fallstudie)
Frau Anu Launiainen	UPM Raflatac (Verantwortlich für Recyclingfragen)	4.4.2008	Validierung der Aussagen zu Antennen Stellungnahme zu ISO/IEC TR 24729-2:2007
Herr Jesper Holmberg	Hitachi Europe Ltd. (EU Affairs Manager)	13.4.2008	Stellungnahme zur RFID-Technologie
Herr Dr. Frank Kriebel	KSW Microtec (Projektkoordinator UHF-Sensor-Etikett (BMBF 16SV2065))	2.4.2008	UHF semi-passive Label mit Temperatur-Sensoren in der Kühlkette

Anhang B: Liste der Teilnehmer/-innen am Fachgespräch

Das Fachgespräch zum F+E-Vorhaben fand am 16. September 2008 im Umweltbundesamt in Berlin statt.

Tabelle Anhang B-1: Teilnehmer/-innen am Fachgespräch

Name	Institution
Herr Siegfried Behrendt	IZT
Herr Lorenz Erdmann	IZT
Herr Prof. Lorenz Hilty	Empa
Herr Tobias Welz	Empa
Herr Dr. Kai Kuhlmann	BITKOM
Herr Dr. Frank Gillert	Ubiconsult / BITKOM
Herr Dr. Thomas Probst	BVSE
Frau Sandra Giern	BDE
Herr Dr. Ulrich Roger	HVG-DGG
Herr Heribert Streubel	Süddeutsche Altglas Rohstoff GmbH
Herr Adrian Manoiu	Papiertechnische Stiftung PTS
Herr Jochen Ebbing	Lobbe Entsorgung GmbH
Herr Hartmut Strese	VDI/VDE Innovation+Technik GmbH
Herr Dr. Hermann Kessler	UBA III 3.2 Fachgebietsleitung
Frau Susann Krause	UBA III 3.2
Herr Ulrich Gromke	UBA III 3.2
Frau Uta Rathmann	UBA III 3.2
Herr Gerhard Kotschik	UBA III 2.4
Herr Ralf Menzel	UBA III 3.3
Frau Christiane Schnepel	UBA III 1

Anhang C: Annahmen für die Quantifizierung der Stoffströme

Marktentwicklung

Tabelle Anhang C-1: Referenzprojektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 im Referenz-Szenario und im Szenario Selbstregulierung [Mio. St.]

Anwendung	2007	2012	2017	2022
Distribution				
Pakete	5	100	250	1.000
Briefe und sonstige Post	0	0	900	3.000
Fluggepäck	1	10	60	120
Einwegverpackungen				
Großgewerbe	13,5	180	900	3.600
Lebensmittel PEV	0	180	1.800	10.000
Bedarfsgegenstände PEV	2,5	175	875	2.000
Medikamente PEV	1,5	60	400	1.500
Kleidung PEV	1	20	100	200
EE-Geräte PEV	1	20	100	200
CDs/DVDs PEV	0,5	10	50	100
Mehrwegsysteme				
Kühlkette	0	1	20	100
Großgewerbe (sonstige)	1,5	19	80	300
Büchereien	5	10	20	30
Archivierung	0,3	10	500	1.000
Konsumgüter				
Kleidung	0	10	50	200
EE-Geräte	0	10	50	200
CDs/DVDs	0	5	25	100
Personenbezogene Anwendungen				
Smart Cards	50	60	80	100
Smart Ticket Verkehr	0	10	60	600
Smart Ticket Freizeit	10	10	20	150
Gesamt	92,8	900	6.340	24.000

Quelle und Anmerkungen: Abschätzungen des IZT, basierend auf Bridge 2007 und IDTechEx 2007 und 2008

Tabelle Anhang C-2: Dynamische Projektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 im Push-Szenario [Mio. St.]

Anwendung	2007	2012	2017	2022
Distribution				
Pakete	5	250	1.000	2.000
Briefe und sonstige Post	0	900	3.000	10.000
Fluggepäck	1	60	120	150
Einwegverpackungen				
Großgewerbe	13,5	450	2.700	4.500
Lebensmittel PEV	0	500	5.000	50.000
Bedarfsgegenstände PEV	2,5	325	2.000	6.000
Medikamente PEV	1,5	200	800	4.000
Kleidung PEV	1	50	200	1.000
EE-Geräte PEV	1	50	200	1.000
CDs/DVDs PEV	0,5	25	100	500
Mehrwegsysteme				
Kühlkette	0	20	100	250
Großgewerbe (sonstige)	1,5	30	200	250
Büchereien	5	20	30	40
Archivierung	0,3	500	1.000	10.000
Konsumgüter				
Kleidung	0	20	200	500
EE-Geräte	0	20	200	500
CDs/DVDs	0	10	100	500
Personenbezogene Anwendungen				
Smart Cards	50	100	150	500
Smart Ticket Verkehr	0	400	2.500	4.000
Smart Ticket Freizeit	10	100	500	1.000
Gesamt	92,8	4.030	20.100	101.690

Quelle und Anmerkungen: Abschätzungen des IZT, basierend auf Bridge 2007 und IDTechEx 2007 und 2008

Tabelle Anhang C-3: Moderate Projektion der Stückzahlen passiver RFID-Tags in Deutschland von 2007 bis 2022 im Szenario Staatliche Regulierung [Mio. St.]

Anwendung	2007	2012	2017	2022
Distribution				
Pakete	5	10	50	500
Briefe und sonstige Post	0	0	50	1.000
Fluggepäck	1	2	20	50
Einwegverpackungen				
Großgewerbe	13,5	80	400	1.600
Lebensmittel PEV	0	50	500	5.000
Bedarfsgegenstände PEV	2,5	65	325	1.300
Medikamente PEV	1,5	3	50	500
Kleidung PEV	1	10	50	200
EE-Geräte PEV	1	10	50	200
CDs/DVDs PEV	0,5	5	25	100
Mehrwegsysteme				
Kühlkette	0	1	20	100
Großgewerbe (sonstige)	1,5	19	80	300
Büchereien	5	8	15	20
Archivierung	0,3	5	100	500
Konsumgüter				
Kleidung	0	4	20	80
EE-Geräte	0	4	20	80
CDs/DVDs	0	2	10	40
Personenbezogene Anwendungen				
Smart Cards	50	50	60	70
Smart Ticket Verkehr	0	0	0	0
Smart Ticket Freizeit	10	15	20	20
Gesamt	92,8	343	1.865	12.100

Quelle und Anmerkungen: Abschätzungen des IZT, basierend auf Bridge 2007 und IDTechEx 2007 und 2008

Tabelle Anhang C-4: Wiederverwendungsquote von Verpackungen im Großgewerbe von 2007 bis 2022 (als Kunststoffe)

Szenario	2007	2012	2017	2022
Referenz	10 %	10 %	10 %	10 %
Push	10 %	10 %	10 %	10 %
Staat	10 %	20 %	20 %	20 %
Selbstregulierung	10 %	10 %	10 %	10 %

Quelle und Anmerkungen: Annahmen des IZT, basierend auf Schüler 2008

Tabelle Anhang C-5: Stückzahlen an aktiven Tags für Kühlkettenmanagement von 2007 bis 2022 [Mio. St.]

Szenario	2007	2012	2017	2022
Referenz	0	1	20	100
Push	0	20	100	250
Staat	0	1	20	100
Selbstregulierung	0	1	20	100

Quelle: Abschätzungen des IZT, basierend auf CE RFID 2008

Stoffliche Zusammensetzung der RFID-Tags

Tabelle Anhang C-6: Anteile der Antennenmaterialien Aluminium, Kupfer und Silber von 2007 bis 2022 [Al-%/Cu-%/Ag-&]

Szenario	2007	2012	2017	2022
Referenz	40/50/10	40/40/20	40/30/30**	30/20/50
Push	40/50/10	20/30/50*	30/20/50**	60/20/20
Staat	40/50/10	50/30/20	70/20/10	80/10/10
Selbstregulierung	40/50/10	40/40/20	40/30/30**	30/20/50

Quelle und Anmerkungen: eigene Annahmen; im Push-Szenario erfolgt zunächst ein rascher Wechsel zu Silberantennen wegen kostengünstiger Inline-Produktion; um aber auf sehr geringe Kosten zu kommen muss auf Silber verzichtet werden, weshalb 2022 Aluminium wieder dominiert. * Materialverbrauchsanstieg um 20 % gegenüber ISO/IEC, ** Materialverbrauchsrückgang um 20 % gegenüber ISO/IEC

Tabelle Anhang C-7: Anteil an Polymer-Mikrochips an den gesamten Mikrochips von 2007 bis 2022

