

Abschlussbericht

Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung

von

Torsten Zeller, Sven Birkenfeld, Oliver Keich, Bernd Nawothnig, Jan Henning Seelig

Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH
(CUTEC Institut)

Förderkennzeichen: L75 15006
Laufzeit: 05.08.2015 – 15.05.2016

Die Arbeiten dieses Projekts werden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

August 2016



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

ZUWENDUNGSGEBER

**Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft
Baden-Württemberg**

PROJEKT BETREUER



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Projektträger Karlsruhe
Baden-Württemberg Programme
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

IM UNTERAUFTRAG

**Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT**
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg
Leiter
Prof. Dr. rer. nat. Andreas Hornung

IHRE ANSPRECHPARTNER FÜR DIESEN BERICHT

Name	Telefon	E-Mail
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich	05323 933 124	martin.faulstich@cutec.de
Dr. rer. nat. Torsten Zeller	05323 933 206	torsten.zeller@cutec.de
Dipl.-Biol. Jan Seelig, M. Eng.	05323 933 144	jan.seelig@cutec.de
Dr.-Ing. Matthias Franke	09661 908 438	matthias.franke@umsicht.fraunhofer.de
M. Eng. Jonathan Aigner	09661 908 435	jonathan.aigner@umsicht.fraunhofer.de
Dipl.-Ing. Katharina Reh	09661 908 431	katharina.reh@umsicht.fraunhofer.de

Clausthal-Zellerfeld, den 15. August 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	9
2	Aufgabenstellung	10
3	Lösungsansatz	13
4	Ergebnisse aus Recherchen und Befragungen	15
4.1	Markiersysteme	15
4.1.1	Markierungen mittels Barcode	15
4.1.1.1	Codierungen	15
4.1.1.2	Beschriftungsverfahren	19
4.1.2	Markierung mit Informationsübertragung per Funk (RFID)	22
4.1.3	Weitere Möglichkeiten der Markierung	23
4.2	Detektion von Markierungen	24
4.2.1	Barcodes.....	24
4.2.2	RFID	26
4.2.3	Weitere Markierungen	27
4.3	Möglichkeiten der Markierung und Detektion für zukünftige Recyclingaktivitäten	27
4.4	Modellstoffströme: Kleinmotoren aus Altfahrzeugen	29
4.4.1	Aufkommen von Altfahrzeugen.....	29
4.4.1.1	Aufkommen von Altfahrzeugen in Baden-Württemberg und Deutschland	29
4.4.1.2	Aufkommen von Altfahrzeugen im benachbarten Ausland	30
4.4.1.3	Zukünftige Entwicklung der Altfahrzeugzahlen in Deutschland und den Nachbarländern	31
4.4.2	Erfassung, Verbleib und Verwertungswege von Altfahrzeugen.....	32
4.4.3	Stand der Aufbereitung von Klein- und Hilfsmotoren.....	33
4.4.4	Zusammensetzung und grundsätzlicher Aufbau von Kleinmotoren aus Altfahrzeugen	33
4.4.5	Wertstoffpotenziale in Kleinmotoren aus Altfahrzeugen	36
4.4.5.1	Durchschnittliche Anzahl und Gewicht von Kleinmotoren in Altfahrzeugen	38
4.4.5.2	Recyclingpotenzial in Kleinmotoren in Baden-Württemberg, Deutschland und im benachbarten Ausland	40
4.4.5.3	Zukünftige Entwicklung des Recyclingpotenzials	42
4.5	Modellstoffströme: Elektromotoren in der Industrie	43
4.5.1	Klassifikation von Elektromotoren.....	43
4.5.2	Grundsätzlicher Aufbau und stoffliche Zusammensetzung.....	45
4.5.3	Erfassung, Verbleib und Verwertungswege.....	46
4.5.4	Refurbishment	47
4.5.5	Stand der Aufbereitung	48
4.5.6	Abfallaufkommen	48
4.5.6.1	Globale Abfallmengen.....	48
4.5.6.2	Abfallmengen in Deutschland und Europa	50

4.5.7	Anwendungsbeispiele	52
4.5.7.1	Werkzeugmaschinen.....	52
4.5.7.2	Industrieroboter.....	52
4.6	Modellstoffströme: Fahrräder und Elektrofahrräder (E-Räder).....	53
4.6.1	Aufkommen von Fahrrädern und E-Rädern.....	53
4.6.1.1	Bestand und Absatz in Deutschland und Baden-Württemberg.....	53
4.6.1.2	Fahrradmarkt in den Nachbarländern	55
4.6.1.3	Zukünftiges Abfallaufkommen	58
4.6.2	Erfassung, Verbleib und Verwertungswege.....	59
4.6.3	Stand der Aufbereitung	60
4.6.4	Zusammensetzung	60
4.6.5	Wertstoffpotenziale in Fahrrädern und E-Rädern	64
4.6.5.1	Recyclingpotenzial in Nabendynamos	65
4.6.5.2	Recyclingpotenzial in elektrischen Fahrradantrieben	66
4.7	Weitere potenzielle Stoffströme	70
4.7.1	Transportanwendungen.....	70
4.7.1.1	Hybrid- und Elektrofahrzeugantriebe.....	70
4.7.1.2	Antriebsmotoren von Elektrolokomotiven und Hochgeschwindigkeitszügen ..	71
4.7.2	Gebäudetechnik.....	71
4.7.2.1	Heizungspumpen	71
4.7.3	Medizintechnik	72
4.7.3.1	Medizinische Ausrüstung	72
4.7.3.2	Magnetresonanz-Tomographen (MRT)	72
4.7.4	Spezialanwendungen	72
4.7.4.1	Magnetische Bremsen und Kupplungen.....	72
4.7.4.2	Hebemagnete ohne Strombedarf	73
4.7.4.3	Separatoren	73
4.7.5	Schlussfolgerungen zu weiteren potenziellen Stoffströmen	73
5	Demontage von Elektromotoren, Nabendynamos und elektrischen Fahrantrieben	75
5.1	Demontageversuche	75
5.1.1	Versuchsbeschreibungen	75
5.1.1.1	Demontage von Industrie-Elektromotoren.....	75
5.1.1.2	Demontage von Fahrradnabendynamos	83
5.1.1.3	Demontage elektrischer Fahrradantriebe	84
5.1.1.4	Demontage von Kleinmotoren aus Kfz.....	88
5.1.1.5	Magnetmaterial-Analytik	90
5.1.2	Versuchsergebnisse	90
5.1.2.1	Ergebnisse der Demontage von Industrie-Elektromotoren.....	90
5.1.2.2	Ergebnisse der Demontage von Fahrradnabendynamos	104
5.1.2.3	Ergebnisse der Demontage elektrischer Fahrradantriebe	108
5.1.2.4	Ergebnisse der Demontage von Kleinmotoren aus Kfz	113
5.1.2.5	Ergebnisse der Magnetmaterial-Analytik.....	123

6	Recyclinggerechtes Design der Modellstoffströme	130
6.1	Kleinmotoren aus Altfahrzeugen	130
6.2	Indusriemotoren	131
6.3	Nabendynamos und elektrische Antriebsmotoren aus Fahrrädern / E-Rädern.....	131
6.4	Erkenntnisse aus der Befragung von Unternehmen.....	132
7	Planung der Demontagefabrik auf Basis eines Industrie 4.0-Ansatzes	134
7.1	Anforderungen an die benötigte Planungssoftware	134
7.2	Abgrenzung zu bestehenden Planungswerkzeugen im Umweltbereich.....	135
7.3	Konzeption einer spezialisierten Softwarelösung.....	137
7.3.1	Basisarchitektur	138
7.3.2	Front-End.....	138
7.3.2.1	Darstellung des entwickelten Konzeptes.....	138
7.3.2.2	Benutzeroberfläche	140
7.3.3	Daten	143
7.3.3.1	Datenbank	144
7.3.3.2	Sichern und Wiederherstellen	145
7.3.3.3	Rückverfolgbarkeit und Revision von Änderungen.....	146
7.3.3.4	Mehrsprachigkeit.....	147
7.3.3.5	Datensicherheit.....	147
7.3.3.6	Datenimport	148
7.3.3.7	Stand der Implementierung.....	148
7.3.4	Zukünftige Möglichkeiten	148
8	Konzeptionelle Entwicklung der Demontagefabrik	150
8.1	Ausgestaltung einer Demontagefabrik	150
8.1.1	Grundlegender Aufbau	150
8.1.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	152
8.1.2.1	Stoffströme	152
8.1.2.2	Bilanzierungsgrundlage	153
8.1.2.3	Ergebnis.....	155
8.2	Ansätze für die Erfassung von wertstoffhaltigen Abfällen	157
8.2.1	Gesteigerte Erfassung wertstoffhaltiger Komponenten aus Altfahrzeugen	158
8.2.2	Gesteigerte Erfassung von wertstoffhaltigen Komponenten aus Indusriemotoren.....	160
8.2.3	Gesteigerte Erfassung von wertstoffhaltigen Komponenten aus Fahrrädern und E-Rädern	161
8.3	Möglichkeiten zur Einbindung der Öffentlichkeit	162

9	Schnittstellenanalyse zur Ultraeffizienzfabrik	164
9.1	Einbindung in den „UEF check basic“	164
9.2	Nutzung des Konzepts der Ultraeffizienzfabrik zur Konzeption einer effizienten Demontagefabrik.....	166
10	Executive Summary	171
11	Anhang	174
11.1	Abbildungsverzeichnis	174
11.2	Tabellenverzeichnis.....	179
11.3	Literaturverzeichnis.....	182
11.4	Abbildungen Demontage Kleinmotoren aus Kfz	203
11.5	Abbildungen Leiterplatten in Kleinmotoren aus Kfz	208
11.6	Bewertung der Demontierbarkeit von Kleinmotoren aus Kfz.....	209
11.7	Tabelle zur Funktionalitätsübersicht der am Markt erhältlichen Planungswerkzeuge für den Umweltbereich	220

1 Hintergrund

Der Ausbau der Ressourceneffizienz nimmt in Baden-Württemberg einen wichtigen Stellenwert ein, da die Schonung natürlicher Ressourcen nicht nur aufgrund ökologischer Aspekte, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht bedeutend ist. Zum einen ist eine gesicherte Rohstoffversorgung für die Stabilität der Wirtschaft unabdingbar, zum anderen können insbesondere Branchen wie der Maschinen- und Anlagenbau durch die Weiterentwicklung vorhandener oder Entwicklung neuer Recyclingtechnologien profitieren. Innovative Recyclingstrategien sollen zukünftig in entscheidendem Maße zum Schließen von Materialverwendungszyklen mit dem Ziel der Etablierung einer ökonomisch wie ökologisch tragfähigen Kreislaufwirtschaft beitragen.

Die grundlegende Idee zur Einrichtung einer Demontagefabrik im urbanen Raum geht auf die „Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg“ zurück, die beim Ressourceneffizienzkongress in Karlsruhe im September 2014 an den Umweltminister übergeben wurde. Um konkrete Handlungsempfehlungen zu geben, wurden – aufbauend auf den Erkenntnissen der Studie und ergänzt durch Ansätze aus den Arbeitskreisen der „Akteursplattform Ressourceneffizienz“ – in Abstimmung mit dem Umweltministerium fünf ausgewählte Leuchtturmprojekte skizziert, deren Ausführung den Innovationsvorsprung Baden-Württembergs weiter ausbauen soll. Eines dieser Leuchtturmprojekte ist die Einrichtung einer Demontagefabrik im urbanen Raum. Das Konzept zielt auf eine Steigerung der Erfassungs- und Recyclingquoten für Stoffströme ab, die die betrachteten versorgungskritischen Elemente enthalten, und trägt außerdem durch die Re-Industrialisierung urbaner Lebensräume zu einem wichtigen Bestandteil der Stadtplanung und –entwicklung bei. Die Demontagefabrik steht in dieser Hinsicht in thematischer Nähe zum Projekt „Ultraeffizienzfabrik im urbanen Umfeld“, welches sich umfassend mit der Re-Integration industrieller Produktion in den urbanen Raum befasst.

Ausgangspunkt für die in diesem Bericht dargestellten Arbeiten ist die im Rahmen des Projektes „Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse“ geschaffene Datengrundlage. In dieser Vorstudie wurde neben der Aktualisierung und Erweiterung des Wissens über Mengen und Zusammensetzungen von Abfallströmen eine Auswahl demontagefähiger, die Zielelemente enthaltender Produktkategorien vorgenommen, welche die inhaltliche Ausrichtung der vorliegenden Arbeit maßgeblich bestimmt hat.

2 Aufgabenstellung

Um die Rohstoffversorgung der Wirtschaft auch in Zukunft sicherzustellen, ist eine erhöhte Unabhängigkeit von rohstofffördernden Ländern anzustreben. Im Land Baden-Württemberg stehen insbesondere die für die ansässige Industrie als kritisch identifizierten Rohstoffe im Fokus. Die Elemente decken sich dabei in weiten Teilen mit den für Deutschland als kritisch identifizierten Elementen (siehe Abbildungen 2-1 und 2-2), weshalb die Ergebnisse landesweite Relevanz aufweisen.

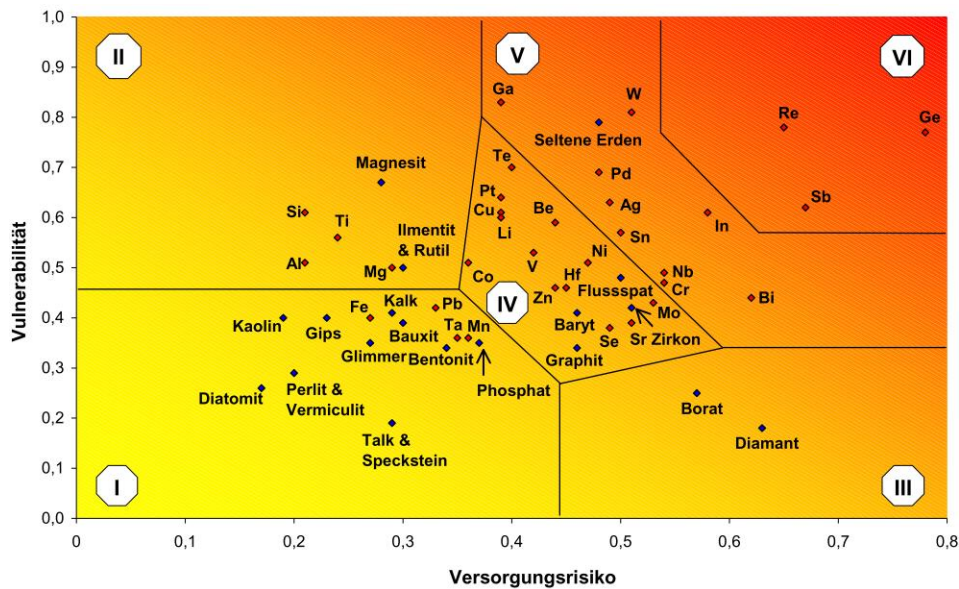


Abbildung 2-1: Kritikalitätsscreening für die deutsche Rohstoffversorgung. (aus [Erdmann et al. 2011])

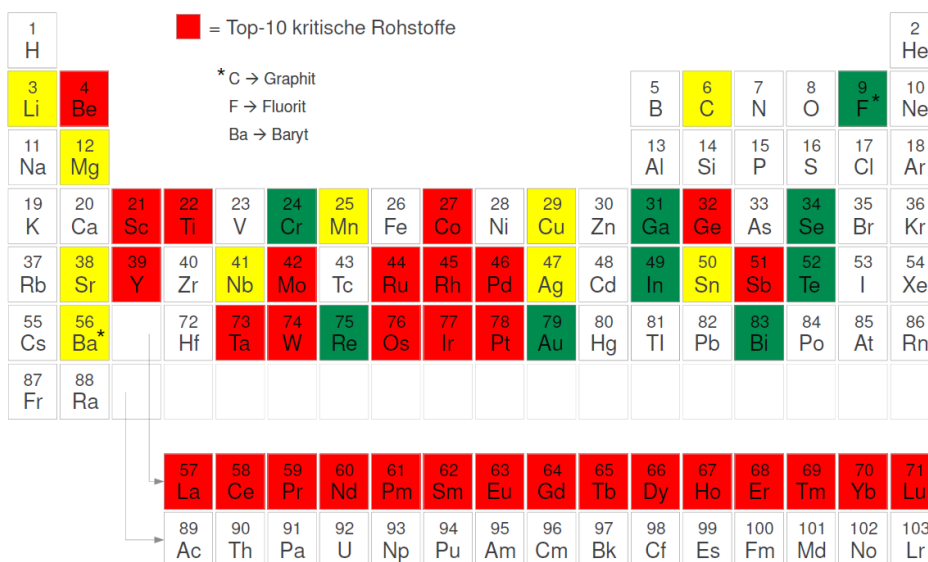


Abbildung 2-2: Kritische Rohstoffe für die baden-württembergische Industrie laut „Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg“. [Kroop et al. 2014]

Die Analyse der Sekundärrohstoffgehalte in kommunalen sowie gewerblichen Abfällen im Rahmen der Studie „Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse“ ergab, dass große Potenziale der Zielmaterialien vorhanden sind, diese jedoch unter der derzeitigen Recyclingpraxis in die Entsorgungsrouten der Massenmaterialien eingebracht werden und dabei verloren gehen. Beispielsweise sind in Elektromotoren, kleinen Elektro- und Elektronikaltgeräten (Klein-EAG) oder Altfahrzeugen relevante Mengen an kritischen wirtschaftsrelevanten Rohstoffen vorhanden, die bisher kaum zurückgewonnen werden – sei es bereits durch mangelhafte Erfassung oder bei der sich anschließenden Aufbereitung nach dem heutigen Standard.

Ein wesentliches Hindernis ist die häufig nahezu dissipative Verteilung der Zielelemente in den für die Verluste verantwortlichen Anwendungen. Dies hat einerseits zur Folge, dass auf Ebene der Sammlung sehr große Einzugsgebiete zu veranschlagen sind, um ausreichende Mengen zu generieren. Andererseits werden somit bei der Rückgewinnung, bezogen auf die Masse des zu verarbeitenden Materials, sehr geringe Ausbeuten der Zielelemente erhalten, wodurch eine wirtschaftliche Betriebsweise nur schwer erreicht werden kann. Die hier vorgestellten Ergebnisse sollen einen Beitrag zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft leisten, indem das Überwinden derartiger Hinderungsfaktoren gezielt angestrebt wird.

Mit Hilfe der Demontagefabrik soll ein Beitrag zur Weiterentwicklung aller Recyclingschritte geleistet werden – ausgehend von der Sammlung, über die Aufbereitung bis hin zur Bereitstellung verschiedener Wertstoffe. Damit wird die Überführung des Standes der Wissenschaft und Technik in die Praxis, zum Stand der Technik, vorangetrieben. Die zukünftige Realisierung der Demontagefabrik soll dabei neben der Anwendung zur Rohstoffrückgewinnung als Demonstrationsprojekt zur Verbreitung neuer Technologien dienen, die in der Realität häufig nicht die Lücke von der Entwicklung zur Markteinführung überwinden (siehe Abbildung 2-3).

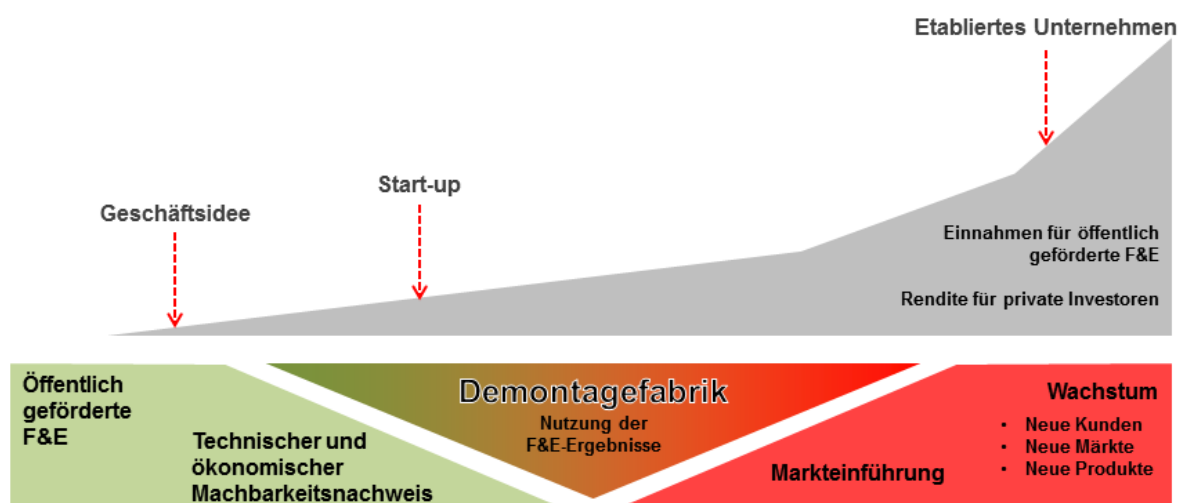


Abbildung 2-3: Die Demontagefabrik als Innovationsmotor zwischen Forschung und Entwicklung und der Markteinführung. [Eigene Darstellung]

Besonderer Schwerpunkt im Rahmen des beschriebenen Themenkreises liegt auf den Aspekten Produktkennzeichnung und deren Detektion sowie der Betrachtung von

Demontagevorgängen. Gesamtkonzepte müssen durch kombinierte Betrachtung der zusammenhängenden Aspekte identifiziert und deren Auswirkungen auf die Recyclingpraxis bewertet werden. Beispielsweise eröffnet die Markierung von Geräten mittels RFID-Tags für die maschinelle Aufbereitung die Möglichkeit, Materialspezifikationen zu hinterlegen, die die automatische Wahl der optimalen Aufbereitungsverfahren sowie eine sortenreine Materialerfassung erlauben. Auch für die Demontage kann die Identifikation durch RFID-Tags und die so ermöglichte Informationsbereitstellung große Vorteile ergeben. So können etwa Demontagehinweise in einer Datenbank hinterlegt werden, die die automatische Zuordnung zu einem mit den entsprechenden Werkzeugen ausgerüsteten Demontageplatz möglich machen.

Die Auswirkungen der Einführung neuer Technologien können nur unter der Voraussetzung einer genauen Kenntnis und Darstellung der bestehenden Recyclingsysteme eingeschätzt werden. Dazu müssen folgende Informationen über das zu betrachtende System (Fokus auf eine Region oder übergreifende Zusammenhänge mit Fokus auf ein Zielmaterial) vorhanden sein und entsprechend miteinander verknüpft werden können:

- ▶ aufkommende Abfallmengen
- ▶ Verortung der Abfallmengen
- ▶ Zusammensetzung der Abfallströme
- ▶ beteiligte Unternehmen (Produzenten und Verwerter)
- ▶ das wirtschaftliche Geflecht zwischen den beteiligten Akteuren
- ▶ Aufbereitungstechnik der Verwerter
- ▶ Performance der vorhandenen Aufbereitungstechnik (Kosten, Verarbeitungskapazitäten, Energiebedarf usw.)
- ▶ Zusammensetzung der erzeugten sekundären Stoffströme
- ▶ Performance der alternativen/innovativen Recyclingtechnologien (Kosten, Verarbeitungskapazitäten, Energiebedarf usw.)
- ▶ Anforderungen an vermarktungsfähige Konzentrate, etc.

Nur durch genaue Kenntnis der Systemdaten sowie der bestehenden Zusammenhänge kann die vorliegende multikriterielle Optimierungsaufgabe im Spannungsfeld zwischen Rückgewinnungsquoten, Kosten und Energieaufwand fundiert gelöst und das Potenzial neuer Recyclingoptionen bestmöglich genutzt werden. Das Erreichen der wirtschaftlichen Betriebsweise einer Demontagefabrik macht ebenfalls die genaue Kenntnis bestehender Systeme im Vorfeld der Implementation (auch zur Identifizierung und Überwindung eventuell bestehender Hemmnisse) zwingend erforderlich.

Durch die Vorstudie wurden Elektromotoren aus Altfahrzeugen sowie aus industriellen Anwendungen als am besten geeigneter Input für die erste Demontagefabrik identifiziert. Die Menge der betrachteten Geräte wurde aufgrund vergleichbaren Aufbaus um Nabendynamos und Nabenantriebe aus dem Fahrradbereich erweitert. Anhand dieser Modellbeispiele sollten im Rahmen des Projektes die Grundlagen für ein zukünftig optimiertes Recycling der in den Geräten verbauten Materialien erarbeitet werden.

3 Lösungsansatz

Die beschriebene Aufgabe erfordert die Verarbeitung, Visualisierung und mathematische Verknüpfung einer großen Fülle von Daten, welche einerseits aus der notwendigen Detailtiefe und andererseits aus der reinen Größe der zu betrachtenden Systeme resultiert. Die Datengrundlage kann dabei je nach Aspekt vorhanden sein, vorhanden aber nicht ausreichend detailliert vorliegen oder gänzlich fehlen. Defizite der Datengrundlage kommen erfahrungsgemäß oftmals nicht im Zuge theoretischer Betrachtungen zutage, sondern bei der praktisch vorgenommenen Durchführung einer derartigen Arbeit. Daher wurde als Lösungsansatz für das hier beschriebene Projekt eine praktische Herangehensweise gewählt.

Aufgrund der Ergebnisse der vorhergehenden Studie „Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse“ wurde Neodym als primär zu betrachtendes Element herangezogen, an dem die im vorliegenden Projekt entwickelte Herangehensweise zur Optimierung des Recyclings beispielhaft dargestellt werden soll.

Nach anfänglichen Recherchen zeigte sich, dass hinsichtlich verschiedener Teilaspekte des Neodymrecyclings bereits Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, sich daraus jedoch nur schwer ein Gesamtbild generieren lässt. Abschätzungen über verfügbare Materialmengen basieren zumeist auf relativ groben Hochrechnungen und Annahmen und weisen im Regelfall keine räumliche oder zeitliche Auflösung auf. Best-Practice-Beispiele geben für einige Elemente Aufschluss über erzielbare Rückgewinnungsraten, jedoch nicht über den Grad der Verunreinigung der so erzeugten Konzentrate. Ebenso wenig ist die real bestehende Verbreitung dieser Best-Practice-Vorgehensweisen bekannt. Teilweise basieren Informationen zudem auf Spezialfällen und Einzelbeobachtungen, die sich nicht ohne Weiteres auf das Gesamtsystem übertragen lassen, sondern nur räumlich begrenzte Aussagekraft besitzen, aber dennoch wichtige Details des Gesamtbildes darstellen. Die Informationen können dabei unterschiedlicher Herkunft sein. Wissenschaftliche Erkenntnisse, Praxiserfahrungen der Marktteilnehmer und spezifische Kenndaten von Aufbereitungsmaschinen seitens der Hersteller tragen gleichermaßen zum Erstellen des Systemabbildes bei.

Bei Betrachtung bisheriger Bemühungen zur Kreislaufschließung unter Fokussierung auf kritische Rohstoffe (aber auch in Bezug auf Massenmaterialien) wird ein Mangel an Ansätzen deutlich, vorhandenes Wissen zentral zu sammeln, zu ordnen und schematisch zu verorten, um so die Abbildung auf der Metaebene zu ermöglichen. Diese Problematik wurde im hier beschriebenen Projekt durch die konzeptionelle Entwicklung einer spezifischen Softwarelösung adressiert. Die Zielsetzung wurde dabei so definiert, dass neben der reinen Systemabbildung eine simulationsgestützte Optimierung mit Hilfe der Software ermöglicht wird.

Die Entwicklung wurde dabei parallel zu praktischen Arbeiten zur Verbesserung des Neodymrecyclings durchgeführt. In diesem Zuge wurden unter anderem praktische Demontageversuche unterschiedlicher, Neodym enthaltender Produkte vorgenommen, mit dem Ziel, Erfahrungen zur notwendigen Datengrundlage zu gewinnen. Zwecks Vervollständigung des Gesamtbildes über das Nutzungssystem der genannten Modellmaterialien wurden die Stoffströme näher beleuchtet.

Zwecks Einbindung der Demontagefabrik in ein zukünftiges Gesamtkonzept zum Recycling

der Zielelemente wurden moderne Möglichkeiten der Markierung und Detektion betrachtet und deren mögliche Auswirkungen auf bei Verwendung im Recyclingbereich beleuchtet.

4 Ergebnisse aus Recherchen und Befragungen

4.1 Markiersysteme

4.1.1 Markierungen mittels Barcode

4.1.1.1 Codierungen

Strichcode (1D-Barcode)

Der Strichcode (1D-Barcode) basiert auf der Darstellung durch einen Satz von vertikalen, parallelen Linien unterschiedlicher Dicke und Abstände. Diese Code-Balken und Lücken repräsentieren Zeichenfolgen mit einer sehr begrenzten Zeichenanzahl. Mit Hilfe des Barcodes können schnell eindeutig Artikeltypen identifiziert werden. Die Bezeichnung als 1D-Barcode liegt darin begründet, dass die Informationen nur in eine Richtung codiert werden [Kieseberg et al. 2010], wie folgende Abbildung verdeutlicht.



Abbildung 4-1: Beispiel eines 1D-Barcodes

Das erste Strichcode-Patent wurde im Oktober 1952 in den USA eingereicht [Patent-Nr. US 2612994 A 2]. Derzeit wird der Strichcode weltweit massiv eingesetzt und repräsentiert eines der am weitesten verbreiteten Systeme zur automatischen Identifikation [Löhle 2012].

Durch Strichcodes können verschiedene Arten von Nummern codiert werden. Der Informationsgehalt hängt dabei von der Anzahl der Code-Balken und Lücken ab. In Europa wird beispielsweise die für Handelsprodukte noch vorherrschende GTIN-13 (Global Trade Identification Number) meist in einen EAN-13-Strichcode codiert und auf Warenpackungen aufgedruckt, so dass diese durch Decodierung mittels Barcodescanner identifiziert werden können.

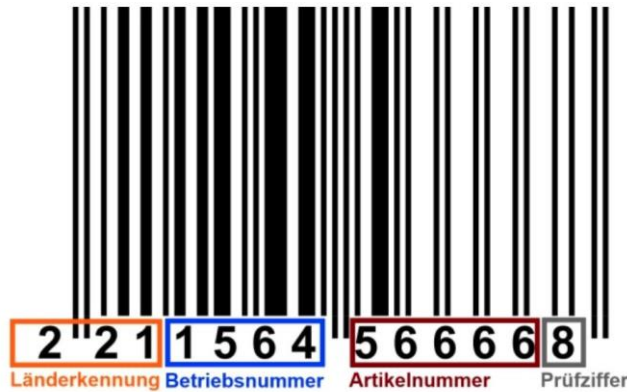


Abbildung 4-2: Beispiel für einen GTIN-13 Strichcode

Die Produktmarkierung mittels GTIN-13 hat durch die Beschränkung auf 13 Zeichen einen relativ geringen Informationsgehalt und erlaubt daher keine Identifizierung eines individuellen Produktes, sondern lediglich des Produkttyps. Ein Strichcode beinhaltet demnach auch keine umfangreichen Informationen über den Produkttyp, sondern dient lediglich der Identifikation. Die produkttypbezogenen Daten können dabei separat in einer Datenbank gespeichert werden. Am Beispiel einer Handelsware können so etwa der Warenpreis, die Warenmenge und weitere Aspekte eines Produktes zugeordnet werden [Matheus und Klumpp 2008].

Die GTIN-13 kann auch auf andere Art von Strichcodes beziehungsweise Auto-ID-Systeme codiert werden. Andere Arten von Strichcodes sind zum Beispiel der Code Codabar, der Code 2/5 interleaved, der Code 39 sowie der GS1-128, die entsprechend für medizinisch-klinische Anwendungen, Autoindustrie und Schiffcontainer sowie Logistik verwendet werden [Finkenzeller 2012]. Diese Strichcodes sind in folgender Abbildung beispielhaft dargestellt.



Abbildung 4-3: Beispielhafte Darstellung verschiedener 1D-Barcodes

Die Herstellung beziehungsweise Verwendung von Strichcodes ist im Vergleich mit anderen Systemen zur automatischen Identifikation kostengünstiger [Urban 2009]. Dies ist neben einer hohen Zuverlässigkeit beim Auslesen der Daten sowie der internationalen Standardisierung einer der Gründe für die weltweite Verbreitung dieser Technologie [Kovac 2013], [ZLIT 2010].

2D-Barcode

Der 2D-Barcode ist eine Methode zum Speichern von Informationen in einem sogenannten Matrix-Barcode. Die Bezeichnung als 2D-Barcode liegt darin begründet, dass die Informationen sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung codiert werden [Kieseberg et al. 2010], wie an dem Beispiel in Abbildung 4-4 gezeigt wird.

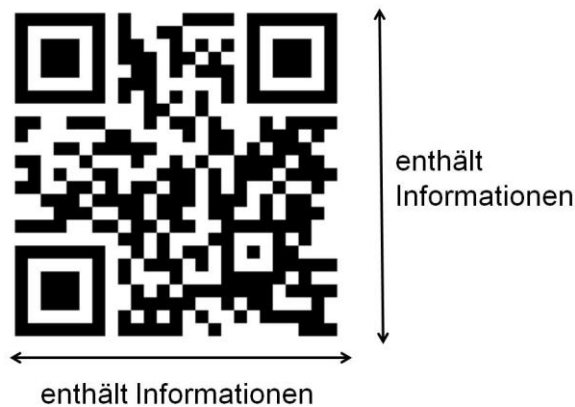







Abbildung 4-4: Beispiel eines QR-Code

Der über alle Industrien betrachtet am stärksten verbreitete 2D-Barcode ist der Quick Response-Code (QR-Code), welcher zudem im Vergleich mit weiteren 2D-Barcode-Typen über die größte Speicherkapazität verfügt und daher im Folgenden verstärkt betrachtet wird. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der unterschiedlichen 2D-Barcode-Typen.

Tabelle 4-1: *Eigenschaften verschiedener 2D-Barcode-Typen. Aus [Yokota 2009]*

	PDF417	DATA MATRIX	MAXI CODE	QR Code	Aztec Code
					
Developer (Country)	Symbol (USA)	CI Matrix (USA)	UPS (USA)	DENSO (Japan)	Hand Held Products (USA)
Code type	Multi-low	Matrix	Matrix	Matrix	Matrix
Data size (Alphanumeric)	1,850	2,355	93	4,296	3,067
Characteristics	High capacity	High capacity Small space	Fast reading	High capacity Small space Fast reading	High capacity
Main market	OA	FA, Medical	Logistics	All industries	Air Line, Railroad
Standard	AIMI ISO	AIMI ISO	AIMI ISO	AIMI ISO JIS	AIMI

Das grundlegende Konzept des QR-Codes wurde 1994 von dem japanischen Unternehmen Denso Wave (einer Tochtergesellschaft von Toyota) entwickelt und bald darauf von der Autoindustrie zur Nachverfolgung von Automobilkomponenten in der Produktion genutzt. Die weitere Verbreitung wurde durch den Umstand gefördert, dass Konsumenten seitdem einen stetig stärker werdenden Wunsch nach Transparenz von Produktionsprozessen – beispielsweise bei der Herstellung von Lebensmitteln oder Pharmazeutika – entwickelten. Ein weiterer Faktor, der die Verbreitung der QR-Codes begünstigte, war die Entscheidung des Unternehmens Denso Wave, für die Nutzung der Codes trotz Einbehalt der Rechte keine Kosten zu veranschlagen.

Seit dem Jahr 2002 konnten QR-Codes die Märkte in besonders starkem Maße durchdringen, da seitdem allen Verbrauchern das Auslesen mittels Smartphone möglich ist [DENSO WAVE 2015]. Außerdem werden QR-Codes mittlerweile auf Druckmedien oder in der Außenwerbung verwendet, um Webseiten zu verlinken und dem Benutzer so Zugang zu weiteren Informationen zu ermöglichen [Yokota 2009], [EuKomm 2016].

QR-Codes sind bis zu einem gewissen Grad robust gegenüber Verschmutzungen und Beschädigungen. Bis zu 30 % eines QR-Codes können beschädigt sein, bevor die gespeicherten Informationen nicht mehr wiederhergestellt werden können [Yokota 2009].

In Abhängigkeit der gespeicherten Datenmenge variiert die minimal nötige Größe eines QR-Codes. Der Platzbedarf für einen QR-Code ist jedoch trotz höheren Informationsgehaltes in der Regel niedriger als bei einem Strichcode. Neben dem normalen QR-Code existieren weitere Formate. Der sogenannte Micro-QR-Code hat gegenüber dem normalen QR-Code einen geringeren Platzbedarf aber auch eine geringere Datenspeicherkapazität. Der iQR-Code, der über geringeren Platzbedarf und höhere Speicherkapazität als normale QR-Codes verfügt, kann auch in rechteckiger Form ausgedruckt werden, was für bestimmte Anwendungsgebiete eine optimierte Anpassung ermöglicht. Folgende Abbildung zeigt eine

beispielhafte Darstellung beider Typen.

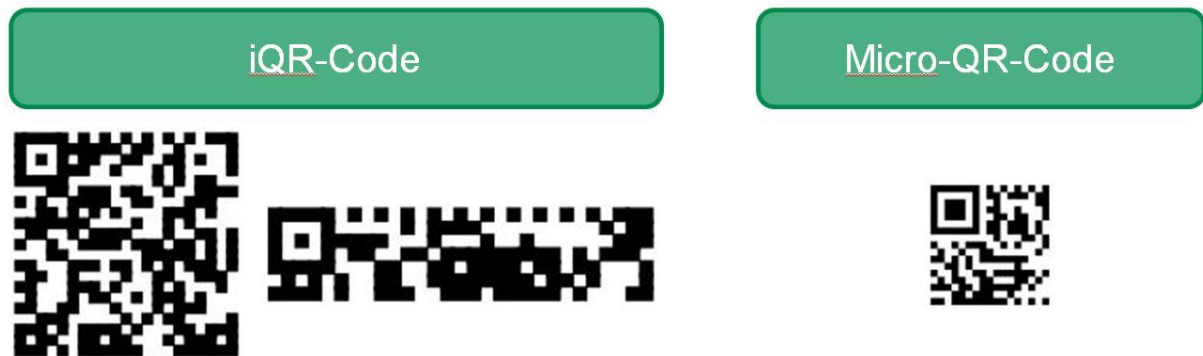


Abbildung 4-5: *Beispielhafte Darstellung eines iQR-Codes (quadratische und rechteckige Ausführung) und eines Micro-QR-Codes*

QR-Codes verfügen über eine höhere Datenspeicherkapazität und bessere Sicherheitsmaßnahmen als Strichcodes, um betrügerische Verwendung der Informationen zu verhindern. Die höhere Datenspeicherkapazität ermöglicht die Speicherung von detaillierten Informationen direkt im QR-Code. Im Gegensatz zu Strichcodes können aus demselben Grund auch spezifische Informationen über ein individuelles Produkt und nicht nur über den Produkttyp gespeichert werden. Die Dateninhalte eines QR-Codes können aus Buchstaben, Zahlen und weiteren Zeichen bestehen.

4.1.1.2 Beschriftungsverfahren

Für das dauerhafte Aufbringen der Barcodes stehen unterschiedlichste Verfahren zur Verfügung, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

Thermotransferdruck

Die Beschriftung mittels Thermotransferdruck wird häufig in Bereichen eingesetzt, in denen die Lesbarkeit des Druckbildes über einen langen Zeitraum hinweg gewährleistet sein soll. Dies ist zum Beispiel beim Aufbringen von Teilekennzeichnungen oder Seriennummern auf langlebige Güter gefordert. Bei dem Verfahren befindet sich eine mit thermoempfindlicher Farbe beschichtete Folie zwischen einem Druckkopf, der hunderte kleiner Heizelemente (je nach erzielter Auflösung) umfasst, und dem zu bedruckenden Gegenstand. Durch die Einwirkung von Hitze aus den Heizelementen des Druckkopfes wird die Farbe verflüssigt und auf die zu bedruckende Oberfläche übertragen.

Für die Anwendung im Bereich der Produktmarkierung erscheint dieses Verfahren besonders geeignet, da eine sehr dauerhafte Informationshinterlegung möglich ist.

Lasermarkierung

Die Lasermarkierung wird hauptsächlich im Metall- und Kunststoffbereich verwendet. Je nach Art des eingesetzten Lasers können mit dieser Technik auch transparente Materialien (wie etwa Glas) beschriftet werden. Die Markierung basiert dabei auf drei unterschiedlichen Prinzipien – Verfärbung, Gravur oder Aufschäumen der Oberfläche. Struktur und Härte der zu

beschriftenden Materialoberfläche spielen bei diesem Beschriftungsverfahren keine Rolle [SIC Marking 2015].

Typische Einsatzgebiete der Lasermarkierung sind Markierungen auf:

- ▶ Werkzeugen und Kugellagern,
- ▶ elektronischen Komponenten und Leiterplatten,
- ▶ Metallteilen der Automobil- oder Flugzeugindustrie,
- ▶ Kunststoffprodukten und Komponenten für Haushaltswaren,
- ▶ medizinischen Instrumenten (Hochpräzisions-Mikrocodierung),
- ▶ Werbegeschenken und Markenprodukten (Dekorative Markierungen) [Östling Marking Systems GmbH 2015].

VERFÄRBUNG kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Zum einen kann im Fall metallischer Oberflächen das sogenannte Anlassfärben verwendet werden. Dabei reagiert das durch die Bestrahlung erhitzte Metall mit dem Luftsauerstoff, wodurch eine oxidative Verfärbung stattfindet. Eine Veränderung der Materialeigenschaften des beschrifteten Bauteils findet dabei aufgrund der geringen Eindringtiefe des Lasers von max. 5 µm nicht statt. Eine weitere Methode ist die Markierung durch Farbumschlag. Diese wird im Kunststoff- und Lackbereich verwendet. Der Farbumschlag wird durch in die zu markierenden Materialien eingebrachte Additive ermöglicht, die unter Einwirkung des Laserlichts reagieren und so eine Farbveränderung bedingen [Östling Marking Systems GmbH 2015].

Bei der LASERGRAVUR erfolgt die Beschriftung durch Materialabtrag, also in Form einer Vertiefung auf dem Produkt. Durch die Einwirkung des Lasers wird dabei eine Verflüssigung bzw. das Verdampfen des Materials hervorgerufen. Eine Sonderform der Lasergravur, die zudem einen stärkeren Kontrast bewirkt, ist der Materialabtrag aus farbigen Beschichtungen. Dabei wird eine Eloxal- oder Lackschicht von der Oberfläche eines Bauteils abgetragen, um eine darunterliegende (im Idealfall andersfarbige) Schicht sichtbar zu machen.

Durch die Lasermarkierung mittels AUFSCHÄUMEN können Kunststoffe beschriftet werden. Bei dieser Methode wird durch die Einwirkung des Lasers der Kunststoff in einem definierten kleinräumigen Bereich thermisch zersetzt, wobei die gasförmigen Abbauprodukte das Material aufschäumen. Der aufgeschäumte Bereich besitzt gegenüber dem umgebenden Material abweichende optische Eigenschaften.

Die zur Laserbeschriftung eingesetzten Maschinen sind laut Herstellerangaben wartungsfrei und eignen sich dank hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit auch in großvolumigen Produktionsbereichen [SIC Marking 2015]. Neben stationären und in Fertigungsanlagen integrierbaren Einheiten sind auch handgeführte Geräte erhältlich (Firma Laser Photonics [Laser Photonics 2008]).

Nadelmarkierung und Nadel-Ritzmarkierung

Sowohl die Nadel- als auch die Nadel-Ritzmarkierung basieren auf einer kleinräumigen Materialverdrängung. Während beim Nadelmarkieren das (Schrift-)Bild durch wiederholtes Einschlagen einer harten, oszillierenden Metallspitze in die zu markierende Oberfläche erfolgt, wird bei der Nadel-Ritzmarkierung eine schmale Furche durch das Material gezogen. Bei letzterer Methode entstehen somit durchgehende Linien, während das Ergebnis der Ersteren eine Abfolge von Punkten ist (Abbildung 4-6).

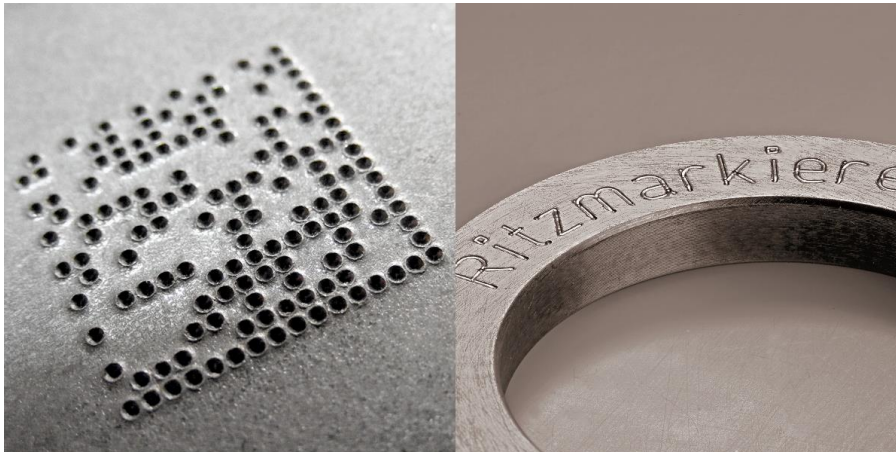


Abbildung 4-6: Beispiele für die Nadelmarkierung (links) sowie die Nadel-Ritzmarkierung.
Bildquelle: [Markator Manfred Borries GmbH 2016]

Beide Arten der Markierung eignen sich ausschließlich für plastisch verformbare Materialien (wie die meisten Metalle und Kunststoffe). Die Markierung durch Nadel-Ritzer ist gegenüber dem schlagenden Verfahren der Nadelmarkierung deutlich geräuschärmer.

Zum Aufbringen von DataMatrix-Code haben sich Nadelmarkierer in der Praxis bewährt. Sie erreichen bei der Markierung jedoch nicht dieselbe Geschwindigkeit, die mit der Lasermarkierung möglich ist, und können bei besonders fragilen Bauteilen aufgrund der Krafteinwirkung nicht eingesetzt werden [Sisma 2016]. Wie bei den Lasermarkierern sind auch Nadelmarkierer in handgeführter Ausführung erhältlich (zum Beispiel [SIC Marking 2016], [Technifor 2016]).

Elektrolytische Beschriftung

Elektrolytische Beschriftung kann ausschließlich bei elektrisch leitfähigen Materialien (Metallen) angewendet werden. Unter Anlegen einer Spannung wird dabei die Produktoberfläche einem Elektrolyten ausgesetzt, der innerhalb weniger Sekunden eine farbliche Veränderung der Metalloberfläche durch Oxidation hervorruft [Schilling Marking Systems 2016]. Die Übertragung der Beschriftung erfolgt mittels einer vorgefertigten Schablone, was einen großen Spielraum bei der Gestaltung lässt.

Die Technik wird heute typischerweise für die Beschriftung folgender Produkte eingesetzt:

- ▶ Bestecke
- ▶ Werkzeuge
- ▶ Medizinische Instrumente
- ▶ Armaturen
- ▶ Kugellager
- ▶ Fässer [Östling Marking Systems GmbH 2016].

Die verwendeten Elektrolyte werden materialspezifisch ausgewählt, da die verschiedenen Metalloberflächen eine unterschiedliche Reaktivität aufweisen.

4.1.2 Markierung mit Informationsübertragung per Funk (RFID)

Die Übertragung (meist) digitaler Daten über kurze, definierte Strecken wird mittels Radio Frequency Identification (RFID) ermöglicht. Im Allgemeinen besteht ein RFID-System aus einer simplen, kostengünstigen Einheit auf der mobilen Seite (Tag/Transponder) und einer komplexeren, teureren Einheit (Lesegerät) auf der anderen Seite. Diese ist oft stationär, kann jedoch auch mobil gestaltet sein [Landt 2005]. Das System umfasst demnach mindestens ein Lesegerät und einen Transponder (RFID-Tag), auf dem als mobilem Datenspeicher Informationen codiert vorliegen.

RFID-Tags erlauben das berührungslose Identifizieren und Lokalisieren von Objekten durch ein elektromagnetisches Feld. Der Tag arbeitet dabei entweder als aktiver Tag mit Hilfe einer eigenen Stromquelle (Batterie/Solarzelle) oder als passiver Tag, der die nötige Energie aus dem vom Lesegerät gesendeten Signal bezieht [DENSO WAVE 2015].

Um die vom Lesegeräte empfangenen Informationen speichern, auswerten, bearbeiten und weiterleiten zu können, wird das Lesegerät mit einem Datenerfassungssystem verbunden [Finkenzeller 2012], [Löhle 2012]. Neben den direkt gespeicherten Daten ist außerdem das Hinterlegen weiterer Informationen in einer angebotenen Datenbank möglich.

Der einfache Aufbau der Tags erlaubt heutzutage deren sehr kostengünstige Produktion (beispielsweise durch Einsatz gedruckter Schaltungen), was den massenhaften Einsatz ermöglicht. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt werden RFID-Tags für hunderte bis tausende von Anwendungen genutzt. Diese liegen in einem breiten Spektrum an Bereichen:

- ▶ Markierung (beispielsweise von Kleidung) im Verkauf zwecks Diebstahlschutz
- ▶ Codierung von Bibliotheksbüchern
- ▶ Codierung von Liftpässen in Skigebieten
- ▶ Verkehrsmautsysteme
- ▶ Diebstahlschutz für Automobile
- ▶ Zugangskarten für Gebäude
- ▶ Management von Lieferketten
- ▶ Terminüberwachung im Containerfrachtbetrieb
- ▶ Grenzüberwachung [DENSO WAVE 2015].

Die RFID-Systeme können entweder als Read-Only-System ausgeführt sein oder auch als Read-Write-System, bei dem ein Beschreiben des Tags durch den Leser (in diesem Fall technisch als Lese-Schreib-Kombination ausgeführt) möglich ist [Finkenzeller 2012].

Im Zuge der zunehmenden Automatisierung logistischer Systeme besteht für die logistischen Objekte der Bedarf zur Echtzeit-Überwachung. Sogenannte Smart Object Technologien ermöglichen einen zeitnahen Informationsaustausch zwischen Objekt und System. Zu diesen Technologien zählen neben RFID-Systemen Real-Time Locating Systems (RTLS) und Wireless Sensor Networks (WSN), welche an die logistischen Objekte angebracht werden. Die so ausgerüsteten „intelligenten“ Objekte (Smart Objects) können unter Einsatz sämtlicher Möglichkeiten eindeutig identifiziert werden, können Informationen speichern und verarbeiten, die Umgebung mittels Sensoren überwachen, über Aktoren mit dieser interagieren, drahtlos kommunizieren und die eigene Position im Raum ermitteln [Lempert et al. 2011].

4.1.3 Weitere Möglichkeiten der Markierung

Neben den genannten Markierverfahren mit optischer oder funkbasierter Informationsübertragung existiert eine Reihe weiterer Verfahren, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden sollen.

Die Markierung mittels **künstlicher DNA** (kDNA) dient vornehmlich dem Diebstahlschutz. Die Deutsche Bahn nutzt beispielsweise das LinkDNA-FIMS (Forensisches Injektions-Markierungs-System) zur Markierung von Leitungen. Einerseits dient dies bei ausreichender Verbreitung des Wissens über dieses Vorgehen als Präventionsmaßnahme, andererseits können Täter oder Händler, die in Kontakt zu den DNA-Partikeln gekommen sind, im Zuge der Verbrechensaufklärung identifiziert werden [SDNA Technology GmbH 2012]. Ein weiteres Anwendungsspektrum ist die Prävention von Produktpiraterie, bei der die Originalware mittels künstlicher DNA kenntlich gemacht wird [Adlershof Online 2012].

Die Applikation der kDNA kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Sie kann entweder bereits im Produktionsprozess vorgenommen werden oder durch späteres Aufsprühen oder Aufstreichen. Auch die Integration von kDNA in Microdots ist möglich.

Chemische Molekülmarker werden aufgrund ihrer Fälschungssicherheit ebenfalls zum Schutz vor Produktpiraterie oder zum Nachweis technischer Modifikationen eingesetzt. Die zur Markierung genutzten, spezifischen Moleküle können nur durch genaue Kenntnis der chemischen Zusammensetzung sowie der bei ihrer Synthese verwendeten Prozessparameter nachgebildet werden. Gegenüber der Markierung mittels künstlicher DNA haben die verwendeten Partikel, welche meist keramischer Natur sind, den Vorteil einer sehr hohen Hitzebeständigkeit (bis 2500 °C [Polysecure 2016]). Sie können bereits im Produktionsprozess unterschiedlichsten Werkstoffen beigelegt werden. Beispiele sind [Polysecure 2016]:

- ▶ Kunststoffe
- ▶ Metallguss
- ▶ Farben und Lacke
- ▶ Chemikalien
- ▶ Textilien
- ▶ Gummi und Kautschuk
- ▶ Belagmassen
- ▶ Kraftstoffe und Öle
- ▶ Sinterwerkstoffe
- ▶ Kosmetik.

Laut Hersteller [Polysecure 2016] werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften der markierten Werkstoffe aufgrund der sehr geringen benötigten Mengen (bei Kunststoffen im ppm-Bereich) nicht beeinflusst. Die Methodik erlaubt zudem laut [Polysecure 2016] mehrere Billionen gut unterscheidbarer Informationskombinationen, was ebenfalls ein verschlüsseltes Hinterlegen von Teilenummern oder ähnlichen Informationen erlaubt. Neben der numerischen Kodierung ist zusätzlich eine Integration fluoreszierender Bestandteile möglich.

Eine weitere Methode aus dem Bereich der Fälschungssicherung sind sogenannte **Mikrofarbcode-Systeme**. Diese bestehen aus 8–90 Mikrometer großen Partikeln aus Melamin-Alkyd-Polymeren, welche entweder direkt auf das Produkt oder in speziellen Etiketten oder Verschlussmarken auf die Verpackungen aufgebracht werden. Die Kodierung

geschieht in diesem Fall durch die geschichtete Farbabfolge der Partikel. Erfinder dieses Markiersystems ist die 3S GmbH [3S 2016]. Durch die Abfolge von mindestens vier Schichten sind laut 3S 4,35 Milliarden individuelle Kodierungen möglich. Hauptanwendungsgebiet ist bei dieser Markiertechnik ebenfalls die Fälschungssicherheit.

Microdots bieten die Möglichkeit, ausgeschriebene Informationen in Form etwa 0,1 – 1 Millimeter großer, aus Kunststoff und Metall bestehender Plättchen an beliebigen Gegenständen anzubringen. Sie werden vornehmlich als Diebstahlschutz genutzt. Folgende Abbildung zeigt ein stark vergrößertes Beispielexemplar.



Abbildung 4-7: Beispiel eines Microdots. Aus [Alpha Dot]

Microdots werden mit einer individualisierten Codierung versehen und dem jeweiligen Kunden zur Applikation auf zu sichernde Güter verkauft. Die Codierung ist personalisiert in einer Datenbank hinterlegt.

Die Eignung als Diebstahlschutz ist durch entsprechende Kennzeichnung der markierten Gegenstände gegeben. Ein zuverlässiges Entfernen sämtlicher Microdots ist aufgrund der geringen Größe kaum möglich. Gleichzeitig genügt ein einzelner Punkt zur Übertragung der beinhalteten Informationen [Alpha Dot].

4.2 Detektion von Markierungen

4.2.1 Barcodes

Die Unterschiede im Aufbau von 1D- und 2D-Barcodes wurden im Kapitel 4.1.1.1 bereits beschrieben. Für das Auslesen der Codes sind jeweils Geräte unterschiedlicher Leistungsfähigkeit am Markt erhältlich. Die Datenübertragung kann bei optischen Markierungen nur dann erfolgen, wenn direkter Sichtkontakt zwischen dem Barcode und dem Barcode-Leser hergestellt ist.

Beim Auslesen von 2D-Barcodes werden verschiedene, auf dem Code hinterlegte Elemente genutzt (siehe farbige Markierungen am Beispiel eines QR-Codes, Abbildung 4-8). Sie dienen unter anderem der Positionsbestimmung, der Ausrichtung (perspektivische Verzerrung beim Auslesen) oder der Angabe der Versionsnummer der Codierung [Hengstbach 2011].



Abbildung 4-8: Für das Auslesen der enthaltenen Information wichtige Elemente eines QR-Codes (im Bild farbig markiert) [Hengstbach 2011]

Das Auslesen von Barcodes ist heute sehr einfach möglich und kann von Privatpersonen mit den meisten mobilen Endgeräten, sofern diese über eine Kamera verfügen, durchgeführt werden.

Im professionellen Bereich existieren mobile und stationäre Scanner für das Auslesen von 1D- und 2D-Barcodes. Die handgeführten (Mobil-)Geräte (Handhelds) sind entweder in kabelgebundener oder kabelloser Ausführung erhältlich. Stationäre Scanner gibt es einerseits weit verbreitet für Kassenanwendungen, andererseits für industrielle Anwendungen.

Die Scanner lassen sich drei unterschiedlichen Typen zuordnen: CCD-Imager, 2D-Imager und Laserscanner. CCD-Imager und 2D-Imager haben die Vorgehensweise gemeinsam, dass sie die jeweiligen Codes mit Hilfe eines Objektivs aufnehmen (fotografieren) und anschließend decodieren. CCD-Imager nehmen dabei nur eine schmale Zeile auf und kommen daher ausschließlich beim Auslesen von 1D-Barcodes zur Anwendung. 2D-Imager haben demgegenüber eine geringere 1D-Auflösung, eignen sich jedoch gleichermaßen für das Auslesen von 1D- und 2D-Codes.