Szenario	2007	2012	2017	2022
Referenz	0 %	0 %	10 %	50 %
Push	0 %	10 %	50 %	90 %
Staat	0 %	0 %	0 %	0 %
Selbstregulierung	0 %	0 %	10 %	50 %

Quelle: Abschätzungen des IZT, basierend auf CE RFID 2008

Entsorgungssystem

Tabelle Anhang C-8: Separierquoten im Szenario Selbstregulierung von 2007 bis 2022

Separierungsmaßnahme für den RFID-Tags	2007	2012	2017	2022
Smart Ticket Getrenntsammlung (PPK-Recycling)	0 %	10 %	50 %	90 %
Ausschleusung im Glasrecycling	5 %	50 %	60 %	75 %
Spektroskopische Detektierbarkeit (LVP-Sortierung)	0 %	10 %	30 %	60 %

Quelle: Abschätzungen des IZT, basierend auf IZT, EMPA 2008

Tabelle Anhang C-9: Schlackeverwertung in der Extrembetrachtung von 2007 bis 2022

Schlackeverwertung	2007	2012	2017	2022
Behandelte Schlacke	50 %	70 %	80 %	90 %
Metall-Extraktionsrate aus RFID-Tags	0 %	20 %	30 %	50 %

Quelle: Abschätzungen des IZT, basierend auf IFEU 2008

Tabelle Anhang C-10: Allokation der RFID-Tags auf Verpackungen gemäß der Materialfraktionen

Fraktion	Anteil
Einwegverpackungen im Großgewerbe	
PPK	80,0 %
Kunststoffe	20,0 %
Einwegverpackungen privater Endverbraucher	
PPK	27,4 %
Kunststoffe	54,0 %
Flüssigkeitskarton	4,2 %
Glas	5,6 %
Weissblech	2,8 %
Aluminium	5,1 %
Sonstige	0,9 %

Quelle und Anmerkungen: eigene Abschätzungen basierend auf Schüler 2008

Tabelle Anhang C-11: Allokation der RFID-Tags auf Materialfraktionen in der LVP-Sortierung von Einwegverpackungen privater Endverbraucher

Fraktion	Anteil
Kunststoffe	77,3 %
Flüssigkeitskarton	6,0 %
Weissblech	4,0 %
Aluminium	7,3 %
Sonstige	5,3 %

Quelle und Anmerkungen: eigene Abschätzungen basierend auf Schüler 2008

Tabelle Anhang C-12: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im PPK- und Verbundkartonrecycling

Input	Output
Altpapier	0,815 in PPK-Rezyklat 0,185 in Reststoff zur thermischen Verwertung
RFID-Tags	0,02 in PPK-Rezyklat 0,98 in Reststoff zur thermischen Verwertung
Aluminium (RFID)	0,001 (von 0,02) in PPK-Rezyklat 0,001 (von 0,02) in Abwasser Rest in Reststoff zur thermischen Verwertung
Kupfer (RFID)	0,002 (von 0,02) in PPK-Rezyklat Rest in Reststoff zur thermischen Verwertung
Silber (RFID)	0,002 (von 0,02) in PPK-Rezyklat Rest in Reststoff zur thermischen Verwertung

Quelle und Anmerkungen: Annahmen des IZT, basierend auf Angaben der Empa aus Interviews

Tabelle Anhang C-13: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Glasrecycling

Input	Output
Altglas	0,99 in Glasrezyklat 0,005 in Reststoff zur thermischen Verwertung 0,005 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung
RFID-Tags	0,92 in Glasschmelze 0,03 in Reststoff zur thermischen Verwertung 0,05 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung
Aluminium (RFID)	0,10 (von 0,92) in Glasrezyklat 0,05 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung Rest in Reststoff zur thermischen Verwertung
Kupfer (RFID)	0,01 (von 0,92) in Glasrezyklat 0,05 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung Rest in Reststoff zur thermischen Verwertung
Silber (RFID)	0,01 (von 0,92) in Glasrezyklat 0,05 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung Rest in Reststoff zur thermischen Verwertung
Silizium (RFID)	0,92 in Glasrezyklat 0,03 in Reststoff zur thermischen Verwertung 0,05 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung

Quelle und Anmerkungen: Annahmen des IZT, basierend auf Angaben der Empa aus Interviews

Tabelle Anhang C-14: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Weissblechrecycling

Input	Output
Weissblech (EoL)	0,98 in Weissblechrezyklat 0,02 in Reststoff zur Verwertung
RFID-Tags	1,0 in Stahlschmelze
Kupfer (RFID)	1,0 in Stahl

Quelle und Anmerkungen: Annahmen des IZT, basierend auf Angaben der Empa aus Interviews

Tabelle Anhang C-15: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Aluminiumrecycling

Input	Output
Aluminium (EoL)	0,98 in Aluminiumrezyklat 0,02 in Reststoff zur Verwertung
RFID-Tags	1,0 in Aluminiumschmelze
Aluminium (RFID)	1,0 in Sekundäraluminium
Kupfer (RFID)	0,8 in Sekundäraluminium 0,2 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung
Silber (RFID)	0,5 in Sekundäraluminium 0,5 in Reststoff zur metallurgischen Verwertung
Silizium (RFID)	1,0 in Sekundäraluminium

Quelle und Anmerkungen: Annahmen des IZT, basierend auf Angaben der Empa aus Interviews

Tabelle Anhang C-16: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten im Monokunststoffrecycling

Input	Output
Altkunststoffe	1,0 in Mono-KS-Rezyklat
Aluminium (RFID)	0,001 in Mono-KS-Rezyklat 0,999 in Reststoff zur thermischen Verwertung
Kupfer (RFID)	0,001 in Mono-KS-Rezyklat 0,999 in Reststoff zur thermischen Verwertung
Silber (RFID)	0,001 in Mono-KS-Rezyklat 0,999 in Reststoff zur thermischen Verwertung
Kunststoffe, Summe (RFID)	0,03 in Mono-KS-Rezyklat 0,97 in Reststoff zur thermischen Verwertung

Quelle und Anmerkungen: Annahmen des IZT, basierend auf Angaben der Empa aus Interviews

Tabelle Anhang C-17: Verbleib der RFID-Tag-Komponenten in der Müllverbrennung

Input	Output
Restmüll in MVA und Sortierreste aus Verwertung	0,27 in Schlacke 0,03 in Filterstaub 0,7 in Emissionen
Aluminium (RFID)	0,85 in Schlacke 0,15 in Filterstaub
Kupfer (RFID)	0,80 in Schlacke 0,20 in Filterstaub
Silber (RFID)	0,62 in Schlacke 0,38 in Filterstaub

Quelle und Anmerkungen: Annahmen des IZT, basierend auf Doka 2007

Anhang D: Ergebnistabellen für Stoffströme 2007 und die vier Szenarios bis 2022

Im folgenden werden die Ergebnistabellen für die Ausgangslage 2007 und die vier Szenarios dargestellt. Zu ihrer Interpretation ist folgendes zu beachten:

- ▶ 'Rückfluss' auf der Input-Seite bedeutet Rückfluss aus dem Bestand, der sich aus dem vorherigen 'Bestandsaufbau' auf der Output-Seite errechnet.
- ▶ Die Summen von Input- und Output-Seite weichen geringfügig voneinander ab. Grund hierfür sind u.a. kleinere Rundungsfehler, die daher rühren, dass die Software Umberto mit kg als Basiseinheit rechnet und nicht mit Stückzahlen (d.h. es wurden manuell Massenanteile von Materialien pro Stück RFID-Tag eingegeben). Außerdem wurden die Rückflüsse aus dem Bestand zur Vereinfachung wie neue Tags gerechnet, obwohl sie sich als ältere Tags stofflich unterscheiden.
- ▶ Der Zusatz semi-passiver Tag umfasst eine Zink/Kohle-Batterie und einen Temperatursensor aus Silizium. Die Verwendung auf Mehrwegverpackungen führt zu einem Bestandsaufbau.
- ▶ Unter 'Emissionen' auf der Output-Seite finden sich 'Treibhausgasemissionen' der RFID-Tags und der Packstoffe für Smart Label, Smart Tickets und Smart Cards, die mit 'sonstige' des Entsorgungssystems kontrastiert werden. Bei letzteren wurde angesetzt, dass die organischen Bestandteile der Sekundärrohstoffe in Treibhausgasemissionen umgewandelt werden, sofern sie nicht werkstofflich recycelt werden. Es wurde hier keine Gewichtung nach Treibhausgaspotenzialen vorgenommen, da die Unsicherheit des Verbleibs von RFID-Bestandteilen in Verbrennungsprozessen und die geringe Mengenrelevanz dies als nicht angemessen erscheinen lassen.
- ▶ Bei Kunststoffen erfolgt eine Differenzierung nach thermischem bzw. rohstofflichem Recycling, Mono- und Mischkunststoffrecycling. Eine an für sich wünschenswerte Aufteilung nach Kunststoffsorten ist nicht gelungen, da uns die Stückzahlen der einzelnen Kunststoffsorten am Verpackungsmarkt nicht vorliegen und deshalb keine realistischen Annahmen zur volkswirtschaftlichen Aufteilung der RFID-Tags auf die einzelnen Kunststoffsorten möglich sind.

Die 'Sekundärrohstoffmengen' auf der Input- bzw. Outputseite sind ebenso wie 'Abfall und Reststoffe' auf der Input-Seite und 'sonstige' Emissionen des Systems und 'Straßenbaumaterial' auf der Output-Seite in allen Berechnungen gleich groß, da das Entsorgungssystem in allen Berechnungen nicht variiert wurde.

Ausgangslage 2007

Tabelle Anhang D-1: Input/Output-Bilanz für 2007

Input			Output		
Größe	Menge	Unit	Größe	Menge	Unit
Abfall und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00	kg	Aluminium in Deponie	103,24	kg
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00	kg	Deponiekörper (Lager)	531.763.005,00	kg
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00	kg	Kupfer in Deponie	1.193,20	kg
Packstoffe			Nickel in Deponie	0,85	kg
KS (Smart Card)	232.163,50	kg	Silber in Deponie	53,12	kg
Papier (Smart Lab.)	6.560,00	kg	Silizium in Deponie	0,06	kg
Papier (Smart Tick)	76.432,70	kg	Metall-Rückgewinnung		
PP (Smart Lab.)	3.280,00	kg	Sekundäraluminium	0,02	kg
RFID Materialien			Sekundärkupfer	3,24	kg
Acrylat (Klebstoff)	9.744,00	kg	Sekundärnickel	0,02	kg
Aluminium (Antenne)	742,40	kg	Sekundärsilber	0,38	kg
Bonding Agent	64,03	kg	Schlackeverwertung		
Epoxy (ACP)	74,24	kg	Alu in Straßenbaumaterial	582,91	kg
Kupfer (Antenne)	6.496,00	kg	Kupfer in Straßenbaumaterial	4.802,33	kg
Nickel (ACP-Metall)	9,28	kg	Nickel in Straßenbaumaterial	7,71	kg
PET (Substrat)	14.384,00	kg	Silber in Straßenbaumaterial	87,35	kg
PUR (Klebstoff)	1.392,00	kg	Silizium in Straßenbaumaterial	42,79	kg
Silber (Antenne)	152,19	kg	Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00	kg
Silizium (IC)	46,40	kg	Bestandsaufbau		
Sekundärrohstoffe			Smart Label (in Bestand)	6.800.000,00	item
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00	kg	Emissionen		
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00	kg	Aluminium gelöst (Abwasser)	0,00	kg
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00	kg	Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00	kg
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00	kg	Treibhausgase	1.643.364,96	kg
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00	kg	Sekundärrohstoffe		
Gewerbeglas	566.900.000,00	kg	Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00	kg
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00	kg	Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00	kg
KS Mono (sonst Rec.)	447.100.000,00	kg	KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00	kg
LVP (Input)	1.104.290.000,00	kg	KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00	kg
Verbundkarton (sonst Rec.)	3.200.000,00	kg	KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00	kg
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00	kg	Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00	kg
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00	kg	PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00	kg
			Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00	kg
			Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00	kg
			Zusatz RFID-Komponenten		
			Alu in Alu	1,79	kg
			Aluminium in Glas	0,03	kg
			Aluminium in Misch-KS	0,01	kg
			Aluminium in Mono-KS	0,01	kg

	Aluminium in PPK	0,00	kg
	KS in Misch-KS	9,75	kg
	KS in Mono-KS	7,18	kg
	Kupfer in Alu	12,50	kg
	Kupfer in Glas	0,03	kg
	Kupfer in Misch-KS	0,09	kg
	Kupfer in Mono-KS	0,04	kg
	Kupfer in PPK	0,05	kg
	Kupfer in Stahl	8,52	kg
	Nickel in Glas	0,00	kg
	Nickel in Misch-KS	0,00	kg
	Nickel in Mono-KS	0,00	kg
	Nickel in PPK	0,00	kg
	Nickel in Stahl	0,01	kg
	Silber in Alu	0,18	kg
	Silber in Glas	0,00	kg
	Silber in PPK	0,00	kg
	Silizium in Alu	0,11	kg
	Silizium in Glas	0,02	kg
	Silizium in PPK	0,01	kg
kg	31.316.578.540,74 kg	kg	31.316.578.548,29 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Szenario Referenzentwicklung

Tabelle Anhang D-2: Input/Output-Bilanz für das Referenz-Szenario 2012

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	1.010,77 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	531.763.005,00 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	8.983,82 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	8,03 kg	
KS (Smart Card)	279.296,40 kg		Silber in Deponie	1.000,16 kg	
Papier (Smart Lab.)	159.000,17 kg		Silizium in Deponie	3,37 kg	
Papier (Smart Tick)	93.098,80 kg		Metall-Rückgewinnung		
PP (Smart Lab.)	79.499,83 kg		Sekundäraluminium	4,47 kg	
RFID Materialien			Sekundärkupfer	156,96 kg	
Acrylat (Klebstoff)	94.500,00 kg		Sekundärnickel	1,18 kg	
Aluminium (Antenne)	7.200,00 kg		Sekundärsilber	40,31 kg	
Bonding Agent	1.242,00 kg		Schlackeverwertung		
Epoxy (ACP)	720,00 kg		Alu in Straßenbaumaterial	5.619,28 kg	
Kupfer (Antenne)	50.400,00 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	37.133,85 kg	
Nickel (ACP-Metall)	90,00 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	74,28 kg	
PET (Substrat)	139.500,00 kg		Silber in Straßenbaumaterial	1.701,74 kg	
PUR (Klebstoff)	13.500,00 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	406,39 kg	
Silber (Antenne)	2.952,00 kg		Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Silizium (IC)	450,00 kg		Bestandsaufbau		
Zusatz semi-passiver Tag			Aktiv Tag Zusatz Kühlung	1.000.000,00 item	
Kohlenstoff	1.000,00 kg		RFID-Tag	25.000.000,00 item	
Silizium für T-Sensor	50,00 kg		Smart Label	40.000.000,00 item	
Zink	2.000,00 kg		Emissionen		
Sekundärrohstoffe			Aluminium gelöst (Abwasser)	0,07 kg	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Treibhausgase	2.136.436,89 kg	
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
KS Mono (sonst Rec.)	447.100.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst Rec.)	3.200.000,00 kg		PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
Rückfluss			Zusatz RFID-Komponenten		
Smart Label AU (Archiv)	300.000,00 item		Alu in Alu	90,68 kg	
Smart Label AU (Bücher)	5.000.000,00 item		Aluminium in Glas	8,30 kg	

Smart Label AU (GG)	1.500.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	0,53 kg
		Aluminium in Mono-KS	0,26 kg
		Aluminium in PPK	0,07 kg
		KS in Misch-KS	495,94 kg
		KS in Mono-KS	365,19 kg
		Kupfer in Alu	507,81 kg
		Kupfer in Glas	5,81 kg
		Kupfer in Misch-KS	3,68 kg
		Kupfer in Mono-KS	1,81 kg
		Kupfer in PPK	1,00 kg
		Kupfer in Stahl	346,23 kg
		Nickel in Glas	0,01 kg
		Nickel in Misch-KS	0,01 kg
		Nickel in Mono-KS	0,00 kg
		Nickel in PPK	0,04 kg
		Nickel in Stahl	0,62 kg
		Silber in Alu	18,59 kg
		Silber in Glas	0,34 kg
		Silber in PPK	0,06 kg
		Silizium in Alu	5,67 kg
		Silizium in Glas	5,19 kg
		Silizium in PPK	0,22 kg
kg	31.317.155.885,61 kg	kg	31.317.155.718,54 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-3: Input/Output-Bilanz für das Referenz-Szenario 2017