Bei den Laserscannern erfolgt das Aufnehmen der Information mit Hilfe eines oder mehrerer Laserstrahlen, die durch unterschiedliche Ablenkverfahren über den Code geführt werden und diesen abrastern. Die Aufnahme der Lichtinformation erfolgt in diesem Fall über eine Fotodiode, die die Lichtinformation in ein elektrisches Signal übersetzt. Der Vorteil der Laserscanner gegenüber den Imagern liegt in der Fähigkeit begründet, auch bei schlechten Kontrastverhältnissen noch gute Leseergebnisse zu erzielen. Laserscanner eignen sich daher besonders auch für das Auslesen von Markierungen, welche beispielsweise durch Lasergravur oder Ritzmarkierung in das Trägermaterial selbst geschrieben wurden und daher vergleichsweise niedrige Kontraste aufweisen. Wie auch mit den 2D-Imagern können mit Laserscannern 1D- und 2D-Barcodes ausgelesen werden [Aisci 2016].

4.2.2 RFID

Das Auslesen von RFID-Chips kann mit Hilfe von RFID-Geräten in unterschiedlichen Frequenzbereichen erfolgen. Es werden folgende vier Frequenzbereiche unterschieden:

- ▶ niedrigfrequenter Bereich (LF): 30–300 kHz
- ▶ hochfrequenter Bereich (HF) / Radiofrequenzbereich (RF): 3–30 MHz
- ▶ ultrahochfrequenter Bereich (UHF): 300 MHz – 3GHz
- ▶ Mikrowellenbereich (MW): > 3 GHz.

Ein Überblick über die Eigenschaften der unterschiedlichen Systeme ist in folgender Tabelle gegeben.

Tabelle 4-2: *Eigenschaften von RFID-Systemen unterschiedlicher Frequenzbereiche (aus [Lampe et al. 2005])*

	LF 0-135 kHz	HF 3-30 MHz	UHF 200 MHz-2 GHz	MW > 2 GHz
Art der Kopp- lung	Induktive Kopplung (arbeitet im Nahfeld)		Elektromagnetische Kopplung (arbeitet im Fernfeld)	
Typische Fre- quenz	134,2 kHz	13,56 MHz	868 MHz (EU) 915 MHz (USA)	2,45 GHz 5,8 GHz
Typische Le- sereichweite	< 1,5 m	< 1,0 m	Passive Transponder: < 3 m (EU bei 0,4 W) ca. 3-5 m (EU bei 2 W, geplant) ca. 5-7 m (US bei 4 W)	
Negative Um- gebungsein- flüsse	<ul style="list-style-type: none"> • Abschirmung • leitfähige Materialien (z.B. Metall) 		<ul style="list-style-type: none"> • Abschirmung • Absorption, Reflexion, Brechung 	
Einflüsse der Transponder untereinander	Antennen-Verstimmung bei engliegenden Transpondern		Verzerrung der Funkmuster auf- grund von Antennenkopplung	

Im hochfrequenten Bereich können Daten aus den entsprechenden Transpondern auf eine Entfernung von bis zu einem Meter ausgelesen werden [AISCI ident GmbH 2016a]. Die entsprechenden Lesegeräte sind hauptsächlich als Handhelds am Markt.

RFID-Technik im UHF-Bereich erreicht demgegenüber höhere Reichweiten von bis zu zehn Metern unter Praxisbedingungen [AISCI ident GmbH 2016b]. Diese hat sich heutzutage in der Logistik weltweit durchgesetzt. Die Lesegeräte sind daher sowohl als stationäre Geräte, aber auch als Handhelds verfügbar.

Dank Normung (Electronic Product Code (EPC) Class 1 Generation 2 und ISO/IEC 18000-6C) ist die UHF-RFID-Technik weltweit kompatibel. Im europäischen Raum ist die Betriebsfrequenz auf 866 MHz festgelegt [AISCI ident GmbH 2016b].

Die Zuverlässigkeit der UHF-RFID-Technik ist anfällig gegenüber elektromagnetischen Interferenzfeldern, die im produzierenden Gewerbe von verschiedenen Maschinen erzeugt werden (z. B. von Schweißgeräten oder Elektromotoren von Industrierobotern). In solchen Bereichen wird daher verstärkt auf RFID-Technik im Mikrowellen-Frequenzbereich zurückgegriffen. Diese benötigt jedoch eine höhere Leistung zum Senden der Informationen, weshalb die RFID-Chips meist vom aktiven Bautyp sind, also eine Batterie oder Solarzelle zur

Energieversorgung benötigen. Die Reichweite mikrowellenbasierter RFID-Systeme liegt dadurch bei bis zu 15 Metern [Finkenzeller 2012].

4.2.3 Weitere Markierungen

Künstliche DNA

Die Detektion einer spezifischen DNA-Sequenz kann bei Einsatz von Einzelstrang-DNA durch Einbringen der komplementären DNA-Sequenz mit einem anhaftenden Fluoreszenz-Farbstoff sichtbar gemacht werden. Der Farbstoff wird erst bei Kombination der komplementären Stränge aktiviert [Winkler 2002].

Der Einsatzzweck dieser Markiertechnik liegt primär auf einer fälschungssicheren, eindeutigen Zuordnung markierter Güter. Ein schnelles Auslesen des hinterlegten Codes ist derzeit nicht möglich, sondern erfordert vielmehr zeit- und kostenaufwendige Labormethodik. Für die automatische Erkennung im Rahmen eines Recyclingsystems ist diese Markiertechnik daher zum momentanen Zeitpunkt nicht geeignet.

Chemische Molekülmarker

Der Nachweis der chemischen Markierung durch spezielle Moleküle ist mittels Röntgenfluoreszenzanalyse möglich. Diese sind befähigt, den hinterlegten Code aus dem chemischen Marker auszulesen. Eine weitere Detektionsmöglichkeit ist die optische Detektion des optional in den chemischen Molekülmarker integrierten Fluoreszenzfarbstoffs.

Da die chemischen Marker in einer großen Bandbreite von Werkstoffen eingesetzt werden können, ist bei Integration fluoreszierender Bestandteile eine Trennung markierter Materialien unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung und ihren physikalischen Eigenschaften möglich [Polysecure 2016]. Dies erlaubt eine sehr spezifische Trennung und die einfache Bildung inhomogener Fraktionen, die im Recycling einer gemeinsamen Behandlung unterzogen werden sollen.

Microfarbcode und Microdots

Das Hauptanwendungsgebiet ist der Schutz vor Produktpiraterie. Hauptanwendungsgebiet der Microdots ist demgegenüber der Diebstahlschutz. Bei beiden Markiersystemen ist für das Auslesen der hinterlegten Informationen der Einsatz eines Mikroskops nötig.

Im Hinblick auf die Nutzung von Microdots für ein Recyclingsystem muss beachtet werden, dass der unmittelbar enthaltene Informationsgehalt stark begrenzt ist. Das Hinterlegen erweiterter Informationen ist nur über die Anbindung einer Datenbank möglich.

Die Verwendung von Microfarbcodes oder Microdots für das Recycling wird aufgrund des zeitaufwendigen Auslesevorganges als nicht praxistauglich eingestuft. Eine Detektion auf Basis der Microdots wird daher in Kapitel 4.3 nicht weitergehend betrachtet.

4.3 Möglichkeiten der Markierung und Detektion für zukünftige Recyclingaktivitäten

Markierungen zur optischen Informationsübertragung müssen systembedingt auf sichtbaren Oberflächen von Produkten angebracht werden. Die Exponiertheit führt vor dem Hintergrund, dass die Markierung für die EoL-Phase erfolgt, über die Nutzungsdauer relativ leicht zu Beschädigungen. Des Weiteren könnte dies, sofern die optische Markierung nicht untrennbar

mit dem eigentlichen Gerät verbunden ist, den Nutzer zu deren Entfernung verleiten. Herstellerseitig ist zudem mit Widerstand gegen eine äußerlich sichtbare Anbringung von Markierungen zu rechnen, da dies das Design von Produkten in deutlichem Maß beeinflussen kann.

Im Hinblick auf das spätere Auslesen der Informationen ist Barcode-Markierungen zudem auf eine korrekte Positionierung zu den entsprechenden Lesegeräten zu achten, was einen gewissen Arbeits- und damit auch Kostenaufwand bedingen würde. Die RFID-Technik ermöglicht demgegenüber nicht nur ein positionsunabhängiges Auslesen, sondern auch das zeitgleiche Auslesen einer Vielzahl von Informationsträgern (Vielfachzugriff). Diese Eigenschaft findet bereits vermehrt Anwendung im Warenverkehr. Im Wareneingang kann so der Inhalt ganzer Paletten zeitgleich registriert werden [Lampe et al. 2005].

Für den Einsatz von Markierungen zwecks zielgerichtetem Recycling bietet sich daher der Einsatz von RFID-Technologie an. RFID-Chips können im Zuge der Herstellung fest in die Geräte integriert werden (beispielsweise durch Einbetten in den Gehäusekunststoff) und minimieren somit die Gefahr des Informationsverlustes deutlich. Zudem ist im Hinblick auf eine geplante Wiederverwendung in einer Demontagefabrik erfasster Geräte auch die individuelle Verpackung der Altgeräte ein denkbarer Schritt, um eventuelle Beschädigungen auf den Transportwegen zu vermeiden. Auch in diesem Fall wäre die Informationsübertragung per RFID die einzig logische zu verwendende Markiertechnik.

Um einerseits die Kosten und andererseits den nötigen Materialaufwand gering zu halten, den ein massenhafter Einsatz von RFID-Chips zwecks Altgeräterecycling mit sich brächte, sollten passive RFID-Chips verwendet werden. Diese beziehen die Energie für die Datenübertragung vollständig aus den von den Lesegeräten erzeugten elektromagnetischen Feldern [Finkenzeller 2012]. Dabei bietet sich insbesondere die UHF-Technologie an, da diese unter den passiven Transponder-Bauarten die höchste Entfernung zum Lesegerät erlaubt und so eine sichere Datenaufnahme ermöglicht.

Neben der Informationsübertragung an den Recyclingbetrieb ist in Bezug auf die Markierungen auch die Möglichkeit zur Kundeninformation gegeben. Unter den genannten Markierungsoptionen bieten dazu optischen Beschriftungsverfahren die besten Voraussetzungen, da diese eine unmittelbare Information des Nutzers erlauben. Ein solches Labeling zwecks Erhöhen der Sammelquote erscheint jedoch wenig zielführend, da nicht die fehlende Information der Nutzer über separat zu sammelnde Produkte zu geringen Sammelquoten [Gallenkemper et al. 2015] führt, sondern eher mangelhafte Einfachheit der Entsorgungswege, mangelnde Information der Bürger über bestehende Entsorgungswege, informelle Elektro(nik)schrottexporte ins Ausland [Lange 2013] sowie Lagerung von Altgeräten in Privathaushalten [Müller et al. 2005].

Für das Ziel der Erhöhung bisheriger Rückgewinnungsquoten kritischer Rohstoffe sowie einer Rückgewinnung von Massenmaterialien auf höchstmöglichem funktionellem Niveau verspricht der Einsatz von RFID-Technologie große Fortschritte. Die Ausstattung von Produkten mit RFID-Tags würde dabei bereits in der Produktionsphase erfolgen. Aufgrund der Vielfalt der liefernden Länder und Produzenten wäre eine Vereinheitlichung der verwendeten Technik hinsichtlich der Sendefrequenz und der hinterlegten Datenstruktur nötig. Dabei wäre die Nutzung der RFID-Tags als reine Identifikationsmöglichkeit ausreichend. Weitere Daten könnten dementsprechend in einer angebotenen Datenbank zentral hinterlegt werden.

Denkbar sind beispielsweise Informationen zu Materialinhalten, Demontageoptionen oder Hinweise zur Prüfung der Wiederverwendbarkeit. Aufgrund des geringen notwendigen Umfangs an Speicherkapazität wären geeignete RFID-Tags im kostengünstigen Bereich angesiedelt, so dass herstellerseitig nur geringer Aufwand zu erwarten wäre. Zudem ist die Mehrfachnutzung der RFID-Tags im Produktions-, Logistik- und Recyclingbereich denkbar, was deutliche Systemvorteile mit sich bringen könnte. Bei hochwertigeren Gütern wird RFID-Technologie ohnehin bereits für das Lagermanagement, den Markenschutz oder zur elektronischen Sicherung der Waren eingesetzt [Urban 2009]

4.4 Modellstoffströme: Kleinmotoren aus Altfahrzeugen

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse aus der Literaturrecherche und den Befragungen von verschiedenen Akteuren (Hersteller, Entsorger, Verbände, Händler, etc.) in Bezug auf die drei betrachteten Stoffströme Elektromotoren aus Kfz, industrielle Elektromotoren und Dynamos bzw. Antriebsstränge in Fahrrädern beschrieben. Dabei wurden vor allem die folgenden Fragestellungen beleuchtet:

- ▶ Abfallaufkommen in Deutschland und im benachbarten Ausland
- ▶ Erfassung, Verbleib und Verwertungswege
- ▶ Aufbau, rohstoffliche Zusammensetzung
- ▶ Potenzieller Rohstoffgehalt

4.4.1 Aufkommen von Altfahrzeugen

Um den Stoffstrom der Kleinmotoren aus Altfahrzeugen näher beleuchten zu können, muss zunächst der Abfallstrom der Altfahrzeuge analysiert werden. Dazu wurden statistische Daten und Literatur ausgewertet, um die gegenwärtig und zukünftig anfallenden Altfahrzeuge in Deutschland und den Nachbarländern quantifizieren zu können.

4.4.1.1 Aufkommen von Altfahrzeugen in Baden-Württemberg und Deutschland

Der Abfallstrom der Altfahrzeuge wurde bereits im Projekt „Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse“ detailliert beleuchtet. Im Januar 2015 betrug der Fahrzeugbestand in Deutschland (exklusive Kfz-Anhänger) 55,7 Millionen Fahrzeuge, davon 44,4 Millionen Personenkraftwagen (Pkw) [KBA 2015a]. Außerdem wurden im Jahr 2014 insgesamt rund 4,3 Millionen Fahrzeuge aus deutscher Produktion ins Ausland exportiert [Statista 2015a]. Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Kraftfahrzeugen (Kfz) beträgt etwa 13 Jahre [Widmer 2015]. In Deutschland wurden im Jahr 2013 ca. 8,15 Millionen Pkw außer Betrieb gesetzt. Es ist davon auszugehen, dass davon ca. 40 % endgültig stillgelegt wurden [UBA 2015, KBA 2015b], was etwa 3,26 Millionen Stück entspricht. 1,57 Millionen der endgültig stillgelegten Pkw wurden als Gebrauchtwagen in EU- und Nicht-EU-Staaten exportiert. Die exportierten Altfahrzeuge werden zum Teil im Ausland weiter genutzt [Widmer 2015]. Bei weiteren 1,18 Millionen Pkw ist davon auszugehen, dass es sich dabei um statistisch nicht erfasste Exporte, gestohlene Fahrzeuge oder auf nicht öffentlichem Gelände genutzte, stillgelegte Fahrzeuge handelt [UBA 2015]. Letztendlich wurden in Deutschland im Jahr 2013 offiziell nur 0,5 Millionen Altfahrzeuge den Erstbehandlungsanlagen zugeführt [UBA 2015], was einem Anteil an den endgültigen Stilllegungen von 15 % entspricht.

In Baden-Württemberg wurden im Jahr 2013 ca. 1,16 Millionen Pkw außer Betrieb gesetzt [KBA 2014]. Bei einem Anteil an den Außerbetriebsetzungen von 40 % gemäß [UBA 2015] kann die Anzahl der endgültigen Stilllegungen im Jahr 2013 damit auf etwa 464.000 Pkw geschätzt werden. In den baden-württembergischen Demontagebetrieben wurden im selben Jahr jedoch insgesamt nur 78.500 Altfahrzeuge bzw. 69.700 Pkw behandelt [StaLa BW 2015]. Über die Verbringung von Altfahrzeugen aus Baden-Württemberg in andere Bundesländer oder ins Ausland sind jedoch keine Angaben verfügbar.

4.4.1.2 Aufkommen von Altfahrzeugen im benachbarten Ausland

Zahlen über die in Deutschland und im benachbarten Ausland einer Behandlung zugeführten Altfahrzeuge können aus der europäischen Statistik entnommen werden. In Deutschland ist diese Zahl deutlich niedriger als die Zahl der endgültig stillgelegten Fahrzeuge nach [UBA 2015, KBA 2015b], da nur ein Teil dieser Fahrzeuge in inländischen Verwertungsbetrieben erfasst wird (vgl. Kapitel 4.4.1.1). Auch für die Nachbarländer konnten teilweise Literaturangaben über die endgültig stillgelegten, das heißt die insgesamt anfallenden Altfahrzeuge, ermittelt werden. Deren Anzahl war häufig ebenfalls höher als die statistisch ausgewiesene Anzahl der im Inland behandelten Altfahrzeuge. Daraus kann geschlossen werden, dass auch im Ausland nicht alle ausgedienten Fahrzeuge den Weg in die vorgesehenen Verwertungsanlagen und damit in europäische Statistik finden. Die Ergebnisse der Recherchen sind in Tabelle 4 3 zusammengefasst.

Tabelle 4-3: *Daten zur jährlich behandelten bzw. insgesamt anfallenden (d. h. endgültig stillgelegten) Anzahl an Altfahrzeugen im benachbarten Ausland*

Land	Einer Behandlung zugeführte Anzahl in Stück, 2013 gemäß [Eurostat 2015]	Anfallende Anzahl in Stück	Bezugsjahr/ Quelle
Polen	402.416	700.000	2012/ [Lewicki 2009]
Tschechien	121.838	k.A.	-
Österreich	73.993	ca. 260.000	[Recyclingportal 2014]
Schweiz	n.v.	105.000	[SARS 2014]
Frankreich	1.115.280	1.500.000 bis 1.700.000	2007/ [ADEME 2009]
Belgien	134.506	k.A.	-
Niederlande	183.451	k.A.	-
Dänemark	125.650	k.A.	-

In Polen wurden nach europäischer Statistik im Jahr 2013 ca. 400.000 Altfahrzeuge behandelt [Eurostat 2015]. Es gibt jedoch Hinweise, dass eine erhebliche Anzahl an Altfahrzeugen nicht

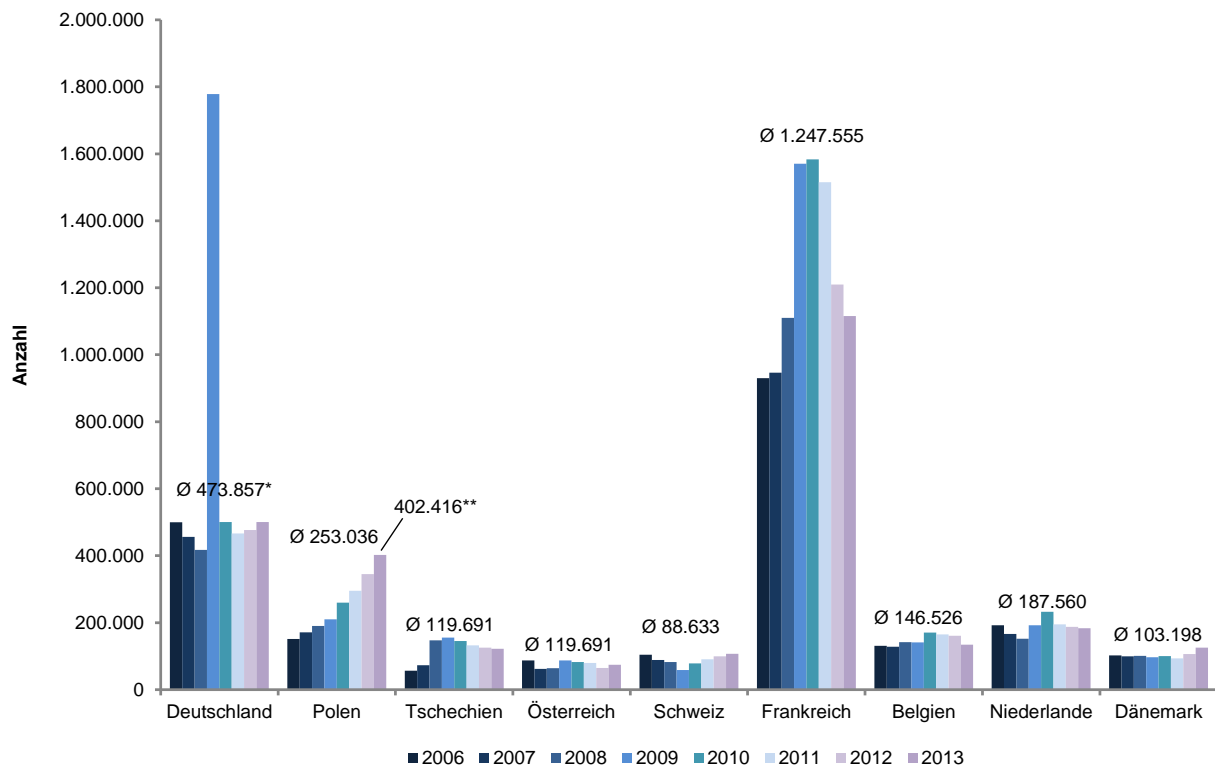
in die offiziell anerkannten Verwertungswege gelangt und damit auch nicht statistisch erfasst wird. Schätzungen zufolge betrug die Anzahl der insgesamt anfallenden Altfahrzeuge im Jahr 2012 über 700.000 Stück. Da eine große Zahl an Gebrauchtwagen aus Westeuropa importiert wird (vgl. Kapitel 4.4.2), beträgt das Alter vieler noch in Nutzung befindlicher Fahrzeuge deutlich über zehn und teilweise bis zu 30 Jahre [Alwaeli 2013, Lewicki 2009]. In Tschechien betrug die Zahl der behandelten Altfahrzeuge im Jahr 2013 laut europäischer Statistik [Eurostat 2015] über 120.000 Stück. Aus der Literatur konnten keine weiteren Informationen erhoben werden, die einen Rückschluss auf die insgesamt anfallenden Fahrzeuge zulässt, die möglicherweise nicht der vorgesehenen inländischen Behandlung zugeführt werden. In Österreich wurden nach Eurostat im Jahr 2013 knapp 74.000 Altfahrzeuge offiziell einer Behandlung zugeführt. Nach [RecyclingPortal 2014] ist der Verbleib von 195.000 Altfahrzeugen jedoch unbekannt, was damit einem Anteil von über 70 % am Gesamtaufkommen an ausgedienten Fahrzeugen entspricht. In der Schweiz wurden gemäß der Stiftung Auto Recycling Schweiz rund 105.000 Altfahrzeuge nachweislich verschrottet. Bei ca. 50.000 Altfahrzeugen ist der Verbleib jedoch unklar [SARS 2014]. In Frankreich wurden im Jahr 2013 laut Statistik über 1,1 Millionen Altfahrzeuge behandelt. Für das Jahr 2007 geht [ADEME 2009] davon aus, dass in Frankreich potenziell 1,5 bis 1,7 Millionen Altfahrzeuge anfielen, wobei nur knapp eine Millionen Stück in offiziellen Demontage- und Schredderbetrieben behandelt wurden. In Belgien wurden im Jahr 2013 offiziell knapp 135.000 Altfahrzeuge als verwertet gemeldet. Die Zahlen werden von der Organisation Febelauto bestätigt, die in Belgien mit der Erfassung und Verwertung von Altfahrzeugen betraut ist [Febelauto 2014]. Zusätzliche Angaben über die Anzahl insgesamt anfallender Altfahrzeuge in Belgien konnten im Rahmen der Recherche nicht nachgewiesen werden. In den Niederlanden wurden nach europäischer Statistik im Jahr 2013 über 180.000 Altfahrzeuge behandelt. Eine Angabe über die insgesamt anfallenden Altfahrzeuge konnte für die Niederlande nicht ermittelt werden. In Dänemark betrug die statistisch gemeldete Zahl an behandelten Altfahrzeugen im Jahr 2013 über 125.000 Stück. Literaturangaben über insgesamt anfallende Altfahrzeugzahlen konnten jedoch ebenfalls nicht ermittelt werden.

4.4.1.3 Zukünftige Entwicklung der Altfahrzeugzahlen in Deutschland und den Nachbarländern

Um einen möglichen Trend in der Entwicklung der Altfahrzeugzahlen in Deutschland und den Nachbarländern abzuschätzen, wurde die Eurostat-Statistik über die Anzahl der Altfahrzeuge von 2006 bis 2013 ausgewertet. Gemäß Abbildung 4-9 ist ersichtlich, dass in den meisten Ländern keine außergewöhnlichen Schwankungen oder Trends in der Entwicklung der Altfahrzeugzahlen zu verzeichnen waren. Für Deutschland ist ein deutlich erhöhter Wert im Jahr 2009 zu sehen, der auf die in diesem Jahr gewährte Umweltprämie zurückzuführen ist. Ebenso gab es in Frankreich deutlich steigende Altfahrzeugzahlen von 2008 bis 2010, die danach jedoch wieder in Richtung des Niveaus aus den früheren Jahren zurückfielen. Einziges Land mit einem kontinuierlich steigenden Trend ist Polen, in dem sich die Altfahrzeugzahlen von 2006 bis 2009 um das knapp 2,7-fache vermehrten.

Auf Grundlage der Altfahrzeugzahlen der letzten Jahre wird deshalb davon ausgegangen, dass sich in den meisten Ländern bis auf gewisse jährliche Schwankungen in den nächsten Jahren keine gravierenden Veränderungen ergeben werden. Im Fall von Polen ist jedoch in den letzten Jahren eine Steigerung der behandelten Altfahrzeuge zu verzeichnen. Dabei

wurden in den Jahren von 2006 bis 2013 im Durchschnitt rund 253.000 Altfahrzeuge einer Behandlung zugeführt. Im Jahr 2013 wurde die im selben Zeitraum größte Anzahl von über 400.000 Altfahrzeugen statistisch ausgewiesen. Der Trend der letzten Jahre lässt in diesem Nachbarland vermuten, dass auch in Zukunft eine vermehrte Zahl an Altfahrzeuge den Weg in die inländischen Verwertungsanlagen finden wird. Es gibt jedoch keine Datenbasis, auf der eine verlässliche Prognose der Entwicklung der Altfahrzeugzahlen in Polen getroffen werden kann.



* ohne 2009

** zuletzt ausgewiesene Anzahl der behandelten Altfahrzeuge in Polen aus dem Jahr 2013

Abbildung 4-9: Entwicklung der statistisch erfassten Altfahrzeuge in Deutschland und den Nachbarländern von 2006 bis 2013 [Eurostat 2015]

4.4.2 Erfassung, Verbleib und Verwertungswege von Altfahrzeugen

Altfahrzeuge müssen innerhalb Deutschlands zertifizierten Erstbehandlern angedient und gemäß der Altfahrzeug-Verordnung behandelt werden. Bei der Behandlung ist gemäß der Abfallhierarchie nach Kreislaufwirtschaftsgesetz zuerst die Wiederverwendung von Bauteilen anzustreben, dann eine stoffliche Verwertung, danach die energetische Verwertung und zuletzt eine Beseitigung. Die jährlich offiziell in Deutschland erfassten und behandelten Altfahrzeuge (ca. 0,5 Millionen Stück) werden in ca. 1.200 Demontagebetrieben zunächst trockengelegt, das heißt von Schadstoffen befreit. Dabei werden neben den Betriebsflüssigkeiten auch schadstoffhaltige Komponenten wie Reifen, Batterien und Katalysatoren sowie Wertstoffe wie Glasscheiben, Aluminiumfelgen und große Kunststoffbauteile demontiert. Bei den Demontagebetrieben handelt es sich überwiegend um familiengeführte Kleinunternehmen, die im Durchschnitt ca. 500 Altfahrzeuge pro Jahr

behandeln. Großunternehmen mit höheren Behandlungskapazitäten stellen die Ausnahme dar [Kärger 2014, Holzhauer 2015].

Funktionsfähige Einzelkomponenten, darunter auch Elektromotoren, werden aus Kfz als Ersatzteile entnommen, sofern diese auf dem Gebrauchtteilemarkt ausreichend nachgefragt werden [Kärger 2014]. Die Karosserie mit den verbleibenden, nicht ausgebauten Komponenten wird geschreddert, um Fe- und NE-Metalle zu separieren und nachfolgend einer stofflichen Verwertung zuführen zu können [Schmid und Zur-Lage 2014]. Demnach verbleiben nach der Demontage derzeit vor allem die nicht vermarktbaaren Bauteile im Fahrzeug. Dazu gehören in erster Linie die Baugruppen des Interieurs, da Sitze und Cockpit nur selten demontiert werden [Holzhauer 2015].

Bei den exportierten Alt-Kfz wird ein erheblicher Teil im Ausland als Gebrauchtwagen wieder angemeldet. Von den im Jahr 2013 nachweislich exportierten 1,57 Millionen Alt-Pkw wurden knapp 490.000 Stück in Polen wiederangemeldet, über 190.000 Stück in Rumänien, 92.000 Stück in Frankreich und 89.000 Stück in Tschechien. Gemäß der Außenhandelsstatistik gelangten auch 134.000 Stück als Gebrauchtwagen nach Westafrika [UBA 2015]. Es ist anzunehmen, dass viele der ins außereuropäische Ausland verbrachten Altfahrzeuge nicht ordnungsgemäß entsorgt werden. Nach [Holzhauer 2015] verbleiben beispielsweise die nach Ghana verbrachten Altfahrzeuge aus Deutschland nach ihrer Ausschachtung häufig an Straßenrändern.

4.4.3 Stand der Aufbereitung von Klein- und Hilfsmotoren

Um die derzeitige Praxis der Behandlung von elektrischen Klein- und Hilfsmotoren zu beleuchten, wurden Informationen über eine gezielte Befragung von Demontage- und Schredderbetrieben, Kfz-Werkstätten und Herstellern erhoben. Nicht berücksichtigt wurden im Rahmen der Untersuchung die Antriebsmotoren von Kfz (weder die Verbrennungs- noch die Elektromotoren in Elektro- und Hybridfahrzeugen).

Dabei ergab die Befragung von Autoverwertern ein differenziertes Bild. Einige gaben an, dass bestimmte Ersatzteile komplett ausgebaut werden [Entsorger 2015]. Andere teilten dagegen mit, dass die meisten Teile (u.a. Elektromotoren) im Fahrzeug verbleiben. Nach [Schrotthandel 2015] ist der Ausbau von Einzelteilen wie beispielsweise Stellmotoren von der Marktlage abhängig, und wird daher zeitweise auch nicht durchgeführt. Die verbleibende Rohkarosserie sowie defekte Teile (u.a. defekte Elektromotoren) werden anschließend geschreddert. Nach dem Schredderprozess erfolgt eine Auftrennung in verschiedene Wertstofffraktionen [Entsorger 2015]. In Kfz-Werkstätten werden defekte Kleinmotoren zum Teil auch mit dem Restmüll entsorgt [Werkstätten 2015]. Zusätzlich wird teilweise eine Rücknahme von defekten und ausgedienten Kleinmotoren durch den Hersteller angeboten [Motorenhersteller 2015].

4.4.4 Zusammensetzung und grundsätzlicher Aufbau von Kleinmotoren aus Altfahrzeugen

In Kfz kommen meist permanenterregte Gleichstrommaschinen zum Einsatz, die eine gute Regelbarkeit aufweisen [Hering et al. 2012]. Meist liegen diese in einem Leistungsbereich zwischen 1 W und 10 kW [Buchert et al. 2014]. Ab 300 W werden in Automobilen häufig permanenterregte Synchronmaschinen eingesetzt (vgl. Abbildung 4-10) [Hering et al. 2012].

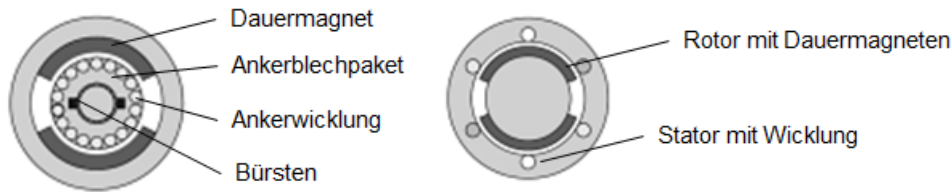


Abbildung 4-10: Aufbau permanenterregte Gleichstrommaschinen (links) und permanenterregte Synchronmaschinen (rechts) nach [Hering et al. 2012]

Die generelle Klassifikation von Elektromotoren sowie der Aufbau permanenterregter Motoren sind in den Kapiteln 4.5.1 bzw. 4.5.2 enthalten. Hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung der Kleinmotoren aus Kfz überwiegt der Anteil an Eisen, Kunststoff und Kupfer [Kohlmeyer et al. 2015]. In Bezug auf den Einsatz von Dauermagneten in Klein- und Hilfsmotoren von Kfz ist davon auszugehen, dass meist keine SEM-haltigen Magnete eingesetzt werden, sondern preiswertere ferritische Magnete. Nur in einigen der Servomotoren sind nach [Kohlmeyer et al. 2015, Buchert et al. 2014] neodymhaltige Magnete zu erwarten.

In der Studie [Kohlmeyer et al. 2015] wurde bei Untersuchungen zur Kfz-Demontage die Zusammensetzung von kleinen Elektromotoren im Fahrzeug bestimmt (vgl. Abbildung 4-11). Dabei waren beispielsweise in den untersuchten 48 Motoren und drei Lautsprechern durchschnittlich 0,9 % Nd enthalten. Die Angaben zu Kupfergehalten stimmen mit den Angaben in [Martens 2011] überein. Insgesamt sind nach [Martens 2011] in Kleinwagen Motoren mit einem Kupferanteil von 8 bis 36 % verbaut.

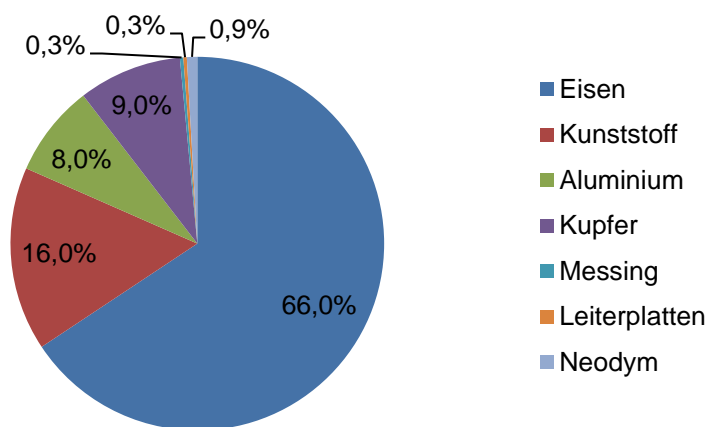


Abbildung 4-11: Stoffliche Anteile in Elektromotoren (Anzahl 48) und Lautsprechern (Anzahl 3) nach [Kohlmeyer et al. 2015]

In der Studie „Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse“ wurde bereits festgestellt, dass die Klein- und Hilfsmotoren in Fahrzeugen ein erhebliches Potenzial an technologierelevanten Metallen bergen. Unter anderem enthalten Leiterplatten und Magnete aus Elektromotoren die Elemente Antimon, Kobalt, Molybdän, Tantal, die SEM

Lanthan und Neodym sowie PGM. Eine umfassende Analyse des Gehaltes dieser zumeist kritischen Metalle in Klein- und Hilfsmotoren ist nach [Widmer 2015] in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: In Klein- und Hilfselektromotoren aus 100 durchschnittlichen Pkw enthaltene Elemente nach [Widmer 2015]

Element	Menge [g/100 Pkw]	Element	Menge [g/100 Pkw]
Silber	38,00	Palladium	2,50
Gold	2,60	Praseodym	4,70
Beryllium	0,17	Platin	unterhalb der Nachweisgrenze
Cer	0,55	Rubidium	0,11
Kobalt	570,00	Rhenium	0,00
Dysprosium	2,00	Ruthenium	0,34
Gallium	1,80	Antimon	41,00
Gadolinium	4,10	Samarium	0,12
Germanium	2,60	Zinn	530,00
Indium	0,27	Strontium	14.000,00
Lanthan	1.200,00	Tantal	2,00
Lithium	0,13	Terbium	0,31
Molybdän	97,00	Tellur	0,01
Niob	2,80	Wolfram	1,50
Neodym	82,00	Yttrium	0,36
		Zirkonium	3,10

Zur Zusammensetzung von Klein- und Hilfsmotoren wurden auch Hersteller befragt. Die Befragung ergab, dass zumindest innerhalb der Materialdeklaration (IMDS-International Material Data System) die stoffliche Zusammensetzung der Bauteile aufgeführt ist. Es ist daher davon auszugehen, dass auch den Herstellern von Elektromotoren für Kfz die elementspezifischen Zusammensetzungen der Produkte (auch von Zukaufteilen) grundsätzlich bekannt sind. Die Informationen des IMDS sind jedoch nicht öffentlich zugänglich [Motorenhersteller 2015].

4.4.5 Wertstoffpotenziale in Kleinmotoren aus Altfahrzeugen

Generell hat die Anzahl der Kleinmotoren in Pkw in den letzten Jahren zugenommen. So verfügten laut [DAT 2014] im Jahr 2013 durchschnittlich 17 % des Fahrzeugbestandes über eine elektrische Sitzverstellung und 92 % über elektrische Fensterheber. Bei Gebrauchtwagen war im Durchschnitt in 13 % der Fahrzeuge eine elektrische Sitzverstellung und in 86 % der Fahrzeuge elektrische Fensterheber verbaut. Von den Neuwagen verfügten sogar 24 % über eine elektrische Sitzverstellung, 93 % waren mit elektrischen Fensterhebern ausgestattet. In Tabelle 4-5 wird die typische Anzahl an Kleinmotoren in heute anfallenden Alt-Pkw dargestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich nur ein Teil der in Tabelle 4-5 aufgeführten Aggregate in allen Alt-Pkw wiederfindet. Für diese Aggregate wird die minimale Anzahl daher mit eins angegeben. Für alle anderen Aggregate (z.B. Leuchtweitenregler, Servolenkung, Schließanlage, etc.) beträgt die minimale Anzahl der Motoren dagegen null, da sie in den letzten Jahren nicht standardmäßig in Pkw verbaut wurden. Generell ist der Ausstattungsgrad von Alt-Pkw mit elektrischen Kleinmotoren von mehreren Faktoren abhängig. Dazu gehören vor allem Baujahr, Hersteller und Fahrzeugmodell. In Bezug auf Letzteres ist die Einordnung in Unter-, Mittel- und Oberklassewagen entscheidend. Die meisten Kleinmotoren pro Fahrzeug finden sich in Oberklasse-Modellen, so dass in modernen Pkw der Oberklasse bereits über 100 Stellmotoren verbaut werden [Jordan 2013]. Eine Hochrechnung der durchschnittlich vorhandenen Anzahl an Motoren ausgehend von den Fahrzeugklassen ist jedoch aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit nicht möglich.

Tabelle 4-5: Abschätzung der Anzahl typischer elektrisch motorisierter Anwendungen in aktuell anfallenden, ausgedienten Pkw in Anlehnung an [Kohlmeyer et al. 2015, Werkstätten 2015]

Aggregat	Spanne der typischerweise zu erwartenden Anzahl an Elektromotoren pro Alt-Pkw	
Anlasser	1	1
Wischermotor	1	3
Waschwasserpumpe	1	2
Lichtmaschine	1	1
Kraftstoffpumpe	1	1
Motorlüfter	1	2
Innenraumgebläse	1	1
Leuchtweitenregler*	0	2
Servomotor Lenkung*	0	1
Schließanlage*	0	5
elektrische Sitzverstellung*,**	0	14
elektrische Scheibenheber*	0	4
Motor Antiblockiersystem*	0	1
Motor für dynamische Lichtstreuung*	0	2
CD-Player*	0	1
Heckklappenschließmotor*	0	1
Spiegelstellmotor*	0	2
Summe	7	44

* Aggregat ist nicht in allen Pkw standardmäßig verbaut.

** Vorstell-, Hochstell-, Kipp-, Lehnen-, Kopfstütz-, Lordose- und Seitenmotoren möglich (14 Motoren in Fahrer- und Beifahrersitz).

Zur Veranschaulichung ist die Lokalisierung verschiedener Elektromotoren im Fahrzeug in Abbildung 4-12 beispielhaft dargestellt. Dabei wurde nur eine Auswahl der abgebildeten Elektromotoren in die Hochrechnung die Abschätzung der Anzahl von Kleinmotoren pro Altfahrzeug gemäß Tabelle 4-5 einbezogen. Die Lage der Aggregate kann in Abhängigkeit von

Hersteller, Modell und Baujahr variieren.

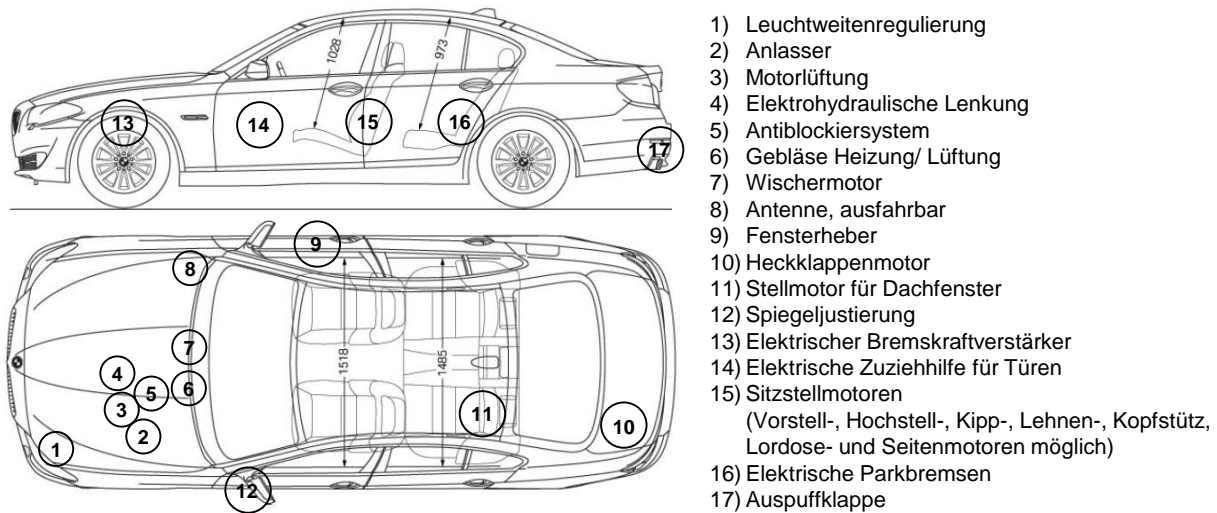


Abbildung 4-12: Beispielhafte Lage von Elektromotoren in Pkw (Kleinmotoren, die mehrmals verbaut sind, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur einmal dargestellt) [Kohlmeyer et al. 2015, Werkstätten 2015, Gresch 2011]; Hintergrundbild: [bimmertoday.de 2016]

4.4.5.1 Durchschnittliche Anzahl und Gewicht von Kleinmotoren in Altfahrzeugen

Während einige motorisierte Anwendungen standardgemäß in allen moderneren Pkw verbaut sind (Anlasser, Wischermotor, Waschwasserpumpe, Lichtmaschine, Kraftstoffpumpe, Motorlüfter, Innenraumgebläse, Leuchtweitenregler), sind andere Anwendungen wie elektrische Sitzverstellung oder elektrische Fensterheber nur in bestimmten Fahrzeugmodellen integriert. Die Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl von Kleinmotoren in Altfahrzeugen ist deshalb von der Entwicklung des Ausstattungsgrads von Fahrzeugen in den letzten Jahren abhängig. Um diesen Faktor zu berücksichtigen, wurden die Daten zum Ausstattungsgrad in Neuwagen der Deutschen Automobil Treuhand GmbH [DAT 2001 bis DAT 2013] für die Jahre von 2000 bis 2012 ausgewertet. Auf der Basis einer durchschnittlichen Lebensdauer eines Pkw in Deutschland von rund 13 Jahren nach [Widmer 2015] entspricht der Ausstattungsgrad von Altfahrzeugen im Jahr 2013 näherungsweise dem Ausstattungsgrad von Neuwagen, die im Jahr 2000 verkauft wurden. Aus dem Ausstattungsgrad in den darauf folgenden Jahren lässt sich dementsprechend gemäß [DAT 2001 bis DAT 2013] eine Entwicklung des durchschnittlichen Ausstattungsgrades von anfallenden Altfahrzeugen mit Elektromotoren bis zum Jahr 2025 abbilden. Gemäß Abbildung 4-13 zeigt die Verrechnung der durchschnittlichen Anzahl von Kleinmotoren aus Tabelle 4-5 mit den jährlichen Erhebungen zum durchschnittlichen Ausstattungsgrad nach [DAT 2001 bis DAT 2013], dass die Zahl der Kleinmotoren in Altfahrzeugen in den nächsten Jahren tendenziell zunehmen wird. Der signifikante Sprung von 19 Kleinmotoren im Jahr 2013 auf 22 Kleinmotoren im Jahr 2014 ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in der statistischen Erhebung des Ausstattungsgrads nach [DAT 2001] die elektrische Sitzverstellung noch nicht erhoben wurde. In [DAT 2002] ist die Sitzverstellung jedoch erstmals enthalten, woraus die deutlich höhere durchschnittliche

Anzahl an Kleinmotoren in Altfahrzeugen von 2014 resultiert. Der durchschnittliche Ausstattungsgrad mit Kleinmotoren wird nach vorliegender Abschätzung auch im Jahr 2025 unter 30 Stück pro Alt-Pkw liegen (im Mittel bei 23 Stück). Dabei gilt zu beachten, dass es sich dabei um eine konservative Abschätzung handelt, da aufgrund fehlender Daten zum Ausstattungsgrad nicht alle motorisierten Anwendungen in die Betrachtung einbezogen werden konnten. Hierbei sind unter anderem Stellmotoren für Seitenspiegel, Tür- und Heckklappenschließmotor oder Schiebedach zu nennen, die in heutigen Modellen bereits häufiger anzutreffen sind.

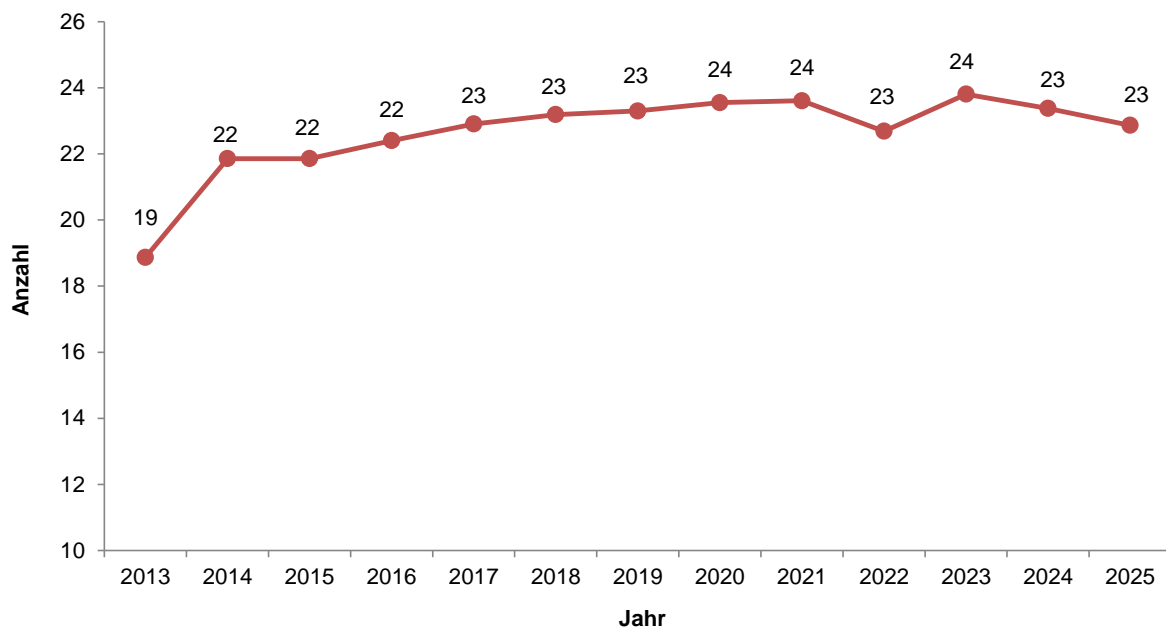


Abbildung 4-13: Abschätzung der Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl von Kleinmotoren in Altfahrzeugen von 2013 bis 2025 in Deutschland anhand von [DAT 2001 bis DAT 2013, Kohlmeyer et al. 2015, Werkstätten 2015]

Die in den Kleinmotoren enthaltenen Wertstofffraktionen lassen sich über die Gesamtzahl der Motoren, dem durchschnittlichen Gewicht und der prozentualen Zusammensetzung nach [Kohlmeyer et al. 2015] (vgl. Kapitel 4.4.4, Abbildung 4-11) ausweisen. Als Durchschnittsgewicht eines Kleinmotors wurde gemäß Tabelle 4-6 auf Grundlage von [Kohlmeyer et al. 2015] und den im Rahmen der Demontageversuche zerlegten Kleinmotoren (vgl. Kapitel 5.1.2.4) ein Gewicht von 1,7 kg ermittelt.

Die in den Kleinmotoren enthaltenen Wertstofffraktionen lassen sich über die Gesamtzahl der Motoren, dem durchschnittlichen Gewicht und der prozentualen Zusammensetzung nach [Kohlmeyer et al. 2015] (vgl. Kapitel 4.4.4, Abbildung 4-11) ausweisen. Als Durchschnittsgewicht eines Kleinmotors wurde gemäß Tabelle 4-6 auf Grundlage von [Kohlmeyer et al. 2015] und den im Rahmen der Demontageversuche zerlegten Kleinmotoren (vgl. Kapitel 5.1.2.4) ein Gewicht von 1,7 kg ermittelt.

Tabelle 4-6: Gewichte verschiedener Kleinmotoren [Kohlmeyer et al. 2015, eigene Untersuchungen]

Kleinmotoren	Durchschnittsgewicht [kg]	Quelle
Servomotor*	3,725	Kohlmeyer et al. 2015, eigene Untersuchungen
Anlasser*	3,343	Kohlmeyer et al. 2015, eigene Untersuchungen
Lichtmaschine*	5,775	Kohlmeyer et al. 2015
Sitzverstellung	0,470	Kohlmeyer et al. 2015
Scheibenwischer*	1,666	Kohlmeyer et al. 2015, eigene Untersuchungen
Innenraumgebläse	0,085	eigene Untersuchungen
Fensterheber	0,558	eigene Untersuchungen
ausfahrbare Antenne	0,796	eigene Untersuchungen
Spiegeljustierung	0,626	eigene Untersuchungen
Leuchtweitenregulierung*	0,111	eigene Untersuchungen
Motorlüfter	1,393	eigene Untersuchungen
Mittelwert	1,686	Kohlmeyer et al. 2015, eigene Untersuchungen

* Durchschnittsgewicht von Kleinmotoren aus verschiedenen Fahrzeugklassen

4.4.5.2 Recyclingpotenzial in Kleinmotoren in Baden-Württemberg, Deutschland und im benachbarten Ausland

Multipliziert man die durchschnittliche Anzahl der Kleinmotoren mit der Anzahl jährlich anfallender verwerteter bzw. endgültig stillgelegter Alt-Pkw, erhält man die potenzielle Gesamtzahl der Kleinmotoren, die im Rahmen einer gezielten Demontage pro Jahr separiert und hochwertig verwertet werden könnten. Wie Tabelle 4-7 zeigt, betrug demnach die Zahl an Kleinmotoren in verwerteten Altfahrzeugen in Baden-Württemberg im Jahr 2013 zwischen 1,06 und 1,57 Millionen Stück. Betrachtet man die Zahl der endgültig stillgelegten Altfahrzeuge in Baden-Württemberg, betrug die Anzahl der Kleinmotoren zwischen 7,97 und 11,75 Millionen Stück. Bezogen auf Deutschland waren in den verwerteten Fahrzeugen zwischen 7,63 und 11,25 Millionen Kleinmotoren enthalten, in den endgültig stillgelegten Fahrzeugen waren es im Jahr 2013 zwischen 49,71 und 73,32 Millionen Stück.

Tabelle 4-7: Anzahl der potenziell enthaltenen Kleinmotoren in verwerteten und endgültig stillgelegten Altfahrzeugen in Baden-Württemberg und Deutschland im Jahr 2013 [KBA 2015b, UBA 2015, StaLa BW 2015]

	Baden-Württemberg 2013	Deutschland 2013
Endgültige Stilllegungen	464.000	3.259.989
Kleinmotoren in endgültig stillgelegten Altfahrzeugen*	7.076.000 - 10.435.360	49.714.832 - 73.317.153
Verwertete Altfahrzeuge	69.712	500.322
Kleinmotoren in verwerteten Altfahrzeugen*	1.063.108 - 1.567.823	7.629.911 - 11.252.242

* Die Spanne bezieht sich auf die Abschätzung der minimalen und maximalen Anzahl von Motoren je motorisierter Anwendung (vgl. Tabelle 4-5), verrechnet mit dem durchschnittlichen Ausstattungsgrad in Altfahrzeugen von 2013 gemäß [DAT 2001].

Im Folgenden werden die potenziell für ein optimiertes Recycling zur Verfügung stehenden Wertstoffe in den Kleinmotoren der in Baden-Württemberg, Deutschland und im benachbarten Ausland anfallenden Altfahrzeuge ausgewiesen. Die Berechnung basiert auf der durchschnittlichen Zusammensetzung von demontierten Kleinmotoren aus Fahrzeugen nach [Kohlmeyer et al. 2015] (vgl. Kapitel 4.4.4). In den Kleinmotoren aus den 69.700 Pkw, die in Baden-Württemberg im Jahr 2013 in Verwertungsbetrieben behandelt wurden [StaLa BW 2015], befanden sich demnach im Mittel knapp 180 Mg Aluminium, rund 1.500 Mg Eisen, 200 Mg Kupfer und ca. 7 Mg Messing. Mit einem Gehalt nach [Kohlmeyer et al. 2015] von 0,9 % enthielten die Kleinmotoren außerdem ca. 20 Mg Neodym. Aus anderen Literaturquellen wurden jedoch auch weit geringere Neodymgehalte in Kleinmotoren aus Kfz nachgewiesen. [Widmer et al. 2015] weist beispielsweise aus der Analyse von 24 Motoren mit einem Durchschnittsgewicht von 2,12 kg auf einen Neodymgehalt von 0,82 g pro Pkw aus. Umgelegt auf die durchschnittliche Anzahl von Kleinmotoren in Pkw im Jahr 2013 (zwischen 15 und 22 Stück) erhält man einen mittleren Neodymgehalt pro Kleinmotor von nur 0,003 %. Mit Bezug auf die in Baden-Württemberg behandelten Altfahrzeuge wäre anhand der Daten von [Widmer et al. 2015] lediglich einer Menge von rund 57 kg Neodym zu rechnen.

Aufgrund der extremen Spanne der Literaturangaben (die Angaben unterscheiden sich ca. um den Faktor 300) wird nachfolgend auf die quantitative Ausweisung von Recyclingpotenzialen für Neodym verzichtet. Die signifikanten Unterschiede in der Literatur sind möglicherweise auf die Stückzahl und Auswahl der analysierten Kleinmotoren zurückzuführen. Aus den eigens durchgeführten Demontageversuchen von zehn Kleinmotoren wurde nur bei einem der Hinweis auf einen möglichen Neodymgehalt gefunden (vgl. Kapitel 5.1.2.4). Die Untersuchungen von [Kohlmeyer et al. 2015] waren mit 48 zerlegten Elektromotoren umfangreicher, in [Widmer et al. 2015] sind die Ergebnisse auf die Untersuchung von 24 Kleinmotoren zurückzuführen. Ein weiterer Grund für den unterschiedlichen Gehalt an Seltenen Erden könnte auch das Alter der untersuchten Komponenten sein. [Kohlmeyer et al. 2015] untersuchte Kleinmotoren aus elf jungen Altfahrzeugen die überwiegend ein Alter von

ein bis zwei Jahren aufwiesen. Die Untersuchungen von [Widmer et al. 2015] umfassten jedoch Kleinmotoren, die überwiegend in Mittelklasse-Pkw der Baujahre 2003 bis 2008 verbaut sind. Das könnte wiederum den Hinweis liefern, dass in den Kleinmotoren der aktuell anfallenden Altfahrzeuge noch kaum SE-haltige Magnete enthalten, der Gehalt in Zukunft aber steigen könnte.