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	5.287,24 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	531.763.007,20 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	34.976,07 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	46,98 kg	
KS (Smart Card)	374.239,84 kg		Silber in Deponie	7.787,70 kg	
Papier (Smart Lab.)	1.210.998,59 kg		Silizium in Deponie	21,03 kg	
Papier (Smart Tick)	254.239,84 kg		Zink in Deponie	1.506,53 kg	
PP (Smart Lab.)	605.499,29 kg		Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	31,03 kg	
Acrylat (Klebstoff)	665.700,69 kg		Sekundärkupfer	733,41 kg	
Aluminium (Antenne)	40.576,04 kg		Sekundärnickel	8,09 kg	
Bonding Agent	10.499,05 kg		Sekundärsilber	368,43 kg	
Epoxy (ACP)	4.564,80 kg		Schlackeverwertung		
Kupfer (Antenne)	213.024,22 kg		Alu in Straßenbaumaterial	30.288,54 kg	
Nickel (ACP-Metall)	570,60 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	150.509,30 kg	
PET (Substrat)	982.701,02 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	450,66 kg	
PUR (Klebstoff)	96.051,10 kg		Silber in Straßenbaumaterial	13.945,96 kg	
Silber (Antenne)	24.954,27 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	2.503,20 kg	
Silizium (IC)	2.853,00 kg		Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Zusatz semi-passiver Tag			Zink in Straßenbaumaterial	492,70 kg	
Kohlenstoff	20.000,00 kg		Bestandslageraufbau		
Silizium für T-Sensor	1.000,00 kg		Aktiv Tag Zusatz Kühlung	20.000.000,00 item	
Zink	40.000,00 kg		RFID-Tag	125.000.000,00 item	
Sekundärrohstoffe			Smart Label	620.000.000,00 item	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Emissionen		
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Aluminium gelöst (Abwasser)	0,40 kg	
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Treibhausgase	5.140.880,14 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Rückfluss			Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	1.000.000,00 item		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
RFID Tag AU (EE-Geräte)	10.000.000,00 item		Zusatz RFID-Komponenten		
RFID Tag AU (CD/DVD)	5.000.000,00 item		Alu in Alu	548,80 kg	

RFID Tag AU (Kleidung)	10.000.000,00 item	Aluminium in Glas	57,67 kg
Smart Label AU (Archiv)	10.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	2,60 kg
Smart Label AU (Bücher)	10.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	1,16 kg
Smart Label AU (GG)	20.000.000,00 item	Aluminium in PPK	0,40 kg
		KS in Misch-KS	3.077,56 kg
		KS in Mono-KS	2.052,05 kg
		Kupfer in Alu	2.305,05 kg
		Kupfer in Glas	30,28 kg
		Kupfer in Misch-KS	13,67 kg
		Kupfer in Mono-KS	6,08 kg
		Kupfer in PPK	4,16 kg
		Kupfer in Stahl	1.571,63 kg
		Nickel in Glas	0,08 kg
		Nickel in Misch-KS	0,04 kg
		Nickel in Mono-KS	0,02 kg
		Nickel in PPK	0,28 kg
		Nickel in Stahl	4,22 kg
		Silber in Alu	168,76 kg
		Silber in Glas	3,55 kg
		Silber in PPK	0,49 kg
		Silizium in Alu	38,56 kg
		Silizium in Glas	40,53 kg
		Silizium in PPK	1,41 kg
		Zink in Misch-KS	0,49 kg
		Zink in Mono-KS	0,24 kg
		Zink in PPK	0,04 kg

kg

31.320.810.452,49 kg

kg

31.320.810.460,90 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-4: Input/Output-Bilanz für das Referenz-Szenario 2022

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	16.790,01 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	531.763.011,20 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	98.217,62 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	110,30 kg	
KS (Smart Card)	468.703,00 kg		Silber in Deponie	54.676,04 kg	
Papier (Smart Lab.)	4.629.996,56 kg		Silizium in Deponie	54,00 kg	
Papier (Smart Tick)	2.165.272,50 kg		Zink in Deponie	30.130,51 kg	
PP (Smart Lab.)	2.314.998,28 kg		Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	117,74 kg	
Acrylat (Klebstoff)	2.572.501,73 kg		Sekundärkupfer	2.305,11 kg	
Aluminium (Antenne)	117.600,08 kg		Sekundärnickel	20,93 kg	
Bonding Agent	67.620,05 kg		Sekundärsilber	2.848,58 kg	
Epoxy (ACP)	9.800,01 kg		Schlackeverwertung		
Kupfer (Antenne)	548.800,37 kg		Alu in Straßenbaumaterial	92.870,30 kg	
Nickel (ACP-Metall)	1.225,00 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	409.608,47 kg	
PET (Substrat)	3.797.502,55 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	1.028,56 kg	
PUR (Klebstoff)	385.875,26 kg		Silber in Straßenbaumaterial	94.090,49 kg	
Silber (Antenne)	160.720,11 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	6.587,64 kg	
Silizium (IC)	6.125,00 kg		Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Zusatz semi-passiver Tag			Zink in Straßenbaumaterial	9.854,01 kg	
Kohlenstoff	100.000,00 kg		Bestandsaufbau		
Silizium für T-Sensor	5.000,00 kg		Aktiv Tag Zusatz Kühlung)	100.000.000,00 item	
Zink	200.000,00 kg		RFID-Tag	500.000.000,00 item	
Sekundärrohstoffe			Smart Label	1.430.000.000,00 item	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Emissionen		
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Aluminium gelöst (Abwasser)	1,13 kg	
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Treibhausgase	17.131.586,00 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Rückfluss			Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	20.000.000,00 item		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
RFID Tag AU (EE-Geräte)	50.000.000,00 item		Zusatz RFID-Komponenten		
RFID Tag AU (CD/DVD)	25.000.000,00 item		Alu in Alu	1.900,15 kg	

RFID Tag AU (Kleidung)	50.000.000,00 item	Aluminium in Glas	218,84 kg
Smart Label AU (Archiv)	500.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	11,02 kg
Smart Label AU (Bücher)	20.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	5,41 kg
Smart Label AU (GG)	100.000.000,00 item	Aluminium in PPK	1,13 kg
		KS in Misch-KS	17.498,08 kg
		KS in Mono-KS	12.884,95 kg
		Kupfer in Alu	7.093,57 kg
		Kupfer in Glas	102,12 kg
		Kupfer in Misch-KS	51,43 kg
		Kupfer in Mono-KS	25,25 kg
		Kupfer in PPK	10,59 kg
		Kupfer in Stahl	4.836,53 kg
		Nickel in Glas	0,23 kg
		Nickel in Misch-KS	0,12 kg
		Nickel in Mono-KS	0,06 kg
		Nickel in PPK	0,59 kg
		Nickel in Stahl	10,85 kg
		Silber in Alu	1.298,39 kg
		Silber in Glas	29,91 kg
		Silber in PPK	3,10 kg
		Silizium in Alu	99,00 kg
		Silizium in Glas	114,02 kg
		Silizium in PPK	3,41 kg
		Zink in Misch-KS	9,90 kg
		Zink in Mono-KS	4,86 kg
		Zink in PPK	0,72 kg

kg 31.334.258.903,15 kg kg 31.334.258.949,98 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Szenario Technisch-ökonomischer Push

Tabelle Anhang D-5: Input/Output-Bilanz für das Push-Szenario 2012

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00	kg	Aluminium in Deponie	2.461,14	kg
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00	kg	Deponiekörper (Lager)	531.763.005,00	kg
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00	kg	Kupfer in Deponie	33.455,97	kg
Packstoffe			Nickel in Deponie	29,81	kg
KS (Smart Card)	465.441,00	kg	Silber in Deponie	12.413,29	kg
Papier (Smart Lab.)	675.999,69	kg	Silizium in Deponie	7,52	kg
Papier (Smart Tick)	1.427.205,00	kg	Metall-Rückgewinnung		
PP (Smart Lab.)	337.999,85	kg	Sekundäraluminium	6,80	kg
RFID Materialien			Sekundärkupfer	350,86	kg
Acrylat (Klebstoff)	423.150,14	kg	Sekundärnickel	2,62	kg
Aluminium (Antenne)	19.344,01	kg	Sekundärsilber	299,19	kg
Bonding Agent	16.684,21	kg	Schlackeverwertung		
Epoxy (ACP)	2.901,60	kg	Alu in Straßenbaumaterial	13.785,73	kg
Kupfer (Antenne)	203.112,07	kg	Kupfer in Straßenbaumaterial	136.489,25	kg
Nickel (ACP-Metall)	362,70	kg	Nickel in Straßenbaumaterial	272,80	kg
PET (Substrat)	624.650,21	kg	Silber in Straßenbaumaterial	20.771,48	kg
PUR (Klebstoff)	61.054,52	kg	Silizium in Straßenbaumaterial	1.504,86	kg
Silber (Antenne)	39.655,21	kg	Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00	kg
Silizium (IC)	1.813,50	kg	Bestandsaufbau		
Zusatz semi-passiver Tag			Aktiv Tag Zusatz Kühlung	20.000.000,00	item
Kohlenstoff	20.000,00	kg	RFID-Tag	50.000.000,00	item
Silizium für T-Sensor	1.000,00	kg	Smart Label	570.000.000,00	item
Zink	40.000,00	kg	Emissionen		
Sekundärrohstoffe			Aluminium gelöst (Abwasser)	0,18	kg
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00	kg	Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00	kg
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00	kg	Treibhausgase	4.995.579,90	kg
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00	kg	Sekundärrohstoffe		
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00	kg	Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00	kg
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00	kg	Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00	kg
Gewerbeglas	566.900.000,00	kg	KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00	kg
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00	kg	KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00	kg
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00	kg	KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00	kg
LVP (Input)	1.104.290.000,00	kg	Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00	kg
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00	kg	PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00	kg
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00	kg	Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00	kg
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00	kg	Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00	kg
Rückfluss			Zusatz RFID-Komponenten		
Smart Label AU (Archiv)	300.000,00	item	Alu in Alu	134,44	kg