Die Hochrechnung für Deutschland ergab, dass sich in den inländisch verwerteten Altfahrzeugen von 2013 potenziell Kleinmotoren mit einem Wertstoffgehalt von im Mittel 1.300 Mg Aluminium, 10.500 Mg Eisen, 1.400 Mg Kupfer und 50 Mg Messing befinden. Wird die Mengenerhebung auf die insgesamt 2,26 Millionen (vgl. Tabelle 4-3, inklusive Schweiz nach [SARS 2014]) verwerteten Altfahrzeuge aus den betrachteten Nachbarländern ausgeweitet, erhält man ergibt sich ein Wertstoffpotenzial in Kleinmotoren von im Mittel knapp 5.800 Mg Aluminium, 47.500 Mg Eisen, 6.500 Mg Kupfer und rund 200 Mg Messing. Die Hochrechnung erfolgte unter der Annahme, dass die Altfahrzeuge im benachbarten Ausland denselben Ausstattungsgrad aufweisen wie die Altfahrzeuge in Deutschland. Die Ergebnisse der Hochrechnungen sind in Abbildung 4-14 zusammengefasst.

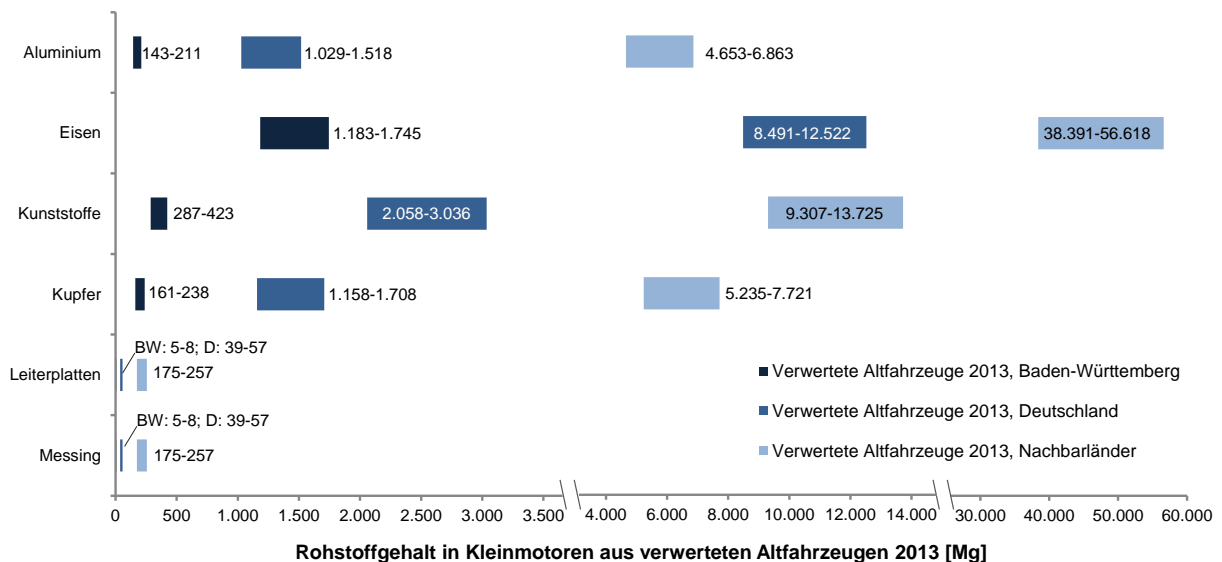


Abbildung 4-14: Wertstoffgehalt in Kleinmotoren der im Jahr 2013 verwerteten Altfahrzeuge in Baden-Württemberg, Deutschland und im benachbarten Ausland

4.4.5.3 Zukünftige Entwicklung des Recyclingpotenzials

Die zukünftige Entwicklung des Recyclingpotenzials von Kleinmotoren in Fahrzeugen hängt von der Entwicklung der jährlich anfallenden Altfahrzeuge, dem durchschnittlichen Ausstattungsgrad, und letztendlich auch dem Produktdesign (z. B. Auswahl von Werkstoffen) der in Zukunft verbauten Kleinmotoren ab. Die zukünftige Entwicklung der anfallenden Altfahrzeuge ist im Wesentlichen vom Absatzmarkt neuer Fahrzeuge und der durchschnittlichen Lebensdauer abhängig. Wie bereits in Kapitel 4.4.1.3 beschrieben, sind die zu erwartenden Abfallmengen genauso wie die Absatzzahlen der letzten Jahre gewissen jährlichen Schwankungen unterworfen. Es lassen sich jedoch für keines der betrachteten

Länder klare Tendenzen ausweisen, ob die Zahl der Altfahrzeuge in den nächsten Jahren steigen oder fallen wird. Allerdings lässt der Trend eine steigende Anzahl an Kleinmotoren pro Altfahrzeug vermuten, dass dieser Stoffstrom für ein separates Recycling oder die Weiterverwendung durch gezielte Demontage in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Die Berechnungen zur zukünftigen Entwicklung der Anzahl von Kleinmotoren in Altfahrzeugen zeigen, dass diese zwar tendenziell steigen wird, sich jedoch auch in den nächsten zehn Jahren im Durchschnitt deutlich unter 30 bewegen wird (vgl. Abbildung 4-13). Dabei ist anzumerken, dass diese Abschätzung als konservativ einzuschätzen ist, da aufgrund fehlender Daten nicht alle motorisierten Anwendungen in Fahrzeugen berücksichtigt werden konnten.

4.5 Modellstoffströme: Elektromotoren in der Industrie

4.5.1 Klassifikation von Elektromotoren

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Typen an Elektromotoren. Eine Unterteilung der Elektromotoren ist grundsätzlich nach Stromart und Wirkungsweise gebräuchlich. Bei der Stromart unterscheidet man grundsätzlich zwischen Gleichstrom-, Wechselstrom-, Drehstrom- und Impulsstrommotoren. In Bezug auf die Wirkungsweise gibt es Stromwender-, Asynchron- und Synchronmaschinen [Fischer 2011, Buchert et al. 2014]. Aus der Übersicht der Anwendungsbereiche in Tabelle 4-8 wird deutlich, dass die Mehrzahl der genannten Motorenarten im Industriebereich Anwendung findet und die Anwendungsmöglichkeiten eine große Bandbreite abdecken.

Im industriellen Bereich kommen verschiedene Motortypen zum Einsatz. Nach [Kupferinstitut 2011, Buchert et al. 2014] ist der Drehstrom-Asynchronmotor der am weitesten verbreitete Motor in industriellen Anwendungen und hatte im Jahr 2008 in Deutschland einen Marktanteil von über 80 %. Üblicherweise sind industrielle Asynchronmotoren als Käfigläufer ausgeführt und können einen Leistungsbereich von einigen 100 W bis zu 50 MW abdecken. Am häufigsten werden die Motoren jedoch im unteren bis mittleren Leistungsbereich (bis ca. 500 kW) eingesetzt. Typische Anwendungen sind unter anderem Pumpen, Transportbänder, Sägen, Kräne, Werkzeugmaschinen, etc. [Binder 2012].

Allerdings finden synchrone Servomotoren mit Permanentmagneten zunehmend Anwendung im industriellen Bereich und lösen die Asynchronmotoren teilweise ab [Buchert et al. 2014]. Permanenterregte Synchronmaschinen haben eine Leistung von rund 100 W bis zu mehreren hundert kW. Als drehzahlveränderbarer Antrieb bzw. als Positionierantrieb sind diese Motoren beispielsweise in Werkzeugmaschinen, Elektroautos, Verpackungsmaschinen oder Robotern verbaut. Ebenso können Synchronmaschinen im gleichen Leistungsbereich als Reluktanzmotor ohne Permanentmagnete ausgeführt sein. Die Leistung eines Reluktanzmotors ist bei gleicher Motorgöße jedoch geringer als die eines Motors mit Permanentmagneten. Eine weitere Ausführungsoption von Synchronmaschinen im industriellen Bereich nutzt die elektrische Läufererregung anstelle der Permanentmagnete. Elektrisch erregte Synchronmaschinen werden in Leistungsbereichen von 1 MW bis zu 100 MW eingesetzt, beispielsweise als Antriebe in Walzwerken, als elektrische Schiffsantriebe oder als Drehofenantrieb [Binder 2012].

Tabelle 4-8: Unterteilung von Motorenarten nach Stromart und Wirkungsweise [Fischer 2011, Buchert et al. 2014]

Stromart	Stromwendermaschinen	Asynchronmaschinen	Synchronmaschinen	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich
Gleichstrom	Dauermagnetmotor			Feinwerktechnik, Kfz-Elektrik, Servoantriebe	<1W bis 10 kW
	Fremderregter Motor			Hauptantrieb für Werkzeugmaschinen, Hebewerkzeuge, Prüffelder, Walzwerke	10 kW bis 10 MW
	Reihenschlussmotor			Anlasser im Kfz, Fahrmotor in Bahnen	300 W bis 500 kW
Wechselstrom	Universalmotor (Kommutator)			E-Werkzeuge, Haushaltsgeräte	50 W bis 2.000W
	Reihenschlussmotor			Fahrmotor in 16 2/3 Hz und 50 Hz Vollbahnen	100kW bis 1.000 kW
		Spaltemotor		Lüfter, Pumpen, Gebläse, Haushaltsgeräte	5 W bis 150 W
		Kondensatormotor		Haushaltsgeräte, Pumpen, Gebläse, Werkzeuge	50 W bis 2.000W
			Hysteresemotor	Uhrwerke, Feinwerktechnik, Hilfsantriebe	<1W bis 20 kW
			Reluktanzmotor	Gruppenantriebe in der Textilindustrie, Extruder	100 W bis 10 kW
Drehstrom	Nebenschlussmotor ¹			Druck- und Papiermaschinen, Textilindustrie	1 kW bis 150 kW
		Käfigläufermotor ²		Industriestandardantrieb, z. B. Pumpen, Gebläse, Bearbeitungsmaschinen, Fördertechnik, Umformer, Fahrmotoren in Bahnen	100 W bis 50 MW
		Schleifringläufermotor		Hebewerkzeuge, Pumpen und Verdichter	10 kW bis 10 MW
		Linearmotor	Linearmotor	Fördertechnik, Schnellbahnen	100 W bis 10 MW
			Dauermagnetmotor	Servoantriebe, Gruppenantrieb	100 W bis 100 kW
			Schenkelpolmaschine	Notstromgenerator, langsam laufender Industrieantrieb, Wasserkraftgenerator	10 kW bis 1.000 MW
			Vollpolmaschine	Verdichter, Mühlenantrieb, Turbogenerator in Kraftwerk	100 kW bis 1.500 MW
Impulsstrom			Elektronikmotor	Feinwerktechnik, Textilindustrie	< 1W bis 200 W
			Schrittmotor	Quarzuhren, Positionierbetrieb	10 µW bis 500 W

¹ Nur noch historisch von Bedeutung

4.5.2 Grundsätzlicher Aufbau und stoffliche Zusammensetzung

Entsprechend der vielfältigen Ausführungen und Anwendungsgebiete von Elektromotoren können auch der Aufbau sowie die stoffliche Zusammensetzung der Geräte variieren. Zwei wesentliche Bauelemente eines jeden Motors sind Stator und Rotor. Bei Asynchronmotoren bestehen Stator und Rotor aus aufeinander geschichteten Eisen-Blechkpaketen, auf denen die Kupferwicklungen mit Hilfe von Nuten befestigt werden. Die Blechpakete können teilweise auch aus Kobalt-Eisen-Legierungen bestehen [Brand 2014]. Der Stator ist in ein Gehäuse eingefasst, bei dem es sich um eine Schweiß- oder eine Gusskonstruktion handeln kann. Das Rotorblechpaket befindet sich entweder direkt auf der Rotorwelle oder auf einer dafür ausgelegten Tragkonstruktion. Beim Rotor unterscheidet man zwischen Käfig- und Schleifringläufern. Beim Käfigläufer werden leitfähige Stäbe, die eine Wicklung ersetzen, ringförmig entlang der Welle kurzgeschlossen und bilden eine Art „Lauftrad“. Der Schleifringläufer verfügt hingegen über drei Wicklungsstränge, deren Enden über Schleifringe und Kohlebürsten kontaktiert sind [Binder 2012]. Für die Wicklungen wird in der Regel Kupfer verwendet, zum Teil auch in Legierung mit Silber, Zirconium oder Zinn [Kupferinstitut 2012, BDG 2011]. Die Schleifringe können unter anderem aus einer korrosionsbeständigen Kupfer-Zinn-Nickel-Legierung oder aus Edelstahl gefertigt sein [ABB 2015].

Synchronmotoren unterscheiden sich vom grundlegenden Aufbau nur unwesentlich von einem Käfigläufer. Sie sind jedoch für die vorliegenden Untersuchungen von besonderem Interesse, weil die Rotoren über Permanentmagnete verfügen können. Diese sind üblicherweise aufgeklebt und werden anschließend bandagiert [VEM 2016]. In neueren Modellen können die Magnete auch gesteckt sein [Buchert et al. 2014], was eine Entnahme grundsätzlich erleichtert.

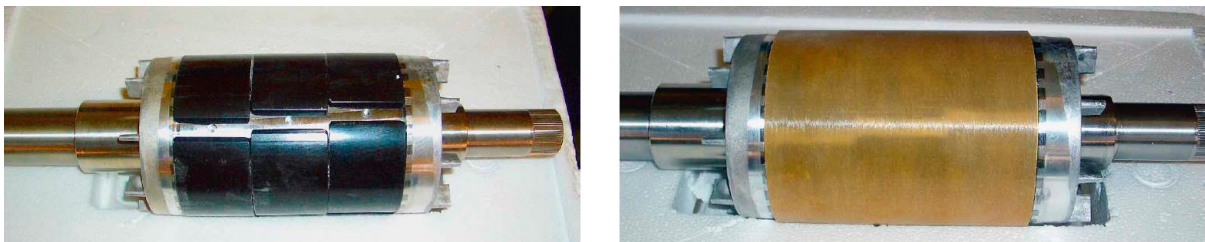


Abbildung 4-15: Magnetbestückte Rotoren eines Synchronmotors (rechts: bandagiert) [VEM 2016]

Die eingesetzten Magnete können Seltene Erden enthalten. Typische Anwendungen sind Neodym-Eisen-Bor- und Samarium-Kobalt-Magnete. Neodym-Eisen-Bor-Magnete können zusätzlich auch Praseodym, Dysprosium und Kobalt enthalten. Der Zusatz von Dysprosium erhöht dabei die thermische Stabilität von Neodym-Eisen-Bor-Magneten. Der Gehalt an Seltenen Erden liegt in Neodym-Eisen-Bor-Magneten bei ca. 27 - 31 % [Buchert et al. 2015]. Ebenso gibt es Magnetmaterialien ohne Seltene Erden, wie beispielsweise Aluminium-Nickel-Kobalt-Magnete und ferritische Magnete [Vacuumschmelze 2012, Bast et al. 2014].

² Fremderregte Asynchronmaschinen

Der Marktanteil der verschiedenen Magnetarten wird nach [Buchert et al. 2015] wie folgt angegeben (die Marktanteile beziehen sich dabei auf die gesamte Bandbreite der Magnetanwendungen):

- ▶ Ferrite 34 %
- ▶ NdFeB-Magneten 62 %
- ▶ SmCo 3 %
- ▶ AlNiCo 1 %

Eine fundierte Hochrechnung von durchschnittlichen Gehalten an Seltenen Erden in Abhängigkeit von Motorarten bzw. Produktreihen ist derzeit jedoch nicht gegeben [Zepf 2015]. Ähnlich schwierig gestaltet sich die Datenlage in Bezug auf die verschiedenen Metallwerkstoffe in Industriemotoren. Selbst bei Motorenherstellern ist die genaue Zusammensetzung der verschiedenen Legierungen nur teilweise bekannt [ATB 2015, SEW 2015].

4.5.3 Erfassung, Verbleib und Verwertungswege

Zur derzeit betriebenen Erfassung und Verwertung von industriellen Elektromotoren wurden umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt sowie verschiedene Akteure (Hersteller, Recyclingunternehmen, Reparaturdienstleister, Verbände, etc.) befragt. Demnach werden nicht mehr funktionsfähige Motoren aus dem industriellen Bereich teilweise von Reparaturbetrieben wieder in Stand gesetzt und weiter genutzt. Dabei besteht auch die Möglichkeit, dass reparierte Motoren zur Zweitnutzung ins nichteuropäische Ausland exportiert werden.

Die meisten Defekte an Industrie-Elektromotoren entstehen durch fehlerhafte Betriebsweise, welche zu einer Überhitzung führt, in deren Verlauf entweder das Lagerfett verbrennt (Lagerschaden) oder Lötstellen im Kupferkabel schmelzen. Sowohl Lager als auch die Kupferwicklung können bei Bedarf ersetzt werden. Die Reparatur der Kupferwicklungen ist allerdings meist nur bei Motoren ab einem Leistungsbereich von ca. 15 bis 90 kW wirtschaftlich. Diese Grenze ist in den letzten Jahren stark angestiegen, da zunehmend günstige Ware (vornehmlich aus China) auf dem europäischen Markt erhältlich ist. Daher werden zunehmend größere Elektromotoren entsorgt, welche noch vor einigen Jahren aufbereitet worden wären. Kleinere Motoren werden mit Ausnahme von Spezialanfertigungen oder Getriebemotoren, bei denen Elektromotoren mit einem Getriebe zu einer Einheit kombiniert sind, üblicherweise nicht repariert. Bei letzteren ist erst in den folgenden Jahren mit einer zunehmenden Anzahl günstiger Ware am Markt zu rechnen. Die Grenze für ein wirtschaftlich lohnenswertes Refurbishment liegt daher in diesem Fall momentan noch bei niedrigen 0,36 kW [Reparaturdienstleister 2016]. Aus den genannten Gründen ist das Aufkommen an Elektromotoren zur Entsorgung hauptsächlich auf kleine Leistungsklassen bis etwa 90 kW beschränkt.

Motoren, deren Reparatur technisch nicht möglich oder unwirtschaftlich ist, werden an örtliche Metall- bzw. Elektroschrott-Recycler abgegeben. Aufgrund der geringen Baugröße ist dabei vielfach mit einer Entsorgung durch die gemischte Schrottsammlung zu rechnen. Bestimmte Betriebe sind jedoch mitunter auf die Zerlegung von Elektromotoren spezialisiert [Entsorger 2015]. Auch Reparaturdienstleister zerlegen defekte Motoren. Dabei können noch funktionsfähige Teile als Ersatzteile weiterverwendet werden, die nicht weiterverwendbaren

Motorkomponenten werden nach Fe- und NE-Metallen separiert und an örtliche Schrotthändler oder Recyclingunternehmen gegeben. Bei den meisten der befragten Reparaturdienstleister liegt dabei der Fokus auf der Gewinnung von Kupferschrott [Reparaturdienstleister 2016].

Auch eine Demontage beim Hersteller ist möglich, wobei in der Regel eine Zerlegung in Bleche, Elektronik, Aluminium, Stator und Rotor erfolgt [Motorenhersteller 2015]. Häufig verbleiben defekte Motoren jedoch beim Abnehmer, auch wenn die Hersteller Reparatur- und Rücknahmemöglichkeiten anbieten [Buchert et al. 2014]. So kann es dazu kommen, dass bei bestimmten Herstellern die Rücklaufquote der ausgelieferten Elektromotoren weniger als 1 % des Produktionsumfangs beträgt. Davon werden teilweise nur 50 % der zurückgenommenen Motoren wieder in Stand gesetzt [Motorenhersteller 2015].

Bei der Entsorgung vollständiger Maschinen ist zudem davon auszugehen, dass darin verbaute Elektromotoren nicht immer demontiert und separat behandelt werden [Bast et al. 2014]. Davon ist auch im Fall des Austausches oder Rückbaus ganzer Anlagen bzw. Anlagenteile auszugehen.

Aus der Befragung von Reparaturdienstleistern wurde zudem ersichtlich, dass es sich bei den defekten Industriemotoren nur selten um SEM-haltige Elektromotoren handelt. Tendenziell sehen einige befragte Dienstleister jedoch ein in Zukunft steigendes Potenzial für SEM-haltige Anwendungen. SEM-haltige Motoren werden nach dem derzeitigen Stand nicht gesondert erfasst und verwertet [Reparaturdienstleister 2016]. Demnach liegt bei diesen End-of-Life(EoL)-Produkten noch kein Fokus auf einer separaten Erfassung von Magnetmaterial. Dies liegt mitunter daran, dass die Magnete häufig fest verklebt sind und nicht Zerstörungsfrei entnommen werden können [Motorenhersteller 2015].

Eine weitere mögliche Quelle für Magnetmaterialien aus Elektromotoren liegt im Bereich der Elektrowerkzeuge. Während in kabelgebundenen Maschinen im Wesentlichen Motoren der Bauart Kommutator verbaut sind, kommen in Akkugeräten permanenterregte Elektromotoren zum Einsatz. Akkugetriebene Geräte erfahren zudem im Werkzeugbereich in den letzten Jahren einen starken Aufschwung [Reparaturdienstleister 2016].

4.5.4 Refurbishment

Im Fall der Wiederaufbereitung eines Elektromotors (Refurbishment) in einem Fachbetrieb erfolgt im ersten Schritt die Trennung von Stator und Rotor. Die im Stator befindliche Kupferwicklung wird je nach Motorengröße im Anschluss an eine thermische Vorbehandlung aus dem Eisenkern entfernt. Zunächst wird dafür eine Seite der Kupferstränge senkrecht zum Eisenkern abgetrennt. Dies erfolgt nach Angabe eines befragten Aufbereiters durch einseitiges Abschlagen der aus dem Blechpaket herausstehenden Wicklungen mittels eines Stechbeitels. Anschließend werden die Statoren je nach Aufbereiter auf unterschiedliche Weise thermisch behandelt. Dies geschieht entweder pyrolytisch durch Einwirkung einer Temperatur von 400–500°C über einen Zeitraum von etwa 4 h in inerter Atmosphäre oder unter Verwendung einer offenen Flamme. Dies dient dem Zersetzen des Tränklackes, mit dem jeder Elektromotor am Ende der Produktion überzogen wird. Der Sauerstoffabschluss verhindert dabei eine Oxidation des Kupfers. Der Eisenkern bleibt von der Behandlung unbeeinflusst, vorausgesetzt, dass die elektrische Isolation der einzelnen Bleche des Blechpaketes nicht durch Aufbringen einer isolierenden Lackschicht, sondern durch eine sogenannte Kohlenstoffimprägnierung erfolgte. Der Eisenkern wird daraufhin gesäubert (beispielsweise durch Gasperlbestrahlung) und kann

anschließend wiederverwendet werden. Das Kupfer kann als sehr reine Fraktion direkt zum Recycling in die Schmelze gegeben werden.

4.5.5 Stand der Aufbereitung

Bei einer hochwertigen Aufbereitung von industriellen Elektromotoren werden zunächst die Betriebsflüssigkeiten, wie zum Beispiel Altöle, entnommen. Danach werden metallhaltige Komponenten zerkleinert und Fe- von NE-Metallen getrennt. Dabei kommen sowohl manuelle als auch automatische Sortierungen (zum Beispiel Magneten und Wirbelstromscheider) zum Einsatz. Zum Teil werden auch spezielle Legierungen wie Edelstahl und Wolframschrotte abgetrennt und an Schmelzbetriebe weitergegeben [Buchert et al. 2014, Bast et al. 2014]. Bei Recyclingunternehmen mit umfangreichen Shredder- und Separationsaggregaten ist die Art der Aufbereitung von der Marktsituation abhängig. Bei hohen Marktpreisen für Metallschrotte werden die kompletten Motoren ins In- und Ausland verkauft, wobei derzeit keine Aussage über die Verwertungswege im Ausland getroffen werden kann. Bei niedrigeren Marktpreisen werden die Motoren geschreddert und in Metallfraktionen wie Aluminium-, Kupfer-, Messingschrott sowie zum Teil in Kunststofffraktionen aufgetrennt. Einige Betriebe trennen außerdem Stator und Rotor, wobei der Rotor üblicherweise einer Mischschrottfraktion, der Stator einem kupferreichen Schrott [Entsorger 2015] zugeführt wird.

4.5.6 Abfallaufkommen

4.5.6.1 Globale Abfallmengen

In der Literatur sind keine belastbaren Aussagen zu Abfallmengen verfügbar. Eine statische Abschätzung weltweit anfallender EoL-Motoren kann jedoch über den globalen Bestand und Literaturangaben zur Lebensdauer erfolgen. Wie in Tabelle 4-9 dargestellt, betrug der weltweite Bestand an Elektromotoren im Jahr 2007 insgesamt rund 2,2 Milliarden Stück. Davon entfiel die größte Anzahl auf Motoren mit einer Leistung kleiner 0,75 kW [Plötz und Eichhammer 2011]. Der zweite wesentliche Faktor für die Abschätzung von Abfallmengen ist die Lebensdauer von Elektromotoren. Diese hängt jedoch von vielen Faktoren wie beispielsweise der Anzahl der Betriebsstunden, der Betriebslast oder der Häufigkeit von Start/Stopp-Vorgängen ab. Zudem sind starke Schwankungen in der Lebensdauer in Abhängigkeit von der Leistungsklasse festzustellen [Buchert et al. 2014, Reparaturdienstleister 2016]. Der Literatur können in Abhängigkeit von der Leistungsklasse die in Tabelle 4-10 aufgeführten Angaben zur Lebensdauer entnommen werden.

Tabelle 4-9: Globaler Bestand von Elektromotoren für alle Anwendungsbereiche nach Leistungsklassen [Plötz und Eichhammer 2011]

Leistungsklasse in kW	Globaler Bestand 2007 in Mio. Stück	Erwartete Lebensdauer in Jahren
< 0,75	2.000	6,7
0,75 - 375	230	7,7
>375	0,6	15

Neben Leistungsklasse, Einsatzgebiet und Betriebsweise lässt sich die durchschnittliche Lebensdauer von Elektromotoren durch Reparatur und Wartung zum Teil stark beeinflussen. Dabei werden kleine Leistungsklassen weniger häufig repariert, da die Anschaffungskosten neuer Motoren vergleichsweise gering sind. Bei größeren Leistungsklassen kann die Lebensdauer der Motoren durch Reparatur jedoch deutlich erhöht werden. Nach [Buchert et al. 2014] können etwa permanentmagnethaltige Elektromotoren bei regelmäßigem Austausch von Verschleißteilen 30 bis 40 Jahre lang eingesetzt werden.

Mit den oben genannten Daten kann die Größenordnung der weltweit anfallenden ausgedienten Elektromotoren abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Abschätzung sind in Tabelle 4-10 dargestellt. Bei Elektromotoren mit geringer Leistung wurde in Anlehnung an [Buchert et al. 2014] angenommen, dass eine Verlängerung der Lebensdauer durch Reparatur und Wartung vernachlässigbar ist. Demnach wurde für diese Leistungsklasse entsprechend [Plötz und Eichhammer 2011] eine Lebensdauer von 6,7 Jahren angesetzt. Bei Motoren mit einer Leistung zwischen 0,75 und 375 kW ist bereits mit einer deutlichen Verlängerung der Lebensdauer durch Instandsetzungsmaßnahmen zu rechnen. Deshalb wurde in Anlehnung an [Buchert et al. 2014] angenommen, dass die Lebensdauer von 7,7 Jahren durchschnittlich auf bis zu 30 Jahre verlängert werden könnte. Bei Elektromotoren mit einer Leistung größer 375 kW könnte die von [Plötz und Eichhammer 2011] angegebene Lebensdauer von 15 Jahren durch Reparatur möglicherweise auf bis zu 40 Jahre erhöht werden. Diese Annahme stützt sich darauf, dass aufgrund der relativ hohen Anschaffungskosten gerade bei leistungsstarken Elektromotoren regelmäßig Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Tabelle 4-10: Hochrechnung der jährlich global anfallenden Abfallmenge an Elektromotoren nach [Plötz und Eichhammer 2011, Buchert et al. 2014]

Leistungsklasse	Durchschnittliche Lebensdauer in Jahren	Erreichbare Lebensdauer durch Wartung in Jahren	Globaler Bestand in Mio. Stück
< 0,75	6,7	6,7*	2.000
0,75 - 375	7,7	30**	230
>375	15	40**	0,6
Leistungsklasse	globale Abfallmenge (max.) in Mio. Stück	Globale Abfallmenge (min.) in Mio. Stück	
< 0,75	298,5	298,5	
0,75 - 375	29,9	7,7	
>375	0,04	0,015	

* Kleine Leistungsklassen werden nach [Buchert et al. 2014] weniger häufig repariert, da die Anschaffungskosten vergleichsweise gering sind. Daher wird keine Verlängerung der Lebensdauer durch Reparaturen angesetzt.

** Annahme: Durchschnittliche Verlängerung der Lebensdauer von Motoren mittlerer Leistungsklasse durch Reparatur in Anlehnung an [Buchert et al. 2014]

Auf Grundlage der Literaturangaben und der getroffenen Annahmen liegt die jährlich weltweit anfallende Stückzahl von Motoren mit einer Leistung kleiner 0,75 kW bei knapp 300 Millionen Stück. Die Zahl ausgedienter Altmotoren aus dem mittleren Leistungsbereich bis 375 kW könnte in Abhängigkeit von der Lebensdauer zwischen knapp 8 und knapp 30 Millionen Stück liegen. Bei leistungsstarken Elektromotoren über 375 kW fallen pro Jahr schätzungsweise zwischen 40.000 und 150.000 Stück zur Entsorgung an. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der globale Bestand nicht nur industriell genutzte Antriebsmotoren sondern auch alle weiteren Anwendungsfelder von Elektromotoren abbildet. Ebenso ist die gezeigte Hochrechnung aufgrund der großen Varianz der Lebensdauer von Motoren unterschiedlicher Leistungsklassen mit großen Unsicherheiten behaftet.

Perspektivisch ist aufgrund der zunehmenden Automatisierung mit einer steigenden Nachfrage nach Elektromotoren in globalem Maßstab zu rechnen. Deshalb ist davon auszugehen, dass auch die Zahl der EoL-Motoren in Zukunft steigen wird [SEW 2015].

4.5.6.2 Abfallmengen in Deutschland und Europa

Da keine statistischen Erhebungen zu den anfallenden EoL-Motoren aus dem industriellen Bereich zur Verfügung stehen, wurde versucht, eine Abschätzung auf Grundlage von import- und exportbereinigten Produktionszahlen und der durchschnittlichen Lebensdauer zu treffen. Produktionszahlen von Elektromotoren werden in Deutschland vom Statistischen Bundesamt erhoben. Die Angaben umfassen dabei die Gesamtheit aller produzierten Elektromotoren, sind

also nicht auf die Anwendung in der Industrie beschränkt. Insgesamt ist die Zahl der produzierten Elektromotoren gemäß Tabelle 4-11 in Deutschland von 2012 bis 2014 leicht gesunken und lag nach letzter statistischer Erhebung bei ca. 92 Millionen Stück. Daten zu den Produktionsmengen in den Jahren 1995 bis 2011 sind auf Nachfrage bei Destatis grundsätzlich verfügbar. Allerdings sind die Daten aus diesen Jahren aufgrund von Änderungen im Güterverzeichnis nicht direkt mit den Angaben für den Zeitraum 2012 bis 2014 vergleichbar.

Tabelle 4-11: *Deutsche Motorenproduktion der Jahre 2012 bis 2014 in Stück nach [Destatis 2015]*

2012	2013	2014
104.355.002	90.922.119	92.521.123

Angaben zu im- und exportierten Mengen an Motoren sind über das Statistische Bundesamt über die Auswertung der entsprechenden Warennummern verfügbar und für die Jahre 2012 bis 2014 in Tabelle 4-12 ausgewiesen. Es zeigt sich, dass die Menge an importierten und exportierten Motoren in diesem Zeitraum jeweils in etwa zwischen 0,8 und 0,9 Millionen Mg lag. Lediglich im Jahr 2012 wurde eine etwas größere Menge von 985.000 Mg exportiert.

Tabelle 4-12: *Im- und Export von Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren sowie Teilen davon in den Jahren 2012 bis 2014 nach [Destatis 2015a]*

Import in Mg			Export in Mg		
2012	2013	2014	2012	2013	2014
841.877	813.088	860.046	985.525	847.343	851.458

Die Angaben umfassen neben den in Deutschland produzierten Motoren jedoch auch von Zwischenhändlern importierte Motoren, die für den anschließenden Weiterverkauf ins Ausland bestimmt sind. Zudem können auch gebrauchte Motoren in den statistischen Daten enthalten sein, wenn diese nicht separat ausgewiesen werden [Destatis 2015b]. Zudem sind die statisch verfügbaren Daten nicht auf Produktion und Handel mit Industriemotoren beschränkt, sondern umfassen allgemein alle Typen und Einsatzgebiete von Elektromotoren. Auch die bisher im Rahmen der Untersuchung befragten Akteure im Bereich der Industriemotoren konnten keine spezifischen Daten liefern, welche eine fundierte Hochrechnung der Abfallmengen in Bezug auf Industriemotoren ermöglicht hätten.

Konkretere Mengenangaben über industrielle Elektromotoren, die in Bezug auf die EU und Deutschland relevant sind, beziehen sich auf permanenterregte Servomotoren. Davon wurden in der EU im Jahr 2012 ca. zwei Millionen Stück für industrielle Anwendungen produziert. Davon wurden wiederum rund eine Million Motoren in Deutschland hergestellt. Von letzteren wurden die eine Hälfte in deutschen Industrieanlagen eingesetzt, die andere Hälfte als

Komponente von Maschinen und Anlagen ins Ausland exportiert [Bast et al. 2014]. Auf Grundlage dieser Daten und der Befragung von Servicedienstleistern im Bereich Industriemotoren ist davon auszugehen, dass die derzeit anfallenden permanentmagnethaltigen Elektromotoren nur einen geringen Anteil an den insgesamt ausgedienten Industriemotoren haben. Tendenziell ist jedoch davon auszugehen, dass diese Art von Servomotoren in Zukunft vermehrt in der Industrie zum Einsatz kommen wird [Buchert et al. 2014, Reparaturdienstleister 2016].

4.5.7 Anwendungsbeispiele

4.5.7.1 Werkzeugmaschinen

Nach Verbandsangaben wurden im Jahr 2015 in Deutschland insgesamt 113.738 Werkzeugmaschinen produziert. Dabei handelte es sich um 57.458 spanende und 56.280 umformende Maschinen. Diese wurden sowohl in Deutschland als auch weltweit in Verkehr gebracht. Ein direkter Rückschluss der genannten Verkaufszahlen auf die darin verbauten Permanentmagnete ist jedoch nicht möglich. Permanentmagnete kommen in Werkzeugmaschinen vor allem bei Synchronmotoren zum Einsatz. Eine Werkzeugmaschine kann jedoch gänzlich ohne Synchronmotoren auskommen oder aber sehr viele Synchronmotoren beinhalten besitzen, was eine Verallgemeinerung ausschließt.

Die durchschnittliche Lebensdauer einer Werkzeugmaschine kann auf etwa 12 Jahre beziffert werden, wobei es durchaus große Spannweiten gibt. Maschinen in der Automobilproduktion haben oft eine kürzere, Maschinen im allgemeinen Maschinenbau häufig eine viel längere Einsatzzeit. Komplettüberholungen sowie Refurbishment- und Second Life Ansätze sind bei Werkzeugmaschinen sehr häufig anzutreffen. Second Life bedeutet in diesem Fall, dass die Maschinen als gebrauchte Maschinen - typischerweise ins außereuropäische Ausland - verkauft werden. Herstellerberichten zu Folge können 40 Jahre alte Maschinen noch repariert und weiterverwendet werden, wofür durchaus auch eine Nachfrage besteht [Hersteller 2016]. Deshalb ist davon auszugehen, dass ausgediente Werkzeugmaschinen im Deutschland nur in geringem Umfang anfallen und sich deshalb für eine Einbindung in die Demontagefabrik nur bedingt eignen.

4.5.7.2 Industrieroboter

Die International Federation of Robotics schätzt die Anzahl der weltweit verkauften Industrieroboter im Jahr 2015 auf rund 240.000 Einheiten [KUKA 2016]. Permanentmagnete kommen hier – ähnlich wie bei den zuvor genannten Werkzeugmaschinen - in den Servomotoren aber auch in Form von Einscheiben-Bremsen zum Einsatz. Die Nutzungsdauer eines Industrieroboters kann auf etwa 15 Jahre geschätzt werden [Feifel et al. 2009]. Bezüglich der Charakterisierung des Stoffstroms der Industrieroboter wurden Akteure aus der Praxis angefragt. Deren Rückmeldung steht zum Stand der Projektbearbeitung jedoch noch aus. Auf Basis bisheriger Erkenntnisse ist jedoch davon auszugehen, dass Industriemotoren, ähnlich wie andere größere Industriemotoren, nach längerer Nutzungsphase in Deutschland Abnehmer im Ausland finden und dort weiterverwendet werden.

4.6 Modellstoffströme: Fahrräder und Elektrofahrräder (E-Räder)

4.6.1 Aufkommen von Fahrrädern und E-Rädern

4.6.1.1 Bestand und Absatz in Deutschland und Baden-Württemberg

Der Ausstattungsbestand deutscher Haushalte mit Fahrrädern lag nach [Destatis 2015c] zum 01.01.2014 bei 187,7 Fahrrädern je 100 Haushalte. Der Ausstattungsgrad deutscher Haushalte lag zum selben Zeitpunkt bei 81,4 %. Das bedeutet, dass 81,4% aller deutschen Haushalte zu Beginn des Jahres 2014 über mindestens ein Fahrrad verfügten. Der Fahrrad-Bestand hat in Deutschland in den letzten Jahren stetig zugenommen. Wie Abbildung 4-16 zeigt, liegt dieser derzeit bei ca. 72 Millionen Stück. Einer Erhebung von [BMVI 2014] zufolge lag der Bestand an Fahrrädern in Baden-Württemberg im Jahr 2008 bei rund 10 Millionen Stück. Insgesamt haben die Fahrräder in Baden-Württemberg damit einen Anteil von ca. 15 % am gesamten Bestand im Bundesgebiet. Die Verkaufszahlen sind in Abbildung 4-17 dargestellt. Demnach wurden in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2015 jährlich zwischen 3,8 und 4,3 Millionen Fahrräder und E-Bikes verkauft. Eine konkrete Abschätzung von jährlich anfallenden ausgedienten Fahrrädern lässt sich nicht abbilden, da es keine verlässlichen Angaben zur durchschnittlichen Lebensdauer von Fahrrädern ohne elektrischen Antrieb gibt.

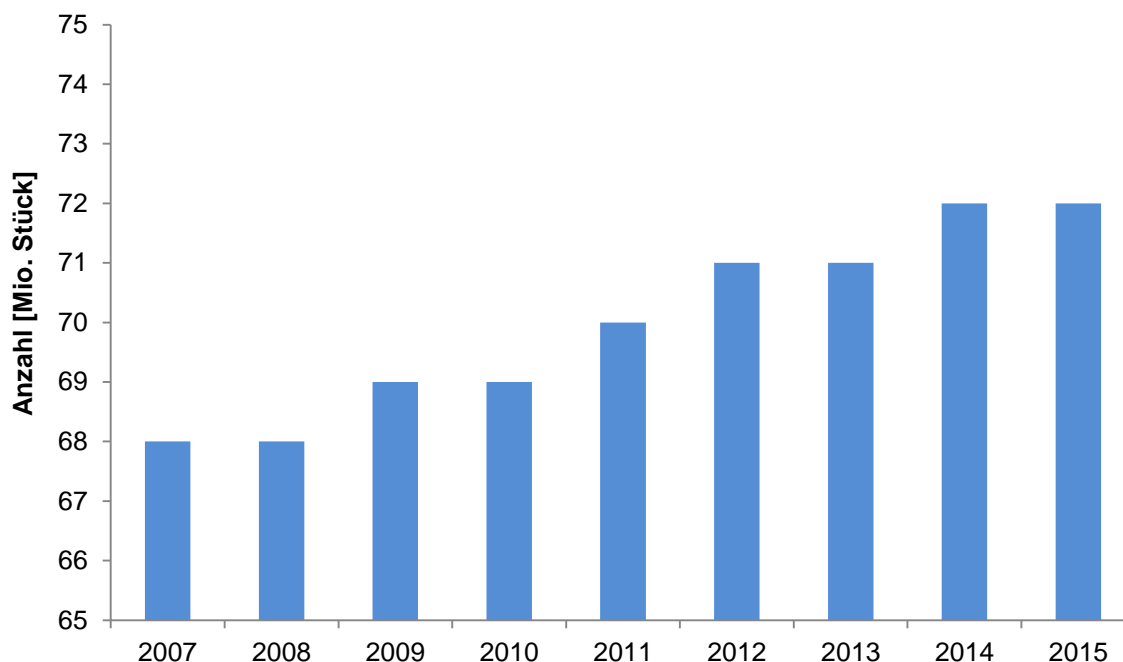


Abbildung 4-16: Entwicklung der Bestandszahlen von Fahrrädern (inkl. E-Räder) in Deutschland [ZIV 2016a, ZIV 2013]

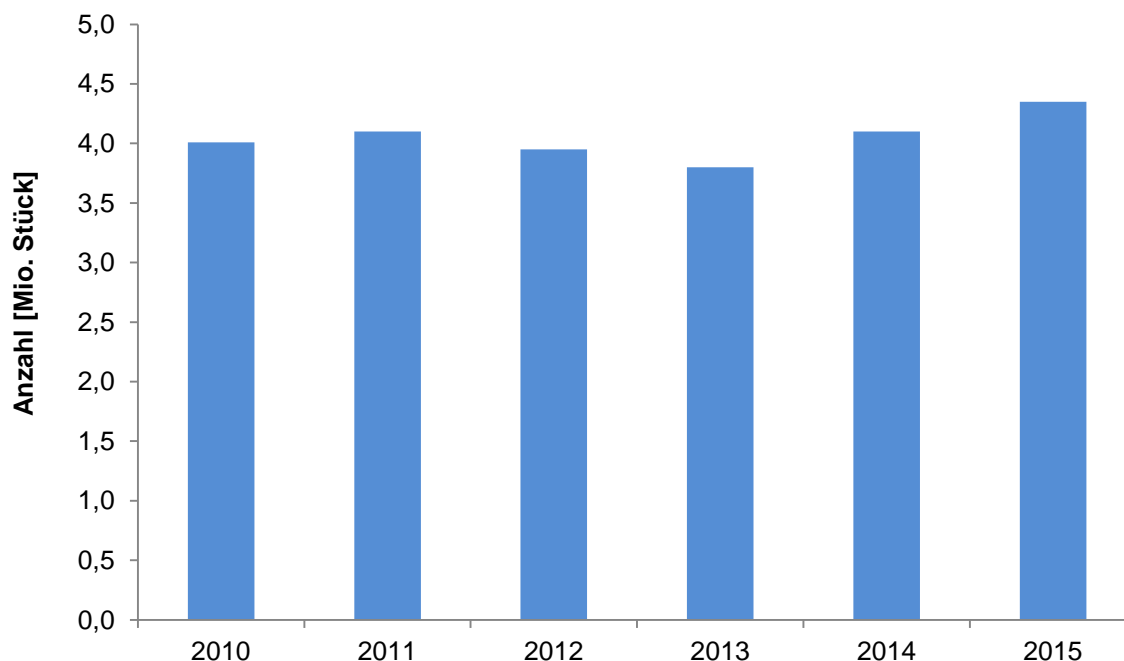


Abbildung 4-17: Verkauf von Fahrrädern und E-Bikes in Deutschland [ZIV 2016a, ZIV 2013]

E-Räder werden häufig in separat ausgewiesenen Statistiken erfasst. Beim Ausstattungsgrad der Haushalte lagen E-Rädern Anfang 2014 bei 3,4 %, was einer Stückzahl von 1,6 Millionen entspricht [Destatis 2015d, UBA 2014]. [Statista 2015b] beziffert auf Basis der Verkaufszahlen der Jahre 2009 bis 2015 den Bestand an E-Rädern in Deutschland für das Jahr 2015 bereits auf 2,45 Millionen Stück. Da bei E-Rädern von einer durchschnittlichen Lebensdauer von deutlich mehr als 6 Jahren ausgegangen werden kann, ist die Annahme, dass sich die im genannten Zeitraum verkauften Räder noch im Bestand befinden, gerechtfertigt. Die in Abbildung 4-18 dargestellten Verkaufszahlen belegen, dass E-Räder in Deutschland einen bedeutenden Wachstumsmarkt darstellen. Schätzungen des Umweltbundesamtes gehen davon aus, dass E-Räder mittelfristig einen Anteil von ca. 15 % aller Räder im Bestand in Deutschland einnehmen könnten, was einer Stückzahl von 10,65 Millionen E-Rädern entsprechen würde [UBA 2014].

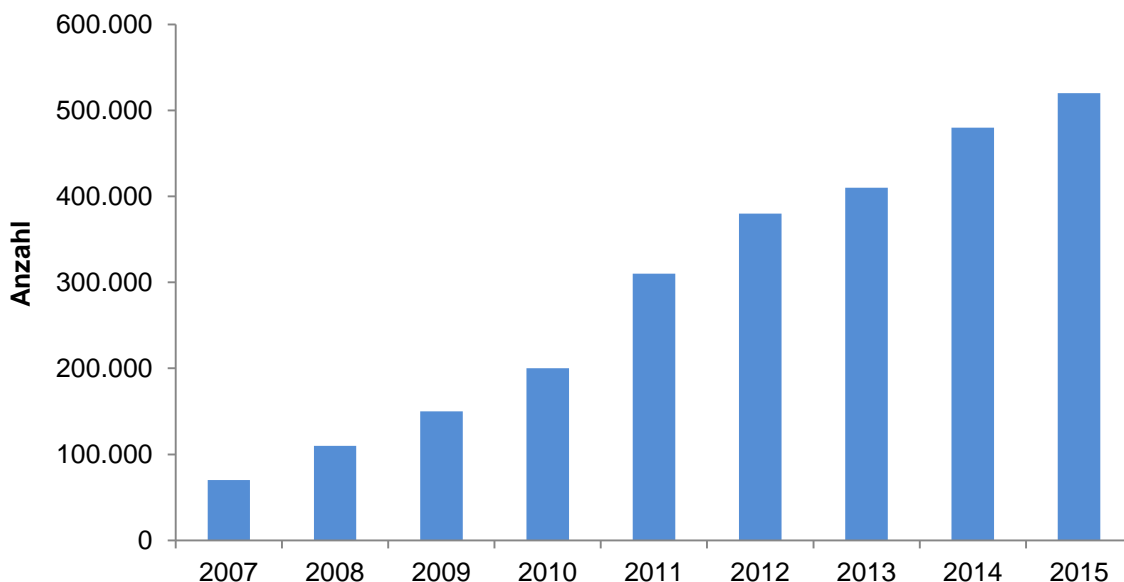


Abbildung 4-18: Anzahl der im Zeitraum von 2007 bis 2015 in Deutschland verkauften E-Räder
[Statista 2015b, UBA 2014]

4.6.1.2 Fahrradmarkt in den Nachbarländern

Die Verkaufszahlen von Fahrrädern und E-Rädern der letzten Jahre betragen gemäß Abbildung 4-19 in den europäischen Ländern und der Schweiz in Summe zwischen 19,9 und 21,7 Millionen Stück (vgl. Abbildung 4-19). Unter den Nachbarländern hatte im Jahr 2014 Frankreich mit rund 3 Millionen verkauften Rädern den größten Anteil am europäischen Absatzmarkt, gefolgt von Polen und den Niederlanden (jeweils ca. eine Millionen Stück) und Belgien (0,6 Millionen Stück). In Tschechien, Österreich und Dänemark wurden 2014 jeweils ca. 0,4 Millionen Räder verkauft, in der Schweiz belief sich der Absatz auf etwas mehr als 0,3 Millionen Stück [CONEBI 2015, COLIBI 2013, Velosuisse 2015]. Die Verkaufszahlen der einzelnen Nachbarländer sind in Abbildung 4-20 für das Jahr 2014 aufgeführt. Zum Aufkommen ausgedienter Fahrräder konnten auch im benachbarten Ausland keine konkreten Angaben ermittelt werden.

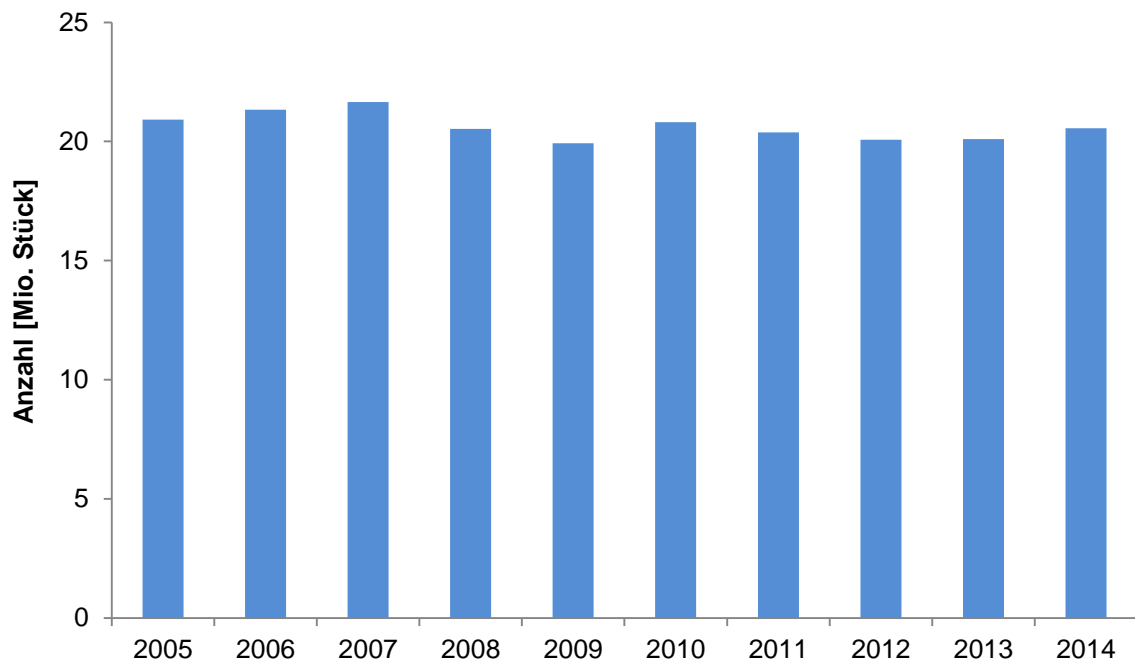


Abbildung 4-19: Verkaufszahlen von Fahrrädern und E-Rädern in den Nachbarländern (2005: exklusive Schweiz) [CONEBI 2015, Velosuisse 2015]

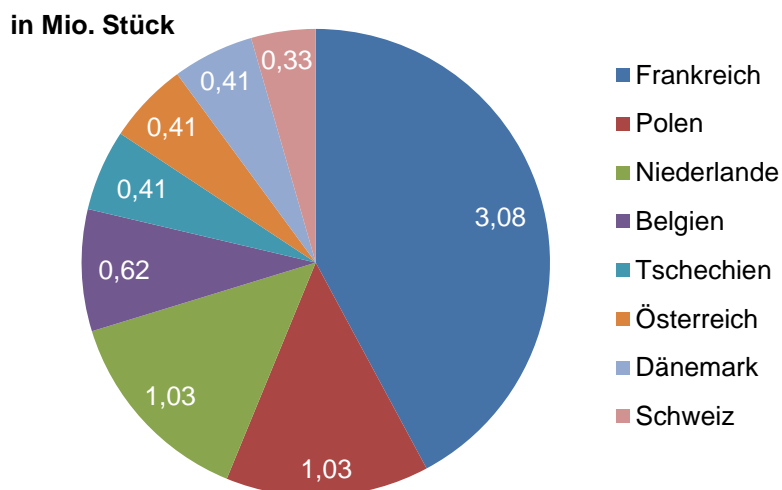


Abbildung 4-20: Länderspezifische Verkaufszahlen in den Nachbarländern im Jahr 2014 [CONEBI 2015, COLIBI 2013]

In Bezug auf E-Räder gehen Prognosen davon aus, dass die Verkaufszahlen im Jahr 2023 global auf 40 Millionen Fahrräder ansteigen werden [Hurst und Gartner 2012]. Den mit Abstand größten Absatzmarkt für E-Räder stellt mit 23 Millionen verkauften Einheiten (2012) die Volksrepublik China dar [Ebike 2014]. Jedoch ist auch in Europa eine stetig steigende Nachfrage zu erkennen. Dies belegen die in Abbildung 4-21 dargestellten Verkaufszahlen von E-Rädern in den EU-28-Staaten, die nach [CONEBI 2015] als EPAC (Electric Power Assisted

Cycle) angegeben werden. [Ehrenfried 2013] schätzt, dass der Markt für E-Räder in Westeuropa bis 2020 um rund neun Prozent jährlich wächst und die Anzahl verkaufter E-Räder im Jahr 2020 bei ca. 2 Millionen Stück liegen könnte.

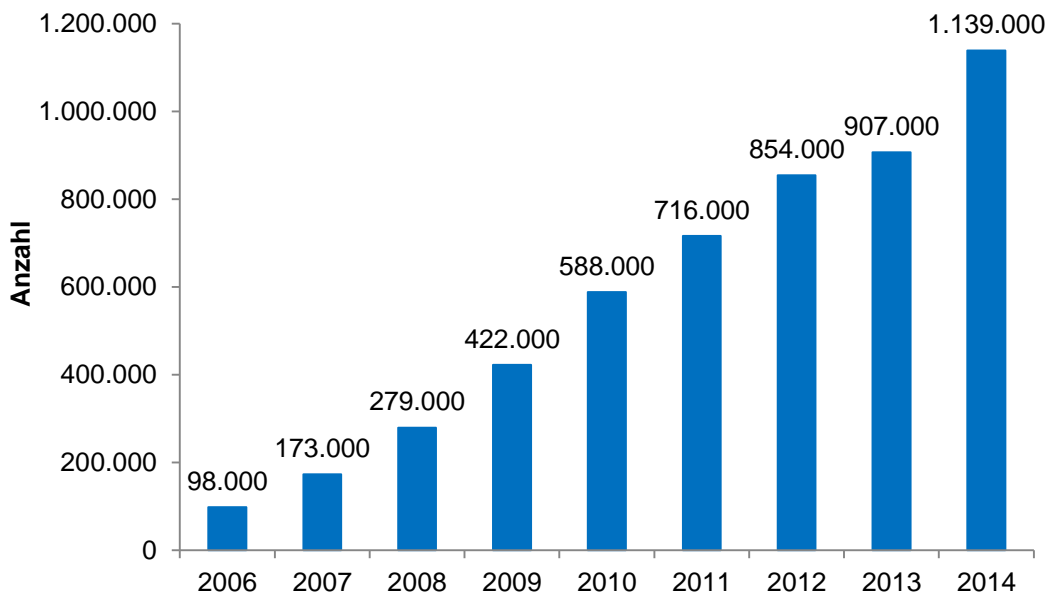


Abbildung 4-21: Verkaufte E-Räder in der EU 28 von 2006 bis 2014 [CONEBI 2015]

In Abbildung 4-21 sind die im Jahr 2014 in der EU verkauften E-Räder nach Ländern aufgeschlüsselt dargestellt. Grundsätzlich stellt sich die europäische Marktsituation derzeit sehr inhomogen dar. Als bedeutendste Absatzmärkte innerhalb der EU sind Deutschland und die Niederlande zu nennen, die mit 671.000 verkauften Einheiten im Jahr 2014 die Liste der Verkaufszahlen deutlich anführen (restliche Länder insgesamt: 437.000 verkaufte Einheiten). Nach [EPOMM 2013] erlangen E-Bikes in den Niederlanden an den Fahrrad-Verkaufszahlen bereits einen Anteil von über 20 % sowie einen Anteil von 40 % beim Verkaufsvolumen. Deutlich geringere Verkaufszahlen sind derzeit in Länder wie Polen, Luxemburg, Portugal oder Griechenland zu verzeichnen, was auch mit der geringeren Einwohnerzahl dieser Länder zu tun hat. Quantitative Prognosen im Hinblick auf mögliche Marktentwicklungen in den einzelnen Ländern können derzeit anhand öffentlich verfügbarer Quellen nicht abgeleitet werden.

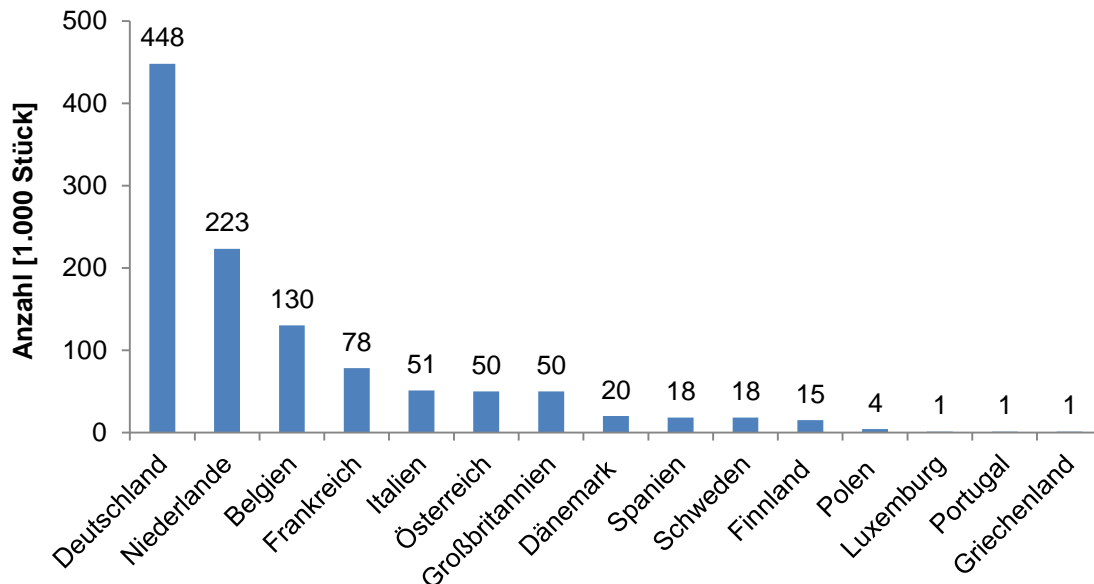


Abbildung 4-22: Im Jahr 2014 verkaufte E-Räder (in 1.000 Stück) nach Ländern [CONEBI 2015]

4.6.1.3 Zukünftiges Abfallaufkommen

Da die Nutzungsdauer von Fahrrädern ohne elektrischen Antrieb von vielen Variablen (z. B. Preisklasse, individuelle Nutzung, Instandhaltung, etc.) abhängt, gibt es keine verlässliche Basis für die Schätzung einer durchschnittlichen Lebensdauer. Eine Prognose des Aufkommens ausgedienter Fahrräder anhand der Verkaufszahlen der letzten Jahre kann deshalb nicht erfolgen. Da die Verkaufszahlen aller Fahrräder in Deutschland und den Nachbarländern in den letzten Jahren jedoch relativ konstant verliefen, sind in den kommenden Jahren keine großen Schwankungen bei der Menge der entsorgten Fahrräder zu erwarten.