Smart Label AU (Bücher)	5.000.000,00 item	Aluminium in Glas	12,63 kg
Smart Label AU (GG)	1.500.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	0,78 kg
		Aluminium in Mono-KS	0,38 kg
		Aluminium in PPK	0,18 kg
		KS in Misch-KS	1.234,65 kg
		KS in Mono-KS	909,15 kg
		Kupfer in Alu	1.129,31 kg
		Kupfer in Glas	13,26 kg
		Kupfer in Misch-KS	8,19 kg
		Kupfer in Mono-KS	4,02 kg
		Kupfer in PPK	3,73 kg
		Kupfer in Stahl	769,98 kg
		Nickel in Glas	0,02 kg
		Nickel in Misch-KS	0,01 kg
		Nickel in Mono-KS	0,01 kg
		Nickel in PPK	0,17 kg
		Nickel in Stahl	1,37 kg
		Silber in Alu	137,80 kg
		Silber in Glas	2,59 kg
		Silber in PPK	0,73 kg
		Silizium in Alu	12,60 kg
		Silizium in Glas	11,84 kg
		Silizium in PPK	0,83 kg

kg	31.320.591.763,71 kg	kg	31.320.591.885,87 kg
----	----------------------	----	----------------------

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-6: Input/Output-Bilanz für das Push-Szenario 2017

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00	kg	Aluminium in Deponie	13.604,69	kg
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00	kg	Deponiekörper (Lager)	531.763.008,31	kg
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00	kg	Kupfer in Deponie	81.044,45	kg
Packstoffe			Nickel in Deponie	90,91	kg
KS (Smart Card)	703.054,50	kg	Silber in Deponie	45.109,94	kg
Papier (Smart Lab.)	3.289.997,56	kg	Silizium in Deponie	31,08	kg
Papier (Smart Tick)	8.061.090,00	kg	Zink in Deponie	30.130,51	kg
PP (Smart Lab.)	1.644.998,78	kg	Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	62,91	kg
Acrylat (Klebstoff)	2.110.501,23	kg	Sekundärkupfer	1.303,94	kg
Aluminium (Antenne)	96.480,06	kg	Sekundärnickel	11,99	kg
Bonding Agent	55.476,03	kg	Sekundärsilber	1.632,71	kg
Epoxy (ACP)	8.040,00	kg	Schlackeverwertung		
Kupfer (Antenne)	450.240,26	kg	Alu in Straßenbaumaterial	75.785,36	kg
Nickel (ACP-Metall)	1.005,00	kg	Kupfer in Straßenbaumaterial	333.811,28	kg
PET (Substrat)	3.115.501,81	kg	Nickel in Straßenbaumaterial	838,80	kg
PUR (Klebstoff)	316.575,18	kg	Silber in Straßenbaumaterial	76.410,22	kg
Silber (Antenne)	131.856,08	kg	Silizium in Straßenbaumaterial	5.586,79	kg
Silizium (IC)	5.025,00	kg	Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00	kg
Zusatz semi-passiver Tag			Zink in Straßenbaumaterial	9.854,01	kg
Kohlenstoff	100.000,00	kg	Bestandsaufbau		
Silizium für T-Sensor	5.000,00	kg	Aktiv Tag Zusatz Kühlung	100.000.000,00	item
Zink	200.000,00	kg	RFID-Tag	500.000.000,00	item
Sekundärrohstoffe			Smart Label	1.330.000.000,00	item
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00	kg	Emissionen		
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00	kg	Aluminium gelöst (Abwasser)	0,88	kg
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00	kg	Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00	kg
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00	kg	Treibhausgase	20.045.401,13	kg
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00	kg	Sekundärrohstoffe		
Gewerbeglas	566.900.000,00	kg	Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00	kg
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00	kg	Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00	kg
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00	kg	KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00	kg
LVP (Input)	1.104.290.000,00	kg	KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00	kg
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00	kg	KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00	kg
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00	kg	Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00	kg
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00	kg	PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00	kg
Rückfluss			Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00	kg
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	20.000.000,00	item	Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00	kg
RFID Tag AU (EE-Geräte)	20.000.000,00	item	Zusatz RFID-Komponenten		
RFID Tag AU (CD/DVD)	10.000.000,00	item	Alu in Alu	1.093,52	kg
RFID Tag AU (Kleidung)	20.000.000,00	item	Aluminium in Glas	116,93	kg

Smart Label AU (Archiv)	500.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	6,34 kg
Smart Label AU (Bücher)	20.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	3,11 kg
Smart Label AU (GG)	50.000.000,00 item	Aluminium in PPK	0,88 kg
		KS in Misch-KS	10.112,02 kg
		KS in Mono-KS	7.446,12 kg
		Kupfer in Alu	4.082,29 kg
		Kupfer in Glas	54,56 kg
		Kupfer in Misch-KS	29,60 kg
		Kupfer in Mono-KS	14,53 kg
		Kupfer in PPK	8,24 kg
		Kupfer in Stahl	2.783,38 kg
		Nickel in Glas	0,12 kg
		Nickel in Misch-KS	0,07 kg
		Nickel in Mono-KS	0,03 kg
		Nickel in PPK	0,46 kg
		Nickel in Stahl	6,25 kg
		Silber in Alu	747,21 kg
		Silber in Glas	15,98 kg
		Silber in PPK	2,41 kg
		Silizium in Alu	56,97 kg
		Silizium in Glas	60,92 kg
		Silizium in PPK	2,75 kg
		Zink in Misch-KS	9,90 kg
		Zink in Mono-KS	4,86 kg
		Zink in PPK	0,72 kg

kg

31.336.947.882,90 kg

kg

31.336.947.910,22 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-7: Input/Output-Bilanz für das Push-Szenario 2022

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	124.235,27 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	531.763.011,05 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	358.396,46 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	78,61 kg	
KS (Smart Card)	1.406.334,60 kg		Silber in Deponie	79.812,11 kg	
Papier (Smart Lab.)	17.937.998,96 kg		Silizium in Deponie	48,86 kg	
Papier (Smart Tick)	14.438.910,00 kg		Zink in Deponie	150.652,53 kg	
PP (Smart Lab.)	8.969.026,94 kg		Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	1.145,12 kg	
Acrylat (Klebstoff)	10.131.441,29 kg		Sekundärkupfer	10.585,68 kg	
Aluminium (Antenne)	926.303,20 kg		Sekundärnickel	18,47 kg	
Bonding Agent	106.524,87 kg		Sekundärsilber	5.158,89 kg	
Epoxy (ACP)	7.719,19 kg		Schlackeverwertung		
Kupfer (Antenne)	2.161.374,14 kg		Alu in Straßenbaumaterial	683.502,95 kg	
Nickel (ACP-Metall)	964,90 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	1.509.026,16 kg	
PET (Substrat)	14.955.937,14 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	739,01 kg	
PUR (Klebstoff)	1.577.610,14 kg		Silber in Straßenbaumaterial	139.022,09 kg	
Silber (Antenne)	253.189,54 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	9.103,09 kg	
Silizium (IC)	4.824,50 kg		Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Zusatz semi-passiver Tag			Zink in Straßenbaumaterial	49.270,07 kg	
Kohlenstoff	250.000,00 kg		Bestandslageraufbau		
Silizium für T-Sensor	12.500,00 kg		Aktiv Tag Zusatz Kühlung	250.000.000,00 item	
Zink	500.000,00 kg		RFID-Tag in Bestand	1.500.000.000,00 item	
Sekundärrohstoffe			Smart Label	10.540.000.000,00 item	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Emissionen		
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Aluminium gelöst (Abwasser)	6,80 kg	
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Treibhausgase	65.201.582,59 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
KS Mono (sonst Rec.)	447.100.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst Rec.)	3.200.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Rückfluss			Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	100.000.000,00 item		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
RFID Tag AU (EE-Geräte)	200.000.000,00 item		Zusatz RFID-Komponenten		
RFID Tag AU (CD/DVD)	100.000.000,00 item		Alu in Alu	17.621,53 kg	