Anders sieht die zukünftige Entwicklung bei den E-Rädern aus. Zum einen gibt es in der Literatur Angaben zur durchschnittlichen Lebensdauer, die nach [Masih-Tehrani et al. 2015] auf 10 Jahre geschätzt wird. Zum anderen ist der Absatz von E-Rädern in den letzten Jahren in Deutschland und Europa stetig gestiegen, weshalb der Stoffstrom ausgedienter E-Räder in Zukunft mehr an Bedeutung gewinnen wird. Gemäß Abbildung 4-23 lässt sich so abschätzen, dass die Verkaufszahlen zwischen 2007 und 2015 dem zukünftigen Abfallaufkommen bis 2025 entsprechen. Folglich würde der Stoffstrom ausgedienter E-Räder in Deutschland im Jahr 2025 bereits eine halbe Million Stück umfassen. In den EU-Ländern und der Schweiz könnten im Jahr 2024 insgesamt knapp 1,2 Millionen E-Bikes als Abfall anfallen.

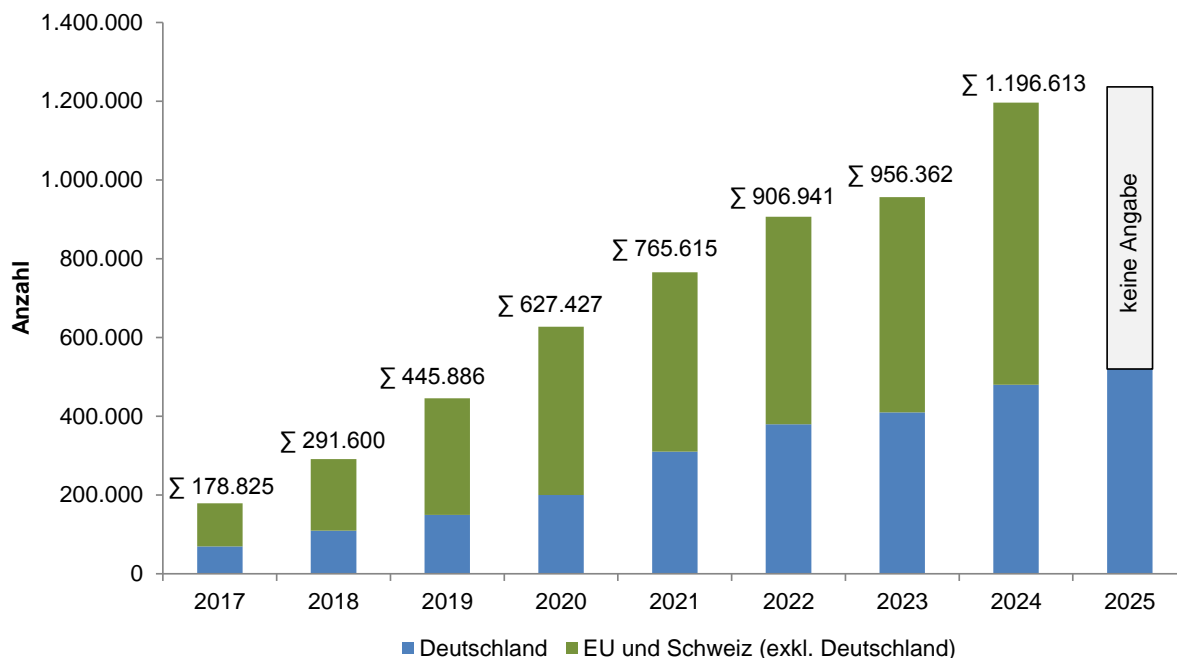


Abbildung 4-23: Entwicklung des Abfallaufkommens von E-Rädern in Deutschland und Europa (inklusive der Schweiz), auf Grundlage von [Statista 2015b, UBA 2014, CONEBI 2015, Velosuisse 2015, Masih-Tehrani et al. 2015]

4.6.2 Erfassung, Verbleib und Verwertungswege

In Deutschland existiert kein einheitliches oder flächendeckendes Rücknahmesystem für konventionelle Fahrräder. Im Gegensatz zu anderen Konsumgütern ist der Handel nicht zur Rücknahme alter Fahrräder verpflichtet. Oftmals erfolgt die Rücknahme bzw. Sammlung schrottreifer konventioneller Fahrräder an Wertstoffhöfen oder über Sperrmüllsammlungen [Entsorger 2015]. Ausgediente Fahrräder können jedoch auch an gemeinnützige Institutionen wie z. B. Behindertenwerkstätten, die alte Fahrräder reparieren oder „ausschlachten“, übergeben werden. Hierfür werden gebrauchte Fahrräder mitunter auch durch die Verwerter abgeholt [Verbände 2015]. Darüber hinaus werden Fahrräder auch durch Vereine gesammelt und an sozial schwache oder bedürftige Menschen weitergegeben oder zur Weiternutzung in ärmere Regionen der Welt und Entwicklungsländer verschickt [Entsorger 2015, Verbände 2015]. Weiterhin gibt es vielerorts die Möglichkeit zum privaten Verkauf (z. B. Fahrradflohmärkte, Sozialkaufhäuser) oder zum Verschenken von gebrauchten Fahrrädern (Online Angebote von Städten und Gemeinden) [Entsorger 2015].

Für ausgediente E-Räder stellt sich die Situation etwas differenzierter dar. Als elektrisch betriebenes Sportgerät fallen die Alt-Elektrofahrräder in den Anwendungsbereich des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG, Kategorie 7), sofern es sich um Fahrzeuge ohne Typgenehmigung handelt [UBA 2014]. Somit gelten für E-Räder einige Besonderheiten. So wird beispielsweise empfohlen die an E-Rädern verbauten lithiumhaltigen Batterien aufgrund ihres Gefahrenpotenzials getrennt von der eigentlichen Fahrradeinheit zu sammeln und zu transportieren [UBA 2014, Lienhop et al. 2015].

Wie bei konventionellen Fahrrädern kann aber auch bei E-Rädern eine kostenlose Rücknahme an kommunalen Sammelstellen wie beispielsweise Wertstoffhöfen erfolgen [UBA 2014].

Grundsätzlich handelt es sich bei E-Rädern um eine vergleichsweise junge Technologie bzw. einen Stoffstrom, der bisher kaum im Abfallbereich anfällt bzw. einer Verwertung zugeführt wird. Insofern ist aktuell auch noch keine Einschätzung möglich, inwiefern die zuvor für die konventionellen Fahrräder beschriebenen Mechanismen in gleichem Umfang wirken. Nach [Zepf 2015] lässt sich derzeit auch kaum abschätzen, wann die Räder in Deutschland für ein Recycling zur Verfügung stehen. Auffallend ist jedoch, dass sich die Aktivitäten und Empfehlungen hinsichtlich der Sammlung bei E-Rädern vorwiegend auf die verbauten Batterien, weniger jedoch auf die verwendeten Antriebseinheiten bzw. Elektromotoren beziehen. Dies liegt möglicherweise darin begründet, dass bei der Sammlung der Fahrradkomponenten vorwiegend der fach- und umweltgerechte Umgang mit Gefahrstoffen im Vordergrund steht und die zielgerichtete Erfassung werthaltiger Komponenten zum Zwecke der Rückgewinnung relevanter Rohstoffe bisher eher eine untergeordnete Rolle spielt.

4.6.3 Stand der Aufbereitung

Ähnlich wie bei der Erfassung existiert in Deutschland kein flächendeckendes Recyclingsystem für konventionelle Fahrräder [Entsorger 2015]. In der Regel erfolgt keine gesonderte Erfassung und Verwertung von Fahrrädern durch öffentlich-rechtliche oder private Entsorgungsträger. Ursache hierfür ist die Unwirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Separation. Fahrräder werden im Regelfall mit dem gemischten Metallschrott einer stofflichen Verwertung zugeführt. Erfolgt jedoch eine nach Stoffen getrennte Anlieferung z. B. von Aluminium-Teilen, werden diese durch die Entsorgungsträger separat gesammelt und einer stofflichen Verwertung zugeführt. Komplette Elektrofahrräder werden zum jetzigen Zeitpunkt, wie bereits erläutert, nur in wenigen Ausnahmefällen bei Entsorgungsträgern abgegeben. Defekte an E-Rädern treten hauptsächlich an Batterien und Elektromotoren auf. Diese werden in der Regel von Reparaturdienstleistern oder Fahrradhändlern demontiert und an die Hersteller geschickt, die diese ggf. austauschen oder auch reparieren. Eine Entsorgung defekter und irreparabler Komponenten erfolgt letztendlich über die Hersteller [Reparaturdienstleister 2015]. Auch für seltenerdhaltige Permanentmagnete, wie sie beispielsweise in Elektromotoren von E-Rädern Verwendung finden, befinden sich technische Verfahren zur Wiederverwendung und -verwertung derzeit in der Entwicklung [UBA 2014].

4.6.4 Zusammensetzung

Im Gegensatz zum klassischen Fahrrad ist ein Elektrorad zusätzlich mit einem Elektromotor, einer Batterie, einer Sensorik zur Ermittlung der Kurbelbewegung, einer entsprechenden Steuerungselektronik für den Motor sowie einem Display ausgestattet. Registriert der Sensor eine Pedalbewegung, schickt dieser ein Signal an den Controller. Der Controller steuert den Antrieb, und die Batterie liefert die erforderliche Energie, welche den Fahrer beim Treten unterstützt. Die einzelnen elektronischen Komponenten sind mit einem Kabelbaum verbunden [Greenfinder 2015d].

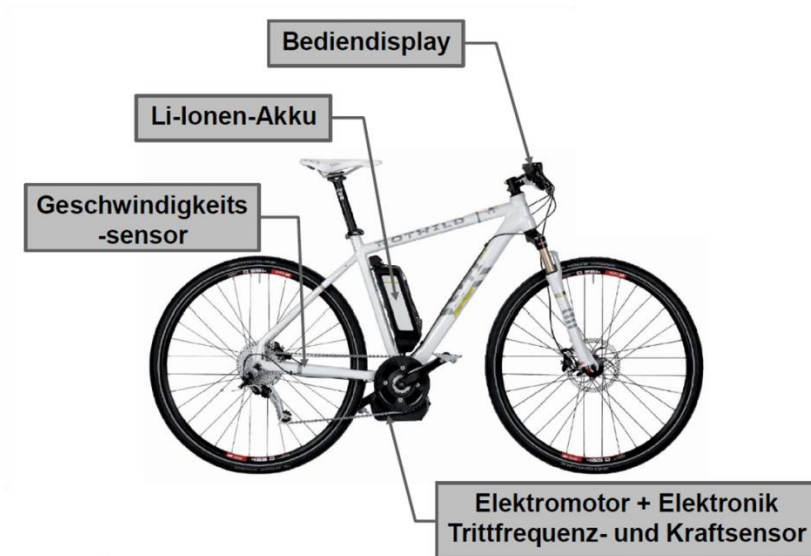


Abbildung 4-24: Komponenten eines Pedelecs bei Mittelmotorantrieb [Wrede 2011]

Diese zusätzlichen Komponenten haben einen erheblichen Einfluss auf das Fahrzeuggewicht. In Tabelle 4-13 wurden Informationen zu den Massen konventioneller Fahrräder und von E-Rädern vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 4-13: Gegenüberstellung der Massen konventioneller Fahrräder und E-Bikes nach [Bieberstein 2015, Greenfinder 2015a]

Kategorie	konventionelle Räder	E-Räder
leicht	10 kg (Rennrad)	< 22 kg
schwer	18 kg (Vollkomfortrad mit zusätzlicher Ausstattung)	> 26 kg
typisch	14 kg	22 - 26 kg, im Mittel 24 kg

Dabei bestehen die herkömmlichen Komponenten konventioneller Fahrräder und E-Räder nach [UBA 2014, FH Nordhausen et al. 2005] aus:

- ▶ Eisenstahl / Stahlblech
- ▶ Aluminium
- ▶ Kunststoff / Kautschuk / Gummimischung (Reifen)
- ▶ Kupfer (Dynamo, Kabelverbindungen)
- ▶ Carbonfasern (untergeordnete Bedeutung)
- ▶ Titan (in sehr geringen Mengen [IZT/ISI 2009])

Nach Verbandsangaben werden die Rahmen konventioneller Fahrräder als auch die der E-Bikes vorwiegend aus Aluminium hergestellt. Die in E-Rädern verwendeten Elektromotoren werden je nach Positionierung am Fahrrad zwischen Vorderrad- bzw. Hinterrad-Nabenmotoren oder Mittelmotoren unterschieden [Greenfinder 2015c] und wiegen zwischen 2,5 und 4,5 kg. Sie bestehen vorwiegend aus Kupfer und Stahl, enthalten aber auch Permanentmagnete, die Seltenerdelemente (SEM) wie beispielsweise Neodym (Nd) enthalten. Derzeit existieren in der Literatur nur wenige belastbare Angaben zur genauen Zusammensetzung von Elektromotoren von E-Rädern.

Neben Elektromotoren und Batterien kommen bei E-Rädern auch Bedienelemente und Sensoren (zur Messung von Geschwindigkeit, Trittfrequenz, Kraft) zum Einsatz [Wrede 2011], in denen kleine Leiterplatten und Magnete verbaut sind. Extrem rückläufig ist bei E-Rädern hingegen die Verwendung von Dynamos. Während bis zum Jahr 2013 die Ausstattung mit einer Lichtmaschine (Dynamo) Pflicht war, ist seit August 2013 gemäß § 67 (1) StVZO zum Betrieb des Scheinwerfers und der Schlussleuchte folgende Ausrüstung vorgeschrieben. Entweder:

- ▶ eine Lichtmaschine mit mindestens 3 W Nennleistung und 6 V Nennspannung oder
- ▶ eine Batterie mit einer Nennspannung von 6 V (Batteriedauerbeleuchtung) oder
- ▶ ein wieder aufladbarer Energiespeicher [ADFC 2016]

Dementsprechend müssen E-Räder nicht länger über einen Dynamo verfügen. Ihre Lichtanlage darf mit Strom aus der Antriebs-Batterie betrieben werden. Darüber hinaus ist beim Pedelec der Verzicht auf einen Dynamo technisch sinnvoll, da die Direktnutzung des Stroms aus der Batterie einen höheren Gesamtwirkungsgrad aufweist als dies bei der Verwendung eines Dynamos der Fall wäre [ADFC 2016]. Diese beschriebene Änderung der Beleuchtungsvorschriften für Fahrräder und die bestehenden technischen Vorteile führten letztendlich dazu, dass inzwischen nahezu alle E-Räder ohne Dynamo hergestellt werden.

Bei konventionellen Fahrrädern kommen jedoch weiterhin Dynamos zum Einsatz. Allerdings wurden hierbei in den letzten Jahren die klassischen Seitenläufer Dynamos zusehends durch Nabendynamos aus dem Markt verdrängt, die aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung und ihrer stark ansteigenden Verbreitung einen interessanten Stoffstrom darstellen. Nabendynamos fungieren – ähnlich wie die Lichtmaschine im Auto – als Energiequelle. Dabei rotieren Permanentmagnete, die im Gehäuse untergebracht sind, um die stationäre Wicklung aus Kupfer oder Aluminium. So wird ein Magnetfeld erzeugt, welches die mechanische Energie – die Tretkraft des Radfahrers – nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion – in elektrische Energie umwandelt [Aktiv Radfahren 2014]. Nabendynamos wiegen in der Regel zwischen 370 und 825 g. Einzelne Modelle, die über eine integrierte Trommelbremse verfügen, wiegen bis zu 1.350 g [Fahrradbeleuchtung-info 2016]. Die zuvor genannte Gesetzesänderung, die einen Betrieb der Fahrradbeleuchtung über eine Batterie zulässt, könnte perspektivisch auch einen Einfluss auf die Verwendung von Nabendynamos haben. Eine Prognose, ob und in welchem Umfang batteriebetriebene Systeme die derzeit dem Stand der Technik entsprechenden Nabendynamos ersetzen könnten, kann derzeit – auch von Händler- und Verbandsseite – nicht getroffen werden.

Gewicht und Zusammensetzung von Nabendynamos und elektrischen Antriebsmotoren

Da in frei verfügbaren Literaturquellen nur in sehr begrenztem Umfang Angaben zur stofflichen Zusammensetzung von Elektromotoren (E-Räder) und Nabendynamos (konventionelle Räder)

gemacht werden bzw. diese Daten oftmals der betrieblichen Geheimhaltung unterliegen, wurden für die Berechnung von Wertstoffpotenzialen die Ergebnisse der Demontageversuche von Nabendynamos und elektrischen Fahrantrieben (vgl. Kapitel 5) herangezogen. Als Datengrundlage für den Wertstoffgehalt von Nabendynamos dient die Auswertung der Zerlegeversuche von 13 Nabendynamos sechs unterschiedlicher Typen. Davon handelte es sich bei zwei Typen um weit verbreitete Massenmodelle, bei drei Typen um seltener vorkommende High-End-Geräte und bei einem Typ um ein Auslaufmodell, das seit längerem nicht mehr produziert wird. Das Durchschnittsgewicht der Dynamos betrug 743,87 g. Die werkstoffliche Zusammensetzung ist in Abbildung 4-25 dargestellt. Die größten Gewichtskomponenten sind demnach Eisen mit über 50 %, gefolgt von Aluminiumteilen mit knapp 30 % und dem Magnetmaterial mit ca. 10 %. Der Gehalt an Kupfer betrug rund 2 %.

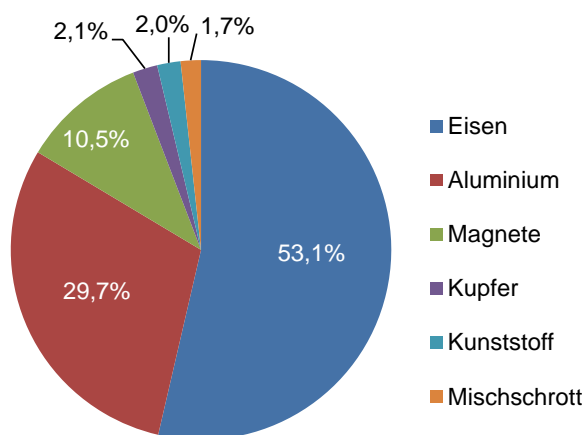


Abbildung 4-25: Durchschnittliche werkstoffliche Zusammensetzung von 13 Nabendynamos

Als Grundlage für die werkstoffliche Zusammensetzung der elektrischen Antriebe in E-Rädern wurden die Ergebnisse aus der Zerlegung von fünf Motoren jeweils unterschiedlicher Typen herangezogen. Davon handelte es sich bei zwei Modellen um Tretlagerantriebe und bei 3 Modellen um Nabenantriebe. Die beiden Tretlagerantriebe sind mit durchschnittlich 3.927 g etwas schwerer als die Nabenantriebe mit 2.355 g. Die fünf Antriebe hatten insgesamt ein Durchschnittsgewicht von 2.983 g. Die mittlere Zusammensetzung der Motoren umfasst ca. 34 % Eisen, 20 % entfallen auf Rotoren, die als Mischschrott anfallen, und knapp 18 % der Antriebe bestehen aus Bauteilen, die dem Elektroschrott zuzuordnen sind. Der Anteil an Aluminium beträgt im Mittel etwa 13 %, der Kupferanteil beträgt ca. 3 %. Zudem lässt sich das Elektroblech nach Zerlegung als Monofraktion erfassen, das einen Anteil am Gesamtgewicht der Antriebe von knapp 6 % aufweist. Magnete wurden mit einem Anteil von rund 2 % erfasst.

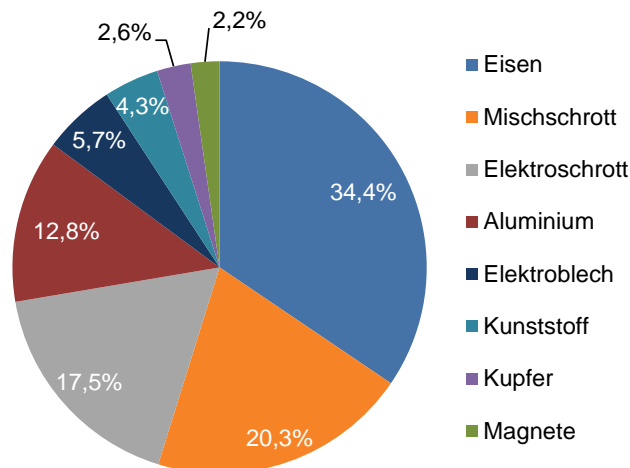


Abbildung 4-26: Durchschnittliche werkstoffliche Zusammensetzung von fünf Antriebsmotoren aus E-Rädern

4.6.5 Wertstoffpotenziale in Fahrrädern und E-Rädern

Für die Abschätzung jährlich insgesamt anfallender, ausgedienter Fahrräder konnten keine verlässlichen Daten erhoben werden. Näherungsweise Abschätzungen zukünftiger Abfallmengen sind jedoch bei E-Räder anhand der jährlichen Verkaufszahlen und der durchschnittlichen Lebensdauer des Rades denkbar. Allerdings kann keine verlässliche Aussage über aktuell anfallende EoL-E-Räder getroffen werden, da der Abfallstrom ausgedienter E-Räder derzeit noch nicht in nennenswertem Umfang in den Verwertungssystemen ankommt.

Der Verband des deutschen Zweiradhandels (ZIV) schätzt die durchschnittliche Nutzungsdauer eines konventionellen Fahrrades derzeit auf etwa acht bis zehn Jahre [Welt a. S. 2008]. Im Rahmen einer von [Lienhop et al. 2015] durchgeführten Studie rechnen die befragten Teilnehmer durchschnittlich mit einer Lebensdauer ihrer erworbenen E-Räder von 11 Jahren.

Vergleichbare Abschätzungen existieren für zukünftige Mengenpotenziale technologie-relevanter Rohstoffe aus den Antriebsmotoren von E-Rädern. Nach [UBA 2014] ist im Fall von Neodym aus Alt-Elektromotoren von E-Rädern im Jahr 2020 mit einem Potenzial von 5,6 Mg in Deutschland zu rechnen. Für Dysprosium werden Potenziale von 1,4 Mg ausgewiesen [Gößling-Reisemann et al. 2013]. Nach [Zepf 2015] liegen die theoretischen Potenziale von Neodym aus E-Bikes noch deutlich höher. Ausgehend von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von zehn Jahren wird hier das Potenzial auf 8 Mg Neodym (frühestens ab 2020), 13 Mg in 2021, 15,2 Mg in 2022 und 16,4 Mg Neodym im Jahr 2023 geschätzt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die für die Berechnungen herangezogenen Daten auf der Demontage und Analyse eines einzelnen Fahrrades und dessen Komponenten beruhen.

Schätzungen von [Luidold et al. 2013] gehen davon aus, dass das Recyclingpotenzial von Neodym aus Elektrofahrrädern in Österreich in den nächsten Jahren kontinuierlich und deutlich steigen wird. Während das Potenzial im Jahr 2011 noch bei 0,006 Mg lag, wird das Potenzial für das Jahr 2033 auf 6,76 Mg beziffert.

Im Fall von Dynamos haben sich, wie bereits beschrieben, Nabendynamos am Markt durchgesetzt und werden sowohl bei Fahrrädern niedriger Preissegmente als auch bei Rädern hoher Preiskategorien eingesetzt. Dabei ist nach Schätzungen des ZIV davon auszugehen, dass grundsätzlich etwa 70 % aller im Jahr 2015 verkauften Fahrräder (Citybikes, Trekkingräder, All-Terrain Bikes, Jugendräder usw.) mit einem Dynamo ausgestattet waren. Dabei lag der Anteil der verbauten Nabendynamos nach Einschätzungen des ZIV wiederum bei 70-80 %. Dies bedeutet, dass von 4,35 Millionen verkauften Fahrrädern im Jahr 2015 etwa 2,1 bis 2,4 Millionen Fahrräder mit einem Nabendynamo ausgestattet waren [ZIV 2016b]. Nach Herstellerangaben ist davon auszugehen, dass in 99 % der Anwendungsfälle die Nutzungsdauer des Nabendynamos der Lebensdauer des Fahrrads entspricht. Vorzeitige Defekte entstehen vorwiegend durch Korrosion oder mechanische Beschädigungen. Eine gezielte Demontage oder Rücknahme wird für Nabendynamos derzeit nicht praktiziert. Besteht an einem Nabendynamo selbst ein Defekt, wird in der Regel das komplette Rad ersetzt, da ein alleiniger Austausch des Nabendynamos aufgrund des damit verbundenen Aufwands für ein neuerliches Aufspeichen unwirtschaftlich ist. Die abmontierten Räder werden dann als Metallschrott entsorgt.

4.6.5.1 Recyclingpotenzial in Nabendynamos

In Abbildung 4-27 sind die Wertstoffpotenziale in Nabendynamos in den im Jahr 2015 in Baden-Württemberg, Deutschland und den Nachbarländern verkauften Fahrrädern ausgewiesen. Ausgehend von der werkstofflichen Zusammensetzung von Nabendynamos (vgl. Abbildung 4-25) sind in den Nabendynamos deutschlandweit verkaufter Fahrräder im Mittel ca. 500 Mg Aluminium, 900 Mg Eisen, 35 Mg Kupfer sowie 178 Mg Magnetmaterial enthalten. In Baden-Württemberg findet sich näherungsweise 15 % des deutschen Fahrradbestands (vgl. Kapitel 4.6.1.1). Unter der Annahme, dass der Anteil der in Baden-Württemberg verkauften Fahrräder am bundesweiten Absatzmarkt ähnlich ist, werden in Baden-Württemberg pro Jahr ca. 640.000 Fahrräder verkauft (Bezugsjahr 2015). Von diesen sind rund 338.000 Stück mit Nabendynamos ausgestattet. In den Nabendynamos der pro Jahr in Baden-Württemberg verkauften Fahrräder befinden gemäß Abbildung 4-27 durchschnittlich unter anderem etwa 75 Mg Aluminium, 133 Mg Eisen, 5 Mg Kupfer und 26 Mg Magnete.

Das aktuellste Bezugsjahr mit verfügbaren Statistiken in Bezug auf die Nachbarländer ist das Jahr 2014, in dem in Polen, Tschechien, Österreich, der Schweiz, Frankreich, Belgien und Dänemark insgesamt 7,3 Millionen Fahrräder verkauft wurden. Legt man den aus Deutschland bekannten Ausstattungsgrad mit Nabendynamos zugrunde, verfügten von diesen Fahrrädern rund 3,9 Millionen Stück über einen Nabendynamo. Diese Nabendynamos enthalten ein Wertstoffpotenzial von durchschnittlich 850 Mg Aluminium, 1.500 Mg Eisen, 60 Mg Kupfer sowie 300 Mg Magnete.

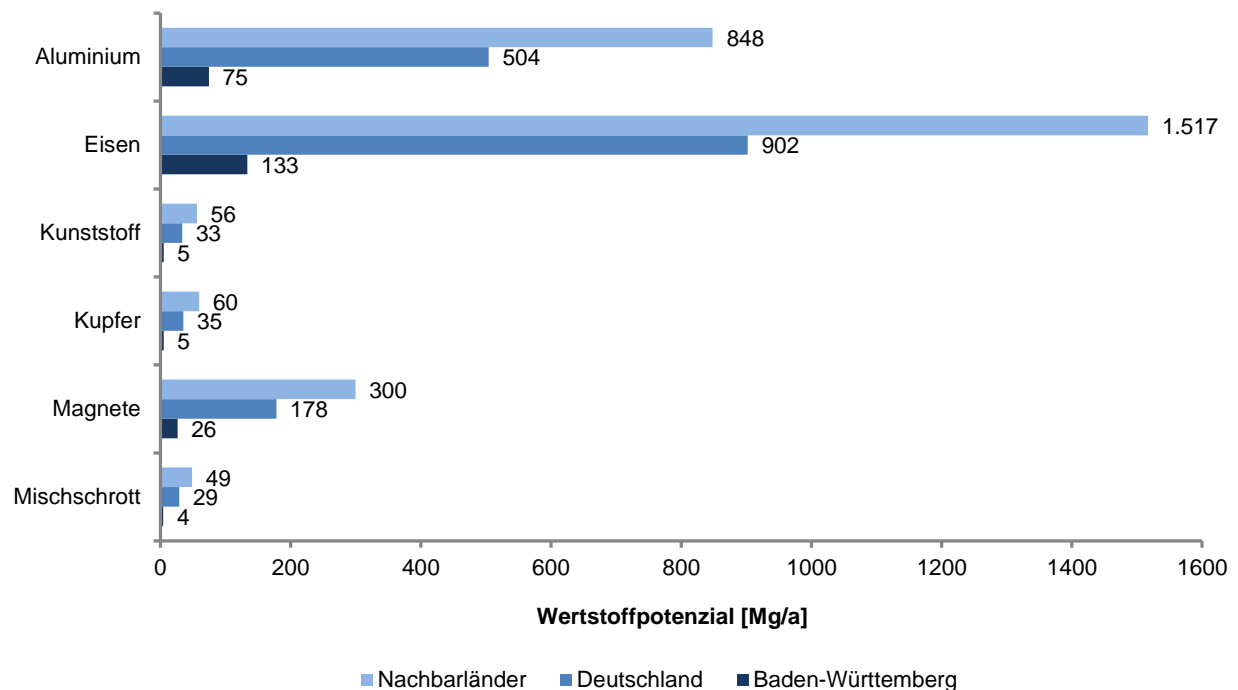


Abbildung 4-27: Wertstoffpotenzial in Nabendynamos in den in Baden-Württemberg, Deutschland und den Nachbarländern verkauften Fahrrädern aus dem Jahr 2015

4.6.5.2 Recyclingpotenzial in elektrischen Fahrradantrieben

Im Fall der Antriebe von E-Rädern konnten auf Grundlage der verfügbaren Daten Wertstoffpotenziale in den zukünftig anfallenden, ausgedienten E-Rädern ermittelt werden. Da sich der europäische Absatzmarkt in den letzten Jahren hauptsächlich auf wenige Länder beschränkte, wurde das Wertstoffpotenzial auf gesamteuropäischer Ebene (inklusive der Schweiz) betrachtet. Legt man die werkstoffliche Zusammensetzung (vgl. Abbildung 4-26) auf die im Jahr 2017 potenziell anfallenden Alt-Räder (in Deutschland und Europa insgesamt fast 179.000 Stück) um, entspricht das einem Wertstoffgehalt in den Antrieben dieser Räder von insgesamt rund 68 Mg Aluminium, 183 Mg Eisen, 30 Mg Elektroblech, 14 Mg Kupfer und knapp 12 Mg Magnetmaterial. Nach Zerlegung würden zusätzlich ca. 93 Mg Elektroschrott und 108 Mg Mischschrott verbleiben. Abbildung 4-28 zeigt die Hochrechnungen für das Jahr 2017.

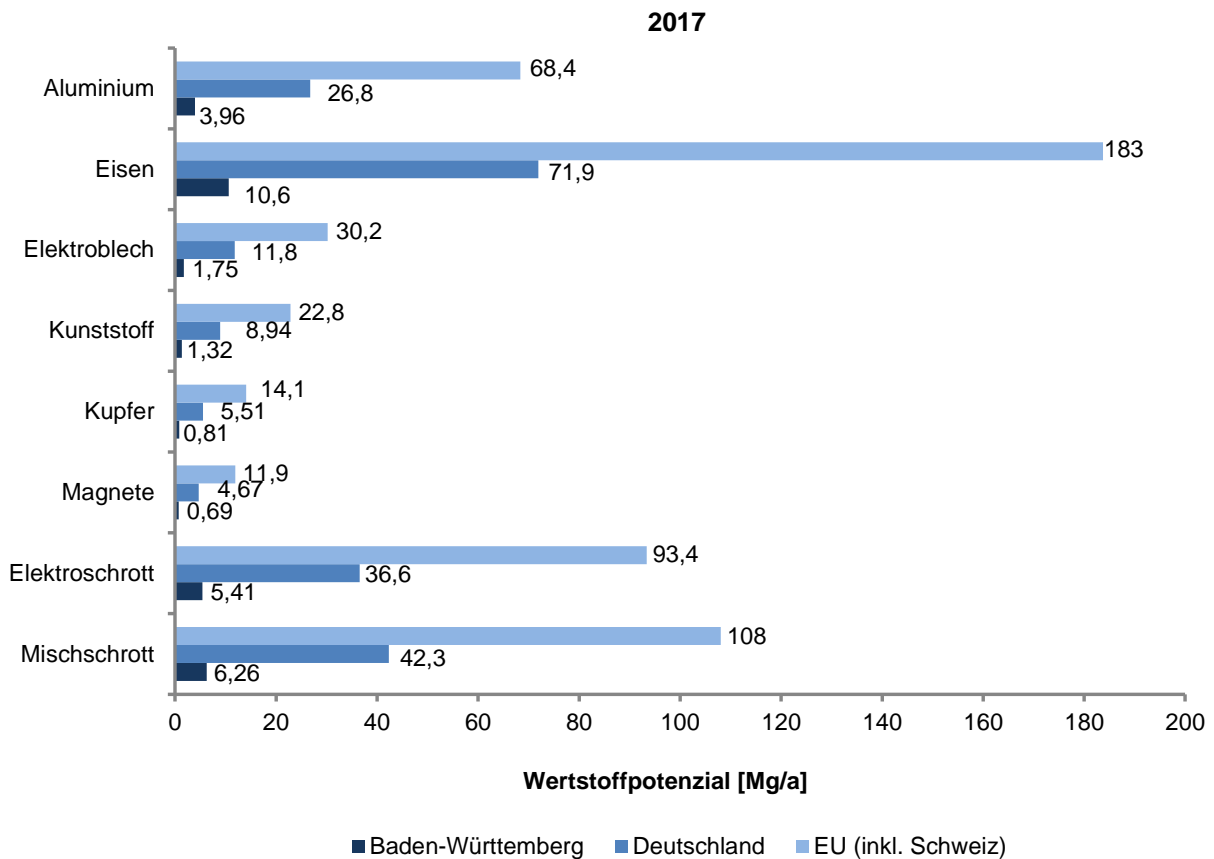


Abbildung 4-28: Wertstoffpotenzial in den Antrieben der im Jahr 2017 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder

Im Folgenden sind zur Verdeutlichung der zukünftigen Entwicklung der verfügbaren Wertstoffe aus E-Rad-Antrieben die Hochrechnungen exemplarisch für das Jahr 2020 und das Jahr 2024 abgebildet. Die potenzielle Menge an Antrieben aus ausgedienten E-Rädern entspricht dabei dem Absatz in Baden-Württemberg, Deutschland und Europa aus den Jahren 2010 und 2014. Aufgrund der steigenden Absatzzahlen von E-Rädern der letzten Jahre wird das in den Antrieben enthaltene jährliche Wertstoffpotenzial bis 2020 im Vergleich zu 2017 ca. um das 3,5-fache steigen. Bezogen auf den europäischen Raum entspricht das einem Potenzial von ca. 240 Mg Aluminium, 645 Mg Eisen, 106 Mg Elektroblech, 49 Mg Kupfer und knapp 42 Mg Magnete. Mit Blick auf das Jahr 2024 ist auf Grundlage der zuletzt verfügbaren statistischen Angaben über den Absatz von E-Rädern im Jahr 2014 mit einer weiteren Steigerung des Recyclingpotenzials um das 1,9-fache im Vergleich zu 2020 zu rechnen. Das entspricht einem Wertstoffpotenzial von 458 Mg Aluminium, 1.229 Mg Eisen, 202 Mg Elektroblech, 94 Mg Kupfer und knapp 80 Mg Magnetmaterial.

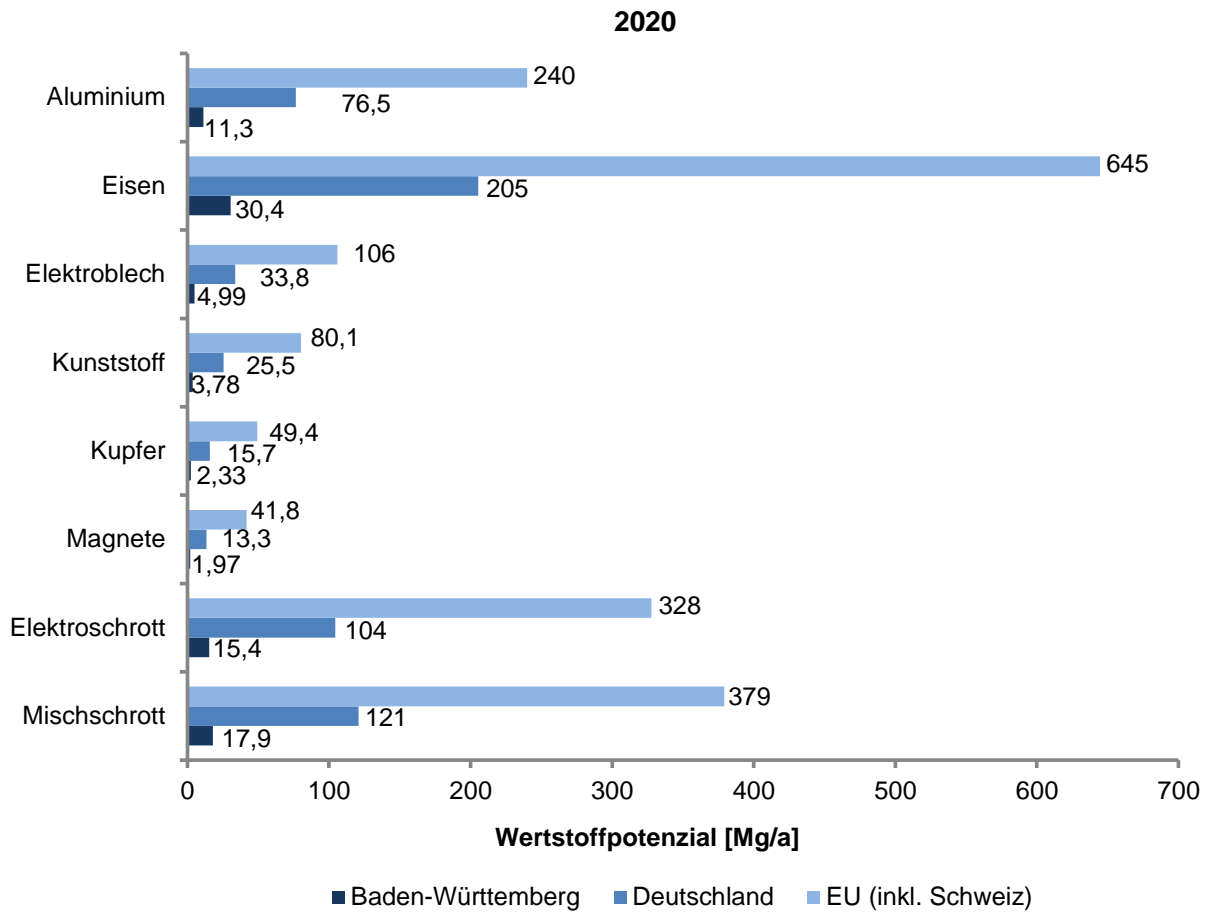


Abbildung 4-29: Wertstoffpotenzial in den Antrieben der im Jahr 2020 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder

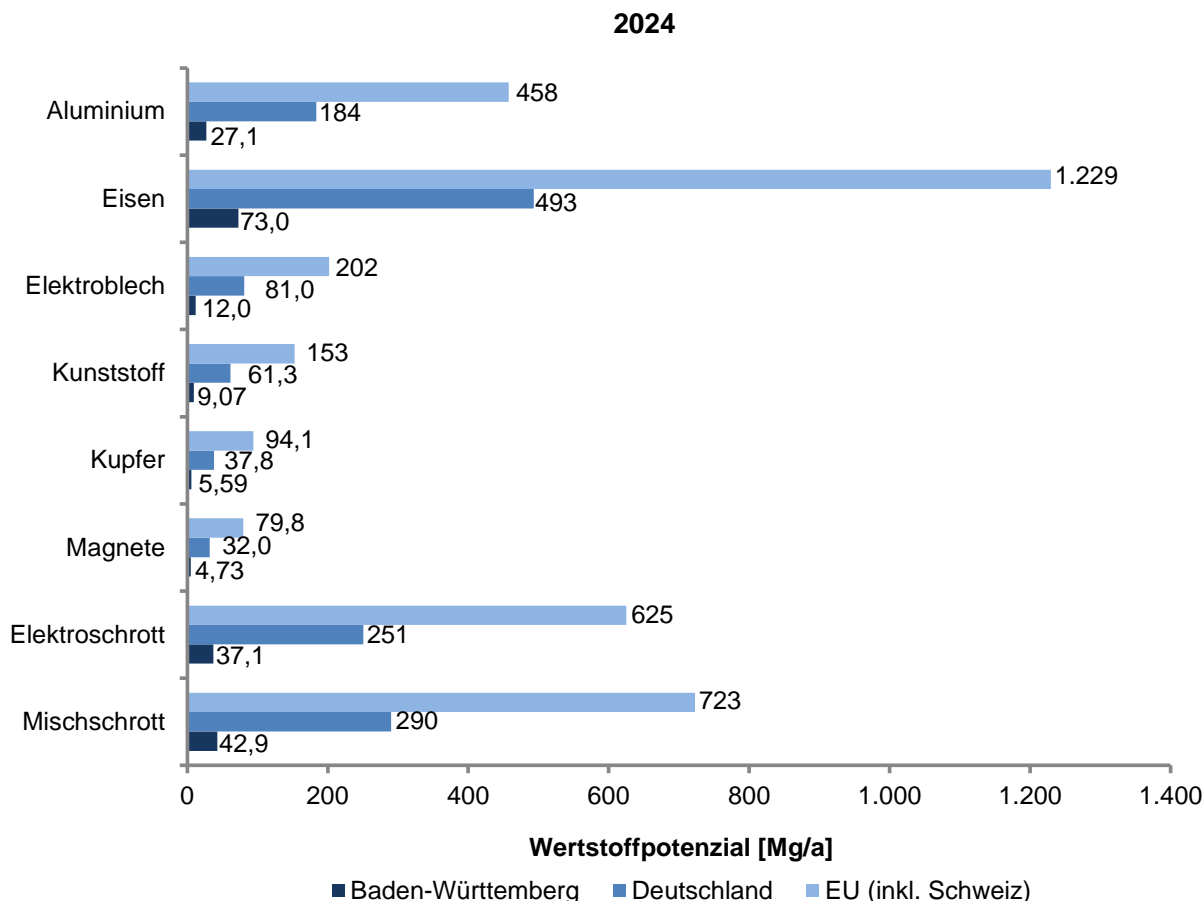


Abbildung 4-30: Wertstoffpotenzial in den Antrieben der im Jahr 2024 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder

In Abbildung 4-31 wird die zukünftige Entwicklung des aggregierten Wertstoffpotenzials in den Antrieben der voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder in Baden-Württemberg, Deutschland und Europa ausgewiesen. Die aggregierten Werte stellen dabei jeweils die Summe der oben ausgewiesenen Wertstofffraktionen (Aluminium, Eisen, Elektroblech, Kunststoff, Kupfer, Magnete, Elektro- und Mischschrott) dar. Demnach steigt der potenzielle Wertstoffgehalt in den Antrieben in Deutschland von knapp 210 Mg im Jahr 2017 auf über 1.400 Mg im Jahr 2024. In den europäischen Ländern sind in den Antrieben der EoL E-Räder von 2017 insgesamt rund 530 Mg Wertstoffe enthalten. Dieser Wertstoffgehalt könnte sich bis 2024 auf über 3.500 Mg erhöhen.

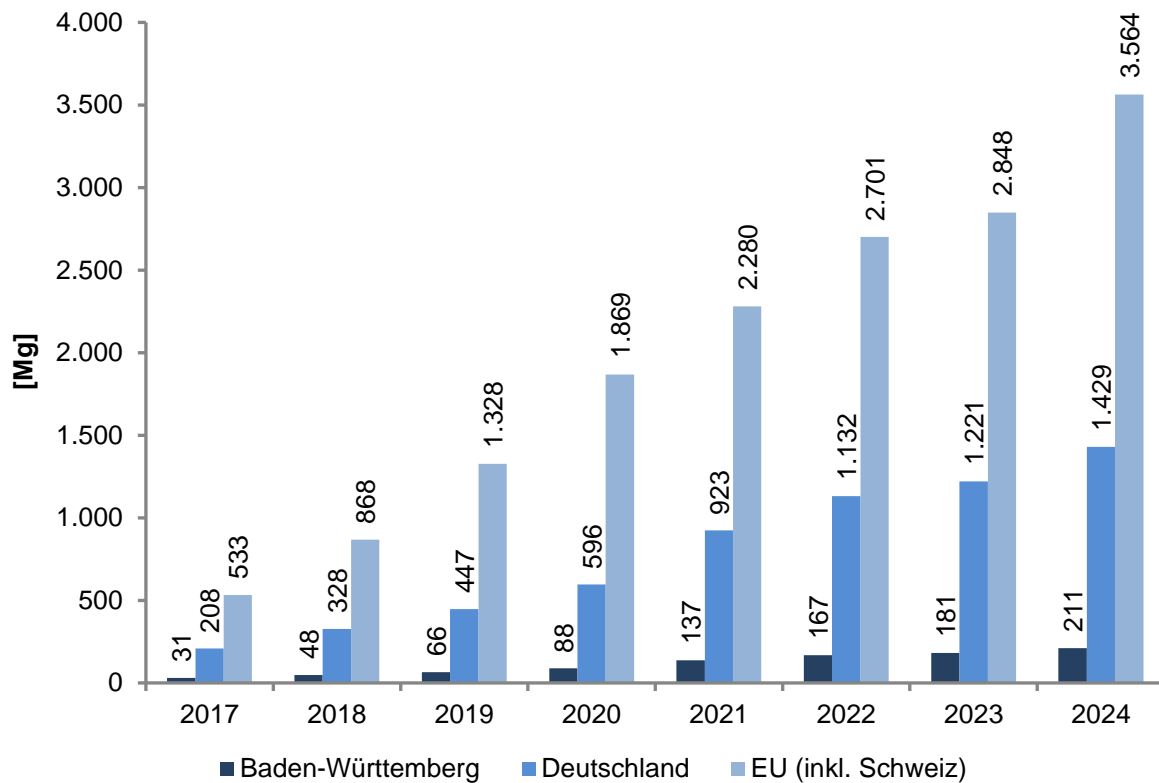


Abbildung 4-31: Entwicklung des aggregierten Wertstoffpotenzials in den Antrieben der bis 2024 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder

4.7 Weitere potenzielle Stoffströme

4.7.1 Transportanwendungen

4.7.1.1 Hybrid- und Elektrofahrzeugantriebe

Nach Angaben des Kraftfahrtbundesamtes [KBA 2016] lag der Bestand an Hybridfahrzeugen zu Beginn des Jahres 2016 deutschlandweit bei 130.365 Einheiten (BW: 17.868), während für Elektroautos in Deutschland ein Bestand von 25.502 Stück (BW: 4.769) zu verzeichnen war. Die Magnetgewichte in den Antriebssträngen von Hybrid-, Plug-in-Hybrid und vollelektrischen PKW liegen heute in Abhängigkeit der Motorengröße zwischen rund 1 kg und 2,4 kg [Buchert et al. 2011]. Der Gewichtsanteil Seltener Erden in den Magnetlegierungen liegt bei etwa 30 %, wobei der Dysprosiumgehalt aufgrund erhöhter Temperaturanforderungen mit rund 9 % hier vergleichsweise hoch ist. Somit lägen die Magnetgewichte der zu Beginn des Jahres 2016 im deutschen Bestand befindlichen Hybrid- und Elektrofahrzeuge zwischen ca. 156 und 374 Mg (BW: 23–54 Mg) und der Gehalt Seltener Erden zwischen 47 und 112 Mg (BW: 7–16 Mg). Allerdings ist fraglich ob diese Fahrzeuge und damit auch die in den Antrieben enthaltenen Magnetmaterialien nach der Nutzungsphase, die nach [UBA 2015] auf 14 bis 15 Jahre geschätzt werden kann, auch tatsächlich in Deutschland einer ordnungsgemäßen Verwertung zugeführt werden (vgl. Kapitel 4.4.1.1). Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Permanentmagnete aus der Antriebstechnik von Fahrzeugen aufgrund der vergleichsweise neuen Technologie und der o.g. Nutzungsdauer derzeit nur in sehr geringem Umfang in die

Verwertungswege gelangen, zukünftig aber an Bedeutung gewinnen werden [Binnemans et al. 2013]. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund steigender Verkaufszahlen im Bereich dieser Fahrzeugtypen. So erhöhte sich der Bestand von Hybridfahrzeugen im Jahr 2016 im Vergleich zum gleichen Zeitraum des Vorjahres um 21 %, bei den Elektrofahrzeugen waren Bestandssteigerungen von 34,6 % zu verzeichnen [KBA 2016]. Zu einer ähnlichen Einschätzung kommen [Luidold et al. 2013], die das derzeitige Neodym-Lager in verschiedenen Hybrid- und Elektrofahrzeugen mit einem Wert von < 10 Mg für Österreich als sehr gering einschätzen, aber aufgrund einer verstärkten Nutzung dieser Fahrzeugtypen von raschen Lagerzuwächsen ausgehen.

4.7.1.2 Antriebsmotoren von Elektrolokomotiven und Hochgeschwindigkeitszügen

Im Jahr 2010 lag der Bestand an Schienenfahrzeugen bei knapp 150 000 Einheiten, wobei es sich bei 21 608 Stück um Triebfahrzeuge (Lokomotiven und Triebwagen) handelte [Destatis 2016]. Nach Angaben der Deutschen Bahn verfügte der Konzern im Jahr 2014 in den Bereichen Fernverkehr und DB Regio über 253 ICE Züge unterschiedlicher Generationen (253 Lokomotiven, 1.746 Reisezugwagen), 988 Lokomotiven (836 elektrische und 152 Dieselvarianten), 4.023 Triebzüge (1.590 S-Bahnen, 1.530 Dieseltriebzüge und 897 Elektrotriebzüge) sowie 11.308 Triebwagen [DB 2014]. Die DB Schenker Rail hatte zum gleichen Zeitpunkt 2.878 Lokomotiven im Betrieb, wobei 1.250 elektrische Lokomotiven und 1.628 Diesellokomotiven waren [DB 2014]. Nach Konzernangaben wird durch eine kontinuierliche Instandhaltung und Modernisierung die Lebensdauer der Fahrzeugflotte verlängert. Im Falle einer Außerbetriebsetzung eines Fahrzeuges wird dieses entweder verkauft oder es werden noch verwertbare Komponenten ausgebaut und der Rest des Fahrzeugs dem Recycling zugeführt [DB 2016].

4.7.2 Gebäudetechnik

4.7.2.1 Heizungspumpen

Schätzungen zufolge werden in Deutschland jährlich rund 2 Millionen Kleinumwälzpumpen in Ein- und Zweifamilienhäusern erneuert oder ersetzt. Hinzu kommt der Markt für Pumpen mittlerer und hoher Förderleistung. In den EU-27 Staaten sind über 100 Millionen Umwälzpumpen im Einsatz [Wuppertal Institut 2010]. Nach Herstellerangaben liegt die durchschnittliche Lebensdauer von Hocheffizienz-Heizungspumpen bei 10 bis 15 Jahren. Defekte und ausgediente Pumpen werden in der Regel einem Materialrecycling zugeführt. Der Installateur sammelt einen Großteil der Altpumpen zusammen mit anderen Altmetallen in einem Container und gibt sie als Mischfraktion an einen Recyclingbetrieb weiter. Eine kleinere Menge von Pumpen, die der Installateur aufgrund des Pumpenalters bzw. zustandes als potenzielle Gewährleistungsfälle einstuft, schickt er an den Hersteller zurück. Dort werden die Pumpen zerlegt und überprüft. Danach werden die Bauteile in unterschiedliche Fraktionen größtenteils sortenrein an Recyclingunternehmen abgegeben [IAT 2004].

4.7.3 Medizintechnik

4.7.3.1 Medizinische Ausrüstung

In einigen Bereichen der Medizin wie beispielsweise der Augenheilkunde oder Dermatologie kommen Neodym dotierte Yttrium-Aluminium-Granat-Laser zum Einsatz (Nd:YAG Laser). [Luidold et al. 2013] bewerten den Neodym Gehalt in diesem Anwendungsgebiet jedoch als vernachlässigbar.

4.7.3.2 Magnetresonanz-Tomographen (MRT)

Nach [Schwartz 2011] kann für das Jahr 2009 in Deutschland von einem Gerätebestand von etwa 1.850 MRT ausgegangen werden. Nach [Zepf 2015] ist hierbei jedoch fraglich wie hoch daran der Anteil an so genannten Low Field Systemen ist (MRT in niederen Leistungsbereich von $<0,5$ Tesla), die tatsächlich seltenerdhaltige Permanentmagnete nutzen. Fachberichte und Produktangaben von weltweit führenden Produzenten lassen demnach vermuten, dass High und Very High Field Systeme (1,5 Tesla bzw. ≥ 7 Tesla), die supraleitende Materialien verwenden, den Markt dominieren und Permanentmagnet basierte Systeme nur noch eine untergeordnete Rolle spielen [Zepf 2015]. Auch [Luidold et al. 2013] bewerten Permanentmagnet-basierte Systeme bei MRT als nicht mehr dem Stand der Technik entsprechend und beurteilen das darin enthaltene Nd Potenzial als sehr gering.

4.7.4 Spezialanwendungen

4.7.4.1 Magnetische Bremsen und Kupplungen

Elektromagnetische Bremsen und Kupplungen werden in aller Regel für das Starten, Stoppen, Positionieren und das sichere Halten bewegter Massen genutzt und werden in zahlreichen Anwendungsgebieten unterschiedlichster Branchen verwendet. Magnetische Bremsen werden beispielsweise in der Medizintechnik, bei Verpackungsmaschinen, bei Schienenfahrzeugen, Fitnessgeräten, Fahrgeschäften, aber auch als Gurtabwickler oder Zugregelung bei Faden-, Draht-, Kabel-, Seil-, Papier-, Film-, und Bandzügen verwendet. Magnetische Kupplungen kommen in der Lebensmittel- und chemischen Industrie sowie im Bereich der Pharmazie als in Aufschraub- und Etikettiermaschinen sowie zur Wickelspannungs- und Drehzahlregelung zum Einsatz. Wie magnetische Bremsen werden auch magnetische Kupplungen in Schienenfahrzeugen, Fitnessgeräten, Fahrgeschäften eingesetzt [Tridelta 2016].

Hinsichtlich der Zusammensetzung der in den Bremsen und Kupplungen verwendeten Materialien und Werkstoffe werden von Herstellerseite teilweise detaillierte Angaben gemacht. So werden beispielsweise für den Werkstoff Secolit®, je nach Qualitätsklasse, Seltenerdgehalte zwischen 24 und 36 M.-% und Kobaltgehalte von 48 bis 65 M.-% angegeben [Secolit® 2016]. Aufgrund des breiten Anwendungsspektrums der Produkte und der ebenfalls stark variierenden Zusammensetzung des verwendeten Magnetmaterials ist eine Potenzialabschätzung jedoch kaum möglich.

4.7.4.2 Hebemagnete ohne Strombedarf

Nach Herstellerangaben werden in Deutschland jährlich ca. 10.000 Hebemagnete mit einem mittleren Working Load Limit (WLL = Belastungsgrenze) von 500 kg hergestellt. Weltweit werden die Produktionszahlen von Herstellerseite auf jährlich 60.000 – 80.000 Einheiten geschätzt. Dabei kommen ausschließlich Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) Legierungen zum Einsatz. Hebemagnete der o.g. Kategorie enthalten dabei ca. 2 kg NdFeB Legierung der Güteklassen N35-N42. Für Hebemagnete kann eine durchschnittliche Lebensdauer von etwa 10 Jahren angenommen werden, wobei defekte und ausgediente Magnete in der Regel über die Schrottfraction entsorgt werden. Eine gezielte Rücknahme durch die Hersteller erfolgt derzeit nicht.

4.7.4.3 Separatoren

Nach Herstellerangaben werden in Deutschland im Bereich der Separation einige 1000 Einheiten pro Jahr verkauft (grobe Schätzung). Hierzu zählen beispielsweise auch Kaskadenmagnete, Magnetgitter, -filter oder -stäbe, aber auch Überbandmagnete oder Trommelmagnete. Eingesetzt werden diese Systeme im Bereich der Abfall- und Recyclingtechnik aber auch bei der gezielten Aussortierung eisenhaltiger Bestandteile aus diversen Schüttgütern oder auch der Filtration von Lebensmitteln. Dabei kommen jedoch nicht zwangsläufig auch bei allen der genannten Anwendungsbereiche seltenerdhaltige Magnetlegierungen zum Einsatz. So können Überbandmagnete entweder mit Permanentmagneten oder auch mit Elektromagneten ausgestattet sein [Buchert et al. 2013]. Herstellerangaben zu Folge sinkt aus Gründen der Wirtschaftlichkeit mit zunehmender Größe des Systems die Wahrscheinlichkeit des Einsatzes neodymhaltiger Permanentmagnete, während in eher kleineren Systemen wie Gittern, Filtern oder Stäben vorwiegend neodymhaltige Legierungen zum Einsatz kommen. So werden gemäß Schätzungen der Hersteller insbesondere im Lebensmittelbereich bei etwa 75 % aller Anwendungsfälle neodymhaltige Permanentmagnete verwendet. Die Lebensdauer von Magneten im Lebensmittelbereich kann entsprechend der Angabe von Herstellern prinzipiell als unendlich, mindestens jedoch mit 30 Jahren beziffert werden, sofern es im Anwendungsfall nicht zu einer thermischen Überbelastung bzw. mechanischen Beschädigung kommt. Rücknahmesysteme existieren herstellerseitig nicht, es ist davon auszugehen, dass defekte und ausgediente Systeme über den Stahlschrott entsorgt oder an Schrotthändler abgegeben werden.

4.7.5 Schlussfolgerungen zu weiteren potenziellen Stoffströmen

Die zuvor beschriebenen Anwendungsgebiete von seltenerdhaltigen Magnetmaterialien verdeutlichen das breite Anwendungsspektrum und die damit verbundene Verteilung dieser relevanten Stoffströme in den unterschiedlichsten Branchen. Ein großer Teil der aufgeführten Produkte sind für das vorliegende Konzept der Demontagefabrik aufgrund zu geringer Mengenpotenziale oder bereits bestehender und etablierter Verwertungs- und Recyclingkonzepte von eher untergeordneter Bedeutung. Einige Stoffströme, für die bisher noch keine optimalen Erfassungs- und Verwertungssysteme bestehen, bergen jedoch ein nennenswertes Wertstoffpotenzial, das bei einer gezielten Zuführung der Produktströme in die Demontagefabrik ausgeschöpft werden könnte.

Hierzu zählen in erster Linie

- ▶ Antriebe aus Hybrid- und Elektrofahrzeugen
- ▶ Hebemagnete sowie
- ▶ Magnetische Bremsen und Kupplungen

Darüber hinaus könnte das Recycling relevanter Rohstoffe aus Produkten, die bisher als Magnetfraktion an Schrotthändler gehen, durch eine gezielte Lenkung in die Demontagefabrik weiter optimiert werden.

5 Demontage von Elektromotoren, Nabendynamos und elektrischen Fahrtrieben

5.1 Demontageversuche

Die folgend dargestellten Demontageversuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, eine gesicherte Datengrundlage für die im Projekt konzipierte Planungssoftware zu erhalten. Es sollte zunächst festgestellt werden, ob Magnetwerkstoffe aus EoL-Elektromotoren, Nabendynamos und elektrischen Nabenantrieben durch eine gezielte Demontage separiert und einer Wiederverwertung zugeführt werden können. Dabei sind die notwendige Zeit und zusätzliche Separation weiterer enthaltener Wertstoffe (Kupfer, Aluminium, Stahl etc.) zu berücksichtigen. Massen- und Zeitbilanzen wurden als Basis für zukünftige ökonomische und ökologische Bewertungen aufgestellt.

Aufgrund des technisch vergleichbaren Aufbaus von Elektromotoren, Nabendynamos und elektrischen Nabenantrieben sind die erzielten Erkenntnisse mit Einschränkungen auf die jeweils anderen Produktgruppen übertragbar.

5.1.1 Versuchsbeschreibungen

5.1.1.1 Demontage von Industrie-Elektromotoren

In einer ersten Versuchsreihe wurden Industrie-Elektromotoren in ihre größeren Komponenten demontiert. Anschließend wurden Versuche zur Demontage der enthaltenen Statoren durchgeführt. Eine sorgfältige Trennung der in den Statoren verbauten Materialien ist aus zwei Gründen vorteilhaft. Einerseits sind die verbauten Kupferdrähte für eine Maximierung der Wertschöpfung sortenrein zu gewinnen, andererseits können die Blechpakete bei unbeschädigter Bergung direkt wiederverwendet werden. Aus diesen Gründen wurde die Zerlegung der Statoren tiefergehend untersucht.

Zerlegung auf Komponentenebene

Für eine repräsentative Analyse von Industrie-Elektromotoren wurden stichprobenartig mehrere Altgeräte im Leistungsbereich bis 1,5 kW untersucht, die einer real vorliegenden Schrottfraktion bei einem Entsorgungsfachunternehmen entnommen wurden. Um eine nachvollziehbare und sowohl im Projekt als auch zukünftig wiederholbare Vorgehensweise zu verwenden, ist in einem ersten Schritt eine Demontageanleitung erstellt worden. Die Demontageanleitung wurde flexibel gestaltet, um unterschiedliche Konstruktionsweisen zu berücksichtigen. Abbildung 5-1 zeigt modellhaft die schrittweise Demontage eines Industrie-Elektromotors mit den einzelnen Arbeitsschritten. Die in der Demontageanleitung beschriebenen Arbeitsschritte wurden bei allen Industrie-Elektromotoren angewendet.

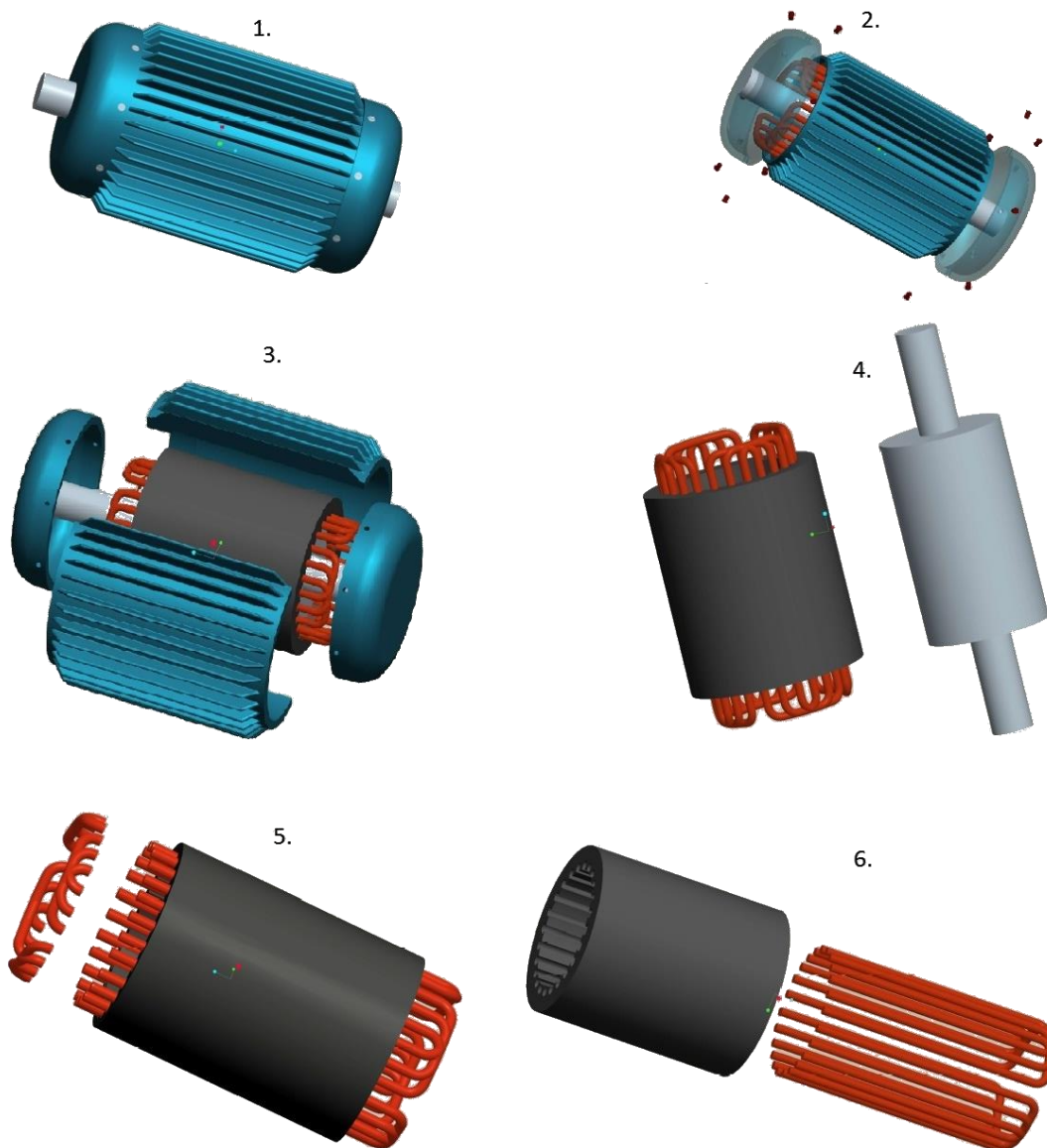


Abbildung 5-1: Graphische Darstellung der Arbeitsschritte zur Demontage eines Industrie-Elektromotors. [Eigene Darstellung]

Die Demontage beginnt mit der Entfernung sämtlicher von außen zugänglicher Schraubverbindungen (1 → 2). Dies betrifft meistens die Seitenklappen, den Klemmkasten (ehemaliger Anschluss an die Stromversorgung) sowie in einigen Fällen einen Kondensator. Von außen am Gehäuse angebrachte Bauteile können nun entfernt werden. Die Kondensatoren müssen aufgrund des bestehenden Verdachtes auf PCB (Polychlorierte Biphenyle) separat entsorgt werden. Anschließend ist das Gehäuse vom Motorblock zu trennen (2 → 3). Ist das Gehäuse entfernt, liegen Rotor und Stator lose vor und können getrennt werden (3 → 4). Im Falle eines permanenterregten Elektromotors würden sich die Seltenerdmetall-Magnete auf dem Rotor befinden und könnten an dieser Stelle demontiert werden. Bei anderen Motorentypen (beispielsweise Käfigläufer) wird der Rotor direkt der Mischschrottfraktion zugeführt. Bei den Nabendynamos und den elektrischen Nabenantrieben befindet sich der Rotor mit den Permanentmagneten meist entsprechend außen, während die

Wicklungen im zentralen Teil verbaut sind.

Im Sinne einer möglichst weitgehenden Sortierung der Werkstoffe soll in den weiterführenden Schritten das Kupfer aus dem Stator gewonnen werden. Hierfür wird eine Seite der Kupferstränge entlang der Kante des Eisenkerns abgetrennt (5). Dabei sollte auf die Verwendung eines Winkelschleifers (Scheibenschneidergerät) unbedingt verzichtet werden. Durch diese Trennmethode werden in hohem Maße feine Kupferstäube emittiert, was bei Inhalieren zu erkältungsähnlichen Symptomen führen kann, dem sogenannten „Metallfieber“. Eine öl- oder wassergekühlte Metallbandsäge ist daher für diesen Zweck zu empfehlen. Nach Aussage eines Aufbereitungsbetriebes für Elektromotoren werden die Wicklungsschlaufen in der Praxis auch mit Hilfe eines Stechbeitels und eines Hammers entfernt.

Das restliche Kupfer kann nach einer Vorbehandlung (thermisch beziehungsweise chemisch) aus dem Blechpaket gezogen werden (6). Da es sich bei sämtlichen untersuchten Geräten um Asynchronmotoren (Käfigläufer) handelte, waren die Rotoren durch Schrumpfverfahren auf der Welle angebrachte, metallvergossene Blechpakete. Eine weitere Demontage war daher nicht möglich.

Während der gesamten Demontage können die schrittweise entfernten Bauteile spezifischen Werkstofffraktionen zugeführt werden. Dadurch wird bereits frühzeitig eine hochwertige Sortierung erreicht.

Für die Demontage wichtige Werkzeuge sind: Schraubendreher (Kreuz, Schlitz, Torx und Inbus), Maulschlüssel, Rohrzange, Seitenschneider, Hammer und Meißel, Brecheisen, Winkelschleifer und ein Abzieher.

Der Winkelschleifer wurde zum Auftrennen der Gehäuseschale verwendet. Das Gehäuse besteht häufig aus Aluminium oder aus Grauguss und ist durch eine Presspassung mit dem Stator verbunden. Ein Winkelschleifer ist wegen seiner guten Handhabbarkeit für die Laborversuche geeignet, jedoch aufgrund von hohem Verschleiß und Staubemission nicht für eine häufige, wiederholte Anwendung dieses Arbeitsschrittes in einer Demontagefabrik zweckmäßig. Daher werden hierfür andere Mittel empfohlen. Eine Möglichkeit stellt eine Metallbandsäge dar. Als zweite Variante ist ein schneller Stoß mit einem großen Meißel auf die Längsseite des Gehäuses denkbar, der zum Aufbrechen des Gehäuses führen kann. Hierzu wurden mehrere Versuche durchgeführt, um zu simulieren, wie sich das Gehäuse bei Schlageinwirkung verhält. Ein großer Hammer mit einer Masse von fünf Kilogramm wurde aus verschiedenen Höhen auf das Gehäuse fallen gelassen. Bei etwa einem Meter Fallhöhe konnten sowohl Grauguss- als auch Aluminiumgehäuse mit dieser Methode geöffnet werden. Es ist demnach nur eine relativ geringe Krafteinwirkung nötig. Abbildung 5-2 zeigt die Bruchkanten der Gehäuse aus den Schlagversuchen.



Abbildung 5-2: *Bruchkanten eines Aluminium- und eines Graugussgehäuses nach Öffnung durch Hammerschlag*

Diese Option bietet gegenüber der Bandsäge einerseits einen deutlichen Zeitvorteil, andererseits kommt es nur zu einem geringen Verschleiß des Werkzeugs im Vergleich zur Verwendung einer Bandsäge oder eines anderen schneidenden Verfahrens. Besondere Vorsicht ist bei dem Öffnen des Gehäuses geboten, falls eine Weiterverwendung des Stators vorgesehen ist, da es bei übermäßiger Krafteinwirkung leicht zu einer Beschädigung des Eisenkerns kommen kann.

Demontage von Statorn aus Industrie-Elektromotoren

Aufgrund der Konstruktion der Statorn konnten diese mit herkömmlichen Werkzeugen nicht tiefergehend demontiert werden. Die Separation des im Stator verbauten Kupfers und des Eisenblechs wurde daher im Projektverlauf mittels verschiedener Verfahren getestet. Das primäre Ziel war dabei der Erhalt einer reinen Kupferfraktion durch Demontage der Kupferstränge aus dem Blechpaket. Bei größeren Motoren können die Methoden der beschädigungsfreien Gewinnung von Blechpaketen im Zuge des Refurbishments dienen.

Ein Stator ist typischerweise ein gepresstes Elektrolechpaket mit Nuten. In diesen Nuten sind die Kupferwicklungen verlegt. Die Kupferwicklungen werden bei der Produktion mit Kunststoff- und Papierstreifen, Nutenhölzern sowie Bändern fixiert. Der gewickelte Stator wird anschließend in einen Tränklack getaucht, der mit Hilfe der Einwirkung von Wärme oder UV-Strahlung aushärtet. Der ausgehärtete Tränklack dient der mechanischen Stabilisierung der Kupferwicklungen und ist die Ursache der anschließend sehr hohen Festigkeit des Materialverbundes. Ohne den Tränklack würden sich die Kupferwicklungen im Betrieb entlang des Magnetfeldes ausrichten und daher verbiegen, was zum Funktionsausfall führen würde.

Für das Recycling in der End-of-Life-Phase ist dies von großem Nachteil, da der Tränklack eine Demontage sehr aufwendig macht. Für kleinere Aggregate ist diese Option bisher zu kostenintensiv. Diese werden daher maschinell zerkleinert und anschließend maschinell sortiert, um das Kupfer vom Eisenblech zu trennen. Die Trennschärfe der maschinellen Sortierung führt dabei zu Verunreinigungen bzw. Materialverlusten.

Um diese Effekte zu minimieren, ist es zielführend, nach effizienteren Methoden zu suchen. Im Projektverlauf wurden daher drei mögliche Trennverfahren untersucht, um das Kupfer vom Blechpaket zu isolieren. Das erste Verfahren stellt eine rein mechanische Separation dar, bei

der durch Anlegen einer ausreichend großen Zugkraft die Kupferstränge vom Blechpaket getrennt werden. Die zwei Alternativen sind eine thermische sowie eine chemische Vorbehandlung, die die Haftkräfte zwischen den Kupfersträngen und dem Eisenkern im Vorfeld des eigentlichen Trennschrittes verringern sollten. Zu den Vorbehandlungen sind zunächst orientierende Versuche durchgeführt worden, um eine erste Bereichseingrenzung der zu untersuchenden Parameter zu erreichen.

Zum Thema der Kupfer-Eisen-Separation aus Statoren von Elektromotoren liegen bereits verschiedene Patente vor. Während in dem einen Patent [Patent-Nr. DE 39 11 490 C1] lediglich eine hydraulische Zugvorrichtung zum Herausziehen der Kupferstränge vorgeschlagen wird, wird bei dem anderen Patent [Patent-Nr. DE 698 09 111 T2] eine thermische Vorbehandlung unter sauerstoffarmer oder sauerstofffreier Atmosphäre beschrieben, ähnlich wie in Kapitel 4.5.4 erläutert. Da in letzterem Patent keine weiteren Angaben hinsichtlich der notwendigen Zugkraft oder Temperatur gemacht werden, wurden für die drei im Projektverlauf angewandten Verfahren Messreihen durchgeführt.

Mechanische Zerlegung des Stators

Bei der rein mechanischen Behandlung sollten die Kupferstränge allein durch Anlegen von Zugkraft aus dem Eisenkern gezogen werden. Dabei sollte herausgefunden werden, ob die Separation von Kupfer und Eisen ohne eine eventuell energie- und zeitintensive Vorbehandlung technisch möglich ist und welcher Aufwand dafür notwendig ist. Es wurde ein Vorversuch durchgeführt, um die Zugkraft abschätzen zu können. Zusätzlich wurde geprüft, ob die Kupferstränge den dabei auftretenden Zugkräften standhalten können.

Der erste Schritt war das Abtrennen der Kupferstränge auf einer Seite des Eisenkerns, wie es in Schritt 5 auf Abbildung 5-1 zu sehen ist. Als Angriffspunkt für die Zugkraft wurden Karosserie-Zugklemmen angebracht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5-3 zu sehen. Zu beachten ist dabei, dass die zeitgleiche Einleitung der Zugkraft in sämtliche Kupferstränge nicht möglich war, da die gegebene Größe der untersuchten Statoren nur begrenzten Raum für die verwendeten Zugklemmen bot. Für eine erste, qualitative Abschätzung war der verwendete Aufbau jedoch ausreichend.



Abbildung 5-3: Versuchsaufbau der Zugversuche

Durch Anwendung einer Vorbehandlung sollte in den folgenden Versuchen die notwendige Zugkraft verringert werden. Diese werden folgend erläutert.

Thermische Vorbehandlung

Bei der Produktion von Industrie-Elektromotoren werden Tränklacke für die Imprägnierung (auch Sekundärisolation genannt) verwendet [Elantas 2016]. Tränklacksysteme basieren entweder auf Epoxidharzen oder auf ungesättigten Polyestern (UP). Letztere kommen laut Expertengespräch in den weitaus meisten am Markt erhältlichen Elektromotoren zum Einsatz. Epoxidbasierte Lacke kommen demnach hauptsächlich bei solchen Motoren zur Anwendung, die hohe technische Anforderungen an die Temperaturstabilität erfüllen müssen (Motoren für Hochtemperaturanwendungen).

Aus Gesprächen mit einem Hersteller von Norm-Elektromotoren, sowie dem Patent „Verfahren zum Verarbeiten von abgelegten Elektromotoren“ [Patent-Nr. DE 698 09 111 T2] ist bekannt, dass bereits thermische Verfahren zur Separation des Kupfers aus dem Eisenpaket angewendet werden. Es wurde deutlich, dass es in Werkstätten bereits gängige Praxis ist, den Stator unter inerten Bedingungen vier Stunden auf 400 °C zu erhitzen. Dadurch kommt es zur thermischen Zersetzung des polymerbasierten Tränklackes. Im Anschluss können die Kupferstränge ohne großen Kraftaufwand entfernt werden.

Der Prozess soll unter inerten Bedingungen stattfinden, um eine Oxidation des Kupfers zu

verhindern. Oxidiertes Kupfer würde zu einem Wertverlust des gewonnenen Sekundärrohstoffes im Hinblick auf die anschließende Vermarktung führen. Die in dem Patent angegebenen Behandlungstemperaturen betragen zwischen 300 °C und 700 °C. Dadurch soll neben der Verbrennung oder Verkohlung des Polymers eine Immobilisierung des Rotors durch Aufschmelzen und anschließendes Erstarren des enthaltenen Aluminiums erreicht werden. Die Immobilisierung soll folgende Zerkleinerungsschritte, wie das Halbieren der Motoren senkrecht zur Welle, erleichtern.

Im hier dargestellten Projekt zur Konzeption einer Demontagefabrik sollte lediglich die Idee einer thermischen Vorbehandlung aufgegriffen werden. Durch Wärmeeinwirkung sollte der Tränklack entweder verflüssigt werden oder in die gasförmige Phase übergehen. Damit sollte erreicht werden, dass die mittels des Tränklackes erzeugte Verbindung zwischen Kupfersträngen und Blechpaket gelöst wurde und somit das Kupfer einfacher zu entfernen war. Ein Aufschmelzen der Aluminiumanteile war nicht beabsichtigt. Des Weiteren wurde die thermische Behandlung erst nach der primären Demontage der Elektromotoren in die größeren Komponenten vorgesehen – also nach der Entnahme der Rotoren.

Für weitere Versuche wurde zunächst eine Charakterisierung des Tränklackes vorgenommen. Dafür wurde eine Probe ausgehärteten UP-Tränklackes, wie er in der Produktion von Norm-Elektromotoren verwendet wird, genauer untersucht. Es wurden eine Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) und eine Thermogravimetrische Analyse (TG) durchgeführt, um das Verhalten des ausgehärteten Lackes unter Temperatureinfluss zu untersuchen. Die DSC-Messung wurde zur Verifikation der Messergebnisse dreifach durchgeführt.

Die gesammelten Informationen sollten anschließend genutzt werden, um die bisherige Praxis zu optimieren. Die Optimierung kann durch eine Reduzierung der Verarbeitungszeit sowie der Behandlungstemperatur erreicht werden, da dies zu einer Verringerung der aufzuwendenden thermischen Energie führt. Die Behandlungstemperatur sollte demnach auf unter 400 °C gesenkt werden, der zeitliche Aufwand auf unter 4 h (siehe Kapitel 4.5.4). Die aktuell durchgeführte Pyrolyse unter Sauerstoffausschluss sollte so durch ein wirtschaftlicheres Verfahren bei niedrigeren Temperaturen ersetzt werden, bei dem keine Inertisierung notwendig ist. Der Tränklack sollte lediglich erweicht und nicht zersetzt werden.

Die Ergebnisse der DSC-Messung dienen der Bestimmung der Glasübergangstemperatur (T_g). Diese stellte einen Anhaltspunkt für die minimal zu wählende Temperatur dar lässt jedoch keine Aussage über die Viskosität des Polymers bei dieser Temperatur zu. Eine Versuchsreihe sollte daher zeigen, welche Temperaturen notwendig sind, um die Kupferstränge mit verringertem Kraftaufwand zu entfernen. Hierfür wurden Statoren für jeweils 15 Minuten einer mit jeder Versuchsdurchführung in festem Intervall ($\Delta T = 25 \text{ K}$) gesteigerten Temperatur ausgesetzt. Ausgangspunkt war die mittels DSC-Messung ermittelte Glasübergangstemperatur. Nach jeder dieser Vorbehandlungen erfolgte ein Zugversuch, um die notwendige Zugkraft für die Entfernung der Kupferstränge zu ermitteln. Die maximal aufzuwendende Zugkraft orientierte sich dabei an der Vorgabe, eine deutliche Verringerung gegenüber der ohne Vorbehandlung nötigen Kraft zu erreichen.

Chemische Vorbehandlung

Eine weitere Methode, um den stabilisierenden Tränklack zu entfernen, beziehungsweise die mechanisch stabilisierende Wirkung zu schwächen, basiert auf der chemischen Zersetzung des Polymers. Mit Hilfe eines geeigneten Lösemittels sollte der Tränklack aufgelöst werden,

um die Trennung des Kupfers von den Blechpaketen zu erleichtern.

Ziel der Versuche war daher zunächst das Bestimmen eines geeigneten Lösemittels im Vorversuch. Dieses muss die Fähigkeit besitzen, den Tränklack soweit an- beziehungsweise aufzulösen, dass ein Herausziehen der Kupferwicklungen mit geringem Kraftaufwand ermöglicht wird. Weiterhin sollen die weiteren Wertträger (Kupfer und Blechpaket) nicht durch die chemische Vorbehandlung angegriffen werden. Weitere angesetzte Qualitätskriterien waren eine gute Handhabbarkeit (hinsichtlich Toxizität, Arbeitssicherheit und schädlicher Umweltauswirkungen), niedrige Kosten und die Möglichkeit zur Regeneration (Wiedergewinnung des Lösemittels). Daraus ergibt sich im Hinblick auf die Demontagefabrik eine kostengünstige Kreislaufführung für das Lösemittel.

Im Rahmen der Vorversuche sollten vornehmlich die Machbarkeit und die dafür notwendigen Bedingungen (Lösemittel, Verarbeitungstemperatur) geprüft werden. Als Ausgangsmaterial wurde die Probe eines typischen Tränklackes aus der Produktion seitens eines Herstellers von Norm-Elektromotoren zur Verfügung gestellt. Diese stand repräsentativ für die häufig verwendeten Tränklacksysteme aus ungesättigten Polyestern mit Styrol als Reaktivverdünner. Die Ergebnisse des CUTEC-Projektes „Entschichtung von Weißblechschrotten als Beitrag einer innovativen Zinrückgewinnung (ENWEI)“ [Schulze et al. 2014] dienten zur Auswahl der anorganischen Lösemittel. In diesem Projekt wurde festgestellt, dass es sich als schwierig erweist, ein geeignetes organisches Lösemittel zu finden, welches für die Vielzahl möglicher Polymervarianten in Tränklacken geeignet ist. Kalilauge und Natronlauge zeigen demnach unter erhöhter Temperatur gute Lösemitteleigenschaften für die unterschiedlichen Lacksysteme. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die Lösemittel, die auf dieser Basis als potenziell geeignet definiert wurden.

Tabelle 5-1: Übersicht über die verwendeten Lösemittel

Organische Lösemittel	Anorganische Lösemittel
Aceton	Kalilauge (20 %ig)
Butanol	Natronlauge (20 %ig)
Diethylether	
Diethylglycolmonomethylether	
Styrol	
Toluol	
Toluol/Butanol (50:50)	

Um die Wirksamkeit der Lösemittel zu prüfen, wurden Langzeitversuche bei 20 °C und 60 °C durchgeführt. Bei 20 °C wurden ausschließlich die organischen Lösemittel verwendet, bei der Temperatur von 60 °C kamen Kalilauge und Natronlauge (jeweils 20 %ig) hinzu. Bei 60 °C wurde auf die Verwendung von Diethylether und Aceton verzichtet, da diese Lösemittel einen zu niedrigen Siedepunkt für dieses Temperaturniveau besitzen.

Für die Versuche wurde jeweils eine Probe des Tränklackes in 10 ml Lösemittel eingewogen und für 24 Stunden mit Hilfe eines Rütteltisches in Bewegung gehalten. Für die Auswertung wurden die Tränklackproben anschließend im Trockenschrank bei 70 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und die Lösemittleigenschaften auf Basis der Gewichtsverluste bewertet.

Die Ergebnisse aus den Vorversuchen dienten anschließend als Basis für weitere Praxisversuche. Ein anschließendes Experiment sollte zeigen, ob die chemische Vorbehandlung erfolgreich auf Statoren angewendet werden kann. Weiterhin sollte die Behandlungszeit verringert werden, um diese Methode für eine praktische Anwendung wirtschaftlich zu gestalten. Daher sind folgende Versuchsparameter gewählt worden: Die Statoren sollten für eine Stunde mit den ermittelten Bedingungen (bezüglich Lösemittel und Temperatur) behandelt werden. Analog zu den anderen Verfahren (rein mechanisches Verfahren sowie thermische Vorbehandlung) erfolgten nach der chemischen Vorbehandlung die Zugversuche.

5.1.1.2 Demontage von Fahrradnabendynamos

In der Vorstudie zu diesem Projekt wurden Fahrradnabendynamos als weiterer, potenziell geeigneter Inputstrom für die Demontagefabrik identifiziert. Analog zu den Elektromotoren sollte für diesen Stoffstrom eine Untersuchung auf die Demontagefähigkeit zur zielgerichteten Vorsortierung durchgeführt werden. Der Fokus lag auch hier auf der Rückgewinnung seltenerdmetallhaltiger Magnete unter Berücksichtigung weiterer zu bergender Materialien.

Für die Demontage wurden zwei Altgeräte von einem Fahrradaufbereitungsbetrieb sowie eine Reihe aktuell am Markt erhältlicher Modelle herangezogen. Dabei wurde darauf geachtet, verschiedene Konstruktionstypen zu untersuchen. Der Erhalt gebrauchter Geräte erwies sich als schwierig, da diese meist nur geringe Verschleißerscheinungen zeigen und bei der Aufbereitung in einem Fachbetrieb häufig erneut verbaut werden.

Das Vorgehen der Demontageversuche wurde analog zu dem der Industrie-Elektromotoren gestaltet. Zunächst wurde ebenfalls eine Demontageanleitung erstellt. In dieser wird die Demontage in einzelne Arbeitsschritte unterteilt. Die Anleitung soll flexibel auf verschiedene Konstruktionen anwendbar sein und musste daher verallgemeinert formuliert werden.

Nach dem in der Anleitung beschriebenen Vorgehen wurden anschließend die Demontageversuche durchgeführt und entsprechende Zeit- und Massenbilanzen erstellt. Die Vorgehensweise wird folgend in Kürze wiedergegeben.

Lag der Nabendynamo noch in einem kompletten Fahrrad verbaut vor, so war dieser zunächst als vollständiges Bauteil zu separieren. Dies diente einer besseren Handhabbarkeit bei den nachfolgenden Arbeitsschritten. Um Zeit zu sparen, wurden die Speichen direkt am Nabendynamo mittels eines Seitenschneiders durchtrennt. An der Nabe befindliche Bauteile, wie beispielsweise Bremsscheiben, konnten anschließend abgeschraubt werden.

Sobald der Dynamo einzeln vorlag, begann die Zerlegung in seine Einzelteile. Im ersten Schritt wurde dazu eine Seitenklappe mit Hilfe eines großen (häufig 32er) Maulschlüssels oder einer Rohrzange abgeschraubt. Nachdem der Dynamo geöffnet wurde, war der zentral gelegene Stator einzeln zu entnehmen. Das Nabengehäuse (Gehäuse des Rotors) war je nach Konstruktion aus einem Guss oder besaß eine zweite, aufgepresste Seitenklappe. Im ersten

Fall musste das Gehäuse mittels einer Drehbank geöffnet werden. Hierbei wurde es vorsichtig entlang des Umfangs aufgeschnitten und konnte anschließend geöffnet werden. Die im Rotor verbauten Magnete konnten anschließend entnommen werden. Im zweiten Fall konnte die Seitenklappe herausgeschlagen werden, wodurch die kreisförmig angeordneten Magnete freigelegt wurden.

Der letzte Arbeitsschritt war die Demontage des Stators. In Fahrradnabendynamos besteht der Stator häufig aus einer Spule (aus Kupfer, beziehungsweise bei einigen Modellen aus Aluminium) welche, von einem Eisenkäfig umgeben, auf einem Halter aus Kunststoff montiert ist. Der Eisenkäfig wird meist aus einer Anzahl von Elektroblechen in Form kleiner Winkel gebildet. Dieses Paket ist auf der Welle mit Muttern fixiert. Die Muttern wurden entfernt, so dass die genannten Einzelteile leicht voneinander getrennt werden konnten.

Die für die manuelle Demontage nötige Werkzeugausstattung war sehr gering: Mutternschlüssel unterschiedlicher Größe (schmale Bauform: sogenannte Konusschlüssel), ein Schraubstock, ein Hammer, ein Stößel und ein Schraubendreher (Schlitz).

5.1.1.3 Demontage elektrischer Fahrradantriebe

E-Bike-Antriebe weisen einen grundsätzlich ähnlichen Aufbau wie die Fahrradnabendynamos und Industrie-Elektromotoren auf. Für eine speziell ausgerichtete Demontagestecke im Rahmen einer Demontagefabrik stellen sie daher eine potenzielle Ergänzung des Input-Stoffstroms dar.

Das Wirkprinzip der Antriebsmotoren entspricht dem eines Gleichstrom-Elektromotors, dessen Rotor-Magnetfeld durch einen Permanentmagneten aufgebaut wird. Dies hat den Vorteil, dass auf Verschleißteile, wie beispielsweise Bürsten, verzichtet werden kann. Außerdem wird so eine leichtere Bauweise erreicht, was dem im Fahrradbereich angestrebten Leichtbau zu Gute kommt.

Analog den Demontageversuchen der anderen beiden Stoffströme lag auch hier die Zielsetzung im Schaffen einer Datengrundlage über die mittels Demontage zu gewinnenden Werkstoffmassen sowie die dafür notwendigen Demontagezeiten. Der Fokus liegt dabei auf den seltenerdmetallhaltigen Permanentmagneten, jedoch wurden wiederum sämtliche weiteren Werkstoffe in die Betrachtung einbezogen, da diese zusätzliche Wertstofffraktionen darstellen, die dem ökonomischen Erfolg einer Demontagefabrik dienen.

Für die Demontageversuche wurde eine Auswahl von sechs verschiedenen Antriebsmodellen demontiert. Diese teilten sich in fünf Modelle mit integriertem Getriebe sowie ein getriebeloses Modell eines Vorderrad-Nabenantriebs auf. Von den Antriebsmotoren mit integriertem Getriebe gibt es einerseits Modelle, die am Tretlager der Fahrräder verbaut werden (Mittelmotor), andererseits solche, die wie die getriebelosen Modelle in die Naben integriert sind (Nabenmotor). Es wurden zwei Mittelmotor-Modelle sowie drei Nabenmotoren mit Getriebe demontiert. Somit konnte das gesamte Spektrum der auf dem Markt erhältlichen Geräte abgedeckt werden.

Da das getriebelose Modell in siebenfacher Wiederholung demontiert wurde, konnte zusätzlich eine genauere Zeitbilanz bei mehrfacher Zerlegung identischer Geräte erstellt werden. Deren Ergebnis kann im Hinblick auf die ökonomische Gesamtrechnung einer Demontagefabrik von Bedeutung sein.

Es ist zu beachten, dass die Definition von Stator und Rotor zwischen den unterschiedlichen Bauarten variiert, da in einigen Fällen das Gehäuse das rotierende Bauteil ist, während bei anderen Konstruktionen die Achse innerhalb des Gehäuses rotiert.

Nabenantriebe



Abbildung 5-4: Separierte Bauteile eines Nabenantriebes

Wie in Abbildung 5-4 zu erkennen ist, gleicht die Konstruktionsweise der Nabenantriebe stark derjenigen der Fahrradnabendynamos. Ihre Demontage gestaltet sich dementsprechend. Im ersten Arbeitsschritt der Demontage müssen sämtliche von außen erreichbare Schraubverbindungen gelöst werden. Anschließend kann eine Seitenklappe, in einigen Fällen sogar beide Seitenklappen, vom Gehäuse getrennt werden. Dadurch sind Stator und Rotor freigelegt. Das jeweils auf der Achse befindliche Bauteil kann einfach herausgenommen werden. Das Gegenstück befindet sich ringförmig fest in das Gehäuse gepresst und ist häufig zusätzlich geklebt. Unabhängig davon, ob sich die Magnete im Innenring des Gehäuses oder auf dem Achsenbauteil befinden, können diese nun vorsichtig abgeschlagen werden. Das Gegenstück wird aus Kupferspulen in einem Eisenkern gebildet. Um diese Werkstoffe voneinander zu trennen, kann anschließend analog dem Verfahren, welches bei den Elektromotor-Statoren angewendet wird (Laugung/thermische Behandlung), vorgegangen werden. Für sehr kleine Aggregate muss abgeschätzt werden, ob eine automatisierte Zerkleinerung und Sortierung effizienter ist.

Mittelmotoren

Gegenüber den Nabenantrieben sind die Mittelmotoren deutlich komplexer aufgebaut. Auch bei den Mittelmotoren ist das Lösen der Schraubverbindungen der erste Arbeitsschritt.

Anschließend kann das Gehäuse auf einer oder beiden Seiten aufgeklappt werden. Die Außenklappen sind häufig geklebt, was einen gewissen Kraftaufwand erfordert.

Die für den Fahrbetrieb notwendige Steuerelektronik ist bei E-Fahrrädern mit Mittelmotor im Motorengehäuse untergebracht. Die funktionellen Bauteile sind (wie in Abbildung 5-5 dargestellt) im Innern so angeordnet, dass die Getrieberäder außen liegen, während die Steuerelektronik dazwischen im Zentralen Bereich liegt. Diese ist in Form einer einzelnen Platine verbaut, welche mittels Schraubverbindung befestigt ist und daher relativ problemlos entnommen werden kann.

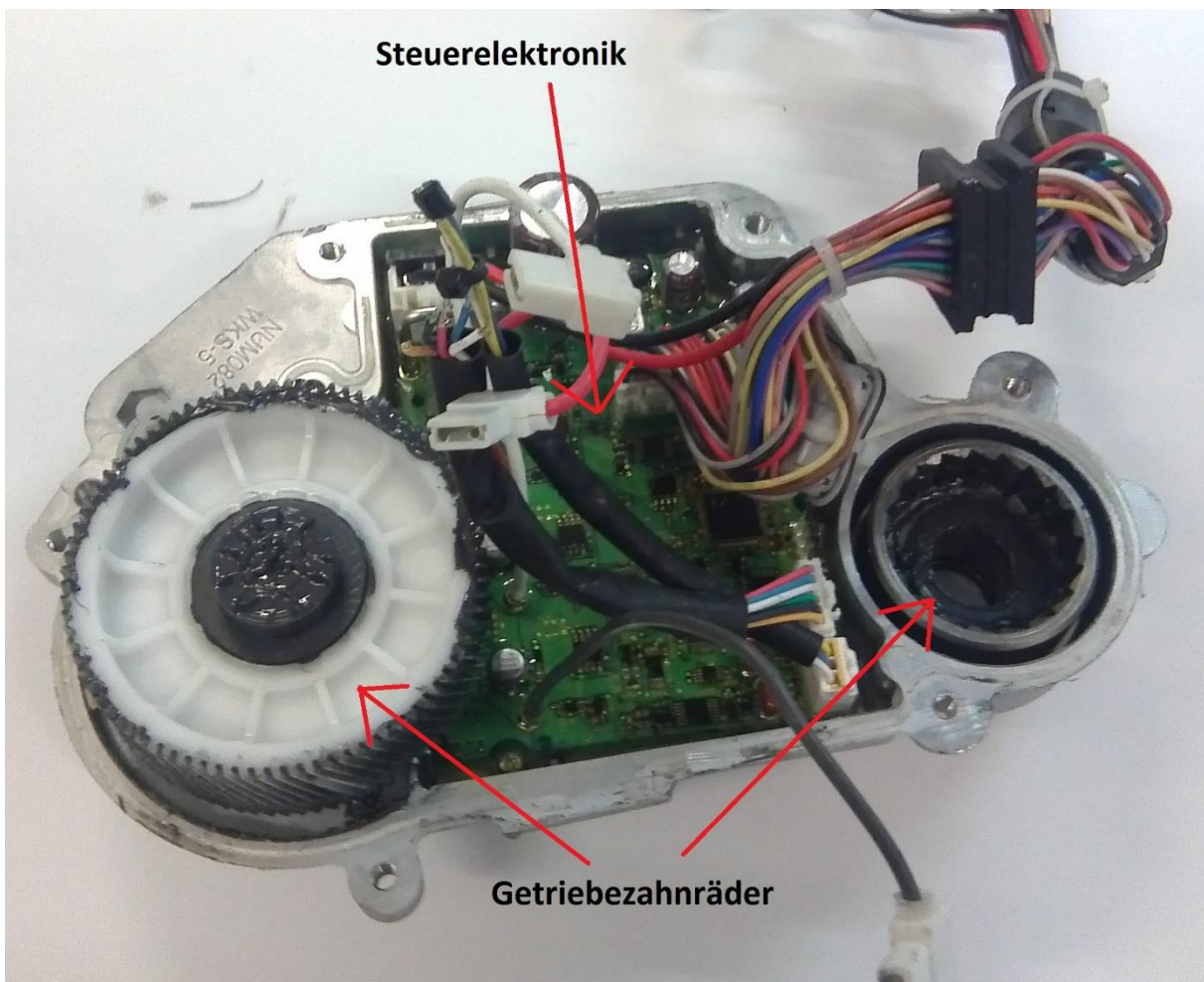


Abbildung 5-5: Innenansicht eines Mittelmotors

Des Weiteren können die Getriebeteile entnommen werden. Bei den untersuchten Geräten mussten hierfür zunächst Sprengringe mit Hilfe einer Sprengringzange entfernt werden. Auf den Getriebeachsen befanden sich kleine Steuermotoren mit sehr schwachen Magneten, sowie einer kleinen Kupferspule. Diese können erst separiert werden, nachdem die auf der Welle befindlichen Lager mit Hilfe eines Abziehers entfernt wurden.

Als letztes muss der eigentliche Antriebsmotor aus dem Gehäuse demontiert werden. Der Rotor war bei beiden Modellen über eine Runde Scheibe, welche auf der Welle gelagert ist, zusätzlich am Gehäuse angeschraubt. Nachdem die Schraubverbindungen gelöst wurden,

kann dieser einfach herausgenommen werden. Hierfür muss lediglich die Magnetkraft zwischen den Permanentmagneten und dem Eisenkern des Stators überwunden werden.

Die untersuchten Modelle besaßen Taschen im Blechpaket des Rotors, in die die Magnete eingelassen waren. Die Magnete waren nicht festgeklebt und ließen sich im Vergleich zu den geklebten Ringmagneten der Fahrradnabendynamos und Nabenantriebe leicht aus den Taschen drücken.

Im Hinblick auf ein recyclinggerechtes Design sind die Statorn der Mittelmotoren hingegen unvorteilhaft konstruiert. Diese waren bei einem Modell segmentiert und in das Gehäuse geklebt (siehe Abbildung 5-6), sodass auch nach dem Aufschneiden des Gehäuses keine erfolgreiche Separation möglich war. Bei dem zweiten Modell war der komplette Stator mit Kunststoff vergossen, was eine weitere Demontage unmöglich machte. Dadurch konnten die Wertstoffe Kupfer und Elektroblech nicht voneinander getrennt werden und der Stator muss als gesamtes Bauteil der Elektroschrott-Fraktion zugeordnet werden.

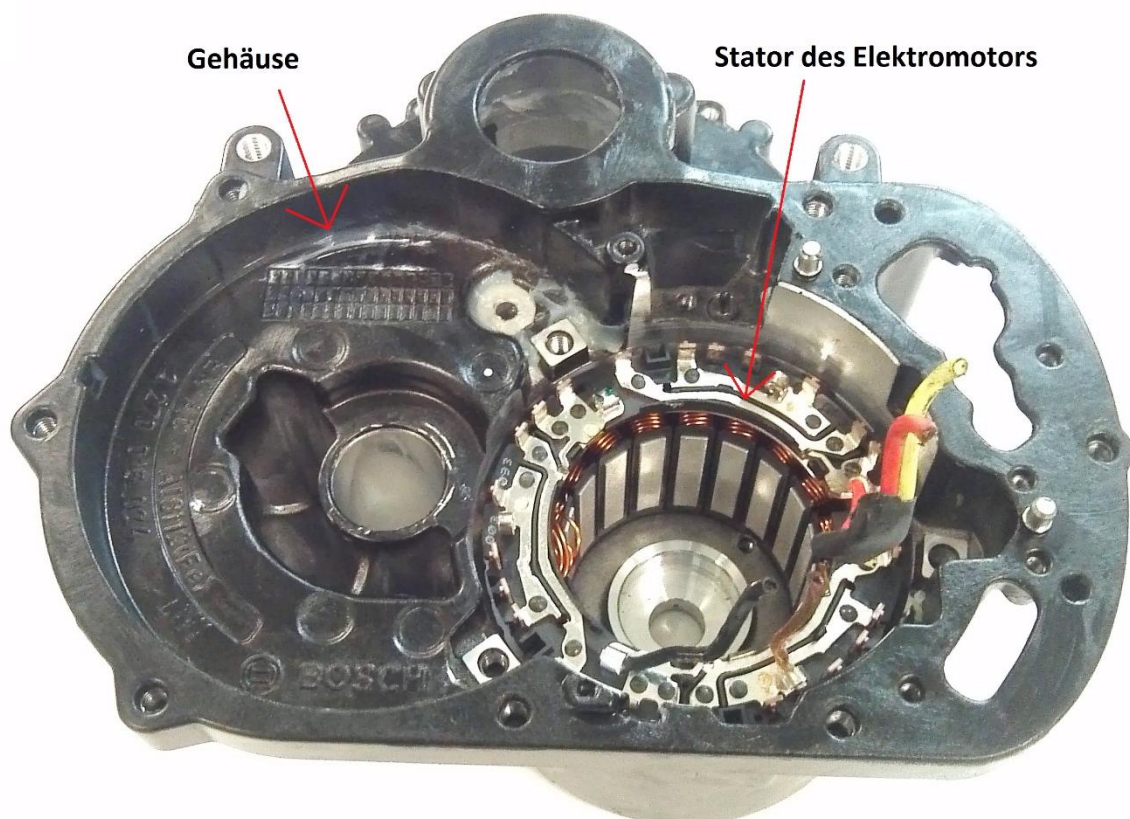


Abbildung 5-6: Im Gehäuse eines Mittelmotors integrierter Stator des Antriebmotors

Die notwendigen Werkzeuge beschränkten sich bei den Nabenmotoren auf Schraubenzieher, Mutternschlüssel, eine Rohrzange und einen Abzieher. Für die Mittelmotoren wurden zusätzlich ein Hammer und ein Stößel verwendet, um die geklebten Gehäuseschalen voneinander zu trennen.

5.1.1.4 Demontage von Kleinmotoren aus Kfz

Im Rahmen des Projekts wurden neben der Demontage von Industrie-Elektromotoren, Fahrradnabendynamos und elektrischen Fahrradantrieben auch manuelle Zerlegeversuche von Kleinmotoren aus Kfz durchgeführt. Ziel der Versuche war die Analyse der werkstofflichen und baugruppenspezifischen Zusammensetzung sowie die Bewertung des Produktdesigns in Hinblick auf die Zerlegbarkeit und die Gewinnung von separaten Wertstofffraktionen und Bauteilen zur Weiterverwendung. Der Ausbau von Kleinmotoren aus Kfz und der damit verbundene zeitliche Aufwand war hingegen nicht Gegenstand der vorliegenden Versuchskampagne, da hierzu bereits ausführliche Untersuchungen von [Kohlmeyer et al. 2015] durchgeführt und dokumentiert wurden.

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgte eine manuelle Zerlegung der Motoren in die Einzelkomponenten, welche anschließend verwogen wurden. Darüber hinaus wurde das Magnetmaterial separiert und mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX) und nasschemischer Analysemethoden hinsichtlich des Rohstoffgehaltes untersucht.

Das Vorgehen der Demontage wurde dokumentiert, um anschließend allgemein gültige Hinweise zum Vorgehen sowie den benötigten Werkzeugen zusammenfassen zu können. Zudem wurde ein Kriterienkatalog in Anlehnung an [Bartnik et al. 2013] genutzt, um die Demontierbarkeit am Beispiel der Kleinmotoren aus Fahrzeugen zu beurteilen. Die Studie von [Bartnik et al. 2013] verfolgt das Ziel einer Bewertung der recyclinggerechten Konzeption von Elektrogeräten. Der Kriterienkatalog wurde auf Grundlage rechtlicher Anforderungen und Erkenntnissen aus bestehenden Recyclingverfahren entwickelt. Die in [Bartnik et al. 2013] verwendeten Kriterien und die Anpassungen bzw. Erweiterungen in Bezug auf Kleinmotoren aus Kfz sind in Tabelle 5-2 aufgeführt. Die Kriterien können als positiv, neutral und negativ hinsichtlich der Demontagefähigkeit der Elektromotorbauteile eingestuft werden. Die Kriterien beleuchten dabei für die Demontage- und Recyclingfähigkeit relevante Aspekte des Produktdesigns, beispielsweise die Lösbarkeit von Werkstoff- oder Komponentenverbindungen.

Tabelle 5-2: Methodik zur Bewertung der recyclinggerechten Konzeption von Elektrogeräten nach [Bartnik et al. 2013]

Kriterium	Bewertung als positiv	Bewertung als neutral	Bewertung als negativ
Auffindbarkeit der Verbindungen:	Erfüllt: Verbindungsart direkt visuell sichtbar	Überwiegend erfüllt: Schrauben teils verdeckt oder Ansatzpunkte von Klemmen nicht sofort ersichtlich	Nicht erfüllt: Verbindungsart bzw. Öffnungs- oder Ansatzpunkt von außen nicht ersichtlich
Färbung von Bauteilen aus gleichen Kunststoffen:	Erfüllt: Einheitliche Färbung der Kunststoffe gleicher Art	Überwiegend erfüllt: Gleiche Färbung der Kunststoffe gleicher Art bei einigen Bauteilen vorhanden	Nicht erfüllt: Keine einheitliche Färbung der Kunststoffe gleicher Art zu erkennen
Kunststoffkennzeichnung:	Erfüllt: Kennzeichnung eines oder mehrerer Bauteile vorhanden	Teilweise erfüllt: Bei < 25 g und ebenen Fläche von weniger als 200 mm ² keine Kennzeichnung vorhanden	Nicht erfüllt: Bei > 25 g und ebenen Fläche von mind. 200 mm ² keine Kennzeichnung vorhanden
Verbindungsarten:	Wenige Verbindungsarten: Eine Verbindungsart bei der durchgeführten Demontage gelöst	Mehrere Verbindungsarten: Zwei bis drei verschiedene Verbindungen wurden gelöst	Viele Verbindungsarten: Mehr als drei verschiedene Verbindungsarten wurden gelöst
Lösbarkeit der Verbindungen:	Zerstörungsfrei ohne Werkzeug: Gesteckte Teile ohne Werkzeug voneinander trennbar	Zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug: Verbindungen problemlos mit gängigem Werkzeug lösbar	Zerstört: Bei Trennung der Verbindungen Zerstörung von einzelnen Komponenten
Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Möglich: Alle Werkstoffe (mit und ohne Werkzeug) Zerstörungsfrei voneinander trennbar	Zerstörend möglich: Alle Werkstoffe (mit und ohne Werkzeug) mit Zerstörung einzelner Komponenten trennbar	Nicht möglich: Trennung der Werkstoffe manuell (mit Werkzeug) nicht möglich
Werkzeuge:	Einsatz weniger Werkzeuge: Ein Werkzeug zur Trennung nötig	Einsatz mehrerer Werkzeuge: Zwei bis drei Werkzeuge zur Trennung nötig	Einsatz vieler Werkzeuge: Mehr als drei Werkzeuge zur Trennung nötig
Entnehmbarkeit des Magneten*:	Mit geringem Aufwand entnehmbar	Stator zerstört: Magnet nicht ohne Zerschneiden des Stators entnehmbar	Magnet zerstört: Magnet muss zertrümmert werden um Trennung von Stator zu ermöglichen

* Diese Kriterium wurde ergänzt und ist demnach in [Bartnik et al. 2013] nicht enthalten.

5.1.1.5 Magnetmaterial-Analytik

Die während der Demontageversuche geborgenen Magnetmaterialien wurden im Projektverlauf auf ihre Gehalte hinsichtlich der Zielelemente (kritische Rohstoffe) analysiert. Für die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, deren Performance zur Detektion von Seltenerd-Elementen getestet werden sollte. Im Projekt wurden die Magnetmaterialien mittels folgender Methoden untersucht:

- ▶ Rasterelektronenmikroskopie mit angeschlossener energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX)
- ▶ Analyse mittel induktiv gekoppelten Plasmas (ICP-OES).

Die genauesten Analyseergebnisse wurden von der sehr sensitiven ICP-Methodik erwartet. Bei dieser Methode werden Proben des zu untersuchenden Materials in Königswasser vollständig aufgeschossen. Vor der Analyse im REM-EDX wurden die Magnete thermisch entmagnetisiert. Dazu wurden die Magnete auf 300 bis 400° C erhitzt.

Zusätzliche Analysen mittels eines mobilen Gerätes zur energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Analyse (EDXRF) wurden durchgeführt. Diese werden aktuell von vielen Recyclingbetrieben in der Praxis zur Sortierung von Schrotten genutzt. Eine Betrachtung der bestehenden Performance solcher Geräte ist daher von gesteigertem Interesse.

Da diese mobilen Geräte aufgrund der Schnelligkeit der Ergebnisdarstellung genutzt werden, erfolgt die Auswertung der aufgenommenen Spektrogramme automatisiert mit Hilfe eines internen Messprogramms. Die Zusammensetzungen der gemessenen Materialien werden nach wenigen Sekunden als prozentuale Elementgehalte ausgegeben. Da nach Herstellerangabe die Messprogramme primär auf die in den häufigen Massenmetallen vorkommenden Legierungspartner ausgerichtet sind, sind zahlreiche seltenere Elemente bisher nicht in den Messprogrammen hinterlegt. Für die Suche nach vielen kritischen Elementen sind die Geräte daher bisher nicht geeignet. Laut Herstellerangaben sind entsprechende Modifikationen der Messprogramme jedoch einfach möglich, sobald am Markt eine entsprechende Nachfrage besteht.

5.1.2 Versuchsergebnisse

5.1.2.1 Ergebnisse der Demontage von Industrie-Elektromotoren

Zerlegung auf Komponentenebene

Um bei der Zerlegung auf Komponentenebene eine möglichst genaue Auflösung der Zeitbilanz zu erreichen, wurden die benötigten Zeiten für jeden einzelnen Arbeitsschritt gemessen. Des Weiteren wurden die Massen der einzelnen Baugruppen sowie Werkstofffraktionen erfasst.

Die Versuche haben gezeigt, dass von den stichprobenartig gewählten Elektromotoren alle bis auf ein Gerät Käfigläufer waren. Die einzige Ausnahme bildete ein Schleifringläufer mit Kupferwicklungen im Rotor (Versuch Nr. 4). Daher war es im Fall der Industrie-Elektromotoren nicht möglich, eine an die Demontage anschließende Rückgewinnung von Permanentmagneten durchzuführen. Da sich die grundlegende Konstruktion von Asynchron- und Synchronmotoren mit Permanentmagneten nur geringfügig unterscheidet, sind die Ergebnisse der Zeit- und Massenbilanzen der Demontageversuche auf Synchronmotoren zu

weiten Teilen übertragbar.

In Abbildung 5-7 sind die separierten Fraktionen beispielhaft dargestellt. Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 sowie Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 bilden die ermittelten Massen und Demontagezeiten ab. Die Elektrobleche können wie dargestellt tendenziell einer Wiederverwendung zugeführt werden und werden daher jeweils separat vom restlichen Eisenschrott betrachtet.