RFID Tag AU (Kleidung)	200.000.000,00 item	Aluminium in Glas	2.128,30 kg
Smart Label AU (Archiv)	1.000.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	99,35 kg
Smart Label AU (Bücher)	30.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	48,77 kg
Smart Label AU (GG)	300.000.000,00 item	Aluminium in PPK	6,80 kg
		KS in Misch-KS	78.638,18 kg
		KS in Mono-KS	57.906,30 kg
		Kupfer in Alu	31.975,02 kg
		Kupfer in Glas	496,59 kg
		Kupfer in Misch-KS	231,82 kg
		Kupfer in Mono-KS	113,80 kg
		Kupfer in PPK	31,74 kg
		Kupfer in Stahl	21.801,16 kg
		Nickel in Glas	0,22 kg
		Nickel in Misch-KS	0,10 kg
		Nickel in Mono-KS	0,05 kg
		Nickel in PPK	0,35 kg
		Nickel in Stahl	9,53 kg
		Silber in Alu	2.341,02 kg
		Silber in Glas	58,17 kg
		Silber in PPK	3,72 kg
		Silizium in Alu	89,58 kg
		Silizium in Glas	111,29 kg
		Silizium in PPK	4,03 kg
		Zink in Misch-KS	49,50 kg
		Zink in Mono-KS	24,30 kg
		Zink in PPK	3,60 kg

kg

31.391.143.018,36 kg

kg

31.391.143.590,36 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Szenario Staatliche Regulierung

Tabelle Anhang D-8: Input/Output-Bilanz für das Szenario Staat 2012

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00	kg	Aluminium in Deponie	460,59	kg
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00	kg	Deponiekörper (Lager)	531.763.005,00	kg
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00	kg	Kupfer in Deponie	2.458,70	kg
Packstoffe			Nickel in Deponie	2,93	kg
KS (Smart Card)	233.347,00	kg	Silber in Deponie	364,94	kg
Papier (Smart Lab.)	53.600,03	kg	Silizium in Deponie	1,19	kg
Papier (Smart Tick)	70.004,10	kg	Metall-Rückgewinnung		
PP (Smart Lab.)	26.800,02	kg	Sekundäraluminium	1,69	kg
RFID Materialien			Sekundärkupfer	40,67	kg
Acrylat (Klebstoff)	36.014,99	kg	Sekundärnickel	0,42	kg
Aluminium (Antenne)	3.430,00	kg	Sekundärsilber	14,26	kg
Bonding Agent	473,34	kg	Schlackeverwertung		
Epoxy (ACP)	274,40	kg	Alu in Straßenbaumaterial	2.561,76	kg
Kupfer (Antenne)	14.405,99	kg	Kupfer in Straßenbaumaterial	10.155,02	kg
Nickel (ACP-Metall)	34,30	kg	Nickel in Straßenbaumaterial	27,10	kg
PET (Substrat)	53.164,98	kg	Silber in Straßenbaumaterial	620,33	kg
PUR (Klebstoff)	5.145,00	kg	Silizium in Straßenbaumaterial	148,58	kg
Silber (Antenne)	1.125,04	kg	Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00	kg
Silizium (IC)	171,50	kg	Bestandslageraufbau		
Zusatz semi-passiver Tag			Aktiv Tag Zusatz Kühlung	1.000.000,00	item
Kohlenstoff	1.000,00	kg	RFID-Tag	10.000.000,00	item
Silizium für T-Sensor	50,00	kg	Smart Label	33.000.000,00	item
Zink	2.000,00	kg	Emissionen		
Sekundärrohstoffe			Aluminium gelöst (Abwasser)	0,03	kg
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00	kg	Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00	kg
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00	kg	Treibhausgase	1.763.823,32	kg
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00	kg	Sekundärrohstoffe		
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00	kg	Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00	kg
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00	kg	Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00	kg
Gewerbeglas	566.900.000,00	kg	KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00	kg
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00	kg	KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00	kg
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00	kg	KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00	kg
LVP (Input)	1.104.290.000,00	kg	Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00	kg
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00	kg	PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00	kg
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00	kg	Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00	kg
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00	kg	Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00	kg
Rückfluss			Zusatz RFID-Komponenten		
Smart Label AU (Archiv)	300.000,00	item	Alu in Alu	40,37	kg

Smart Label AU (Bücher)	5.000.000,00 item	Aluminium in Glas	3,14 kg
Smart Label AU (GG)	1.500.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	0,23 kg
		Aluminium in Mono-KS	0,11 kg
		Aluminium in PPK	0,03 kg
		KS in Misch-KS	176,64 kg
		KS in Mono-KS	130,07 kg
		Kupfer in Alu	135,65 kg
		Kupfer in Glas	1,32 kg
		Kupfer in Misch-KS	0,98 kg
		Kupfer in Mono-KS	0,48 kg
		Kupfer in PPK	0,23 kg
		Kupfer in Stahl	92,49 kg
		Nickel in Glas	0,00 kg
		Nickel in Misch-KS	0,00 kg
		Nickel in Mono-KS	0,00 kg
		Nickel in PPK	0,01 kg
		Nickel in Stahl	0,22 kg
		Silber in Alu	6,62 kg
		Silber in Glas	0,10 kg
		Silber in PPK	0,02 kg
		Silizium in Alu	2,02 kg
		Silizium in Glas	1,57 kg
		Silizium in PPK	0,07 kg

kg 31.316.732.345,49 kg kg 31.316.732.345,48 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-9: Input/Output-Bilanz für das Szenario Staat 2017

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	3.453,07 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	531.763.005,72 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	8.633,92 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	15,43 kg	
KS (Smart Card)	280.756,20 kg		Silber in Deponie	961,27 kg	
Papier (Smart Lab.)	346.999,70 kg		Silizium in Deponie	7,89 kg	
Papier (Smart Tick)	93.585,40 kg		Zink in Deponie	1.506,53 kg	
PP (Smart Lab.)	173.500,39 kg		Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	19,82 kg	
Acrylat (Klebstoff)	195.824,97 kg		Sekundärkupfer	200,00 kg	
Aluminium (Antenne)	26.110,00 kg		Sekundärnickel	3,00 kg	
Bonding Agent	1.286,85 kg		Sekundärsilber	51,42 kg	
Epoxy (ACP)	1.492,00 kg		Schlackeverwertung		
Kupfer (Antenne)	52.219,99 kg		Alu in Straßenbaumaterial	19.083,27 kg	
Nickel (ACP-Metall)	186,50 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	36.064,93 kg	
PET (Substrat)	289.074,96 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	144,06 kg	
PUR (Klebstoff)	27.975,00 kg		Silber in Straßenbaumaterial	1.657,58 kg	
Silber (Antenne)	3.058,60 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	839,16 kg	
Silizium (IC)	932,50 kg		Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Zusatz semi-passiver Tag			Zink in Straßenbaumaterial	492,70 kg	
Kohlenstoff	20.000,00 kg		Bestandslageraufbau		
Silizium für T-Sensor	1.000,00 kg		Aktiv Tag Zusatz Kühlung	20.000.000,00 item	
Zink	40.000,00 kg		RFID-Tag	50.000.000,00 item	
Sekundärrohstoffe			Smart Label	215.000.000,00 item	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Emissionen		
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Aluminium gelöst (Abwasser)	0,23 kg	
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Treibhausgase	2.596.513,48 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Rückfluss			Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	1.000.000,00 item		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
RFID Tag AU (EE-Geräte)	4.000.000,00 item		Zusatz RFID-Komponenten		
RFID Tag AU (CD/DVD)	2.000.000,00 item		Alu in Alu	404,95 kg	

RFID Tag AU (Kleidung)	4.000.000,00 item	Aluminium in Glas	36,84 kg
Smart Label AU (Archiv)	5.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	2,35 kg
Smart Label AU (Bücher)	8.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	1,15 kg
Smart Label AU (GG)	20.000.000,00 item	Aluminium in PPK	0,23 kg
		KS in Misch-KS	1.268,20 kg
		KS in Mono-KS	933,86 kg
		Kupfer in Alu	647,92 kg
		Kupfer in Glas	7,37 kg
		Kupfer in Misch-KS	4,70 kg
		Kupfer in Mono-KS	2,31 kg
		Kupfer in PPK	0,92 kg
		Kupfer in Stahl	441,77 kg
		Nickel in Glas	0,03 kg
		Nickel in Misch-KS	0,02 kg
		Nickel in Mono-KS	0,01 kg
		Nickel in PPK	0,08 kg
		Nickel in Stahl	1,58 kg
		Silber in Alu	23,72 kg
		Silber in Glas	0,43 kg
		Silber in PPK	0,05 kg
		Silizium in Alu	14,47 kg
		Silizium in Glas	13,17 kg
		Silizium in PPK	0,43 kg
		Zink in Misch-KS	0,49 kg
		Zink in Mono-KS	0,24 kg
		Zink in PPK	0,04 kg

kg

31.317.807.744,44 kg

kg

31.317.807.749,24 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-10: Input/Output-Bilanz für das Szenario Staat 2022