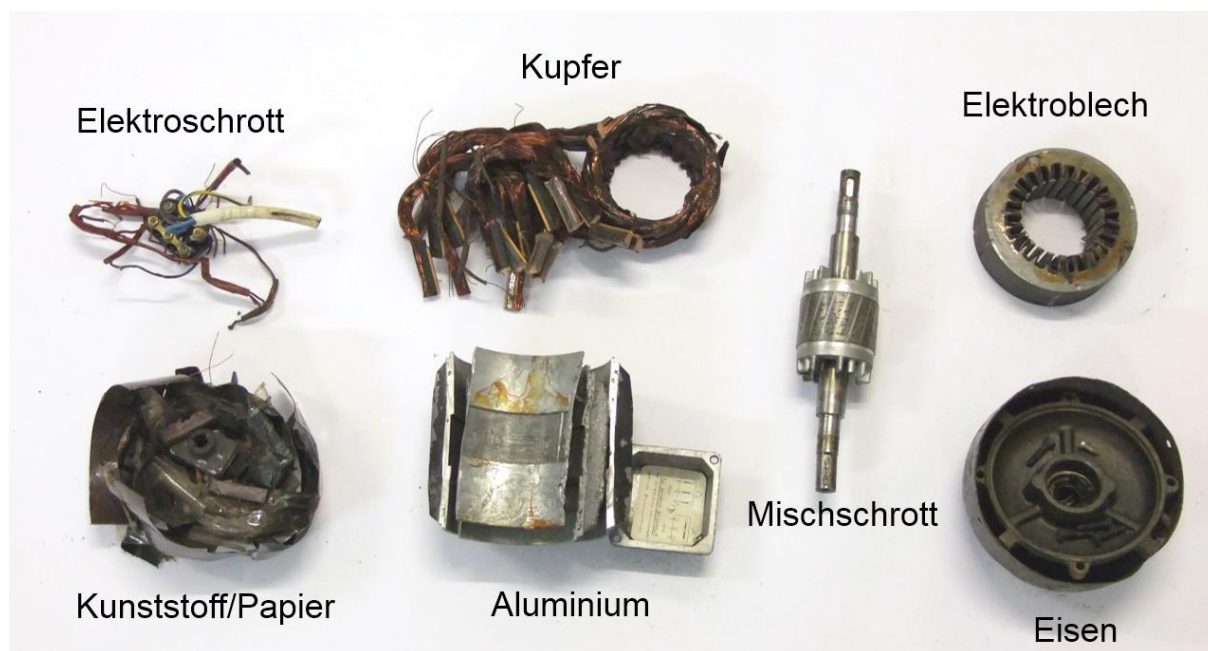


Abbildung 5-7: Werkstofffraktionen eines typischen Käfigläufermotors nach der Demontage

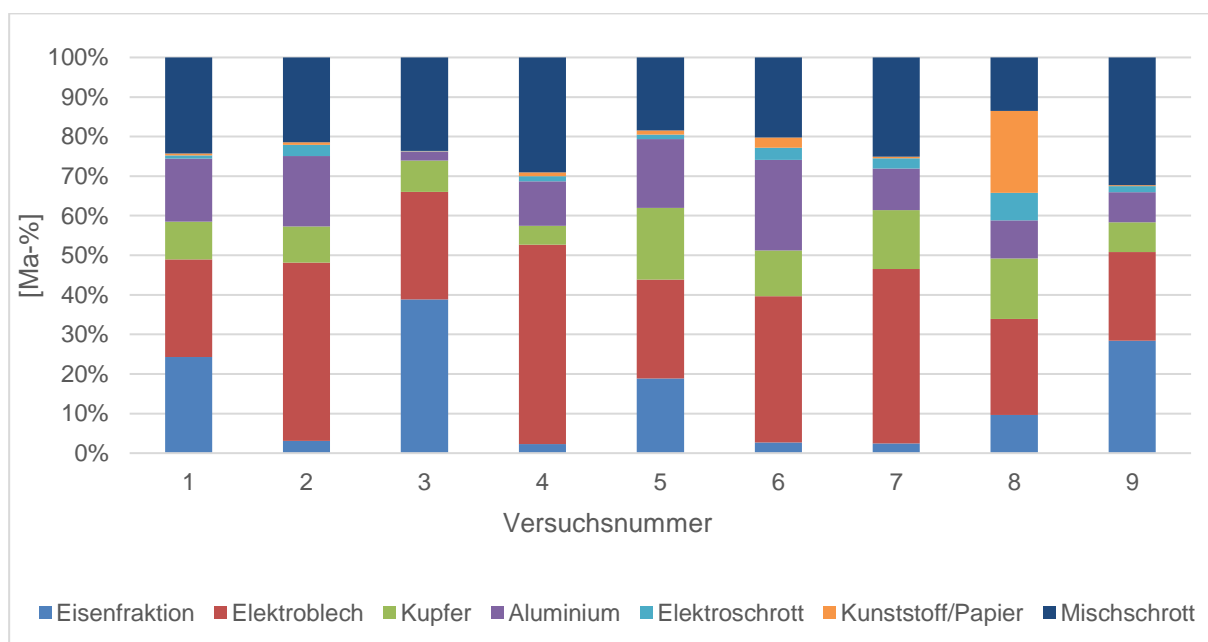


Abbildung 5-8: Prozentuale Massenanteile der Fraktionen aus den demontierten Industrie-Elektromotoren

Die dargestellte Massenbilanz zeigt, dass das Elektroblech, der Mischschrott und die Eisenfraktion zusammen den größten Massenanteil des Elektromotors ausmachen. Die hohen Werte beim Mischschrott sind als Folge des relativ schweren Rotors zu erklären, welcher komplett als Mischschrott entsorgt wird. Die Eisenfraktion variiert und ist stark davon abhängig, ob das Gehäuse aus Grauguss oder Aluminium besteht. Weitere Faktoren sind außen angebrachte Bauteile, wie beispielsweise eine Kühlung, und die verwendete Menge an Schrauben für die jeweilige Konstruktion. Kunststoff und Papier sowie Elektroschrott bilden die kleinsten Massenanteile. Elektroschrott fällt in Form der in den Klemmkästen verbauten Anschlüsse an. Häufigste Quelle für Aluminium ist das Gehäuse. Das Kupfer stammt aus den im Stator verbauten Spulen.

In Tabelle 5-3 sind die durchschnittlichen Massen und prozentualen Massenanteile der Fraktionen dargestellt.

Tabelle 5-3: Mittlere Massen und Massenanteile der Werkstoffe aus den demontierten Industrie-Elektromotoren

Werkstoff	Mittelwerte	
	Masse [Kg]	Massenanteil [Ma-%]
Gusseisen + Stahlteile	2,2	20,3
Elektroblech	3,3	31,6
Kupfer	1,0	9,5
Aluminium	1,2	11,1
Elektroschrott	0,2	1,5
Kunststoff/Papier	0,1	0,9
Mischschrott	2,7	25,1

Die Mittelwerte bestätigen, dass das Elektroblech mit durchschnittlich 32 Massenprozent (Ma-%) die massenmäßig stärkste Fraktion bildet. Der Mischschrott liegt bei etwa 25 %. Darauf folgen die Eisenfraktion mit 20 %, das Kupfer und das Aluminium mit etwa 10 % respektive ca. 11 %. Die Fraktionen Elektroschrott und Kunststoff/Papier haben die geringsten Massenanteile.

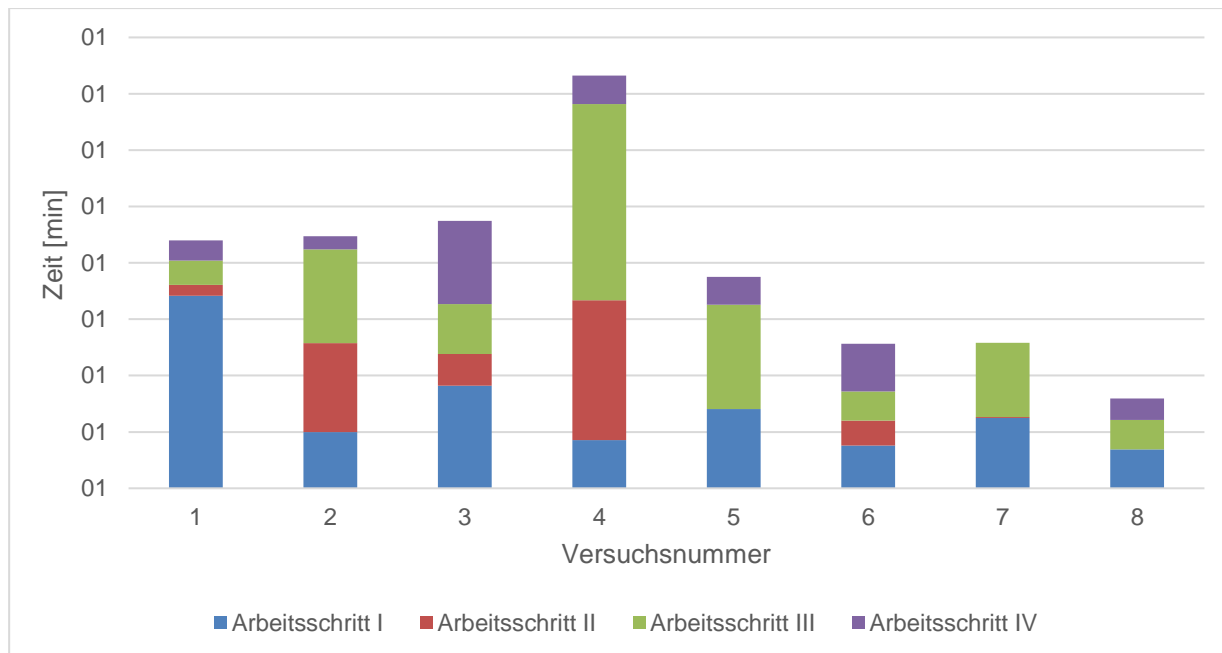


Abbildung 5-9: Zeitbilanz der Demontage der Industrie-Elektromotoren

Die benötigte Gesamtzeit der einzelnen Demontageversuche (in zeitlicher Reihenfolge dargestellt) zeigt mit Ausnahme von Nummer 4 eine deutlich sinkende Tendenz.

Die Arbeitsschritte sind gemäß der erstellten Demontageanleitung gewählt:

Arbeitsschritt 1: Entfernen und Lösen außen liegender Schraubverbindungen

Arbeitsschritt 2: Abziehen auf der Welle befindlicher Bauteile (Lager und 1. Seitenklappe)

Arbeitsschritt 3: Entnahme des Rotors und Abziehen verbliebener Bauteile (2. Seitenklappe)

Arbeitsschritt 4: Aufschneiden, bzw. -brechen des Gehäuses und Entnahme des Stators

Der große Zeitaufwand bei Versuch Nummer 4 ist konstruktionsbedingt. Der demontierte Motor war als einziges Exemplar kein Käfigläufer. Stattdessen besaß dieser Motor Wicklungen auf dem Rotor, welche über Bürsten mit Strom versorgt wurden. Zudem waren einerseits einige Schraubverbindungen mit Kunststoff ausgegossen, wodurch sie nur unter großem Kraftaufwand zu lösen waren, andererseits waren die Enden der Welle speziell gefräst. Diese Eigenschaften erschwerten die Demontage deutlich. Der Rotor aus diesem Elektromotor konnte aufgrund eines dicken Tränklacküberzuges sowie aufgeschumpfter Teile nicht weiter demontiert werden und lag somit wie die weiteren Rotoren am Ende als Mischschrott vor.

Bei Versuch Nummer 7 befanden sich nach Demontageschritt 1 keine zusätzlichen Bauteile mehr auf der Welle, weshalb Arbeitsschritt 2 wegfiel. Die Befestigung des Gehäuses wurde in diesem Fall durch Schraubverbindungen hergestellt, weshalb Schritt 4 ebenfalls wegfiel. Ansonsten kann bei größeren Stückzahlen der gleichen Konstruktionsweise ebenfalls mit sinkenden Demontagezeiten gerechnet werden.

Tabelle 5-4 gibt die mittleren erreichten Demontagezeiten aufgelöst nach den einzelnen Demontageschritten wieder.

Tabelle 5-4: Mittlere benötigte Zeiten für die einzelnen Demontageschritte von Industrie-Elektromotoren

Arbeitsschritt	Mittelwerte der Demontagezeiten [min:sec]
1	7:00
2	3:18
3	6:40
4	2:40
Gesamt	19:38

Die Zeitbilanz zeigt, dass das manuelle Lösen von Schraubverbindungen sowie das Entfernen auf der Welle befindlicher Bauteile (Seitenklappe, Lager, evtl. Schleifkontakte) mit jeweils knapp 7 Minuten die größten zeitlichen Einflussfaktoren bei der Demontage sind. Das anschließende Zerlegen in die einzelnen Baugruppen oder auch Öffnen des Gehäuses nehmen mit jeweils etwa drei Minuten deutlich weniger Zeit in Anspruch. Zusätzlich ist die große Differenz von fast 20 min zwischen der längsten benötigten Zeit und der kürzesten zu beachten. Versuch Nummer 4 hatte eine von den restlichen Geräten abweichende Konstruktion, wodurch sich die Demontage verzögerte. Zusätzlich ist ein Trend zu kürzeren Demontagezeiten mit wachsender Versuchszahl zu verzeichnen, was auf die zunehmende Routine beim Zerlegen der Motoren hinweist.

Da bereits bei den im Projektverlauf durchgeführten Demontageversuchen die benötigte Demontagezeit durch zunehmende Routine sank, ist anzunehmen, dass sich die in der Demontagefabrik benötigte Demontagezeit durch diesen Effekt noch weiter verringern lässt. Zusätzlich kann durch einen gezielt ausgestatteten Arbeitsplatz der benötigte Zeitaufwand zusätzlich reduziert werden. Besonders Akku- oder Druckluft-Schrauber könnten den zeitlichen Aufwand für die Entfernung der Schraubverbindungen (Arbeitsschritt 1) deutlich verringern.

Demontage von Statorn aus Industrie-Elektromotoren

Mechanische Zerlegung des Stators

In dem ersten Zugkraftversuch zur Separation der Kupferstränge aus dem Stator (ohne Vorbehandlung) konnten erst bei über 7,8 kN Zugkraft die ersten Kupferstränge aus dem Blechpaket gezogen werden. Abbildung 5-10 zeigt das Ergebnis des rein mechanischen Zugversuches.

Es ist zu beachten, dass nur diejenigen Kupferstränge, an denen eine direkte Kraftübertragung durch die Zugklemmen erfolgte, aus dem Eisenkern gezogen wurden. In diesem Fall konnten ohne Umsetzen der Zugklemmen 12 von 36 Strängen entfernt werden.



Abbildung 5-10: Ergebnis des Zugversuches: a) Stator mit verbliebenen Kupfersträngen, b) Zugklemme mit herausgezogenen Kupfersträngen

Die aufgewendete Zugkraft war bereits zum Entfernen eines Drittels der verbauten Kupferstränge sehr hoch. Hochgerechnet auf das zeitgleiche Entfernen aller 36 Stränge wäre bereits bei dem im Vorversuch getesteten Elektromotor eine Zugkraft von umgerechnet 23,4 kN nötig gewesen. Umgerechnet auf die nötige Zugkraft pro Quadratzentimeter Kontaktfläche zwischen dem Blechpaket und den Kupfersträngen war eine Zugkraft von 37,6 N/cm² nötig. Ein Abreißen der Kupferstränge bei Motoren mit längeren Blechpaketen ist daher nicht auszuschließen.

Thermische Vorbehandlung

Zur Charakterisierung der thermischen Eigenschaften des Tränklackes werden zunächst die Ergebnisse der DSC- sowie der TGA-Analyse vorgestellt.

Aus den DSC-Kurven kann die Glasübergangstemperatur T_g des untersuchten Materials abgelesen werden, bei der ein fester Stoff zur zähflüssigen Schmelze wird. Dafür wird der mittlere Punkt der charakteristischen Steigungen abgelesen. Abbildung 5-11 zeigt die ermittelten DSC-Kurven für einen in der Herstellung von Norm-Elektromotoren häufig verwendeten Tränklack auf Basis ungesättigter Polyester.

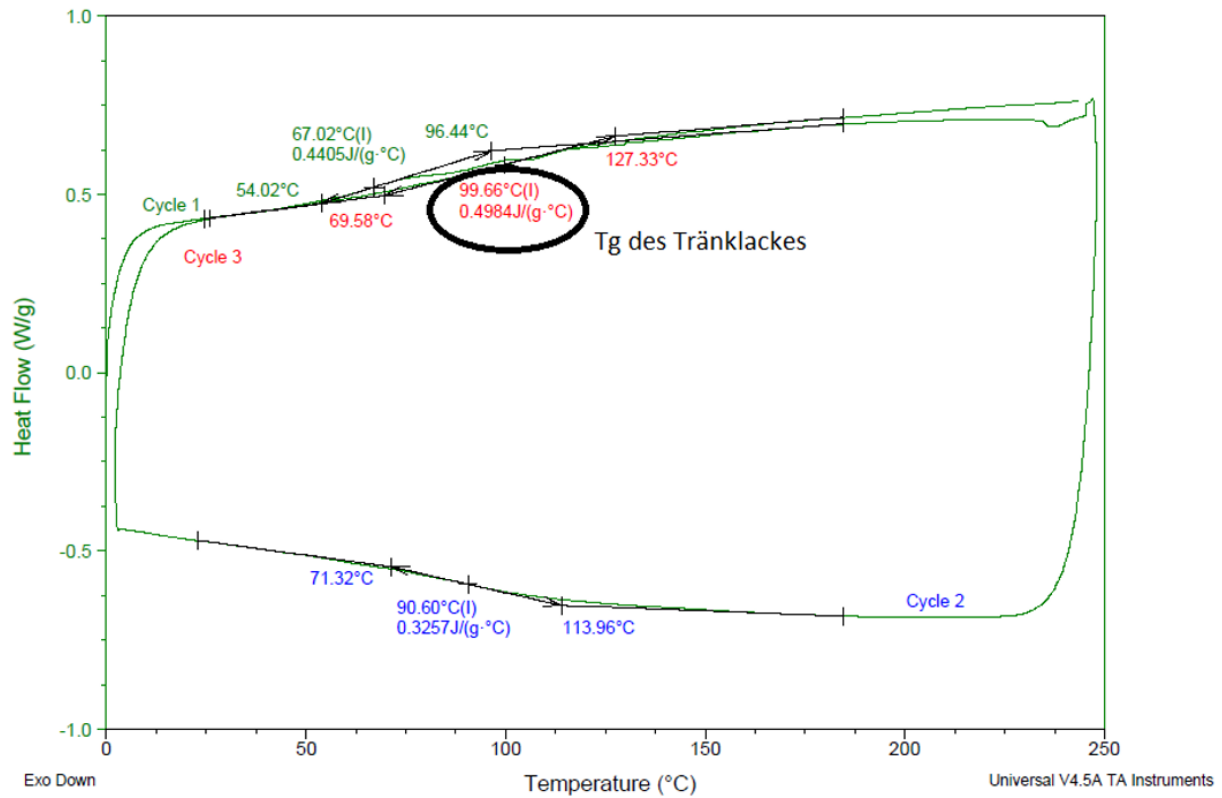


Abbildung 5-11: DSC-Kurve des UP-Tränklackes (T_g = Glasübergangstemperatur)

Aus den Messkurven konnte eine Glasübergangstemperatur von rund 100 °C für den Tränklack bestimmt werden. Bei einer Temperatur von 100 °C liegt demnach der Übergang zu einem zähflüssigen Aggregatzustand. Die ermittelte Temperatur diente als Ausgangstemperatur für die Versuchsreihe zum Entfernen der Kupferstränge nach einer thermischen Vorbehandlung.

Die Thermogravimetrische Analyse wurde genutzt, um die Temperatur zu bestimmen, bei der sich der UP-basierte Tränklack zersetzt und in die Gasphase übergeht. Abbildung 5-12 zeigt die aufgenommene TGA-Kurve.

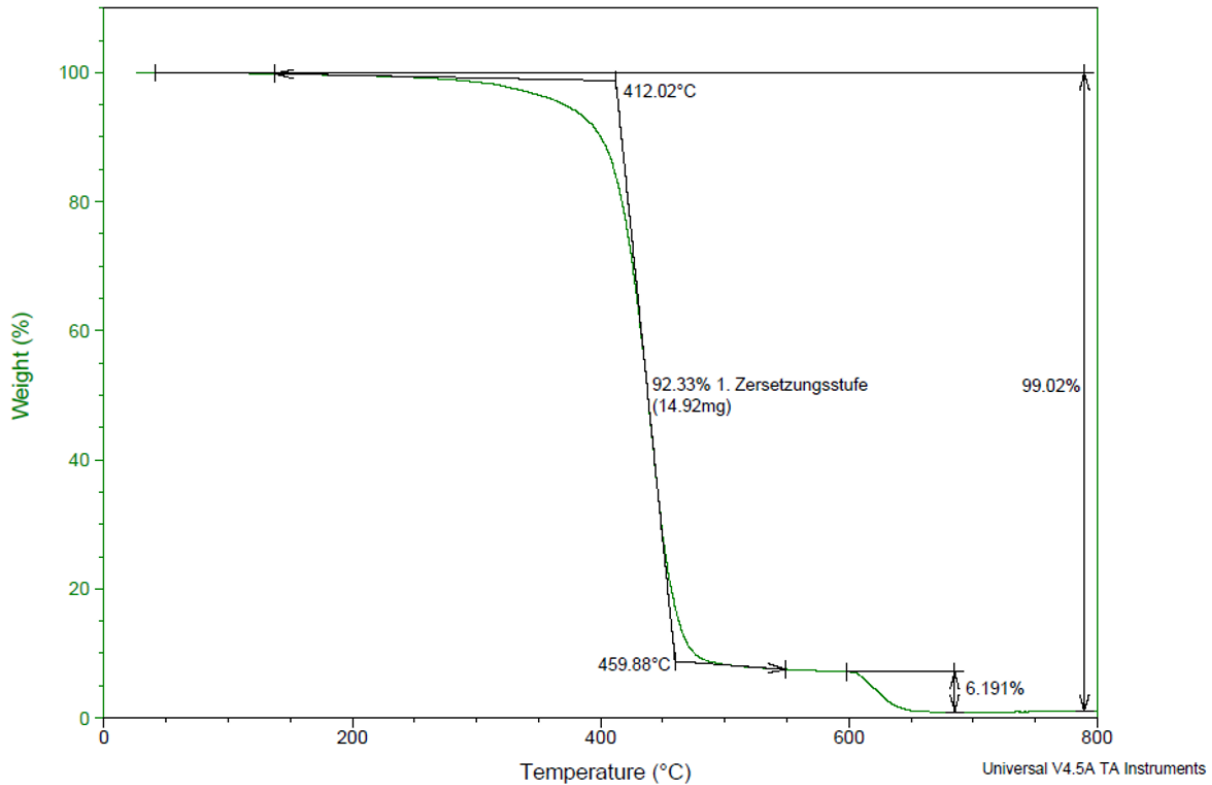


Abbildung 5-12: TGA-Kurve des UP-Tränklackes

Die meisten Polymere zersetzen sich unter inerten Bedingungen innerhalb eines Temperaturbereiches von 400 °C bis 600 °C [Grellmann et al. 2011]. Die Kurve zeigt bei 412 °C einen abrupten Massenverlust von 92,33 % der Probe, was auf die Zersetzung des Tränklackes schließen lässt. Die Zersetzungstemperatur liegt demnach im unteren Bereich der für Polymere üblichen Zersetzungstemperaturen und ist im Hinblick auf den zur Zerlegung der Statoren maximal nötigen Energieeinsatz positiv zu bewerten.

Neben der Festlegung der Minimaltemperatur für die thermische Vorbehandlung wurde auch bezüglich der einzusetzenden Zugkraft im Vorfeld Einschränkungen unternommen. Es wurde eine maximal zulässige Zugkraft von 3000 N gewählt. Die Zugkraft wurde auf diesen Wert limitiert, da dies eine deutliche Verringerung der notwendigen Zugkraft im Vergleich zur rein mechanischen Separation darstellt und leicht in einer späteren praktischen Anwendung implementierbar ist.

Die Dauer der thermischen Behandlung wurde auf 15 Minuten festgelegt, da in diesem Zeitraum aufgrund der guten thermischen Leitfähigkeit der Metalle auch im Kern der Statoren das eingestellte Temperaturniveau erreicht sein sollte.

Bei der Ergebnisauswertung war wiederum zu beachten, dass die zum Entfernen der Kupferstränge notwendige Zugkraft von der Kontaktfläche zwischen dem Blechpaket und den Kupfersträngen abhängt. Für die anschließende Auswertung wurde daher eine Normierung auf die pro Quadratzentimeter Kontaktfläche notwendige Kraft vorgenommen. Diese Normierung ermöglicht zudem den Vergleich der Versuchsergebnisse aus den drei Herangehensweisen „ohne Vorbehandlung“, „thermische Vorbehandlung“ sowie „chemische Vorbehandlung“. Eine Übersicht wird in Tabelle 5-7 auf Seite 103 gegeben.

Zusammenfassend wurden folgende Rahmenbedingungen für die Versuchsreihe der thermischen Vorbehandlung gesetzt:

Anfangstemperatur:	$T_0 = 100 \text{ °C}$
Temperaturintervall:	$\Delta T = 25 \text{ °C}$
Zeitintervall:	$\Delta t = 15 \text{ min}$
Maximale zulässige Zugkraft:	$F_{\max} = 3000 \text{ N}$

Folgend wird eine Erfahrungsbeschreibung der Zugversuche unter thermischer Vorbehandlung im Temperaturbereich von 100–175 °C gegeben. Zu beachten ist dabei die Angabe der nötigen Zugkräfte zum Entfernen aller in einem Stator befindlichen Kupferstränge. Dies ist im Hinblick auf die Auslegung der Maschinen in einer Demontagefabrik von Bedeutung. Zusätzlich werden auf die Flächeneinheit normierte Werte angegeben, um die Vorbehandlung unabhängig von der Motorbauweise bewerten zu können. Eine Übersicht wird anschließend in Tabelle 5-5 gegeben:

T_0 : Im ersten Versuch wurde ein Stator über eine Zeit von 15 Minuten einer Temperatur von 100 °C ausgesetzt. Der anschließende Zugversuch hat gezeigt, dass die Temperatur für die gewählten Vorbedingungen nicht ausreichend war, da bei Erreichen von 3000 N Zugkraft die von den Zugklemmen erfassten Kupferstränge nicht entfernt werden konnten.

T_1 : Nach der Vorbehandlung bei 125 °C konnten bei einer hochgerechneten Zugkraft von 2600 N (20,5 N/cm²) sämtliche Kupferstränge herausgezogen werden. Die Vorbehandlung bei 125 °C wurde zur Überprüfung des Ergebnisses auf einen weiteren Stator angewendet. Bei diesem Gerät konnte ein einzelner Kupferstrang einem Kraftaufwand von 900 N herausgezogen werden. Hochgerechnet auf die Anzahl von 36 Strängen wären demnach 32400 N (27 N/cm²) erforderlich gewesen, um in einem Arbeitsschritt alle Stränge zu entfernen.

T_2 : Eine Vorbehandlung von $T_2 = 150 \text{ °C}$ resultierte in einer notwendigen Zugkraft von 1800 N (1,5 N/cm²) für denselben Stator, welcher bei der 25 K geringeren Behandlungstemperatur 32400 N (27 N/cm²) erreichte. Für einen weiteren Stator ist bei dieser Temperatur eine Zugkraft von etwa 2550 N (2,5 N/cm²) gemessen worden.

T_3 : Nachdem der gerade genannte Stator einer Temperatur von 175 °C ausgesetzt wurde, konnten alle Kupferstränge mit einer Zugkraft von 600 N (0,5 N/cm²) entfernt werden. Ein weiterer Stator erreichte die gleiche Zugkraft von 600 N, was jedoch aufgrund der geringeren Kontaktfläche eine normierte Kraft von 1,5 N/cm² ergab.

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Zugversuche nach thermischer Vorbehandlung der Statoren

Temperatur	Kraft [N]	Anzahl Nuten	Länge [cm]	Kontaktfläche [cm ²]	Benötigte Kraft pro Kontaktfläche [N/cm ²]
125 °C	2600	16	2,5	126	20,5
125 °C	32400	24	16	1206	27,0
150 °C	1800	24	16	1206	1,5
150 °C	2550	36	9,5	1074	2,5
175 °C	600	36	9,5	1074	0,5
175 °C	600	24	5	376	1,5

Die folgenden Abbildungen 21 a) und b) zeigen einen Stator während und nach dem Zugversuch, nachdem eine thermische Vorbehandlung bei 175 °C angewendet wurde.

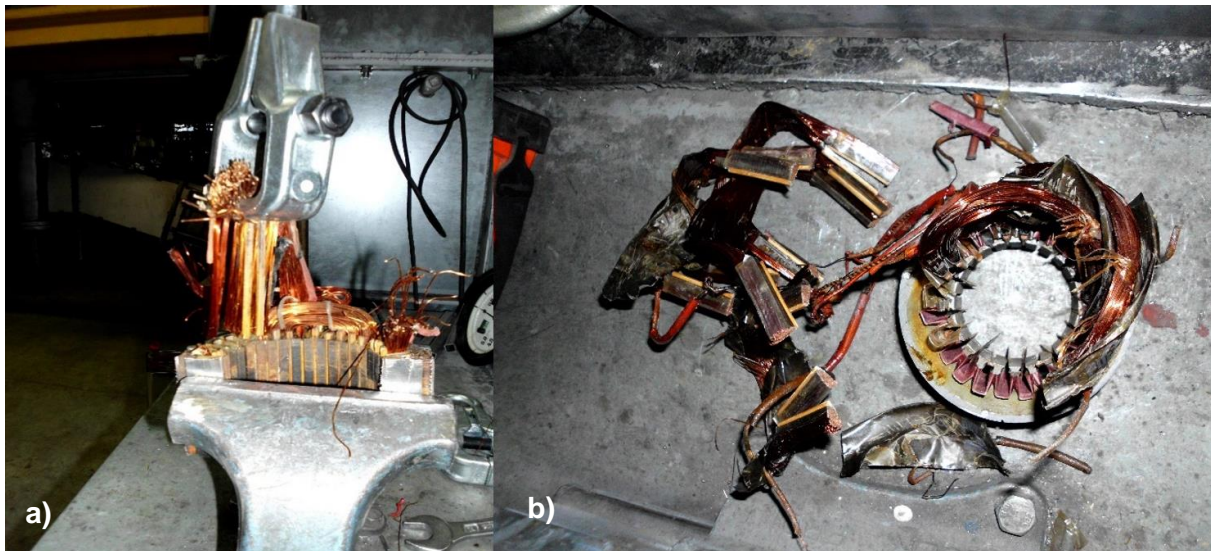


Abbildung 5-13: a) Beispiel eines Zugversuches nach thermischer Behandlung, b) Stator und Wicklungen nach dem Zugversuch

Durch die Behandlung bei 175 °C über 15 min sind weder das Polymer am Kupferkabel noch der Tränklack pyrolisiert oder verbrannt. Eine Oxidation des Kupfers kann somit bei dieser Behandlungsmethode ausgeschlossen werden. Das Ziel einer Einsparung der Inertisierung wurde erreicht, dementsprechend kann eine Temperatur von 175 °C als zielführend angesehen werden.

Chemische Vorbehandlung

Folgend werden die Ergebnisse der Lösemittelversuche zur Ermittlung geeigneter Betriebsparameter für die chemische Vorbehandlung von tränklackierten Statoren dargestellt. Abbildung 5-14 zeigt die Proben nach Ende der Lösungsversuche bei 20 °C unter Verwendung der organischen Lösemittel.



Abbildung 5-14: Proben nach dem Lösemittelversuch mit organischen Lösemitteln bei Zimmertemperatur

Die Probenansätze wiesen nach 24 Stunden keine optischen Veränderungen auf, was darauf schließen lässt, dass keine starke Auflösung der Proben stattfand. Die Massenbilanz (Tabelle 5-6) bestätigt diese Beobachtung. Sämtliche Proben wiesen einen Gewichtsverlust von $<0,3\%$ auf. Eine Ausnahme bildet die in Diethylenglykolmonomethylether gelöste Probe. Entgegen der Erwartungen zeigte diese Probe nach dem Versuch sogar eine Gewichtszunahme von knapp 3% .

Bei dem Lösemittelversuch bei einer Temperatur von $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ traten erste optische Veränderungen der Versuchsansätze bereits nach einer Behandlungszeit von nur 60 Minuten auf. Es konnten deutliche Verfärbungen bei der Kalilauge und der Natronlauge beobachtet werden. Abbildung 5-15 zeigt die Ergebnisse aus den Lösemittelversuchen nach 24 Stunden bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nach der Trocknung der Proben war nach diesem Versuch zudem ein Unterschied zwischen den mit den Laugen behandelten Proben und den mit organischen Lösemitteln optisch feststellbar (Abbildung 5-16). In welchem Ausmaß die Proben von den Lösemitteln angegriffen wurden, konnte wiederum über die Massenbilanz bestimmt werden (Tabelle 5-6).

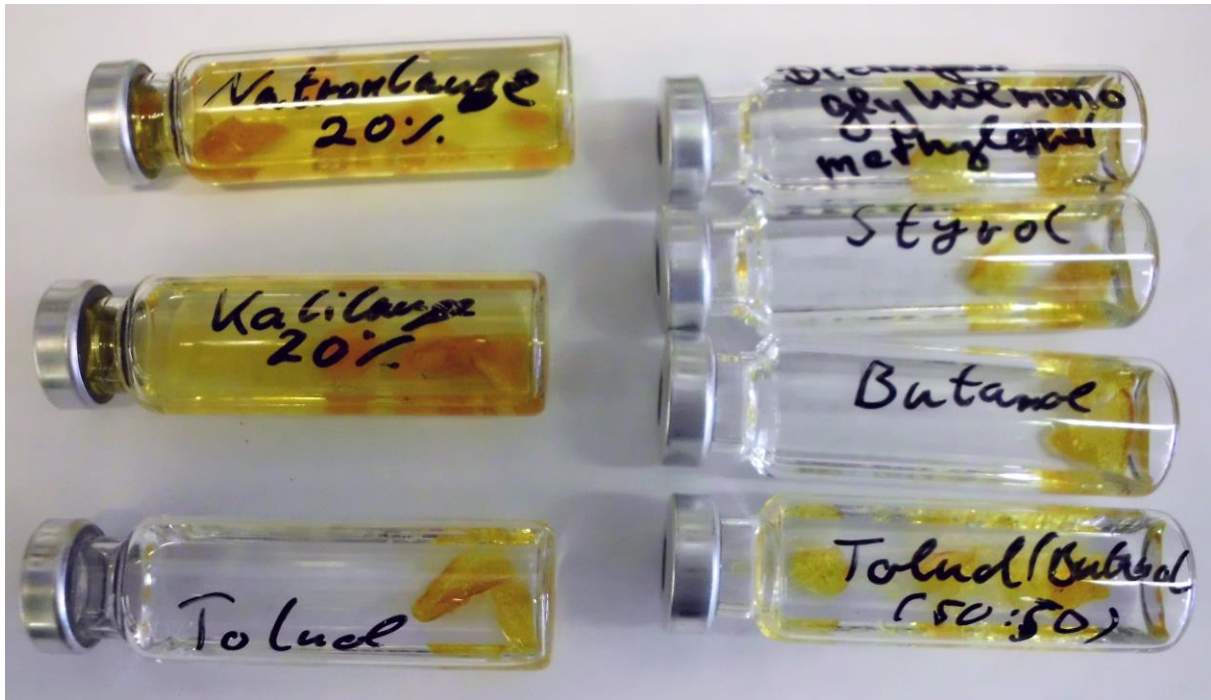


Abbildung 5-15: Proben nach dem Lösemittelversuch bei 60 °C



Abbildung 5-16: Getrocknete Tränklackproben nach dem Lösemittelversuch bei 60 °C

Tabelle 5-6: Massenbilanzen der Lösemittelversuche nach 24 h

Lösemittel	20°C		60°C	
	ΔM [g]	ΔM [%]	ΔM [g]	ΔM [%]
Aceton	0,0012	0,1412	-	-
Butanol	-0,0024	-0,2868	0,0048	0,5781
Diethylether	-0,0004	-0,0499	-	-
Diethylenglykolmonomethylether	0,0250	2,9421	0,0136	1,5939
Kalilauge (20 %)	-	-	-0,1280	-15,2417
Natronlauge (20 %)	-	-	-0,0396	-4,4422
Styrol	-0,0007	-0,0817	0,0215	2,5127
Toluol	-0,0012	-0,1380	0,0057	0,6581
Toluol/Butanol (50:50)	-0,0020	-0,2391	0,0095	1,1390

Die Massenbilanzen der Versuche bei 60 °C zeigen, dass auch bei dieser Temperatur nur die Laugen als potenzielle Lösemittel geeignet sind. Die organischen Lösemittel zeigten bei der erhöhten Temperatur durchweg eine geringe Massenzunahme. Diese kann durch die Eigenschaft hydrophober Polymere zum Aufquellen unter Einfluss organischer Lösemittel erklärt werden. Die Lösemittel lagern sich dabei in die dreidimensionale Polymerstruktur derart ein, dass eine vollständige Entfernung durch Trocknung einen sehr langen Zeitraum erfordert. Die mit Lauge versehenen Ansätze wiesen eine Massenreduktion von etwa 4,5 % bei der Natronlauge und 15 % bei der Kalilauge auf.

Anhand der Daten aus den Vorversuchen wurde daher 20 %ige Kalilauge als Lösemittel für weitergehende Versuche ausgewählt. Der Löseversuch mit einem demontierten Stator ist in der nachfolgenden Abbildung 5-17 zu sehen. Diese zeigt den Stator in Kalilauge zu Beginn und am Ende des Versuches. Wie erwartet zeigte die Verfärbung des Lösemittels deutlich den erfolgreichen Angriff des Tränklackes.

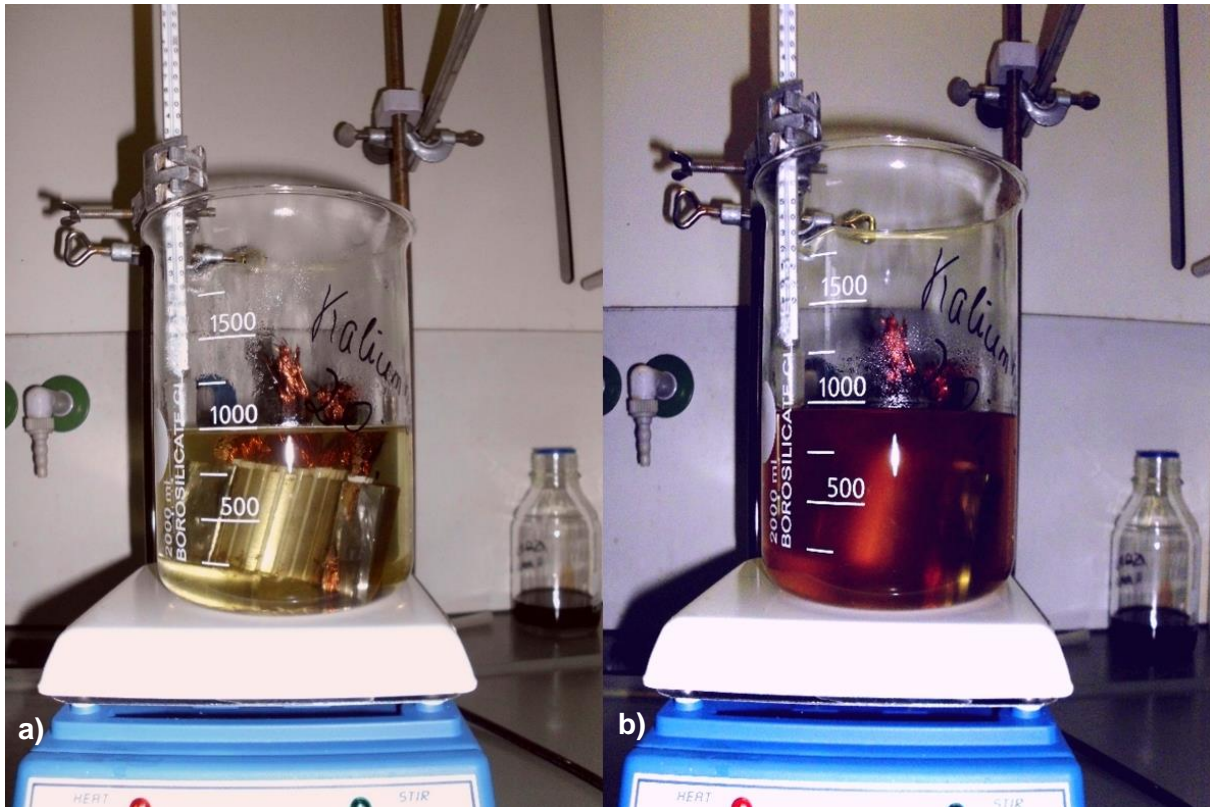


Abbildung 5-17: Laugungsversuch eines Stators, a) zu Beginn der chemischen Vorbehandlung, b) zum Ende der chemischen Vorbehandlung

Die im anschließenden Zugversuch gemessene Zugkraft betrug hochgerechnet auf alle Kupferstränge weniger als 900 N. Einzelne Stränge konnten nach der Kalilaugebehandlung auch per Hand entfernt werden.

Die Ergebnisse der drei Separationsmethoden sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst.

Tabelle 5-7: Übersicht der Ergebnisse der Zugversuche für die Kupferstränge (rein mechanisch sowie mit thermischer und chemischer Vorbehandlung)

Bedingungen	Kraft [N]	Anzahl Nuten	Länge [cm]	Kontaktfläche [cm ²]	Benötigte Kraft pro Fläche [N/cm ²]
rein mechanisch	23400	36	5,5	622,04	37,62
125 °C	2600	16	2,5	125,66	20,69
125 °C	32400	24	16	1206,37	26,86
150 °C	1800	24	16	1206,37	1,49
150 °C	2550	36	9,5	1074,42	2,37
175 °C	600	36	9,5	1074,42	0,56
175 °C	600	24	5	376,99	1,59
KOH, 60 °C	900	24	5,5	414,69	2,17
KOH, 60 °C	900	24	3,5	263,89	3,41

Der Zugversuch ohne vorbehandelten Stator zeigt, dass ein enormer Kraftaufwand (spezifische Zugkraft von etwa 38 N/cm² Kontaktfläche) notwendig ist, um die Kupferwicklungen zu entfernen. Die Machbarkeit ist gegeben, jedoch ist eine effizientere Methode anzustreben – gerade auch im Hinblick auf die in der Demontagefabrik zu erwartenden größeren Elektromotoren.

Die Versuchsreihen zur thermischen Vorbehandlung haben gezeigt, dass eine Mindesttemperatur von 150 °C zu empfehlen ist. Unter dieser Bedingung scheint der Tränklack eine ausreichend niedrige Viskosität zu haben, um die erforderliche Zugkraft deutlich zu reduzieren. Durch die thermische Vorbehandlung konnte die notwendige Zugkraft so auf unter 2,5 N/cm² gesenkt werden.

Durch eine chemische Vorbehandlung konnte die notwendige Zugkraft zusätzlich reduziert werden. Um alle Kupferstränge gleichzeitig aus dem Blechpaket zu ziehen, wurde nach der Vorbehandlung mit 20 %iger Kalilauge eine spezifische Zugkraft von weniger als 3,5 N/cm² benötigt.

Sowohl nach der thermischen als auch nach der chemischen Vorbehandlung konnte das Kupfer mit deutlich geringerer Zugkraft aus dem Eisenkern separiert werden. Beide Verfahren haben daher das Potenzial, den Demontageprozess zu vereinfachen. Das Kupfer konnte erfolgreich aus dem Eisenkern entfernt werden ohne diesen zu zerstören und kann daher im Anschluss hochwertig pyrometallurgisch recycelt werden. Das Blechpaket kann unter Umständen direkt einer Wiederverwendung zugeführt werden oder aber in die Eisenfraktion gegeben werden.

Ein Nachteil der chemischen Vorbehandlung ist der notwendige Einsatz eines Lösemittels. Nachfolgende Untersuchungen müssen klären, ob die Kalilauge regeneriert werden kann. Diesbezüglich ist zukünftig auch der dafür erforderliche Aufwand (Wasser, Energie etc.) zu untersuchen. Erst danach kann ein ökologischer und ökonomischer Vergleich zwischen diesen beiden Verfahren getroffen werden. Die ermittelten Daten würden die Demontagezeit bei thermischer Vorbehandlung um etwa 15 und bei chemischer Vorbehandlung um etwa 60 Minuten erhöhen. Die Machbarkeit der Verfahren konnte bestätigt werden, weitere Prozessoptimierungen hinsichtlich des erforderlichen Zeitaufwandes sind jedoch zukünftig zu empfehlen.

Bezüglich der Zugversuche ist zu beachten, dass die verwendeten Klemmen aufgrund des begrenzten Platzes an den Kupferschlaufen keine optimale Kraftübertragung ermöglicht haben. Kleinere geeignete Zugklemmen waren nicht am Markt erhältlich. So konnte lediglich an einer kleinen Anzahl der Kupferstränge gleichzeitig gezogen werden. Für die praktische Umsetzung in einer Demontagefabrik wäre der Einsatz vieler kleiner Klemmen oder einer für diese Anwendung speziell konstruierten Klemme (für variierende Kreisdurchmesser einsetzbar) denkbar. So könnte eine zeitgleiche Entfernung aller Kupferstränge realisiert werden.

5.1.2.2 Ergebnisse der Demontage von Fahrradnabendynamos

Für die Demontageversuche mit Fahrradnabendynamos wurden insgesamt 13 Exemplare herangezogen. Diese gehörten zu sechs unterschiedlichen Modelltypen. Von dem Modelltypus DH-3N31-QR wurden insgesamt 8 Exemplare zerlegt, um eine Vergleichbarkeit der Demontagezeiten bei identischen Modellen zu erreichen. Tabelle 5-8 zeigt die

Gesamtmassen der verschiedenen Modelltypen. Aufgrund des leicht möglichen Verlustes der bei einigen Modelltypen verbauten Schnellspanner wurden diese nicht in die Betrachtungen einbezogen

Table 5-8: Masse der Nabendynamos nach Modelltyp

Typ	Gesamtmasse [g]
Shimano DH-3D37-QR	683
Shimano DH-3N20	704
Shimano DH-3N31-QR	685
Shimano DH-3N80	575
Shimano DH-S701	492
Shimano Nexus HB-NX10	1003

Die Massen der untersuchten Nabendynamos decken einen Bereich von 492–1003 Gramm ab. Die Gesamtmassen der vergleichsweise teureren Modelltypen DH-s701 und DH-3N80 sind erwartungsgemäß deutlich niedriger, da Leichtbau im Fahrradbereich im Allgemeinen mit höheren Kosten verbunden ist.

Die bei der Demontage der Fahrradnabendynamos erhaltenen Fraktionen waren:

- ▶ Kupferdraht
- ▶ Eisenschrott
- ▶ Aluminiumschrott
- ▶ Mischschrott
- ▶ Kunststoffe
- ▶ Magnetmaterial.

Abbildung 5-18 zeigt die separierten Fraktionen. Die Abbildung zeigt zusätzlich zu den aus einem einzelnen Gerät entnommenen Teilen ein zweites Spulenmaterial. Bei einigen Dynamos wurde als Spulenmaterial nicht Kupfer-, sondern Aluminiumdraht verbaut. In allen demontierten Nabendynamos war Permanentmagnetmaterial in den Rotoren verbaut.

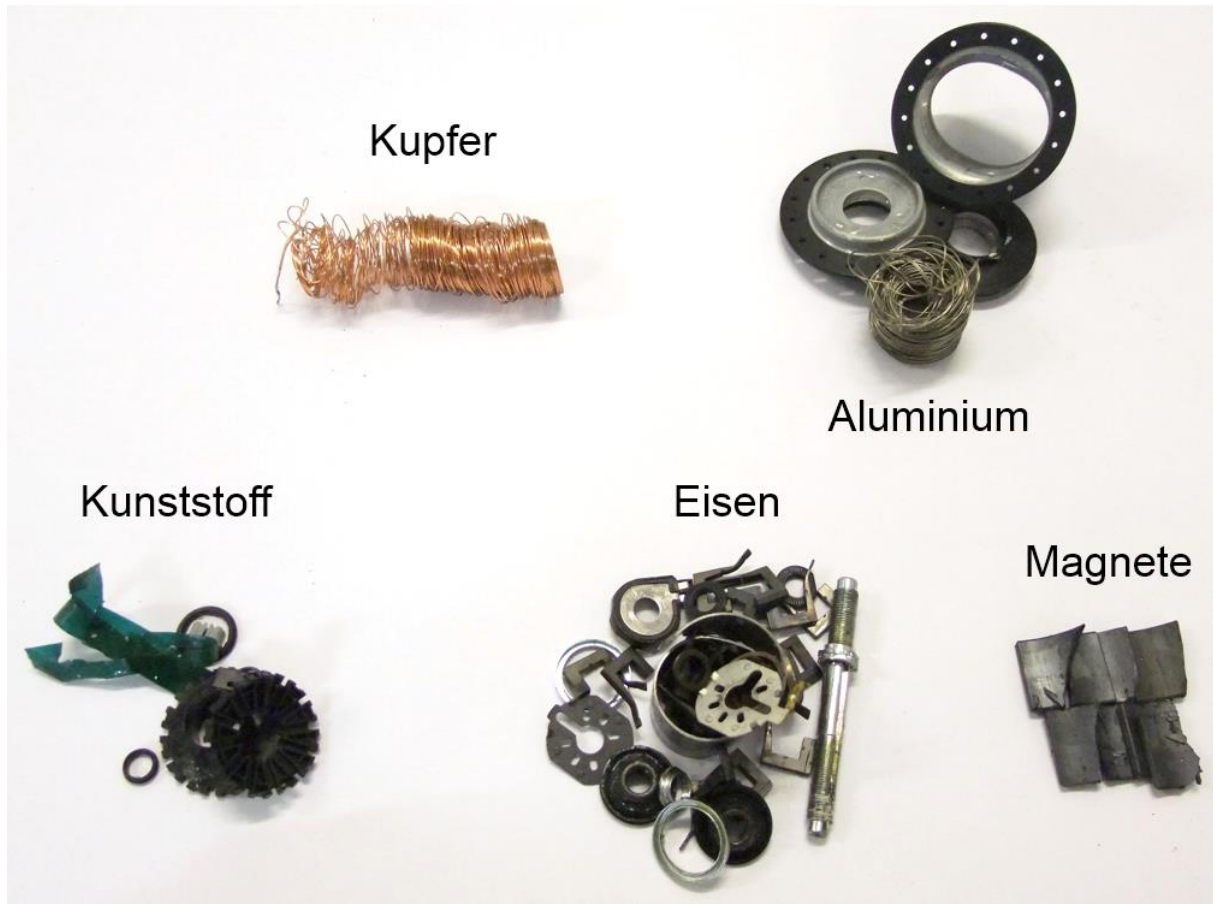


Abbildung 5-18: Separierte Werkstoffgruppen aus demontierten Fahrradnabendynamos (Teile aus einem Exemplar plus Kupferspule aus einem weiteren Modell)

Aus den Demontageversuchen konnte sowohl die Massen- als auch die Zeitbilanz ermittelt werden. Abbildung 5-19 zeigt die Massenbilanzen der unterschiedlichen Fahrraddynamomodelle.

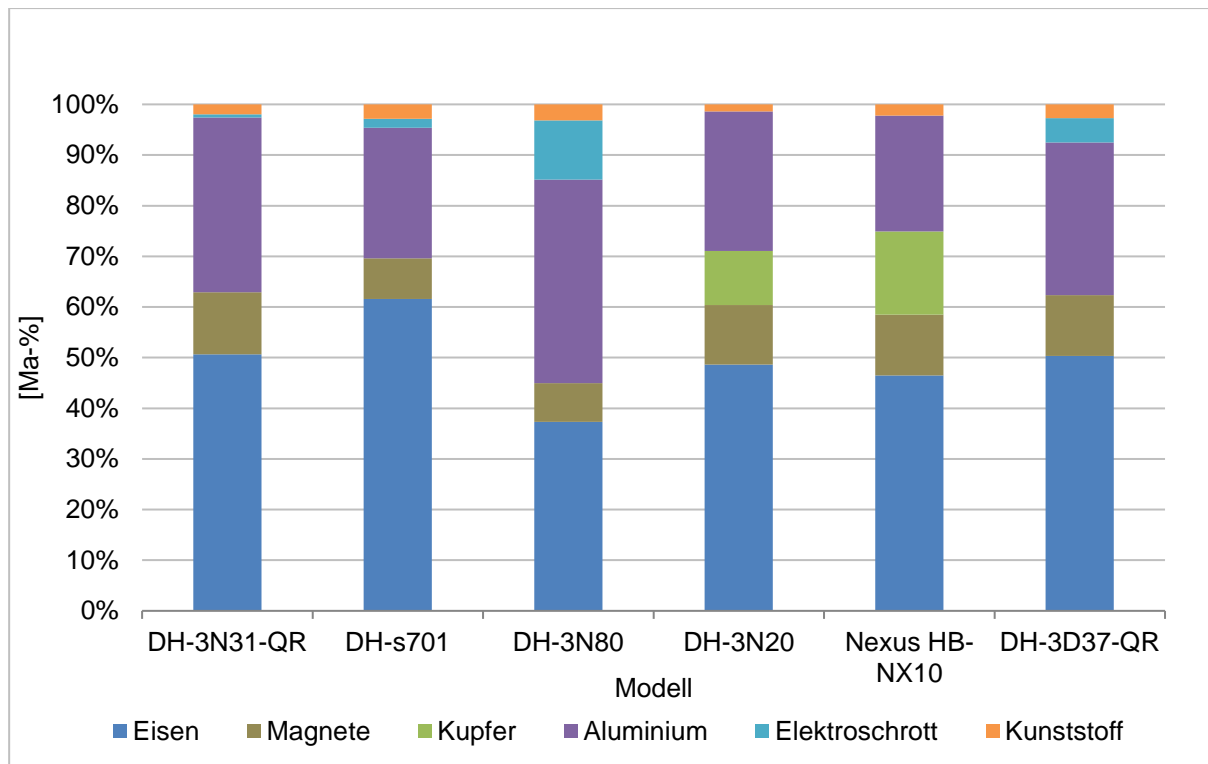


Abbildung 5-19: Massenbilanzen der in den Demontageversuchen zerlegten Fahrraddynamo-Modelle des Herstellers Shimano

Die Eisen- und die Aluminiumfraktionen haben deutlich den stärksten Massenanteil. Lediglich bei zwei Modellen war Kupferdraht als Spulenmaterial verbaut. Tabelle 5-1 zeigt die Mittelwerte der Massen und der prozentualen Massenanteile der aus den Fahrradnabendynamos demontierten Werkstofffraktionen.

Tabelle 5-9: Mittelwerte der Massen und prozentualen Massenanteile der aus den Fahrradnabendynamos demontierten Werkstofffraktionen

Werkstofffraktion	Mittelwerte	
	Masse [g]	Massenanteil [%]
Magnete	75	10,9
Kupfer	40	5,8
Aluminium	203	29,5
Eisen	334	48,7
Kunststoff	16	2,3
Mischschrott	19	2,7

Die Eisenfraktion bildet mit durchschnittlich etwa 47 Ma-% den größten Anteil der Gesamtmasse. Darauf folgt Aluminium mit durchschnittlich etwa 30 Ma-%. In den untersuchten Dynamos trugen die Magnete zu etwa 11 % zur Gesamtmasse bei. Deren Materialzusammensetzung ist in Kapitel 5.1.2.5 gegeben.

Die untersuchten Geräte waren einander in Aufbau und Größe sehr ähnlich. Die eng beieinander liegenden Demontagezeiten stehen in direktem Zusammenhang dazu. Dies ermöglichte eine sicherere Bilanzierung der zu erwartenden Mengen im Hinblick auf die Planung einer Demontagefabrik. Die Demontagezeiten sind in Abbildung 5-20 graphisch, in Reihenfolge der durchgeführten Demontagen dargestellt.

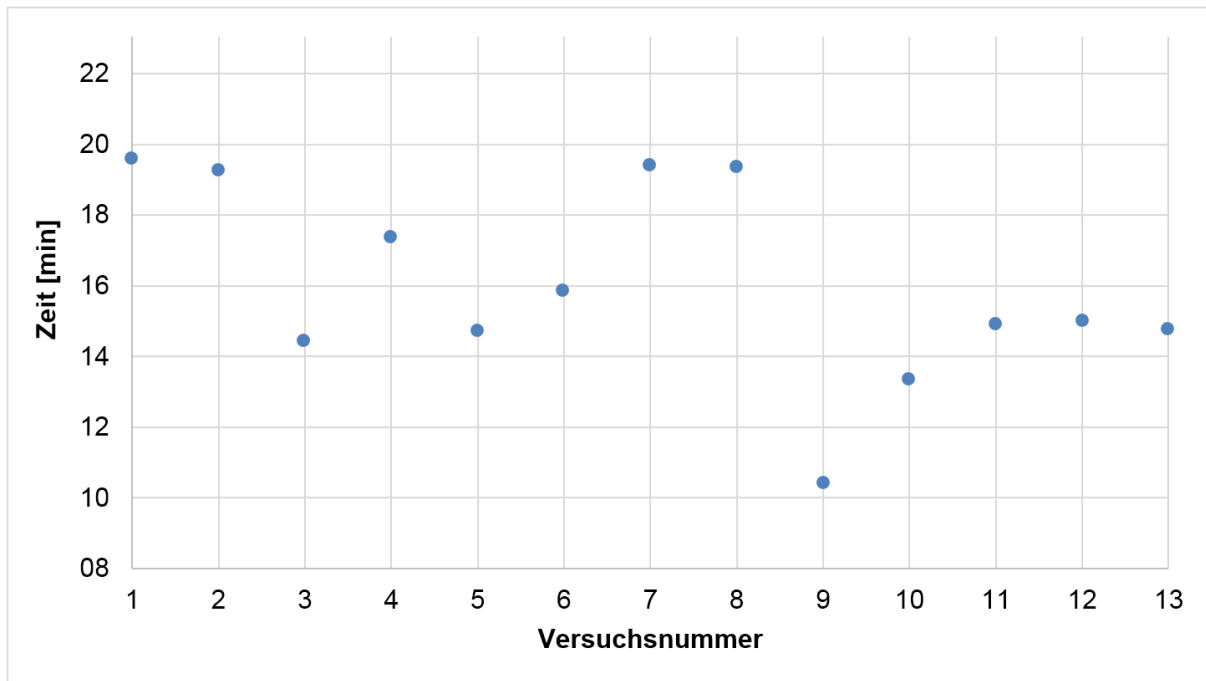


Abbildung 5-20: Zeitbilanz der Demontageversuche an Fahrraddynamos

Die durchschnittliche Demontagezeit lag für die Versuche bei etwa 16 Minuten. Zwei Arbeitsschritte konnten als besonders zeitaufwendig identifiziert werden. In Arbeitsschritt 4 musste eine Mutter von der Welle geschraubt werden. Während der Demontageversuche wurde dazu ein Mutternschlüssel verwendet. An einem spezialisierten Demontageplatz sollte stattdessen ein Druckluftschrauber mit entsprechendem Aufsatz verwendet werden.