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	25.940,35 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	531.763.011,32 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	28.179,53 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	100,62 kg	
KS (Smart Card)	328.388,90 kg		Silber in Deponie	6.274,82 kg	
Papier (Smart Lab.)	2.274.000,77 kg		Silizium in Deponie	57,53 kg	
Papier (Smart Tick)	93.825,40 kg		Zink in Deponie	30.130,51 kg	
PP (Smart Lab.)	1.136.996,92 kg		Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	200,27 kg	
Acrylat (Klebstoff)	1.224.300,78 kg		Sekundärkupfer	760,26 kg	
Aluminium (Antenne)	186.560,12 kg		Sekundärnickel	22,11 kg	
Bonding Agent	8.045,41 kg		Sekundärsilber	378,73 kg	
Epoxy (ACP)	9.328,01 kg		Schlackeverwertung		
Kupfer (Antenne)	163.240,10 kg		Alu in Straßenbaumaterial	142.956,46 kg	
Nickel (ACP-Metall)	1.166,00 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	118.295,78 kg	
PET (Substrat)	1.807.301,16 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	943,55 kg	
PUR (Klebstoff)	174.900,11 kg		Silber in Straßenbaumaterial	10.888,57 kg	
Silber (Antenne)	19.122,41 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	6.145,47 kg	
Silizium (IC)	5.830,00 kg		Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Zusatz semi-passiver Tag			Zink in Straßenbaumaterial	9.854,01 kg	
Kohlenstoff	100.000,00 kg		Bestandslageraufbau		
Silizium für T-Sensor	5.000,00 kg		Aktiv Tag Zusatz Kühlung	100.000.000,00 item	
Zink	200.000,00 kg		RFID-Tag	200.000.000,00 item	
Sekundärrohstoffe			Smart Label	920.000.000,00 item	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Emissionen		
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Aluminium gelöst (Abwasser)	1,68 kg	
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Treibhausgase	7.911.202,63 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Rückfluss			Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	20.000.000,00 item		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
RFID Tag AU (EE-Geräte)	20.000.000,00 item		Zusatz RFID-Komponenten		
RFID Tag AU (CD/DVD)	10.000.000,00 item		Alu in Alu	3.376,63 kg	

RFID Tag AU (Kleidung)	20.000.000,00 item	Aluminium in Glas	372,22 kg
Smart Label AU (Archiv)	100.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	19,58 kg
Smart Label AU (Bücher)	15.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	9,61 kg
Smart Label AU (GG)	100.000.000,00 item	Aluminium in PPK	1,68 kg
		KS in Misch-KS	9.315,74 kg
		KS in Mono-KS	6.859,78 kg
		Kupfer in Alu	2.363,69 kg
		Kupfer in Glas	32,57 kg
		Kupfer in Misch-KS	17,14 kg
		Kupfer in Mono-KS	8,41 kg
		Kupfer in PPK	2,95 kg
		Kupfer in Stahl	1.611,61 kg
		Nickel in Glas	0,23 kg
		Nickel in Misch-KS	0,12 kg
		Nickel in Mono-KS	0,06 kg
		Nickel in PPK	0,53 kg
		Nickel in Stahl	11,49 kg
		Silber in Alu	173,05 kg
		Silber in Glas	3,82 kg
		Silber in PPK	0,35 kg
		Silizium in Alu	105,47 kg
		Silizium in Glas	116,27 kg
		Silizium in PPK	3,08 kg
		Zink in Misch-KS	9,90 kg
		Zink in Mono-KS	4,86 kg
		Zink in PPK	0,72 kg

kg

31.324.172.319,55 kg

kg

31.324.167.338,35 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Szenario Selbstregulierung

Tabelle Anhang D-11: Input/Output-Bilanz für das Szenario Selbstregulierung 2012

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00	kg	Aluminium in Deponie	994,74	kg
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00	kg	Deponiekörper (Lager)	531.767.848,82	kg
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00	kg	Kupfer in Deponie	8.723,57	kg
Packstoffe			Nickel in Deponie	7,81	kg
KS (Smart Card)	279.296,40	kg	Silber in Deponie	970,36	kg
Papier (Smart Lab.)	159.000,17	kg	Silizium in Deponie	16,50	kg
Papier (Smart Tick)	93.098,80	kg	Metall-Rückgewinnung		
PP (Smart Lab.)	79.499,83	kg	Sekundäraluminium	201,69	kg
RFID Materialien			Sekundärkupfer	1.634,85	kg
Acrylat (Klebstoff)	94.500,00	kg	Sekundärnickel	3,73	kg
Aluminium (Antenne)	7.200,00	kg	Sekundärsilber	123,77	kg
Bonding Agent	1.242,00	kg	Schlackeverwertung		
Epoxy (ACP)	720,00	kg	Alu in Straßenbaumaterial	5.438,09	kg
Kupfer (Antenne)	50.400,00	kg	Kupfer in Straßenbaumaterial	35.912,62	kg
Nickel (ACP-Metall)	90,00	kg	Nickel in Straßenbaumaterial	71,85	kg
PET (Substrat)	139.500,00	kg	Silber in Straßenbaumaterial	1.644,70	kg
PUR (Klebstoff)	13.500,00	kg	Silizium in Straßenbaumaterial	395,54	kg
Silber (Antenne)	2.952,00	kg	Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00	kg
Silizium (IC)	450,00	kg	Bestandslageraufbau		
Zusatz semi-passiver Tag			Aktiv Tag Zusatz Kühlung	1.000.000,00	item
Kohlenstoff	1.000,00	kg	RFID-Tag	25.000.000,00	item
Silizium für T-Sensor	50,00	kg	Smart Label	40.000.000,00	item
Zink	2.000,00	kg	Emissionen		
Sekundärrohstoffe			Aluminium gelöst (Abwasser)	0,07	kg
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00	kg	Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00	kg
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00	kg	Treibhausgase	2.131.755,78	kg
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00	kg	Sekundärrohstoffe		
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00	kg	Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00	kg
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00	kg	Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00	kg
Gewerbeglas	566.900.000,00	kg	KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00	kg
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00	kg	KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00	kg
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00	kg	KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00	kg
LVP (Input)	1.104.290.000,00	kg	Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00	kg
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00	kg	PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00	kg
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00	kg	Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00	kg
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00	kg	Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00	kg
Rückfluss			Zusatz RFID-Komponenten		
Smart Label AU (Archiv)	300.000,00	item	Alu in Alu	81,61	kg

Smart Label AU (Bücher)	5.000.000,00 item	Aluminium in Glas	4,24 kg
Smart Label AU (GG)	1.500.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	0,47 kg
		Aluminium in Mono-KS	0,23 kg
		Aluminium in PPK	0,07 kg
		KS in Misch-KS	446,34 kg
		KS in Mono-KS	328,67 kg
		Kupfer in Alu	457,03 kg
		Kupfer in Glas	2,97 kg
		Kupfer in Misch-KS	3,31 kg
		Kupfer in Mono-KS	1,63 kg
		Kupfer in PPK	1,00 kg
		Kupfer in Stahl	311,61 kg
		Nickel in Glas	0,01 kg
		Nickel in Misch-KS	0,01 kg
		Nickel in Mono-KS	0,00 kg
		Nickel in PPK	0,04 kg
		Nickel in Stahl	0,56 kg
		Silber in Alu	16,73 kg
		Silber in Glas	0,17 kg
		Silber in PPK	0,06 kg
		Silizium in Alu	5,10 kg
		Silizium in Glas	2,65 kg
		Silizium in PPK	0,22 kg

kg 31.317.155.885,61 kg kg 31.317.155.683,13 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-12: Input/Output-Bilanz für das Szenario Selbstregulierung 2017