Der zweite zeitintensive Schritt ist die Zerlegung des Rotors. Die einzelnen Eisenwinkel wurden während der Demontage händisch aus dem Kunststoffhalter gelöst. Da die größten Unterschiede in der Konstruktionsweise des Rotors bestehen, ist an dieser Stelle eine Automatisierung der Demontage erschwert. Die Anwendbarkeit einer robotergestützten Lösung ist zukünftig zu prüfen. Die Demontage hat gegenüber der maschinellen Zerkleinerung den Vorteil, dass sowohl der Kunststoffhalter, als auch das Kabel zerstörungsfrei demontiert werden können.

5.1.2.3 Ergebnisse der Demontage elektrischer Fahrradantriebe

Es wurden insgesamt zwölf elektrische Fahrradantriebe demontiert. Darunter waren sieben baugleiche Exemplare vom Modell dmg-movement SYM-36-25X. Aus den Versuchen konnte eine Massenbilanz über alle Modelle erstellt werden. Hierbei muss zwischen Antrieben mit Getriebe und getriebelosen Geräten unterschieden werden. Bei letzteren konnte keine tiefere Separation des kupferhaltigen Stators durchgeführt werden, weshalb die

Massenbilanz sich hierbei auf die Bauteilebene beschränkt. Für Geräte mit Getriebe liegt eine detaillierte Aufschlüsselung in die einzelnen Werkstofffraktionen vor. Über die Zerlegung der modellgleichen Geräte war es zudem möglich, ähnliche Arbeitsschritte zu definieren und zeitlich zu bilanzieren. Tabelle 5-10 zeigt die Ausgangsmassen der zerlegten Antriebsmotoren.

Tabelle 5-10: Ausgangsmassen der E-Bike-Antriebe

Modellbezeichnung	Ausgangsmasse [g]	Konstruktion
AKM15012148873/BBE3628A	2079	Nabenmotor mit Getriebe
A362812099580	1996	Nabenmotor mit Getriebe
Sram Sparc	2988	Nabenmotor mit Getriebe
PANASONIC NUA035HB	3757	Mittelmotor mit Getriebe
Bosch 0275007006	4080	Mittelmotor mit Getriebe
dmg-movement SYM-36-25X	6560*	Nabenmotor ohne Getriebe

*Mittelwert aus den sieben zerlegten Exemplaren des Bautyps

Auffällig ist der deutliche Gewichtsunterschied zwischen dem leichtesten und dem schwersten Modell. Das schwerste Modell im Vergleich ist der Nabenantrieb ohne Getriebe. Tabelle 5-11 zeigt die Massenverteilung bezogen auf die wichtigsten Baugruppen. Unter die Fraktion Rest fallen dabei beispielsweise Schrauben, Lager, Gehäuse sowie Getriebeteile.

Tabelle 5-11: Massen und prozentuale Massenanteile der Baugruppen in den demontierten E-Bike-Antrieben

Modellbezeichnung	Rotor [g]	Stator [g]	Rest [g]	Rotor [%]	Stator [%]	Rest [%]
AKM15012148873/BBE3628A	204	373	1502	9,81	17,94	72,24
A362812099580	186	379	1431	9,32	19,00	71,69
Sram Sparc	166	320	2503	5,56	10,71	83,77
PANASONIC NUA035HB	211	1057	2489	5,62	28,13	66,25
Bosch 0275007006	411	0	3669	10,07	0,00	89,93
dmg-movement SYM-36-25X*	2059	3757	744	31,39	57,27	11,34

*Werte sind Mittelwerte aus den sieben zerlegten Exemplaren des Bautyps

Hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Geräten mit und ohne Getriebe zu erkennen. Dabei liegt die Ursache hauptsächlich in der Größe des verbauten Elektromotors und der daraus resultierenden Stator- und Rotormasse. Das Getriebe hingegen besteht aus Kunststoffzahnradern, welche nur einen geringen Anteil an der Masse haben. Abbildung 5-21 zeigt die beiden Bauteile zum Vergleich bei einem getriebelosen Nabenantrieb und einem Nabenantrieb mit integriertem Getriebe.

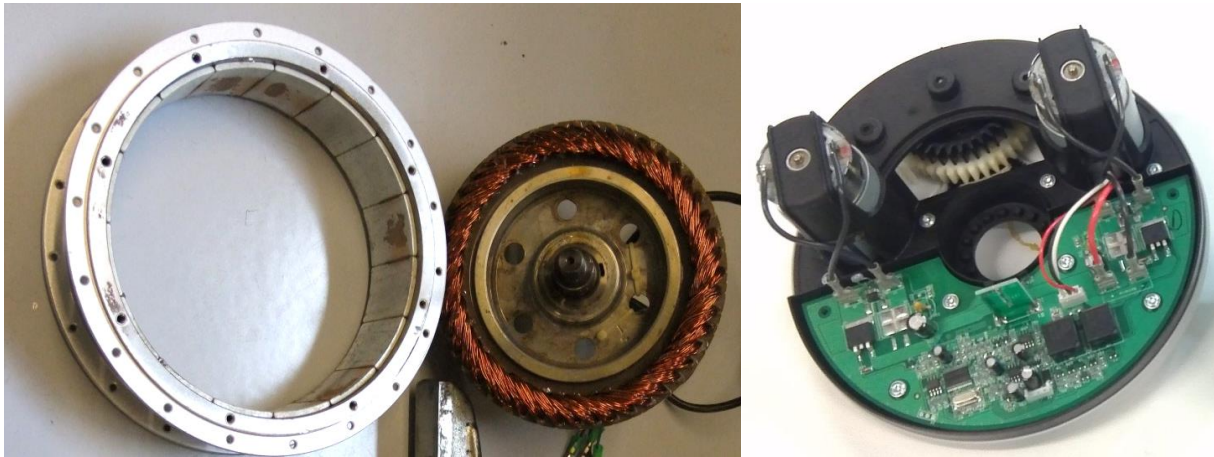


Abbildung 5-21: Beispielhafte Darstellung eines Nabenantriebes ohne Getriebe (links) und eines Nabenantriebes mit Getriebe und integrierter Elektronik (rechts)

Eine detaillierte, nach demontierten Fraktionen aufgeschlüsselte Massenbilanz ist zur Übersicht in Abbildung 5-22 dargestellt.

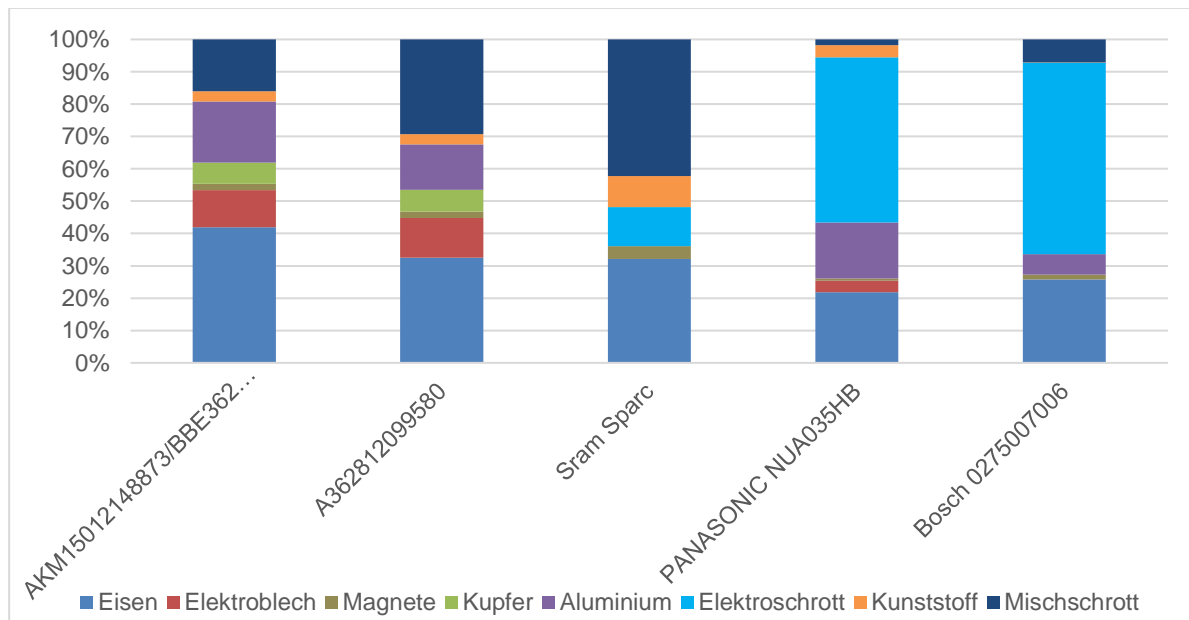


Abbildung 5-22: Massenbilanz der in den Demontageversuchen zerlegten E-Bike-Antriebe

Generell ist die Massenbilanz der Antriebe ähnlich den Massenbilanzen der Industrie-Elektromotoren sowie der Fahrrad-Nabendynamos. Auch hier stellt die Eisenfraktion etwa ein Drittel der Gesamtmasse. Prozentual sind die Magnete bei den Fahrradantrieben im Vergleich mit den Nabendynamos von geringerer Bedeutung.

Für die drei untersuchten Modelle von Sram, Bosch und Panasonic sind einige Besonderheiten zu beachten, die eine 100 %ige Separation der enthaltenen Werkstoffe mittels Demontage unmöglich machten. Dies führte zu einer Verzerrung der Werte für die einzelnen Werkstoffe hin zu Mischfraktionen wie Elektroschrott und Mischschrott. Dabei handelt es sich um folgend dargestellte Schwächen bezüglich eines recyclinggerechten Designs.

Panasonic NUA035HB: Bei diesem Modell war der Stator komplett in Kunststoff gegossen. So war weder das Kupfer, noch der Eisenkern demontierbar. Dementsprechend ist der Stator als vollständiges Bauteil dem E-Schrott zuzuordnen und muss einer automatisierten Aufbereitung zugeführt werden. Daraus resultiert das kein Kupfer und nur ein geringer Prozentsatz Elektroblech (vom Rotor) in der Massenbilanz berücksichtigt ist.

Bosch 0275008006: Hier bildeten mehrere zusammengesteckte Segmente den Stator. Die Segmente waren wiederum in das Gehäuse geklebt. Auch nachdem das Gehäuse mit Hilfe eines Winkelschleifers geöffnet wurde, konnte kein Segment entnommen werden. Somit sind auch bei diesem Modell die Massen des Kupfers und Elektrobleches vom Stator im Elektroschrottanteil zu finden.

Sram Sparc: In diesem Antriebsmodell wurden zwei kleinere Elektromotoren verbaut, wie in Abbildung 5-21 rechts zu sehen ist. Die Motoren sind vergleichsweise klein. Dementsprechend sind auch die Bauteile Stator und Rotor kleiner als bei anderen Modellen. Die zwei Rotoren waren von kompakter Bauform und das enthaltene Kupfer konnte nicht händisch demontiert werden. Daher wurde nicht tiefergehend separiert, so dass Kupfer und Elektroblech dem E-Schrott zugerechnet wurden. Des Weiteren waren sämtliche Aluminiumbauteile mit Kunststoff und/oder Eisen so verbunden, dass keine saubere Aluminiumfraktion gewonnen werden konnte. Für die Sammlung dieser Aluminiumanteile bleiben somit verschiedene Optionen offen: Einerseits könnte es über die Mischschrott-Fraktion, andererseits mit dem bis dahin reinen Aluminiumschrott entsorgt werden. Eine dritte Option ist die Sammlung mit Eisen verunreinigten Aluminiums als separate Fraktion innerhalb der Demontagefabrik.

Hinsichtlich der späteren ökonomischen Bewertung wurde eine zeitliche Betrachtung der Demontagevorgängen vorgenommen. Daher ist bei jedem Demontageversuch die benötigte Gesamtzeit gestoppt worden. Zeitangaben über einzelne Schritte können nicht wiedergegeben werden, da sich die Demontagerihenfolge für die unterschiedlichen Modelle deutlich unterschied. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-12 dargestellt.

Tabelle 5-12: Demontagezeiten bis Rotor, Stator, Getriebe und Magnete separat vorlagen

Modellbezeichnung	Demontagezeit [mm:ss]
AKM15012148873/BBE3628A	29:33
A362812099580	19:25
Sram Sparc	25:57
PANASONIC NUA035HB	24:26
Bosch 0275007006	27:03
dmg-movement SYM-36-25X	09:27

Im Vergleich wurde für getriebelose Antriebe mit durchschnittlich etwa 9,5 Minuten Demontagezeit weniger als die Hälfte der Zeit benötigt als für Geräte mit Getriebe. Es ist zu beachten, dass sich für die sieben Geräte des Modells SYM-36-25X der Firma dmg-movement ein abnehmender Trend der Demontagezeiten eingestellt hat. Dies untermauert die Ergebnisse des wiederholten Demontageversuches der Fahrradnabendynamos. Da es sich bei den anderen Modellen um jeweils sehr unterschiedliche Konstruktionen handelte, ist hier

kein Routineeffekt ersichtlich. Allerdings kann angenommen werden, dass bei häufigem Zerlegen von gleichen oder ähnlichen Geräten die Zeiten weiter verkürzt werden können.

Aus den Demontageversuchen der sieben Geräte des Modells SYM-36-25X der Firma dmovement ist zusätzlich eine Zeitbilanz für die einzelnen nötigen Arbeitsschritte erstellt worden. Aus Tabelle 5-13 können die ermittelten Zeiten abgelesen werden.

Tabelle 5-13: Durchschnittliche Zeitbilanz der Demontageschritte eines getriebelosen Nabenantriebs

Arbeitsschritt	Demontagezeit [mm:ss]
Lösen der Schrauben	04:55
Entfernen der Seitenklappen	01:55
Abziehen des Magnetrings	01:17
Ausschlagen der Lager	01:21
Summe	09:28

Auch hier ist ein Zusammenhang zu den Demontageversuchen der anderen Stoffströme erkennbar. So wird für das Lösen der Schrauben mit 4:54 Minuten der größte Zeitaufwand benötigt. Auch hier könnte die benötigte Zeit durch einen spezialisierten Demontageplatz verringert werden. Zusätzliche Versuche haben gezeigt, dass die benötigte Zeit pro Schraube im Durchschnitt von neun auf fünf Sekunden verringert werden kann, wenn mit einem Akkuschrauber gearbeitet wird. So kann je nach Konstruktion zwischen dreißig Sekunden und fast zwei Minuten eingespart werden. Noch größer wird die Einsparung, wenn bei einem Altgerät Gebrauchsspuren wie Rost oder Verformungen auftreten, oder die Schrauben mit Schmierfett überzogen sind. In diesen Fällen erhöhte sich die notwendige Zeit zum Lösen der Schrauben um ein Vielfaches. Ein Akku- oder Druckluftschrauber mit passendem Aufsatz ist daher in jedem Fall zu empfehlen.

5.1.2.4 Ergebnisse der Demontage von Kleinmotoren aus Kfz

Im Rahmen der Demontageversuche wurden elf Kleinmotoren aus Kfz unterschiedlicher Hersteller untersucht, welche von Ersatzteihändlern erworben wurden. Es handelt sich demnach um Kleinmotoren, die heute schon standardgemäß aus Altfahrzeugen ausgebaut und bei noch vorhandener Funktionsfähigkeit als Ersatzteile weiterverwendet werden. Über eine Anfrage bei Kfz-Werkstätten bezüglich dort im Rahmen von Reparaturmaßnahmen anfallender defekter Kleinmotoren konnten dagegen keine Motoren zur Verfügung gestellt werden. Eine Übersicht der demontierten Motoren ist in Tabelle 5-14 aufgeführt.

Tabelle 5-14: Übersicht über die zerlegten Kleinmotoren aus Kfz

Zerlegte Klein- und Hilfsmotoren	Automarke
a) Wischermotor ³	Fiat
b) Gebläse Heizung/ Lüftung	VW/Audi
c) Fensterheber	Renault
d) Antenne	k.A.
e) Spiegeljustierung	Audi
f) Leuchtweitenregulierung	Opel und VW
g, h) Motorlüftung	VW und Mazda
i) Anlasser	Renault

Die Demontage erfolgte manuell unter Zuhilfenahme von gängigen Werkzeugen. Die Kleinmotoren sind je nach Einsatzbereich mit verschiedenen Halterungen und Anbindungen gekoppelt, welche in einem ersten Schritt zu entfernen waren. Diese nicht unmittelbar den Kleinmotoren zuzuordnenden Bestandteile wurden in der Darstellung der Zusammensetzung getrennt ausgewiesen (vgl. Abschnitt „Zusammensetzung“ in diesem Kapitel), da sie teilweise auch eine höhere Masse aufweisen als der eigentliche Motor (z. B. Antennenführung am Motor zum Aus- und Einfahren der Antenne, vgl. Abbildung 11-4). Dieser erste Demontageschritt war für den Großteil der Motoren mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich, für einige Motoren kam es jedoch auch zu einem deutlich erhöhten Demontageaufwand. Die Motoren wurden, wie bereits erwähnt, aus Gründen der Verfügbarkeit im Ersatzteihandel beschafft, weshalb diese noch mit den genannten Halterungen gekoppelt sind. Bei einer ausschließlichen Demontage von Kleinmotoren aus Kfz vorab würde dieser erste Arbeitsschritt in der Demontage der Motoren entsprechend entfallen.

³ Für Scheibenwischer an der Frontscheibe.

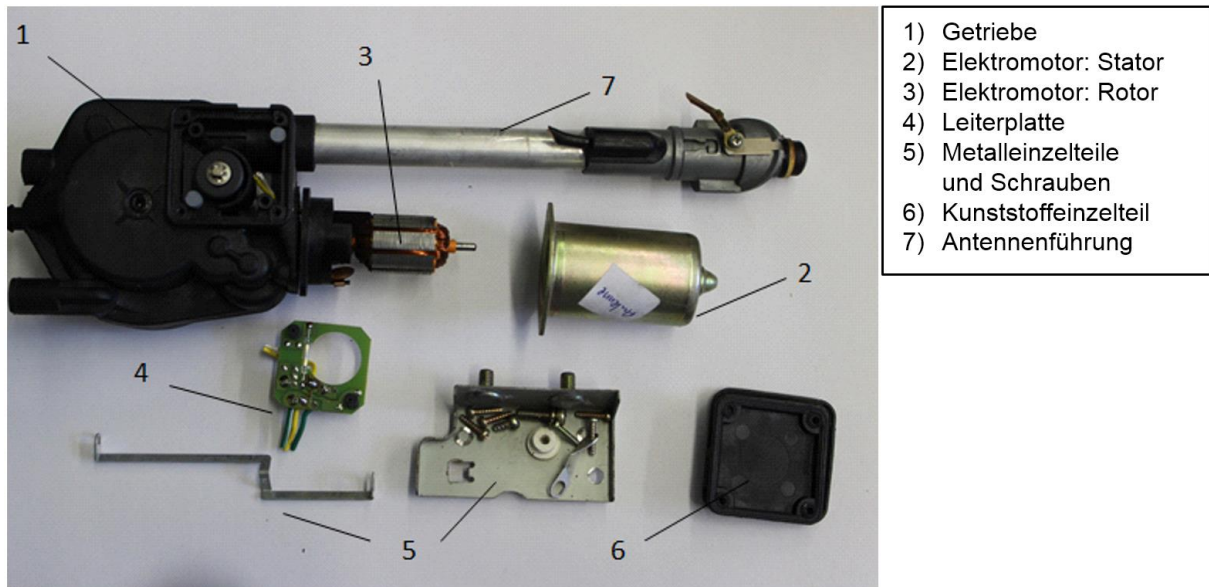


Abbildung 5-23: Demontierte Komponenten nach den ersten Zerlegungsschritten des Motors zum Aus- und Einfahren der Antenne

Danach wurde die Demontage der eigentlichen Motoren durch das Öffnen des Gehäuses begonnen. Hierfür wurden die Gehäuse aufgebrochen (unter Verwendung eines Schraubenziehers) oder aufgebohrt (z. B. beim Motor des Anlassers). Bei einem Großteil der Motoren besteht das Gehäuse aus Kunststoff (z. B. Scheibenwischer sowie Leuchtweitenregulierung Modell 1 und 2), zum Teil werden auch Aluminiumgehäuse, wie bei der Spiegeljustierung der Fall, verwendet. Die Kunststoffgehäuse weisen bei einigen Motoren höhere Massen auf als der eigentliche Motor (z. B. Spiegeljustierung, Antenne, Leuchtweitenregulierungen). Im Anschluss konnten bereits bestimmte Einzelteile wie zum Beispiel Leiterplatten, Getriebe, Schrauben und Zahnräder und Kabel abgetrennt werden.

Danach wurde der Deckel des Stators abgeschraubt (z. B. bei dem Motor des Scheibenwischers, Motorlüftung Modell 1 und 2) oder durch Aufbiegen von Aluminiumklemmen gelöst (z. B. bei den Motoren der Leuchtweitenregulierungen). Der Deckel sowie der Rotor selbst sind bei allen Motoren aus Stahl gefertigt. Anschließend wurden Stator und Rotor voneinander getrennt. Der Rotor konnte dabei häufig mit geringem Aufwand durch Aufbiegen von am Stator an-gebrachten Aluminiumklemmen entnommen werden (z. B. bei Motoren der Leuchtweitenregulierung). Bei dem Motor des Fenster-hebers war dagegen ein Zersägen der Statorhülle notwendig, wobei auch die enthaltenen Magnete beschädigt wurden. Zusätzlich waren die Bürsten zu demontieren, welche über einen Kunststoffring mit Befestigungspunkten aus Metall, häufig Kupfer, angebracht sind. In einem nächsten Schritt wurden die Magnete, welche an der Innenwand der Statoren angebracht sind, und bei allen untersuchten Motoren vorhanden sind, freigelegt. Die Magnete ließen sich bei den meisten Motoren durch ein Entfernen von Klammern, die der Befestigung dienten, entnehmen (z. B. bei Motor des Scheibenwischers, der Spiegeljustierung, der Leuchtweitenregulierungen, der Motorlüftung Modell 2 (VW) und des Anlassers). Teilweise waren die Magneten jedoch auch geklebt, so dass diese bei der Entnahme aufgrund der hohen Sprödigkeit stark beschädigt wurden (z. B. beim Motor des Heizungsgebläses oder der Motorlüftung Modell 1 (Mazda), vgl. Abbildung 5-24).



Abbildung 5-24: Stator des Motors der Motorlüftung Modell 2 (VW) mit beschädigten Magneten

Der Stator selbst besteht in der Regel aus einer Stahllegierung (z. B. bei Motorlüftung Modell 2, vgl. Abbildung 5-24) oder aus Aluminium (z. B. bei Motoren der Leuchtweitenregulierungen). Die Rotoren selbst bestehen aus einem Stahlkern mit Kupferwicklungen (Beispiel Motorlüftung Modell 2, vgl. Abbildung 5-25), welche lediglich beim Motor des Anlassers mit einem Tränklack versehen waren.

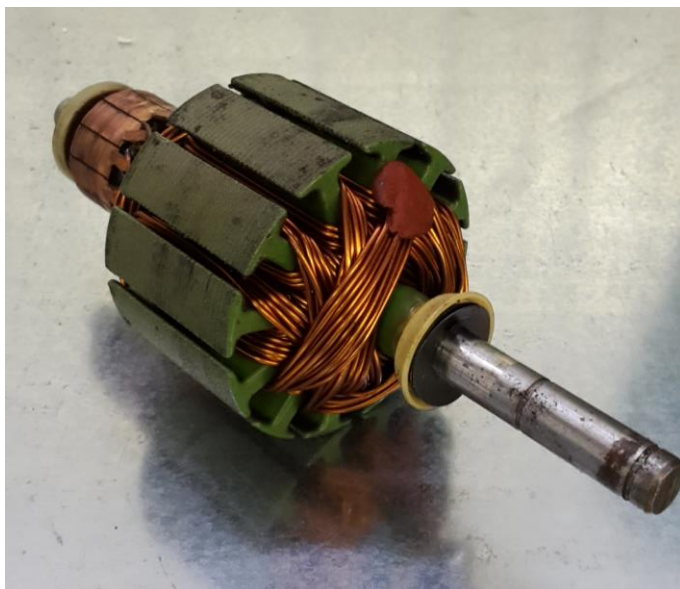


Abbildung 5-25: Rotor des Motors der Motorlüftung Modell 2 (VW)

Die Kupferwicklungen waren bei 10 der 11 Motoren dagegen nur mit einer Kunststoffbefestigung versehen, die leicht zu entfernen war. Bei dem Rotor des Wischermotors wurde der Kupferdraht manuell „abgewickelt“. Die Massenaufteilung zwischen Kupfer und Eisenbestandteilen wurde für eine Aufteilung der enthaltenen Materialien für die

Rotoren der weiteren zehn Motoren genutzt (vgl. Werkstoffbetrachtung in Abbildung 5-30 und Abbildung 5-31).

Für die Demontage wurden folgende Werkzeuge verwendet:

- ▶ Schraubenzieher,
- ▶ Zange,
- ▶ Hammer, Maul- und Ringschlüssel,
- ▶ Säge und
- ▶ Akkubohrmaschine (Aufbohren des Motorgehäuses beim Anlasser).

Die **Demontagezeiten** für die einzelnen Motorenarten sind in Abbildung 5-26 dargestellt.

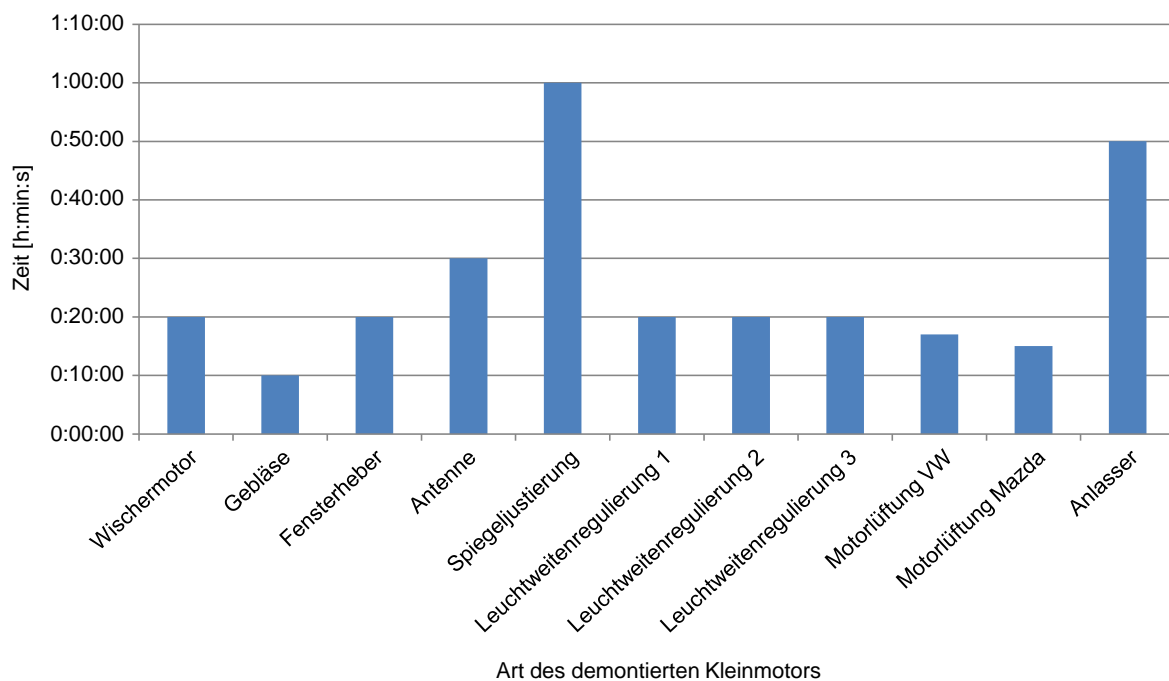


Abbildung 5-26: Zeitlicher Aufwand für die Demontage der Kleinmotoren aus Kfz

Diese Zeitangaben sind auf geschultes Demontagepersonal nicht übertragbar, da ein Großteil des zeitlichen Aufwandes auf die Planung der Herangehensweise, die Auswahl der Werkzeuge und das Testen möglicher Vorgehensweisen zur Demontage bei unbekanntem Aufbau von Verbindungen entfiel. Auch ein Einsatz von geeigneten Spezialwerkzeugen kann hier wiederum zu einer deutlichen Reduzierung der Demontagezeit führen. Die Demontagezeit wurde nicht auf einzelne Arbeitsschritte aufgeteilt, da sich das Vorgehen für die einzelnen Motoren in den meisten Fällen deutlich unterschied und daher eine Gegenüberstellung der Demontagezeiten einzelner Komponenten für verschiedene Motoren in diesem Fall nicht sinnvoll wart. Darüber hinaus ist bei der Auswertung der Demontagezeiten zu berücksichtigen, dass das Entfernen von mit den Motoren verbundenen Komponenten, die jedoch keine unmittelbaren Motorenbestandteile darstellen, ebenfalls zur Demontagezeit gezählt wurde. Dieser erste Demontageschritt hat, wie bereits erwähnt, für einige Motoren zu einer deutlichen Erhöhung der Demontagezeit geführt. So führte beispielsweise bei dem Motor der Spiegeljustierung das Abtrennen des Spiegelgehäuses von dem Gelenk, welches das

Einklappen des Spiegels ermöglicht, dazu, dass sich die Gesamtdemontagezeit auf 60 Minuten belief. Bei dem Motor für das Aus- und Einfahren der Antenne wurde die Demontage beispielsweise durch das vorhandene Schmiermittel am Getriebe erschwert. Auch die großen Einzelkomponenten der Motorlüftung, der Propeller und die Kunststoffhalterung, waren aufgrund schlecht zugänglicher Verschraubungen und Klammern nur schwer zu trennen.

Zur **Bewertung der Demontierbarkeit und Kennzeichnung** wurden die in Tabelle 5-2 (vgl. Kapitel 5.1.1.4) beschriebene Methodik genutzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-27 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung für jeden Motor ist in Anhang 11.6 nachzuvollziehen. Bei der Auswertung konnten keine generellen Unterschiede zwischen der Demontagefähigkeit verschiedener Motorenarten beziehungsweise verschiedener Hersteller festgestellt werden.

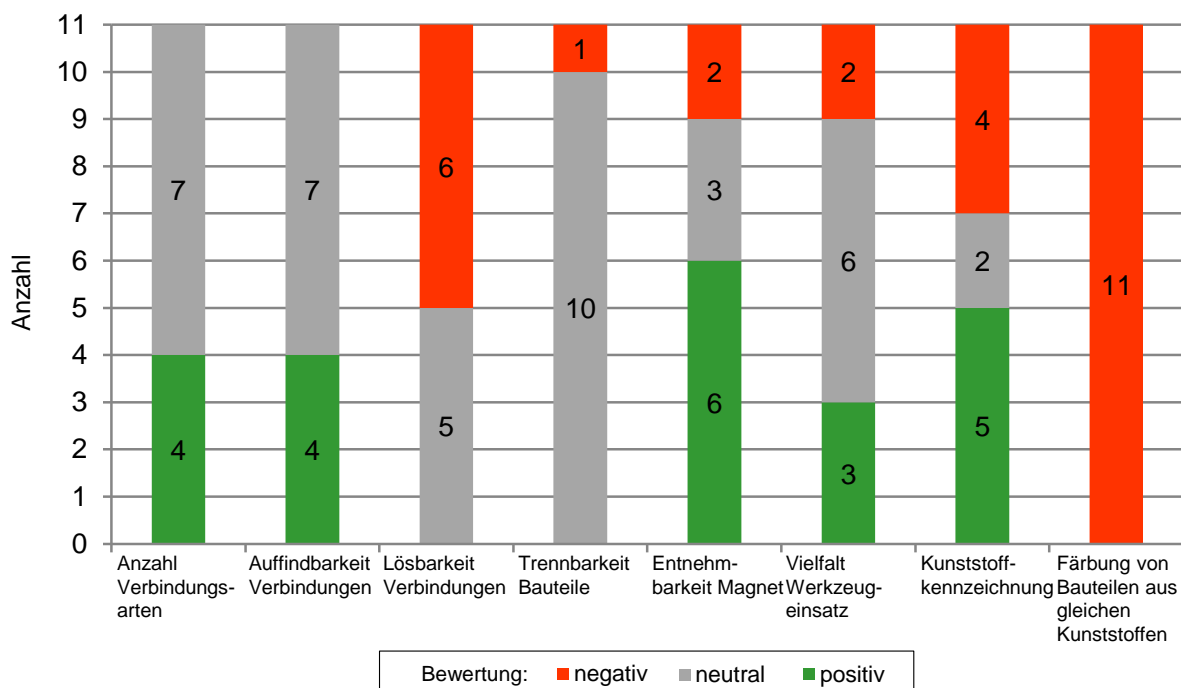


Abbildung 5-27: Bewertung der Demontierbarkeit und Kennzeichnung der Kleinmotoren aus Kfz

Es ist festzuhalten, dass die Vielfalt an Verbindungsarten und die Auffindbarkeit der Verbindungen überwiegend neutral und jeweils für vier von sieben Motoren sogar positiv bewertet werden konnte (Kriterien: *Anzahl Verbindungsarten* und *Auffindbarkeit Verbindungen*). In den meisten Fällen beschränken sich die Verbindungsarten auf Schraub-, Kleb- und Klemmverbindungen. Anders stellt sich die Situation bei dem Kriterium *Lösbarkeit der Verbindungen* dar. Hier waren bei einigen Motoren Kleb- oder Lötverbindungen vorhanden, was mit hohem Zeitaufwand bei der Demontage oder mit Beschädigung von Komponenten verbunden war. Dies war beispielsweise bei Leiterplatten (z. B. Scheibenwischermotor) der Fall. Die Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen selbst (Kriterium: *Trennbarkeit Bauteile*) waren bei zehn der elf Motoren größtenteils mit der beschriebenen Methodik und unter Zuhilfenahme gängiger Werkzeuge voneinander trennbar.

In Zusammenhang zur Lösbarkeit von Verbindungen wurden im speziellen die mit den Statoren verbundenen Magnete betrachtet (Kriterium: *Entnehmbarkeit Magnete*). Diese waren

bei zwei Motoren geklebt (z. B. bei dem Gebläsemotor), was eine Beschädigung der Magnete bei der Entnahme nach sich zog und als negativ bewertet wurde. Bei sechs Motoren konnten diese beschädigungsfrei durch Lösen bzw. Aufbiegen von Klammern entnommen werden. Bei den übrigen drei Motoren war zur Entnahme der Magnete eine Beschädigung des Stators, beispielsweise durch Zersägen, erforderlich, ohne jedoch die Magneten selbst zu beschädigen.

Im Kriterium *Vielfalt Werkzeugeinsatz* kann festgehalten werden, dass für drei der betrachteten Motoren nur ein Werkzeug für die Demontage genutzt werden musste. Bei sechs der Motoren wurden bis zu drei verschiedene Werkzeuge benötigt, für zwei der Motoren waren mehr als drei Werkzeuge für die Demontage erforderlich.

Im Kriterium *Kunststoffkennzeichnung* wurden sieben der elf Motoren positiv bewertet. Bei den zwei neutral bewerteten Motoren war dagegen keine Kennzeichnung vorhanden, jedoch waren die Kunststoffkomponenten mit einer Fläche von weniger als 200 mm² bzw. einem Gewicht von unter 25 g auch vergleichsweise kleinteilig (vgl. Methodik nach [Bartnik et al. 2013]). Motoren mit größeren bzw. schwereren Kunststoffteilen, die ebenfalls keine Kennzeichnung aufwiesen, wurden negativ bewertet. Dies war bei vier der elf Motoren der Fall. Darüber hinaus konnten bei keinem der Motoren eine gleiche Einfärbung von Bauteilen, die aus den gleichen Kunststoffarten gefertigt wurden, festgestellt werden (Kriterium: *Färbung von Bauteilen aus gleichen Kunststoffen*).

Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende Nachteile des vorgefundenen **Designs der Kleinmotoren** ableiten. Zum einen hat die Verwendung von geklebten und gelöteten Verbindungen bei der Demontage häufig die Beschädigung von Komponenten wie Leiterplatten oder Magneten zur Folge. Gerade am Beispiel der Magnete zeigt sich, dass auch Verbindungen über Klammern genutzt werden können, welche häufig sogar ohne Verwendung von Werkzeug und sehr schnell gelöst werden können. Auch die Öffnung von Gehäusen oder die Abtrennung des Statordeckels ließ sich bei geschraubten Verbindungen schneller bewerkstelligen als bei geklebten Verbindungen, so dass geschraubte Verbindungen hier zu bevorzugen wären.

Die bei den Industriemotoren vorgefundene Problematik der in Tränklack eingebundenen Kupferwicklungen wurde bei den Kleinmotoren aus Kfz nur bei einem Motor vorgefunden (Motor des Anlassers). Bei zehn der elf Motoren wäre ein Abwickeln der Wicklungen möglich, jedoch ist der dabei entstehende Zeitaufwand zu berücksichtigen. Ein Veränderungsbedarf hinsichtlich des Designs lässt sich jedoch hier nicht ableiten. Darüber hinaus erwies sich besonders die manuelle Auftrennung von sehr kleinteiligen Verbindungen als schwierig. Besonders deutlich wurde dies bei den Bürstenhaltern, welche für eine materialscharfe Demontage nach Kunststoffen, Kabeln sowie Kupfer- und Graphitanteilen häufig so stark beschädigt wurden, dass beispielsweise die sehr spröden Graphitbürsten nur noch in Bruchstücken vorlagen. Auch hier erscheinen jedoch Veränderungen im Design kaum umsetzbar. Für die weitergehende Konzeption der Demontagefabrik ist, auch in diesem Zusammenhang, eine optimierte Werkzeugauswahl vorzusehen, die, neben den anzustrebenden Änderungen im Design der Kleinmotoren, zu einer Verringerung der genannten Probleme bei der Demontage führen kann.

In der folgenden Abbildung 5-28 ist die **Zusammensetzung** der Motoren nach Baugruppen dargestellt. Die Gesamtmasse der betrachteten Motoren betrug 11,123 kg.

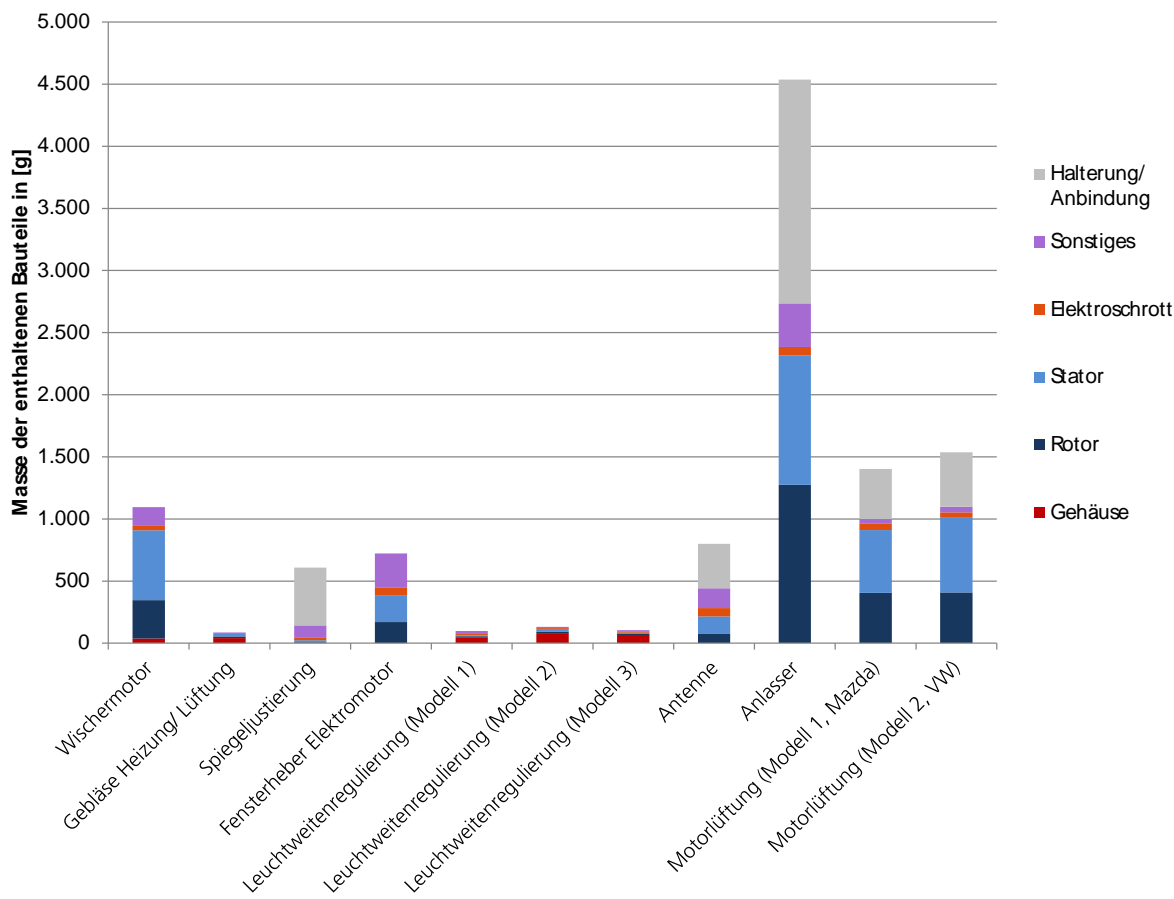


Abbildung 5-28: Masse der in den einzelnen demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Bauteile, inklusive Halterungen und Anbindungen

Dabei ist zu erkennen, dass für einige Motoren (Spiegeljustierung, Antenne, Anlasser, Motorlüftung Modell 1 und 2) die Halterungen und Anbindungen des Motors die Gesamtmasse stark beeinflussen. Da diese Komponenten keine eigentlichen Bestandteile des Kleinmotors darstellen, werden sie in den nachfolgenden Darstellungen nicht berücksichtigt. Die herausgerechneten Halterungen haben eine Masse von 3,466 kg und bestehen zu rund 36 Ma-% aus Kunststoff, zu etwa 44 Ma-% aus Eisen und zu rund 20 Ma-% aus Aluminium. Ohne diese Komponenten zur Halterung und Anbindung der Motoren ergibt sich ein Gesamtgewicht der Motoren von 7,657 kg. Die anteilige Aufteilung der Massen der einzelnen Motoren auf Baugruppen, ohne Berücksichtigung von Halterungen und Anbindungen, sind in Abbildung 5-29 dargestellt.

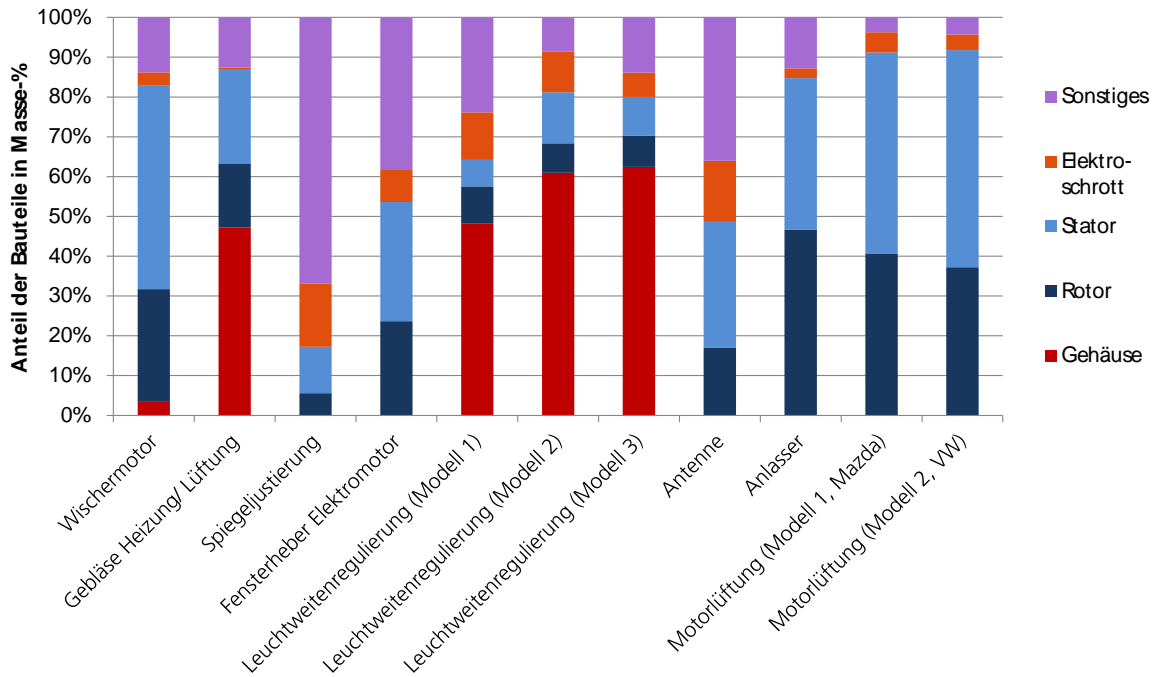


Abbildung 5-29: Massenbezogene Anteile der in den einzelnen demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Bauteilen, exklusive Halterungen und Anbindungen

Für den Wischermotor, den Anlasser sowie die beiden Modelle der Motorlüftungen stellen Stator und Rotor mehr als 80 Ma-% der Gesamtmasse des Motors dar. Die Statoren beinhalteten dabei auch die Magnete sowie einen Deckel. Für die Motoren des Gebläses sowie der Leuchtweitenregulierungen werden dagegen zwischen etwa 45 und 60 Ma-% der Gesamtmasse allein durch das Gehäuse des Kleinmotors gestellt, welches bei allen vier Motoren aus Kunststoff bestand. Zum Elektroschrott wurden die vorhandenen Leiterplatten, Kabel und Bürsten inklusive der Befestigungen gerechnet. Zur Fraktion „Sonstiges“ wurden dabei alle vorhandenen Kleinteile wie Schrauben oder Kunststoffteile zugeordnet. Diese Fraktion stellt mit jeweils mehr als 30 Ma-% einen vergleichsweise hohen Anteil bei den Motoren der Spiegeljustierung, des Fensterhebers und der Antenne.

Die nachfolgende Abbildung 5-30 zeigt die Zuordnung der demontierten Komponenten zu Stoffgruppen.

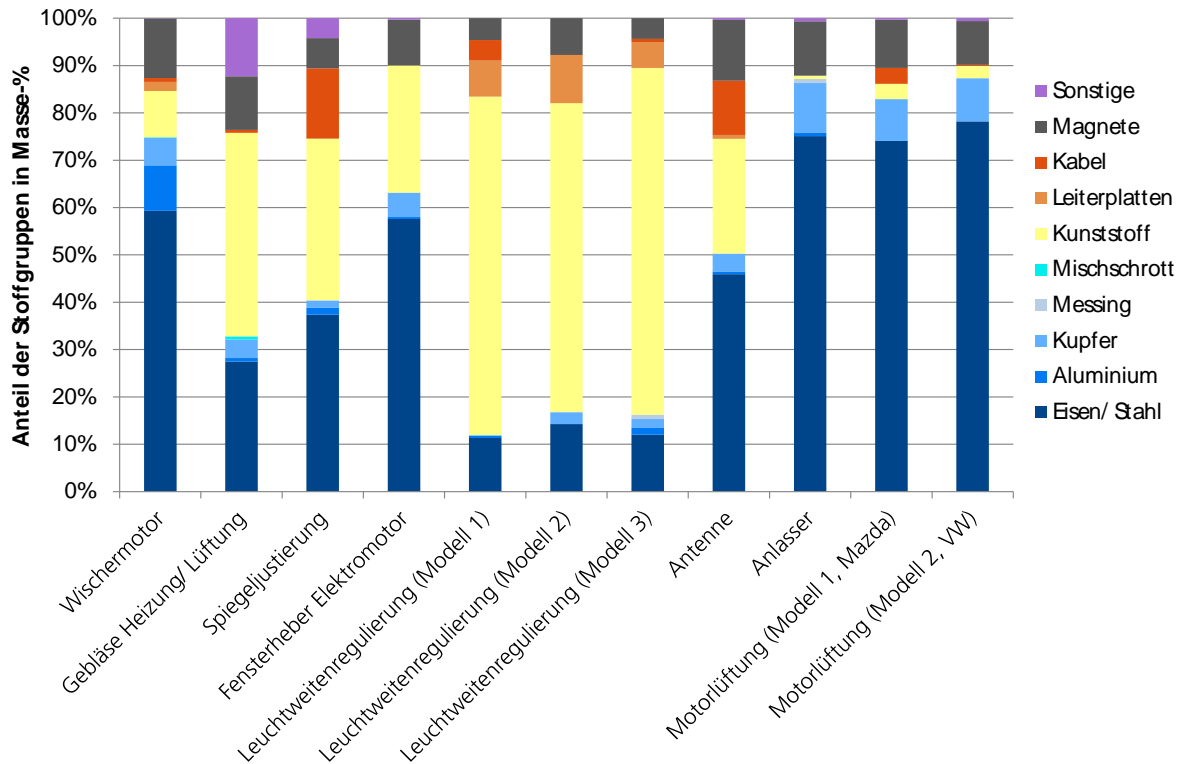


Abbildung 5-30: Massenbezogene Anteile der in den einzelnen demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Stoffgruppen, exklusive Halterungen und Anbindungen

Die Rotoren wurden dabei in einen Kupfer- und einen Eisen/Stahl-Anteil aufgeteilt. Das massenbezogene Verhältnis von Kupfer zu Eisen/Stahl-Anteil wurde, wie bereits erwähnt, anhand des Rotors des Wischermotors bestimmt und auf die anderen Rotoren übertragen. Der Kupferanteil im Rotor wurde mit 22 Ma-%, der Eisenanteil mit 78 Ma-% bestimmt. Kabel und Leiterplatten wurden separat ausgewiesen. Die Bürsten wurden gemeinsam mit der entsprechenden Halterung den einzelnen Stoffgruppen zugeordnet, der enthaltene Graphitanteil und elektronische Bauteile wurden dabei der Fraktion Sonstiges zugeordnet. Gleiches gilt für Bestandteile aus Gummi.

Es ist zu erkennen, dass die Gesamtgewichte der Motoren durch die Stoffe Kunststoff und Eisen dominiert werden. Die nächst größeren Anteile werden durch die Magnete, Elektroschrott und Leiterplatten sowie Kupfer gestellt. Die Fraktion „Sonstiges“ sowie Aluminium und Messing spielen lediglich bei folgenden Motoren eine Rolle:

- ▶ Motor von Heizungsgebläse und Spiegeljustierung (Sonstiges)
- ▶ Wischermotor (Aluminium)
- ▶ Anlassermotor (Messing)

Als „Mischschrott“ wurden vorgefundene Metallverbunde bezeichnet, die nicht näher charakterisiert werden konnten. Dieser Fraktion wurden für alle betrachteten elf Motoren insgesamt drei Kleinteile mit einem Gesamtgewicht von 1,6 g zugeordnet.

Die folgende Abbildung 5-31 zeigt die Verteilung der einzelnen Stoffgruppen zusammengefasst für die elf untersuchten Motoren.

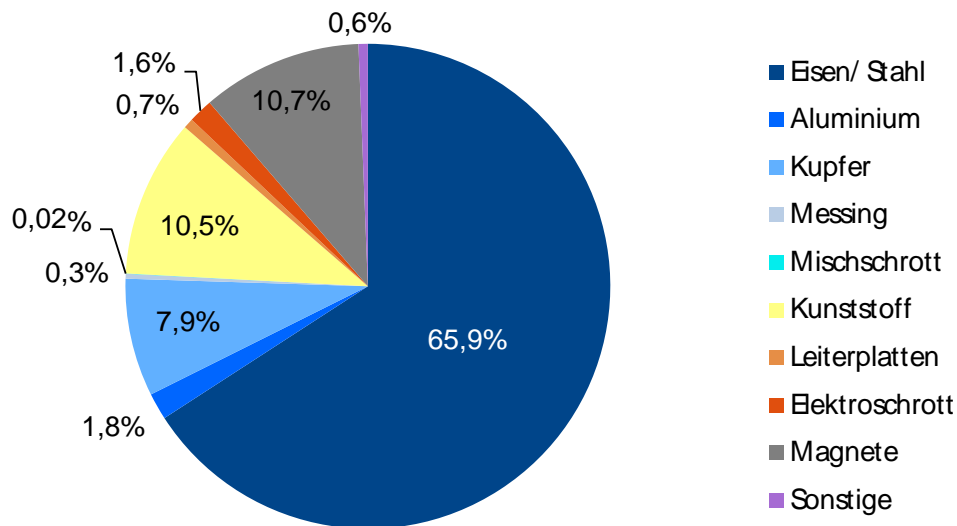


Abbildung 5-31: Summierte, massenbezogene Anteile der in den demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Stoffgruppen, exklusive Halterungen und Anbindungen, in Ma-%

Im Vergleich zu der in [Kohlmeyer et al. 2015] beschriebenen Zusammensetzung (vgl. Abbildung 1-11 in Kapitel 4.4.4) ist zu erkennen, dass der Anteil der Eisen/Stahl-Fraktion in gleicher Größenordnung ermittelt wurde (65,9 gegenüber 66,0 Ma-%). Der hier gefundene Kunststoff- und Kupferanteil ist mit 10,5 gegenüber 16,0 Ma-% (Kunststoff) sowie 7,9 gegenüber 9,0 Ma-% (Kupfer) ebenfalls in einem ähnlichen Größenbereich. Messing und Leiterplatten wurden bei beiden Untersuchungen zu einem ähnlich geringen Anteil vorgefunden (Messing: 0,3 gegenüber 0,3 Gew.-%, Leiterplatten: 0,7 gegenüber 0,3 Ma-%). Der Aluminiumanteil wurde mit 1,8 gegenüber 8,0 Ma-% bei [Kohlmeyer et al. 2015] deutlich höher angegeben. Der Neodym-Anteil wurde bei [Kohlmeyer et al. 2015] mit 0,9 Ma-% ermittelt, während der Magnetanteil in den hier durchgeführten Demontageversuchen mit 10,7 Ma-% bestimmt wurde, wobei jedoch keine Seltenerdelemente vorgefunden wurden (vgl. Kapitel 5.1.2.5).

Der Anteil an Mischschrott, Kabel, Leiterplatten und Sonstigem kann nicht gegenübergestellt werden, da diese Fraktionen bei [Kohlmeyer et al. 2015] nicht gebildet wurden. Jedoch ist festzuhalten, dass sich der bereits ausgewiesene Kupferanteil bei tiefergehender Demontage noch um den in der Elektroschrottfraktion enthaltenen Kupferanteil erhöhen würde.

Bei der Auswertung ist zu berücksichtigen, dass bei [Kohlmeyer et al. 2015] neben den 48 untersuchten Elektromotoren auch drei Lautsprecher in die Ergebnisse einbezogen wurden, was bei der vorliegenden Untersuchung nicht der Fall ist.

Nachfolgend soll zusätzlich genauer auf den Aufbau der enthaltenen **Leiterplatten** eingegangen werden. In fünf der insgesamt elf verbauten Motoren waren Leiterplatten vorhanden (vgl. Anhang 11.5). Die Leiterplatten der untersuchten Motoren besaßen maximal eine Fläche von 12 cm² (siehe Leuchtweitenregulierung Modell 2) und ein maximales Gewicht von 20 g. Dabei besteht das Leiterplattenmaterial üblicherweise aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) oder aus kunstharzverbundener Zellulose (KHZ). Bestückt sind die Leiterplatten der untersuchten Motoren mit Kondensatoren zur Spannungsregelung, welche standardgemäß entweder elektrolyt- oder keramikbasiert gefertigt sind. Dabei können Elektrolytkondensatoren Tantal enthalten (Ta₂O₅ dient als Dielektrikum) [Angerer et al. 2009]. Die Tantalanteile dieser Kondensatoren liegen zwischen 24,4 und 42,6 Ma-%, im Mittel bei 36,7 Ma-% [Buchert 2012]. Des Weiteren sind die Leiterplatten mit Widerständen und elektronischen Schaltungen, den ICs (integrated circuit), sowie Freilaufdioden versehen. Letztere dienen als Schutz vor Überspannungen.