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	5.249,28 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	531.816.950,79 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	33.514,76 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	45,22 kg	
KS (Smart Card)	374.239,84 kg		Silber in Deponie	7.444,51 kg	
Papier (Smart Lab.)	1.210.998,59 kg		Silizium in Deponie	215,09 kg	
Papier (Smart Tick)	254.239,84 kg		Zink in Deponie	1.327,86 kg	
PP (Smart Lab.)	605.499,29 kg		Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	2.851,84 kg	
Acrylat (Klebstoff)	665.700,69 kg		Sekundärkupfer	16.673,65 kg	
Aluminium (Antenne)	40.576,04 kg		Sekundärnickel	49,03 kg	
Bonding Agent	10.499,05 kg		Sekundärsilber	2.150,97 kg	
Epoxy (ACP)	4.564,80 kg		Sekundärzink	267,30 kg	
Kupfer (Antenne)	213.024,22 kg		Schlackeverwertung		
Nickel (ACP-Metall)	570,60 kg		Alu in Straßenbaumaterial	27.705,26 kg	
PET (Substrat)	982.701,02 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	137.213,82 kg	
PUR (Klebstoff)	96.051,10 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	412,81 kg	
Silber (Antenne)	24.954,27 kg		Silber in Straßenbaumaterial	12.559,35 kg	
Silizium (IC)	2.853,00 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	2.320,73 kg	
Zusatz semi-passiver Tag			Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Kohlenstoff	20.000,00 kg		Zink in Straßenbaumaterial	404,29 kg	
Silizium für T-Sensor	1.000,00 kg		Bestandslageraufbau		
Zink	40.000,00 kg		Aktiv Tag Zusatz Kühlung	20.000.000,00 item	
Sekundärrohstoffe			RFID-Tag	125.000.000,00 item	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Smart Label	620.000.000,00 item	
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Emissionen		
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Aluminium gelöst (Abwasser)	0,39 kg	
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Treibhausgase	5.087.519,86 kg	
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
KS Mono (sonst Rec.)	447.100.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst Rec.)	3.200.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
Rückfluss			PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	1.000.000,00 item		Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
RFID Tag AU (EE-Geräte)	10.000.000,00 item		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
RFID Tag AU (CD/DVD)	5.000.000,00 item		Zusatz RFID-Komponenten		

RFID Tag AU (Kleidung)	10.000.000,00 item	Alu in Alu	384,16 kg
Smart Label AU (Archiv)	10.000.000,00 item	Aluminium in Glas	23,19 kg
Smart Label AU (Bücher)	10.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	2,23 kg
Smart Label AU (GG)	20.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	1,09 kg
		Aluminium in PPK	0,39 kg
		KS in Misch-KS	2.632,25 kg
		KS in Mono-KS	1.938,29 kg
		Kupfer in Alu	1.613,53 kg
		Kupfer in Glas	12,18 kg
		Kupfer in Misch-KS	11,70 kg
		Kupfer in Mono-KS	5,74 kg
		Kupfer in PPK	4,13 kg
		Kupfer in Stahl	1.100,14 kg
		Nickel in Glas	0,03 kg
		Nickel in Misch-KS	0,03 kg
		Nickel in Mono-KS	0,02 kg
		Nickel in PPK	0,28 kg
		Nickel in Stahl	2,95 kg
		Silber in Alu	118,13 kg
		Silber in Glas	1,43 kg
		Silber in PPK	0,48 kg
		Silizium in Alu	26,99 kg
		Silizium in Glas	16,30 kg
		Silizium in PPK	1,40 kg
		Zink in Misch-KS	0,35 kg
		Zink in Mono-KS	0,17 kg
		Zink in PPK	0,04 kg
kg	31.320.810.452,49 kg	kg	31.320.810.460,93 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT

Tabelle Anhang D-13: Input/Output-Bilanz für das Szenario Selbstregulierung 2022

Input			Output		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
Abfall- und Reststoffe			Deponie und Versatz		
Restmüll in MVA (Graue T)	10.976.237.000,00 kg		Aluminium in Deponie	15.589,47 kg	
Sortierreste zur Deponie	63.285.000,00 kg		Deponiekörper (Lager)	532.209.528,70 kg	
Sortierreste zur MVA	1.382.715.000,00 kg		Kupfer in Deponie	83.379,67 kg	
Packstoffe			Nickel in Deponie	94,66 kg	
KS (Smart Card)	468.703,00 kg		Silber in Deponie	46.147,35 kg	
Papier (Smart Lab.)	4.629.996,56 kg		Silizium in Deponie	1.292,84 kg	
Papier (Smart Tick)	2.165.272,50 kg		Zink in Deponie	22.983,85 kg	
PP (Smart Lab.)	2.314.998,28 kg		Metall-Rückgewinnung		
RFID Materialien			Sekundäraluminium	19.062,99 kg	
Acrylat (Klebstoff)	2.572.501,73 kg		Sekundärkupfer	97.731,10 kg	
Aluminium (Antenne)	117.600,08 kg		Sekundärnickel	225,41 kg	
Bonding Agent	67.620,05 kg		Sekundärsilber	29.490,92 kg	
Epoxy (ACP)	9.800,01 kg		Sekundärzink	10.692,00 kg	
Kupfer (Antenne)	548.800,37 kg		Schlackeverwertung		
Nickel (ACP-Metall)	1.225,00 kg		Alu in Straßenbaumaterial	76.442,10 kg	
PET (Substrat)	3.797.502,55 kg		Kupfer in Straßenbaumaterial	336.302,39 kg	
PUR (Klebstoff)	385.875,26 kg		Nickel in Straßenbaumaterial	846,53 kg	
Silber (Antenne)	160.720,11 kg		Silber in Straßenbaumaterial	76.778,68 kg	
Silizium (IC)	6.125,00 kg		Silizium in Straßenbaumaterial	5.374,79 kg	
Zusatz semi-passiver Tag			Straßenbaumaterial	4.110.742.845,00 kg	
Kohlenstoff	100.000,00 kg		Zink in Straßenbaumaterial	6.317,53 kg	
Silizium für T-Sensor	5.000,00 kg		Bestandslageraufbau		
Zink	200.000,00 kg		Aktiv Tag Zusatz Kühlung	100.000.000,00 item	
Sekundärrohstoffe			RFID-Tag	500.000.000,00 item	
Altglas (PEV)	2.039.500.000,00 kg		Smart Label	1.430.000.000,00 item	
Altpapier (sonstige)	8.332.000.000,00 kg		Emissionen		
Altpapier (Verpackung)	6.068.000.000,00 kg		Aluminium gelöst (Abwasser)	1,12 kg	
Aluminium (Sonst. Rec)	14.200.000,00 kg		Sonstige (des Systems)	8.651.266.400,00 kg	
Alu-Verschlüsse (Altglas)	2.800.000,00 kg		Treibhausgase	16.703.385,25 kg	
Gewerbeglas	566.900.000,00 kg		Sekundärrohstoffe		
KS Misch (sonst. Rec)	135.600.000,00 kg		Aluminium-Rezyklat	73.206.000,00 kg	
KS Mono (sonst. Rec.)	447.100.000,00 kg		Glas-Rezyklat	2.580.336.000,00 kg	
LVP (Input)	1.104.290.000,00 kg		KS therm. & rohstoffl. Rec.	201.944.000,00 kg	
Verbundkarton (sonst. Rec.)	3.200.000,00 kg		KS-Rezyklat (Misch)	549.810.000,00 kg	
Weißblech (sonst. Rec)	171.600.000,00 kg		KS-Rezyklat (Mono)	303.056.000,00 kg	
WB-Verschlüsse (Altglas)	8.800.000,00 kg		Mahlgut (Al, WB Rec.)	10.452.000,00 kg	
Rückfluss			PPK-Rezyklat	11.857.190.500,00 kg	
Aktiv Tag AU (Kühlkette)	20.000.000,00 item		Reststoffe therm. Rec.	2.006.215.050,00 kg	
RFID Tag AU (EE-Geräte)	50.000.000,00 item		Weißblech-Rezyklat	438.942.000,00 kg	
RFID Tag AU (CD/DVD)	25.000.000,00 item		Zusatz RFID-Komponenten		

RFID Tag AU (Kleidung)	50.000.000,00 item	Alu in Alu	760,06 kg
Smart Label AU (Archiv)	500.000.000,00 item	Aluminium in Glas	52,33 kg
Smart Label AU (Bücher)	20.000.000,00 item	Aluminium in Misch-KS	4,41 kg
Smart Label AU (GG)	100.000.000,00 item	Aluminium in Mono-KS	2,16 kg
		Aluminium in PPK	1,12 kg
		KS in Misch-KS	6.999,23 kg
		KS in Mono-KS	5.153,98 kg
		Kupfer in Alu	2.837,43 kg
		Kupfer in Glas	24,42 kg
		Kupfer in Misch-KS	20,57 kg
		Kupfer in Mono-KS	10,10 kg
		Kupfer in PPK	10,41 kg
		Kupfer in Stahl	1.934,61 kg
		Nickel in Glas	0,05 kg
		Nickel in Misch-KS	0,05 kg
		Nickel in Mono-KS	0,02 kg
		Nickel in PPK	0,58 kg
		Nickel in Stahl	4,34 kg
		Silber in Alu	519,36 kg
		Silber in Glas	7,15 kg
		Silber in PPK	3,05 kg
		Silizium in Alu	39,60 kg
		Silizium in Glas	27,26 kg
		Silizium in PPK	3,36 kg
		Zink in Misch-KS	3,96 kg
		Zink in Mono-KS	1,94 kg
		Zink in PPK	0,72 kg
kg	31.334.258.903,15 kg	kg	31.334.258.916,71 kg

Quelle und Anmerkungen: Berechnungen des IZT