Die Leiterplatte des Wischermotors besaß des Weiteren ein Relais als elektromagnetischen Schalter. In der Platine der Antenne war zusätzlich ein sogenannter Reedschalter verbaut, der das Ausfahren der Antenne regelt. Die Bauteile waren über Lötverbindungen auf der Platine befestigt. Als Lötmaterial wird für gewöhnlich eine Zinn-Blei-Kupfer-Legierung oder bleifreies Zinn-Silber verwendet [Tieste 2010]. In Tabelle 5-15 sind die auf den Leiterplatten der demontierten Motoren vorgefundenen Baugruppen dargestellt.

Tabelle 5-15: Übersicht über Bauteile auf den Leiterplatten der betrachteten Elektromotoren

	Kondensator	Widerstand	IC	Diode	Relais	Transistor	Schalter	Reed-Kontakt	Platine
Leuchtweite 1	2	1	1	2					GFK
Leuchtweite 2	4	6	1	2			1		GFK
Leuchtweite 3	1	4	1	2					GFK
Wischer	6	1		1	1	1			KHZ
Antenne		2		2				1	GFK

5.1.2.5 Ergebnisse der Magnetmaterial-Analytik

Die aus den E-Fahrrad-Antrieben demontierten Magnete wiesen insgesamt hohe Gehalte an Seltenerdelementen auf (siehe Tabelle 5-16).

Tabelle 5-16: Magnetmaterial-Analyseergebnis der Magnete aus E-Fahrrad-Antrieben (Analyse mittels ICP-OES)

	AKM150121 48873/BBE3 628A	A3628120995 80	PANASONIC NUJA035HB	Bosch 0275007006	Sram Sparc	dmg- movement
Element	[Ma-‰]					
Al	11	11	4,5	6,3	0,29	4,7
B	9,5	10	14	9,8	0,11	6,2
Ba	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,42	
Ca	0,58	0,20	0,57	0,73	3,8	0,58
Ce	1,9	1,9	1,9	2,6	0,02	1,5
Co	6,0	5,7	5,9	15	2,6	8,4
Cr	0,15	0,20	0,05	0,05	0,18	0,16
Cu	3,0	2,2	2,3	2,0	0,07	1,6
Dy	12	2,3	17	17	0,07	2,7
Er	1,1	1,1	1,1	1,0	< 0,01	0,83
Eu	0,26	0,22	0,26	0,52	< 0,01	
Fe	696	667	768	708	564	559
Gd	23	21	0,98	1,1	< 0,01	0,87
Ho	3,5	2,6	0,11	0,08	< 0,01	0,12
La	spektrale Störung	spektrale Störung	spektrale Störung	spektrale Störung	4,2	0
Lu	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	
Mn	0,40	0,86	0,20	0,15	2,2	0,99
Na	0,14	0,11	0,23	0,15	0,10	0
Nd	209	208	277	283	2,6	186
Ni	0,06	0,07	0,03	0,04	0,07	
Pr	60	66	62	1,5	0,04	43
Sc	< 0,01	0,01	spektrale Störung	0,02	< 0,01	
Sm	9,6	9,8	8,0	11	0,06	6,8
Sr	0,06	0,05	0,07	0,11	76	0,11
Tb	0,20	0,06	0,04	< 0,01	< 0,01	
Tm	0,53	0,30	0,88	1,0	0,06	
Y	< 0,01	0,02	0,02	0,03	< 0,01	
Yb	0,17	0,14	0,16	0,15	0,14	0,3
Zn	2,8	3,0	0,06	0,86	0,08	

Die Ausnahme bildete das Modell Sram Sparc, welches, wie in Kapitel 5.1.2.3 beschrieben, eine besondere Bauform mit zwei kleinen enthaltenen Elektromotoren aufwies. Bei den

weiteren Motoren waren Neodymgehalte zwischen ca. 20 und 28 Ma-% enthalten. Dysprosium war zu 0,2 bis 1,7 Ma-% in diesen enthalten, Praseodym mit Gehalten bis zu 6,6 Ma-%.

Auch in den Nabendynamos wurden Seltenerdelemente in großem Umfang gefunden (siehe Tabelle 5-17).

Tabelle 5-17: Magnetmaterial-Analyseergebnis der Magnete aus Nabendynamos

	DH -3 D 37	DH -3 N 20	DH-3 N 31- QR	DH-3 N 80	DH-S 701	NEXUS HB- N x 10
Element	[Ma-%]					
Al	3,0	3,5	0,33	2,1	0,66	0,50
B	0,24	< 0,03	0,35	7,8	8,3	< 0,03
Ba	1,9	1,6				2,7
Ca	15	15	4,5	0,75	0,53	14
Ce	< 0,04	< 0,03		1,5	1,1	< 0,03
Co	6,5	1,6	1,1	36	0,21	0,09
Cr	1,2	0,30	1,4	0	0,21	0,46
Cu	0,27	0,30	0	0,58	0,42	0,11
Dy	< 0,04	< 0,03		0,56	0,42	< 0,03
Er	< 0,04	< 0,03		0,75	0,74	< 0,03
Eu	< 0,04	< 0,03				< 0,03
Fe	1504	1440	525	688	712	1309
Gd	< 0,04	< 0,03		0,89	0,74	< 0,03
Ho	< 0,04	< 0,03		<0,3	0,3	< 0,03
La	17	9,5	3,2	0	0	0,13
Lu	< 0,04	< 0,03				< 0,03
Mn	8,0	5,2	2	0,33	0,32	4,4
Na	0,30	0,40	7,6	0	0	0,34
Nd	< 0,04	< 0,03	0	201	149	< 0,03
Ni	0,57	0,17				0,39
Pr	0,10	0,11	0	14	52	0,10
Sc	< 0,04	< 0,03				< 0,03
Sm	0,05	0,05	0	6,9	5,3	< 0,03
Sr	203	211	71	1,5	0	184
Tb	< 0,04	< 0,03				< 0,03
Tm	0,15	0,16				0,03
Y	< 0,04	< 0,03				< 0,03
Yb	0,35	0,38		0,31	0,36	0,35
Zn	0,22	0,21				0,23

Für die Analyse der Kfz-Magnete wurden diese zunächst entmagnetisiert und anschließend mittels REM-EDX untersucht, um die elementspezifische Zusammensetzung zu bestimmen. In Tabelle 5-18 sind die Ergebnisse der Analyse aufgeführt.

Tabelle 5-18: Zusammensetzung der Dauermagnete aus den untersuchten Elektromotoren in Massenprozent nach REM-EDX

Element	Magnet Antenne	Magnet Wischer	Magnet LW ⁴ Modell 1	Magnet LW Modell 2	Magnet LW Modell 3	Magnet Fensterheber	Magnet Spiegel	Magnet Anlasser	Magnet ML ⁵ Modell 1	Magnet ML Modell 2
	[Ma-%]									
Sauerstoff	33,75	51,59	33,53	33,39	34,87	35,85	31,40	21,81	35,38	28,57
Silizium	0,29	0,39	0,28	0,41	0,57	0,37	0,19	0,13	-	0,15
Schwefel	0,18	-	-	0,07	0,27	-	-	-	-	-
Kalzium	0,32	0,97	0,34	-	0,39	0,32	0,31	0,27	0,05	0,08
Mangan	0,17	0,11	0,19	-	-	0,21	-	0,21	0,16	0,19
Eisen	57,78	28,15	57,78	52,45	54,7	55,19	54,49	71,14	55,86	63,16
Strontium	7,52	8,22	7,88		6,15	8,06	-	5,61	8,03	7,40
Bor	-	9,86	-	-	-	-	-	-	-	-
Chrom	-	0,51	-	-	-	-	-	0,07	-	-
Kupfer	-	-	-	-	3,04	-	-	-	-	-
Barium	-	-	-	13,68	-	-	13,37	0,15	0,15	0,22
Aluminium	-	-	-	-	-	-	-	0,59	0,37	0,23

Mit der REM-EDX-Analyse konnten keine Seltenen Erden nachgewiesen werden. Zusätzlich wurden diese Magnete nasschemisch analysiert, um die Genauigkeit der Ergebnisse aus der REM-EDX-Analyse zu verifizieren. Die Untersuchung ergab bis auf leichte quantitative Abweichungen eine identische Zusammensetzung. In den Kfz-Magneten sind somit keine Seltenerd-Elemente nachgewiesen worden. In Tabelle 5-19 sind beispielhaft die Analyseergebnisse eines Antennen-Servomotormagneten aus der REM-EDX- und der ICP-OES-Analytik gegenübergestellt.

⁴ LW: Leuchtweitenregulierung

⁵ ML: Motorlüftung

Tabelle 5-19: Beispielhafte Gegenüberstellung der Analyseergebnisse eines Antennen-Servomotormagneten mittels REM-EDX und ICP-OES

Element	REM-EDX	ICP-OES
	[Ma-%]	
Al		0,073
B		< 0,002
Ba		0,10
Ca	0,32	0,46
Ce		< 0,002
Co		0,021
Cr		0,038
Cu		0,057
Dy		< 0,002
Er		< 0,002
Eu		< 0,002
Fe	57,78	52
Gd		< 0,002
Ho		< 0,002
La		< 0,002
Lu		< 0,002
Mn	0,17	0,025
Na		0,029
Nd		0,013
Ni		0,006
O	33,75	
Pr		0,006
S	0,18	
Sc		< 0,002
Si	0,29	
Sm		0,002
Sr	7,52	7,6
Tb		< 0,002
Tm		0,006
Y		< 0,002
Yb		0,014
Zn		0,054

Beispielhaft für mögliche Diskrepanzen der erhaltenen Untersuchungsergebnisse aus unterschiedlichen Methoden sollen an dieser Stelle die Ergebnisse der EDXRF- und ICP-OES-Analysen des Magnetmaterials aus dem Dynamomodell Shimano DH-S701 vergleichend gegenübergestellt werden (Tabelle 5-20). Die EDXRF-Analyse wurde mittels eines

handelsüblichen tragbaren Gerätes durchgeführt, welches wie unter Kapitel 5.1.1.5 beschrieben von vielen Recyclingbetrieben in der Praxis zur Sortierung von Schrotten genutzt wird.

Tabelle 5-20: Gegenüberstellung der Ergebnisse der EDXRF- und der ICP-Analyse des Magnetmaterials aus einem Nabendynamo vom Typ DH-S701 des Herstellers Shimano (grau hinterlegt = Seltene Erden)

Element	Prozentuale Massenanteile der Elemente [Ma-%]	
	EDXRF	ICP-OES
Al	-	0,066
B	-	0,83
Ca	-	0,053
Co	-	0,021
Cr	1,88	0,021
Cu	-	0,042
Fe	92,4	71,2
Mn	1,31	0,032
V	2,16	-
Ce	-	0,11
Dy	-	0,042
Er	-	0,074
Gd	-	0,074
Ho	-	0,03
Nd	-	14,9
Pr	-	5,2
Sm	-	0,53
Yb	-	0,036

Laut der EDXRF-Messung des Magnetmaterials besteht dieses vornehmlich aus Eisen. Mit Chrom, Mangan und Vanadium waren daneben lediglich drei weitere Elemente in prozentualer Menge enthalten. Die ICP-Messung ergab eine deutlich diversere elementare

Zusammensetzung.

Im Vergleich der Messergebnisse wird deutlich, dass die Messergebnisse der EDXRF- und der ICP-Messungen deutlich voneinander abweichen. Die mangelnde Detektion der Seltenerdelemente in der EDXRF-Analyse lässt sich laut Herstelleraussage durch das in dem EDXRF-Handgerät integrierte Messprogramm erklären, welches, wie unter 5.1.1.5 erläutert, momentan nicht für Seltenerdelemente ausgelegt ist. In dem Messprogramm sind elementspezifische Röntgenfluoreszenzspektren hinterlegt, welche für die Messungen als Referenz herangezogen werden, um aufgenommene Spektren zu vergleichen. Die Datenbank des verwendeten Gerätes war primär auf in Stählen verwendete Metalle ausgerichtet. Problematisch ist dabei, dass die ermittelten prozentualen Elementgehalte so dargestellt werden, dass diese grob auf einhundert Prozent summiert werden können. Die Erkenntnis einer nicht erfolgten Detektion einiger Elemente wird dadurch zusätzlich erschwert.

Die Anpassung der Messprogramme ist laut Hersteller sehr einfach vorzunehmen. Die Handgeräte sind grundsätzlich für die Erkennung von Elementen mit Atommassen zwischen etwa 23 Dalton (Natrium) bis zu 238 Dalton (Uran) geeignet. Von der technischen beziehungsweise analytischen Seite her steht der schnellen Erkennung und Separation kritischer Elemente daher nichts im Wege.

6 Recyclinggerechtes Design der Modellstoffströme

Um die Wertstoffausbeute beim Recycling von komplexen EoL-Produkten durch gezielte Demontage zu optimieren, können Aspekte des Produktdesigns eine entscheidende Rolle spielen. Im Folgenden werden deshalb die wesentlichen Erkenntnisse über die Herausforderungen des Produktdesigns von Elektromotoren erläutert, die im Rahmen der durchgeführten Recherchen und Befragungen sowie im Rahmen der durchgeführten Demontageversuche von Elektromotoren erhoben wurden.

6.1 Kleinmotoren aus Altfahrzeugen

Ein wesentlicher Ansatzpunkt für eine gesteigerte Erfassung von Wertstoffen aus Altfahrzeugen ist die Demontage von elektrischen und elektronischen Nebenaggregaten, wie zum Beispiel Kleinmotoren oder Steuergeräten. Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, ist in Zukunft mit einer zunehmenden Zahl an Nebenaggregaten in Altfahrzeugen zu rechnen. Allerdings wurde jedoch bereits von [Kohlmeyer et al. 2015] festgestellt, dass der manuelle Ausbau vieler Nebenaggregate aus Altfahrzeugen in Deutschland nicht wirtschaftlich ist.

Ein Ansatz, um die Demontage von Altfahrzeugen wirtschaftlicher zu gestalten, ist deshalb der demontagerechte Einbau von wertstoffhaltigen Bauteilen bzw. Baugruppen. Besonders problematisch ist dabei der hohe Anteil an Störkomponenten in den Kraftfahrzeugen. Schwer zugänglich sind vor allem die unter der Armatur (Steuergeräte, Lüftermotoren) oder die in den Sitzen (Sitzstellmotoren) verbauten Komponenten. Hier sind Automobilhersteller gefragt, durch spezialisierte Entwicklungen den demontagefreundlichen Einbau einzelner Komponenten oder Baugruppen voranzutreiben. Ein Beispiel wird in [Holzhauer 2015] vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein Cockpit, welches durch einfache Clip- und Schnappverbindungen demontagefreundlich mit den Querträgern der Karosserie verbunden ist. Mit Hilfe von Sollbruchstellen wird der schnelle Ausbau von im Cockpit verbauten Komponenten erleichtert.

Sind die Bauteile erfolgreich aus dem Altfahrzeug entnommen, wird vor allem bei Elektromotoren häufig eine Funktionsprüfung durchgeführt, mit dem Ziel, noch funktionstüchtige Motoren auf dem Gebrauchtteilemarkt gewinnbringend zu verkaufen. Defekte Motoren sollten hingegen den Weg eines möglichst hochwertigen Recyclings einschlagen. Hierzu kann eine weitere Zerlegung zur Erzeugung sortenreiner Wertstoffströme sinnvoll sein. Dabei sind jedoch Anforderungen an ein demontagerechtes Design mindestens genauso ausschlaggebend wie für den Ausbau von Komponenten aus dem Fahrzeug.

Im Rahmen der Demontageversuche wurden die Designaspekte dieser Elektromotoren (vgl. Kapitel 5.1.2.4) genauer untersucht. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Nachteile des vorgefundenen Designs der Kleinmotoren ableiten. Zum einen hat die Verwendung von geklebten und gelöteten Verbindungen bei der Demontage häufig die Beschädigung von Komponenten wie Leiterplatten oder Magneten zur Folge. Gerade am Beispiel der Magnete zeigt sich, dass auch Verbindungen über Klammern genutzt werden können, welche häufig sogar ohne Verwendung von Werkzeug und sehr schnell lösbar sind. Auch die Öffnung von Gehäusen oder die Abtrennung des Statordeckels ließen sich bei geschraubten Verbindungen schneller bewerkstelligen als bei geklebten Verbindungen, so dass geschraubte Verbindungen

hier zu bevorzugen wären. Für die weitergehende Konzeption der Demontagefabrik ist, auch in diesem Zusammenhang, eine optimierte Werkzeugauswahl vorzusehen, die, neben den anzustrebenden Änderungen im Design der Kleinmotoren, möglicherweise zu einer Verringerung der genannten Probleme führen kann.

Es stellt sich jedoch grundsätzlich die Frage, ob das weitere Zerlegen von Kleinmotoren auch bei demontagefreundlicher Konstruktion möglicherweise mit zu hohem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verbunden ist. Ein innovativer Ansatz, um diesen Prozess effizient zu gestalten, könnten jedoch möglicherweise spezialisierte Demontageroboter sein. Beispielsweise trat der IT-Hersteller Apple kürzlich mit der Entwicklung eines Demontageroboters an die Öffentlichkeit. In Verbindung mit einer gezielt zerlegegerechten Gestaltung von Apple-Produkten ist der Roboter, der 30 m lang ist und über 29 Arme verfügt, in der Lage, iPhones in nur 11 Sekunden zu zerlegen. Der Roboter wird derzeit in den Niederlanden eingesetzt, um defekte Smartphones in ihre Einzelteile zu zerlegen. Die automatisierte Abfolge von Demontageschritten beginnt mit der Aufspaltung des Gehäuses, um das Display vom Rumpf zu trennen und den Akku zu entfernen. Anschließend entfernen spezialisierte Roboterarme die Schrauben und legen die elektronischen Komponenten wie Lautsprecher, Kamera oder Vibrationsmodul frei, um diese dann separaten Auffangboxen zuzuordnen [Jannasch 2016].

6.2 Industriebmotoren

Im Fall von großen Aggregaten, zum Beispiel leistungsstarken Käfigläufern, findet bereits ein umfangreiches und effizientes Recycling von Massenmetallen statt. Die Recyclingstrukturen funktionieren dabei häufig im Business-to-Business-Bereich, indem beispielsweise Servicedienstleister defekte Motoren, die nicht mehr reparabel sind, entweder selbst fachmännisch zerlegen oder an spezialisierte Aufbereiter weitergeben. Es handelt sich somit nicht um Wegwerfprodukte, die potenziell im Restmüll landen könnten, sondern um einen wertstoffhaltigen Stoffstrom, der spezialisierte Abnehmer findet.

Da das Recycling der Massenmetalle aus großen Industriebmotoren bereits gut funktioniert, sollte der Fokus in Bezug auf das recyclinggerechte Produktdesign vor allem auf dem Magnetmaterial liegen. Vor allem SE-haltige Magnete sind mittels Demontage besser zu trennen, wenn Schraub- oder Klemmverbindungen gegenüber der Verbindung mittels Kleben bevorzugt werden. Die Befragung eines Motorenherstellers ergab jedoch, dass Schraub- oder Steckverbindungen mit Leistungseinbußen des Motors verbunden sind, sich somit also negativ auf die Produktqualität auswirken würde.

Bei kleineren Elektromotoren aus industriellen Anwendungen können in Bezug auf das Thema recyclinggerechtes Produktdesign Parallelen zu den Kleinmotoren aus Kfz gezogen werden, da sie sich in Größe und Aufbau ähneln.

6.3 Nabendynamos und elektrische Antriebsmotoren aus Fahrrädern / E-Rädern

Die Fragestellung zu einem demontagefreundlichen und recyclinggerechten Design von Nabendynamos und elektrischen Antrieben aus E-Rädern ist grundsätzlich mit der Problematik der Kleinmotoren aus Altfahrzeugen zu vergleichen. Der Ausbau der Komponenten aus Fahrrädern stellt jedoch eine deutlich geringere Herausforderung dar als der Ausbau kleiner

Komponenten aus Altfahrzeugen, da keine ernstzunehmenden Störkomponenten den Zugang zu den Bauteilen behindern. Somit wäre die Entnahme der beiden Komponenten im Umfeld der Demontagefabrik mit einfachen Werkzeugen und relativ geringem Aufwand zu bewerkstelligen. Zudem ist der Gehalt an Seltenen Erden in Magneten häufiger gegeben als in Kleinmotoren aus Altfahrzeugen.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Demontageversuche zeigten, dass die Magneten durchgängig geklebt waren. Grundsätzlich sollten also Hersteller vor allem bezüglich der Verbindung des Magnetmaterials prüfen, ob geklebte Verbindungen beispielsweise durch Steckverbindungen ersetzt werden können.

6.4 Erkenntnisse aus der Befragung von Unternehmen

Um das Thema recyclinggerechtes Produktdesign aus Sicht der Unternehmen zu beleuchten, wurden verschiedene Hersteller und deren Zulieferer sowie Entsorger befragt. Ziel der Befragung war es vor allem, Aussagen dazu zu erhalten, welche Bedeutung dem recyclinggerechtem Produktdesign bei den Herstellern und Entsorgern zukommt. Die Befragung wurde vor allem mit Fokus auf Kraftfahrzeuge und Industrielektromotoren durchgeführt.

Aus der Befragung verschiedener Automobilhersteller und Entsorger ging hervor, dass beim Recycling von Wertstoffen aus Kleinmotoren derzeit vor allem Kupfer im Vordergrund steht. Als Gründe wurden die hohen Wertstoffgehalte und die damit verbundenen Erlöse genannt. Die Verunreinigung der Stahlfraktion aus der Altfahrzeugaufbereitung mit Kupfer spielt ebenfalls eine Rolle. Das Recycling von kritischen Rohstoffen wie Seltenen Erden wurde bei Kleinmotoren als nicht relevant eingestuft. Außerdem wurde darauf hingewiesen, dass Seltene Erden in Elektromotoren in Zukunft zunehmend durch kostengünstigere Elemente ersetzt würden.

Bezüglich des Produktdesigns stellen viele Automobilhersteller an ihre Zulieferer die Anforderung, dass Zulieferteile wie Elektromotoren grundsätzlich recyclinggerecht gestaltet sein müssen, zum Teil jedoch ohne spezielle Designanforderungen vorzugeben. Sowohl von Automobil- als auch von Elektromotorenherstellern wurde allerdings betont, dass ein recyclinggerechtes Design häufig aufgrund spezifischer Kundenanforderungen nicht umsetzbar sei. Zum einen spiele recyclinggerechtes Design für viele Kunden keine Rolle. So stellen diese beispielsweise bei der Innenausstattung von Fahrzeugen hohe Anforderungen an Optik und haptische Aspekte, jedoch nicht an spätere Recyclingfähigkeit. Zum anderen kann die demontage- und recyclingfreundliche Produktgestaltung mit weiteren Zielkonflikten verbunden sein. So stehen bei Industriemotoren vor allem Kosteneffizienz und Funktionalität im Vordergrund. Sollten Anpassungen im Design zu Lasten der Langlebigkeit und Wartungsarmut von Komponenten und gleichzeitigen Erschwinglichkeit des Produktes für den Kunden gehen, könnten sich diese am Markt nur schwer durchsetzen. Jedoch wird recyclinggerechtes Design teilweise auch als zielführend für eine Erhöhung der Lebensdauer wahrgenommen. So müssen langlebige Industriemotoren beispielsweise für regelmäßige Wartung und den Austausch von Verschleißteilen konzipiert sein. Bei der Entsorgung ermöglicht dies wiederum die einfache Zerlegung der Motoren zur Gewinnung möglichst sortenreiner Materialfraktionen. Motorenhersteller sagten jedoch auch aus, dass die recyclingorientierte Auswahl von Werkstoffen nur bedingt möglich sei, da die

Produktzusammensetzung häufig durch Normen beziehungsweise technische Vorgaben definiert werde.

Für eine ökologische Produktgestaltung spielen neben der Demontage- und Recyclingfähigkeit auch weitere Aspekte eine Rolle. Vor allem im Fahrzeugbereich ist die ökobilanzielle Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus entscheidend, da ein Großteil der Treibhausgasemissionen auf die Nutzungsphase zurückzuführen ist. Um die Treibhausbilanz von Fahrzeugen zu verbessern, kann die Wahl von Verbundwerkstoffen und die damit verbundene Gewichtseinsparung sinnvoll sein. Für ein hochwertiges Recycling weisen Verbundwerkstoffe jedoch Nachteile auf.

Auch sollten recyclinggerechte Anpassungen im Produktdesign generell unter ökologischen und ökonomischen Aspekten geprüft werden. Grundsätzlich ist die Zielsetzung einer möglichst tiefgängigen Demontage von Bauteilen und Materialfraktionen bei Altfahrzeugen und Elektromotoren wünschenswert. Da die derzeit überwiegend manuell erfolgende Demontage von Altfahrzeugen mit hohen Kosten und Zeitaufwand verbunden ist (vgl. [Kohlmeyer et al. 2015]), ist eine ökonomisch sinnvolle Kopplung der Demontage mit den nachgeschalteten Aufbereitungs- und Recyclingverfahren anzustreben. Aus Herstellerkreisen wurde der Fokus der technologischen Weiterentwicklung teilweise aber eher auf der Erzeugung möglichst sortenreiner Stoffströme mit optimierten Schreddertechnologien gesehen als bei Themen des Produktdesigns. Demnach sei abzuwägen, welche Demontagetiefe für ein möglichst hochwertiges Recycling notwendig und wirtschaftlich wie auch ökologisch sinnvoll ist.

Eine weitere durch die Hersteller genannte Herausforderung ist die zum Zeitpunkt der Entsorgung fehlende physische und finanzielle Rückkopplung zwischen Hersteller und Produkt. Automobilhersteller können die Verbringungswege ihrer Produkte aufgrund Weiterverkauf oder Absatz ins Ausland kaum nachverfolgen. Da aus der Verwertung von Altfahrzeugen für die Hersteller entsprechend keine ökonomischen Anreize erwachsen, werde recyclinggerechtes Design häufig nur soweit vorangetrieben, wie es die gesetzlichen Auflagen verlangten. Dies könnte sich jedoch durch die derzeitigen Entwicklungen in den Nutzungsstrukturen von Produkten zukünftig verändern. Wenn Hersteller im Besitz des Produkts bleiben und nur die damit verbundene Dienstleistung an die Endkunden verkaufen, wird die Entkoppelung von Herstellung, Nutzungsphase und End-of-Life-Stadium aufgehoben. Der Anreiz, Produkte wartungs-, demontage- und recyclingfreundlich zu gestalten, könnte durch diese Entwicklung erhöht werden.

Ein zusätzlicher, derzeit problematischer Aspekt besteht in der mangelhaften Kommunikation zwischen Herstellern und Entsorgern. Dies führte zum Beispiel bereits dazu, dass Hersteller Demontagesysteme entwickelt haben, für die in der Praxis bereits bewährte Lösungen bestanden. Zudem haben einige Hersteller in den geführten Interviews damit argumentiert, dass die Nutzungsphase bei Fahrzeugen deutlich länger währt als bei vielen anderen Konsumprodukten. Über einen Zeitraum von teilweise 20 Jahren Nutzungsdauer ließen sich nur schwer Prognosen über die Recyclingtechnologien treffen, die am Ende des Lebenszyklus etabliert sind.

7 Planung der Demontagefabrik auf Basis eines Industrie 4.0-Ansatzes

7.1 Anforderungen an die benötigte Planungssoftware

Im Zeitalter von Industrie 4.0 wird die Verzahnung der industriellen Produktion mit den modernsten heutzutage zur Verfügung stehenden Werkzeugen der Datenverarbeitung angestrebt. Das betrifft natürlich auch den gesamten Themenkomplex des Recyclings, der entsprechend behandelt und angegangen werden muss. Wegen der Fülle der heutzutage anfallenden Daten ist eine erfolversprechende Planung und Modellierung einer modernen und zeitgemäßen Demontagefabrik darum nur durch den Einsatz von geeigneter Software möglich.

Die Anforderungen an die Softwarelösung sind:

- ▶ Erfassung und Management produktbezogener Daten unter Einbindung aller beteiligten Akteure des Wertschöpfungsprozesses
- ▶ Darstellung und Planung ganzheitlicher Systemabläufe von Betriebseinheiten auf verschiedenen Ebenen, so z. B. für Prozesse in einzelnen Anlagen, Produktions- oder Verwertungszentren, aber auch für Prozesspfade in ganzen Wirtschaftsräumen
- ▶ Monitoring aller relevanten Parameter wie Stoffströme/Material, Energie, Zeit und Kosten für die modellierten Betriebseinheiten
- ▶ Planungsunterstützung, Kosten- und Risikoabschätzung für bestehende Anlagen bei Maßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz sowie für neu zu errichtende Anlagen
- ▶ Simulation der zu erwartenden Systemauswirkungen bei Einführung neuer Technologien bzw. Änderung wirtschaftlicher Parameter
- ▶ Vermeidung funktionaler Verluste an Rohstoffen, Sicherstellen möglichst hoher Konzentration und Reinheit bei der Wiedergewinnung durch optimierte Prozessplanung
- ▶ Möglichst vollständige Verwertung von Abfallströmen, insbesondere Wiedergewinnung wirtschaftlich relevanter Rohstoffe durch Schließen von Recycling-Lücken
- ▶ Optimierung der Entsorgungslogistik durch Vernetzung von Akteuren auf sowohl lokaler als auch (über-)regionaler Ebene
- ▶ Anbindung der Planungsebene an bestehende LCA- bzw. Ökobilanzierungs-Datenbanken für die Integration umfassender Prozessinformationen zu weiterführenden Fragestellungen
- ▶ Möglichkeit zur konkreten räumlichen 2D/3D-Planung (einschließlich virtueller Begehung) von Verarbeitungsketten, um reale Umsetzung zu unterstützen

7.2 Abgrenzung zu bestehenden Planungswerkzeugen im Umweltbereich

Einige der in Kapitel 7.1 genannten Aufgabenstellungen werden durch kommerziell erwerbliche Softwarepakete abgedeckt. Es wurden etliche Computerprogramme (siehe Anhang 0) mit Bezug zu Planung, Umwelt, Demontage und/oder Modellierung auf deren Funktionalitätsumfang hin untersucht und in Kategorien eingeteilt. Die Zuteilung ist, bedingt durch die von Softwareherstellern genutzten unscharfen Begrifflichkeiten, grob gehalten.

Der überwiegende Teil der betrachteten Programme hat zum Ziel, das betriebliche Umweltmanagement zu unterstützen. Dafür werden in erster Linie einfache, zumeist nur Materialbilanzen bzw. seltener auch modellhafte Darstellungen der Prozesskette (Tabelle 11-12, Seite 220, Spalte Bilanzen) und ein formalisiertes Berichtswesen (Spalte Compliance) benötigt. Aktionsplanungsmodule (Spalte Planung) halten Zeitpläne für Maßnahmen zur Optimierung des betrieblichen Umweltschutzes z. B. in Form von Gant-Charts bereit. Eine Dokumentenverwaltung hält Verordnungen, Sicherheitsdatenblätter etc. vor.

Eine weiterführende Planung aufgrund von möglichst holistischen Modellen im Sinne einer aggregierten Bilanzierung von Finanz- und Materialflüssen und den dazugehörigen Umweltauswirkungen, den benötigten Mitarbeitern sowie dem Bedarf an Nebenaggregaten wie Abluftanlagen, Druckluft etc. und darauf basierenden Simulationen sind bei diesen Programmen nicht vorgesehen.

Zielführend zur Planung einer Demontagefabrik sind Softwarepakete, in denen die verschiedenen Verschaltungen von Prozessschritten visualisiert und durch Anbindung an eine Datenbank (mit Daten für Life Cycle Assessment sowie Input-/Output-Daten der Prozessschritte) miteinander verglichen werden können. Hierfür sind deutlich weniger Programme erhältlich, die die nötige Variabilität, die Darstellung auf unterschiedlichen Hierarchieebenen (Maschinen-, Anlagen-, Wirtschaftsraumbene...) sowie eine einfache Handhabung vereinen. Der Themenbereich Umweltmanagement sollte besser in speziell dafür ausgelegten Programmpaketen unterstützt werden um die Komplexität des zur Recyclingplanung genutzten Programmes nicht zu erhöhen.

Bei der Sichtung der marktverfügbaren Programme wurden drei grundlegende Ansätze identifiziert⁶:

- ▶ **Von Wissenschaftlern für Wissenschaftler.** Die Visualisierung von Prozessketten ist bei diesem Ansatz auf die einfache Handhabung einer größeren LCA-Datenbank optimiert. Es werden schnell publizierbare Ergebnisse erzielt, wobei die Aspekte Modellierung bzw. Simulation eher nachrangig sind und vergleichsweise mühsam eingepflegt werden müssen. (Beispiel: Software Umberto des ifu Hamburg – Institut für Umweltinformatik [Umberto])
- ▶ **Von der Industrie für die Industrie.** Entwickelt von Ingenieurdienstleistern aus dem Bereich Prozess- und Anlagenplanung, die ihre Erfahrung in die Softwareentwicklung einfließen lassen und die Funktionalität um eine CO₂-Bilanz erweitern. Der Einsatzbereich dieser Programme beschränkt sich jedoch auf die Industriezweige in

⁶ Die Bewertung unterliegt der individuellen Wahrnehmung, die genannten Programme sollen nur als Beispiel verstanden werden

denen die Erfahrung gewonnen wurde. (Beispiele: Software 360report der 360report GmbH [360report])

- **Recycling als metallurgische Aufgabenstellung.** Erfolgversprechender Ansatz für simulationsgestützte Entscheidungen bei der Suche nach der individuellen optimalen Prozesskette. Das zu recycelnde Material wird als künstliches Mineral aufgefasst und die Wiedergewinnung der Ausgangsrohstoffe simuliert. Die Prozessketten können material- oder produktzentriert optimiert werden und mittels einer nachgeschalteten LCA verglichen werden. Der Ansatz wurde durch Kombination zweier Werkzeuge realisiert: HSC Sim der Outotec Oyj [Outotec] und GaBi von thinkstep [GaBi]. gibt eine beispielhafte Darstellung der Benutzeroberfläche wieder.

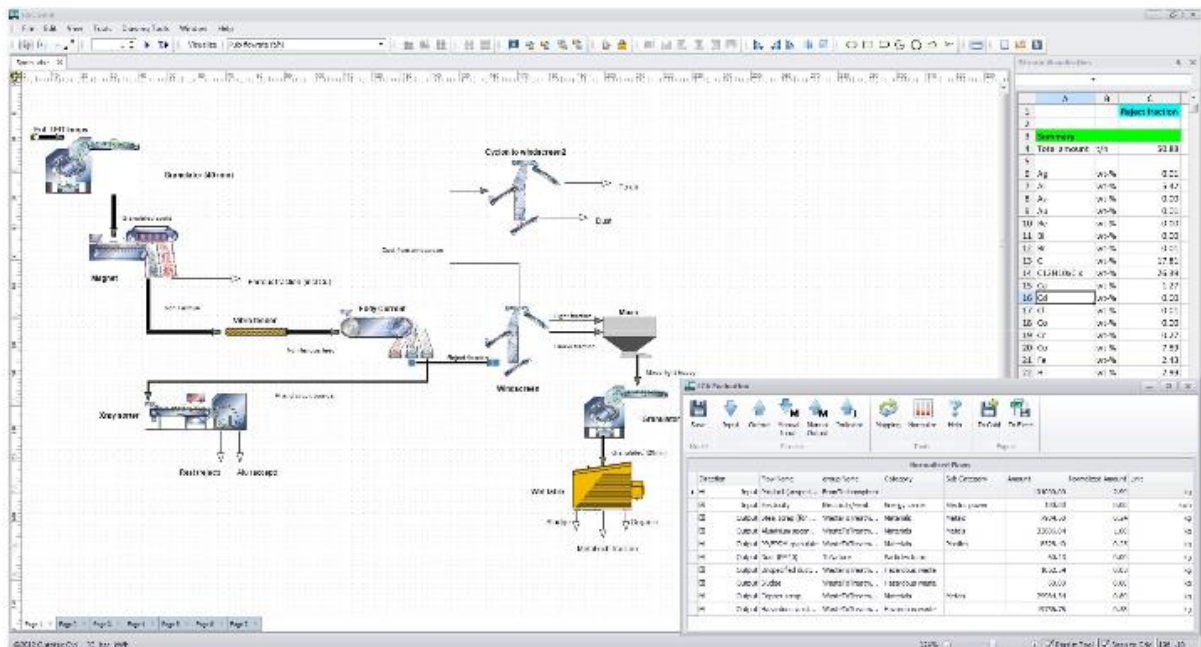


Abbildung 7-1: Benutzeroberfläche der Kopplung von HSC SIM und GaBi [van Schaik und Reuter 2014]

Grundlage aller simulationsgestützten Entscheidungen ist das Vorliegen einer ausreichenden Datenlage. Idealerweise liegen die Herstellerangaben zur Demontage oder zumindest zur materiellen Zusammensetzung der zu verarbeitenden Geräte vor. Positiv fällt hier das Programm IDIS auf, in dem Herstellerinformationen zur „sicheren, wirtschaftlichen und umweltgerechten Entsorgung von Altagos“ von 72 Automarken und 2123 verschiedenen Modellen hinterlegt sind [IDIS]. Dieses Programm beschränkt sich jedoch ausschließlich auf den Automobilbereich.

Vor dem Hintergrund der (Modell-)Vielfalt am Markt befindlicher Elektrogeräte und dem zukünftigen Ziel einer Materialrückgewinnung durch gezielte Demontage ist das Verfügbarmachen modellspezifischer Informationen nötig. Diese sind Grundlage für die produktoptimierte Demontageplanung, die analog der Herausforderung einer Losgröße-1-Produktion in der Industrie 4.0 zu sehen ist. Da die erforderlichen Daten für ein Demontagevorhaben selten vorliegen, muss ein Austausch von experimentellen Daten und Erfahrungen über ein Netzwerk ermöglicht werden. Dies ist auf Basis einer geeigneten

Softwarelösung gut zu realisieren. Das Einpflegen der Daten in eine entsprechende Datenbank muss dabei einfach zu handhaben sein wie das Ermitteln der Informationen, um bei der vorhandenen Vielzahl an individuellen Problemstellungen optimale Entscheidungen treffen zu können.

Werden die Ansätze zur Optimierung der Recyclingkette um Informationen über lokale Emissionen wie z. B. Lärm, Staub, Geruch, Span- und Funkenflug (Bedarf an Absaugungen und Lärmschutzmaßnahmen) und den räumlichen Bedarf der benötigten Anlagen und Arbeitsplätze erweitert, so wird über die reine Informationsbeschaffung hinaus die Detailplanung einer optimierten Demontagefabrik in einem CAD-Programm möglich.

7.3 Konzeption einer spezialisierten Softwarelösung

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt wurde, können die identifizierten Anforderungen mit den am Markt erhältlichen Softwareprodukten nicht oder nur mit erheblichem Aufwand ganzheitlich erfüllt werden. Daher wurde im Rahmen des Projektes eine spezialisierte Softwarelösung in Form eines universellen Planungs- und Simulationswerkzeuges konzeptionell entwickelt und in Teilen bereits prototypisch umgesetzt. Zur Realisierung der beschriebenen Ziele wurde eine umfangreiche Datenbankstruktur definiert und entwickelt, um dem Planungswerkzeug alle relevanten Informationen zu Produkten, Anlagen, Betriebseinheiten, Stoffströmen sowie zu Energie- und Kostenstrukturen zentral verfügbar zu machen. Mit dem Softwaretool selbst können dann basierend auf diesen Daten Prozesse modelliert und simuliert werden, um Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz aufdecken zu können. Insbesondere wurde bei der Konzipierung des Systems untersucht, welcher Bedarf an Funktionalität speziell für den Recycling-Sektor besteht und welche daraus resultierenden Planungs-, Simulations- und Optimierungs-Mechanismen in ihrer Gesamtheit mit bestehenden Lösungen nicht oder nur unzureichend umgesetzt werden können.

Ein weiteres wesentliches Ziel der Entwicklungsarbeiten ist eine bestmögliche Benutzerfreundlichkeit des Systems, um trotz der hohen funktionalen Komplexität eine intuitive Handhabung sowie eine übersichtliche und anwendergerechte Informationspräsentation zu gewährleisten, da dies laut Nutzer-Befragungen häufig ein Schwachpunkt bestehender Softwareprodukte sei.

Die Funktionalität des im Rahmen des Projektes entwickelten Prototyps orientiert sich zunächst am Beispiel der für das Projekt als Schwerpunkt identifizierten neodymhaltigen Produkte wie z. B. Elektromotoren, wobei insbesondere die im CUTEC erfolgten Demontageschritte modelliert wurden. Die in den verschiedenen Demontageversuchen generierten Ergebnisse bildeten somit die erste Datenbasis für den Aufbau der Datenbank sowie für die Tests der bereits umgesetzten Funktionsmodule des Front-Ends. Aufgrund der hohen Komplexität des geplanten Gesamtsystems war die vollständige Umsetzung im Rahmen der Projektlaufzeit nicht möglich, daher blieben die Arbeiten für große Teile des Systems auf die Identifizierung der notwendigen Funktionskomponenten und auf deren darauf basierende Konzeption beschränkt.

Im Folgenden werden die bereits erfolgten Entwicklungsarbeiten sowie das weiterführende Softwarekonzept für die Bereiche Datenbank und Front-End dargestellt.

7.3.1 Basisarchitektur

Da die Software und deren Ergebnis in erster Linie auf einer Vielzahl von Daten basiert, wurde als Basis-Architektur sinnvollerweise ein MVC-Ansatz (Model, View, Controller) gewählt (Abbildung 7-2).

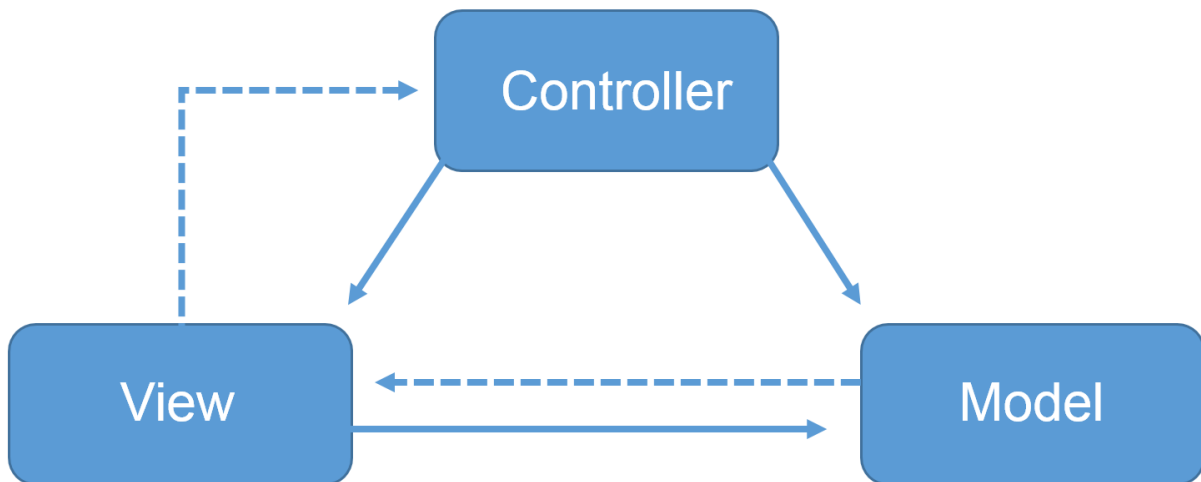


Abbildung 7-2: Model-View-Controller Schema

Das Modell (Model) wird hier durch die Datenbank repräsentiert, die die benötigte Datenstruktur auf geeignete Tabellen für die Materialien, Verarbeitungseinheiten, Stoffströme und Ressourcen abbildet. Die Sicht (View) wird durch das Front-End, also die Benutzerschnittstelle realisiert. Die Steuerung (Controller) liegt sowohl im Bereich der Datenbank (dort durch Funktionen realisiert) als auch im Front-End.

7.3.2 Front-End

7.3.2.1 Darstellung des entwickelten Konzeptes

Um die Verwaltung von Prozessen/Prozessketten möglichst intuitiv zu gestalten, ist ein Konzept unterschiedlicher Ebenen der Betrachtung durch den Benutzer vorgesehen. Dazu wird die Ebene der Maschine, der Anlage und des Wirtschaftsraums unterstützt mit den jeweils benötigten Steuerelementen. Das Ebenenkonzept ist dabei derart gestaltet, dass die Verarbeitungseinheiten und deren Vernetzungen auf der hierarchisch jeweils übergeordneten Ebene als eine einzelne Verarbeitungseinheit dargestellt werden. So kann beispielsweise zunächst eine Demontagefabrik auf Maschinenebene in vollem Umfang inklusive Ausstattung und Prozessabläufe abgebildet werden. Durch Anwahl der nächsthöheren Hierarchieebene (beispielsweise des umgebenden Industrieparks) lässt sich diese Demontagefabrik anschließend als separate, einzelne Verarbeitungseinheit mit den umliegenden Verarbeitungseinheiten vernetzen. Unabhängig von der abgebildeten Ebene verfügt jede Verarbeitungseinheit (Maschine, Wirtschaftsregion etc.) über entsprechend abgebildete Ein- und Ausgänge. So können beispielsweise die externe Logistik und die Vernetzungen mit den Zulieferern und Abnehmern der erzeugten Fraktionen dargestellt und die bestehenden Ströme (etwa von Materialien oder Energie) berechnet werden.

Diese Logik lässt sich beliebig erweitern. Ein Industriepark kann beispielsweise zu einer Verarbeitungseinheit zusammengefasst werden, um die Einbindung in die Wirtschaftsregion zu modellieren usw.. Dieses Prinzip ist bis hinauf zur Abbildung globaler Zusammenhänge fortführbar.

Für die korrekte Modellierung auf einer Ebene ist dabei nicht das Wissen über die untergeordneten Ebenen sämtlicher Verarbeitungseinheiten nötig – das heißt beispielsweise, dass für die Modellierung der Demontagefabrik inklusive der potenziellen Input- und Outputströme selbstverständlich nicht die internen Abläufe der umgebenden Unternehmen bekannt sein müssen. Diese können vielmehr als Black Boxes gesehen werden, über die lediglich die Input- und Outputströme bekannt sind.

Für die modellierten Systeme soll eine Speicherfunktion in einer zentralen Datenbank gegeben sein. Diese ermöglicht nach festgelegten Zugriffsrechten die Nutzung des Wissens in Form der hinterlegten Modelle durch weitere Stakeholder. Unternehmen, welche das Werkzeug zur Optimierung der internen Prozesse nutzen, profitieren einerseits durch die Möglichkeit zur energetischen oder stofflichen Vernetzung mit weiteren Unternehmen auf Basis der verfügbaren Daten. Andererseits können diese aus der internen Planung nach dem Prinzip des Black-Box-Ansatzes eine stark vereinfachte Abbildung ihres Unternehmens dem Netzwerk zur Verfügung stellen, in dem das Unternehmen als einzelne Verarbeitungseinheit mit Informationen über Input- und Outputströme sichtbar gemacht wird.

Langfristig wird bei breiter Teilnahme eine Abbildung der wirtschaftlichen Zusammenhänge entstehen, bei der das entstandene Wissen über die Material- und Energieflüsse das Bergen großer Effizienzpotenziale ermöglicht.

Für eine möglichst intuitive und einfache Bedienung, die für die Verbreitung des Werkzeuges essentiell ist, wird weder auf der Datenbank- noch auf der Frontendseite wesentlich zwischen den einzelnen Ebenen unterschieden. Es kommen lediglich ggf. spezielle Elemente hinzu, die dann nur in diesem speziellen Kontext sinnvoll sind. So ist etwa eine postalische Adresse zwar für eine Fabrik, nicht aber für eine Maschine oder einen ganzen Wirtschaftsraum sinnvoll. Die einzelnen Elemente der verschiedenen Ebenen sind dann bis auf das „Atom“ aufklappbar, welches selbst natürlich keine weitere Aufschlüsselung mehr enthält. Dabei ist die Verknüpfung von Einheiten verschiedener „Aufklapptiefen“ selbstverständlich möglich.

Eine Planungsebene kann wiederum verschiedene Sichten (etwa Material oder Energie) haben, je nachdem, was gerade modelliert oder dargestellt werden soll. Dabei verlaufen die Stoffströme horizontal wie beschrieben bzw. in den Abbildungen zu sehen, Energieflüsse vertikal, wie etwa im Falle von Planungen mit eigener Energieerzeugung (z. B. BHKW). Die Energie-Ressourcen-Andockstellen haben also nicht nur informativen Charakter, sondern man kann dadurch auch echte Energieflüsse modellieren. Die unterschiedlichen Sichten können jederzeit ein- bzw. ausgeblendet oder überlagert werden.

Eine wesentliche Funktionalität der Software ist die automatische Konsistenzprüfung in der Planungsphase bezüglich Materialtypen und sequentieller Durchsatzkapazitäten. Das heißt, es werden zum frühestmöglichen Zeitpunkt unmögliche Kombinationen erkannt und unter Fehlermeldung abgewiesen. So ist es z. B. nicht möglich, eine metallverarbeitende Einheit mit einem Eingabestrom zu verknüpfen, der nur Holz enthält. Dasselbe gilt für unzulässige Korngrößen, Temperaturen oder Massenströme.

Es besteht die Möglichkeit einer zeitlichen Modellierung des Prozesses. Dabei werden

Leerläufe/Überläufe in Betriebseinheiten oder Lagern automatisch erkannt und Aussagen über die zu erwartenden Ausgangsströme (Masse pro Zeit) und die benötigte Zeit für den Durchlauf durch die geplante Verarbeitungskette generiert. Auch die Umkehrung ist möglich, also den benötigten Eingabestrom zu einem gewünschten Ausgabestrom zu berechnen.

Es wird eine umfangreiche Methodik zur Verwaltung und klientelgerechten Darstellung von Detailinformationen gemäß auswählbaren Schwerpunkten wie Stoffstromanalysen, Energie- und Kostenbetrachtungen sowie zeitabhängigen Darstellungen der modellierten Prozesse zur Verfügung gestellt. Dazu kommen ebenfalls geeignete Sichten zur Anwendung.

Beim Hovern mit dem Mauszeiger über ein Element (Betriebseinheiten, Logistikknoten, Pfeile) wird der Benutzer über eine ToolTip-ähnliche Einblendung beim Element sofort und ohne weitere Interaktion mit den wichtigsten Kurzinformationen versorgt, die beim einfachen Mausklick zu einer detaillierteren Anzeige in einem Textfenster erweitert wird (wie in Abbildung 7-6 ersichtlich). Bei Doppelklick öffnet sich ein Fenster zur Bearbeitung sämtlicher Eigenschaften, in der das Element vollständig definiert werden kann bzw. der Datenbank-Import/Export geregelt wird.

Für das gesamte Modell gibt es eine zentrale Übersicht über Energie- und Personalbedarf. Dabei können die Platzhalter für die Kosten mit tatsächlichen Kosten/Löhnen hinterlegt werden, um Zahlen zur Wirtschaftlichkeit zu erhalten.

Rein konzeptuell sind Arbeiten zur (semi-)automatischen Optimierung durchgeführt worden, durch die bestehende Modellteile aus stofflicher oder energetischer Sicht mittels Systemänderungen verbessert werden sollen. Dies beinhaltet etwa die Definition von Anforderungsfiltren zur komfortablen Suche nach geeigneten Anlagen-Komponenten in der Datenbank, oder aber die Integration intelligenter Algorithmen zur Bewertung von Planungskonzepten.

7.3.2.2 Benutzeroberfläche

Im Rahmen der bisherigen Entwicklungsarbeiten sind die benötigten Datenstrukturen und Klassen zur Verwaltung und Darstellung aller grundlegenden Komponenten definiert und implementiert worden. Das System ist dabei modular aufgebaut, was die Wartbarkeit bei der zu erwartenden Komplexität sowie eine weitestgehend universelle Anpassbarkeit unterstützt.

Die Methoden zur Definition von Verarbeitungseinheiten und Stoffströmen sind in Teilen bereits realisiert worden und befinden sich darüber hinaus in der Konzeptionsphase. Die Anbindung an die Datenbank erfolgt benutzergesteuert über verschlüsselte Passwörter, so dass unterschiedlichen Benutzergruppen verschiedene Rechte bei der Verwendung des Programms eingeräumt werden können, was z. B. die Definition und Erstellung neuer Anlagen betrifft.

Das Hauptfenster des Programms, wie es sich dem Benutzer zum Stand der Entwicklung bei Projektende direkt nach dem Start der Software präsentiert, ist in Abbildung 7-3 dargestellt. Es besteht aus folgenden Elementen:

- ▶ Menüleiste zum Zugriff auf die meistgenutzten Funktionen wie das Erstellen, Laden und Speichern von Projekten, das Setzen von Stoffstromquellen und –senken, Betriebseinheiten, Logistikknoten und Materialflüssen sowie das Löschen

- ▶ ausgewählter Komponenten
- ▶ Einem frei verschiebbaren und andockfähigen Fenster zur Darstellung detaillierter Informationen über ausgewählte Komponenten
- ▶ Einem Fenster für weiterführende Informationen, welches dem Benutzer Daten über den Status des Programms sowie zu Analyse- und Simulationsaufgaben liefert
- ▶ Einem Teilbereich, welcher Eigenschaften der vom Benutzer ausgewählten Komponenten (wie Personal-/Energie-/Betriebsmittelbedarf, Materialdurchsatz, Emissionen und Reststoffe etc.) übersichtlich darstellt
- ▶ Dem zentralen Bearbeitungsbereich für die Planung und Darstellung aller Komponenten eines Projektes (Anlagen, Wirtschaftsräume, ...)

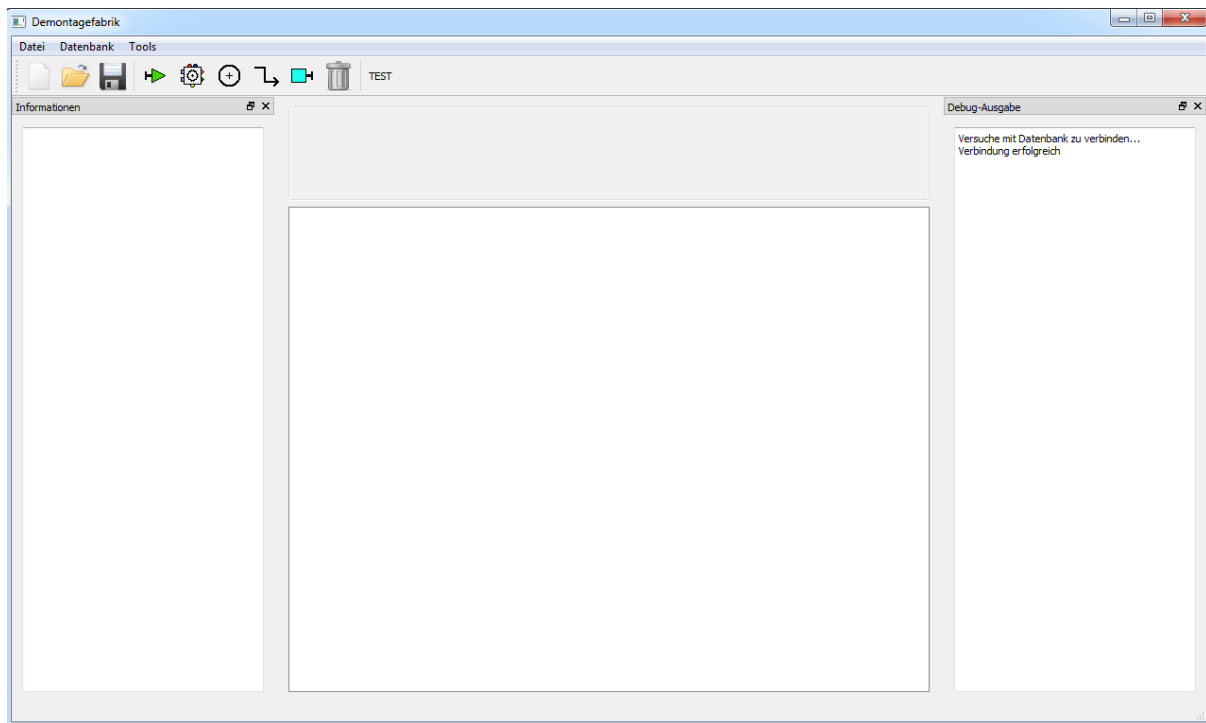


Abbildung 7-3: Hauptfenster nach Programmstart

Das Platzieren und Verknüpfen aller Komponenten (Quellen, Senken, Betriebseinheiten, Logistikknoten und Materialflusspfeile) ist bereits vollumfänglich implementiert worden, bei Verschiebungen einzelner Komponenten passen sich die verbindenden Pfeile automatisch an, wobei auch Pfeilüberschneidungen gemäß den aktuellen Standards durch Unterbrechung eines Pfeiles realisiert werden. Abbildung 7-4 zeigt beispielhaft die derzeit verfügbaren Möglichkeiten zur Planungsvisualisierung. Betriebseinheiten erhalten entsprechend ihrer Funktion gängige Symbole oder können manuell mit Text oder Bildern versehen werden. Stoffströme werden auf der horizontalen Achse realisiert, die Symbole am oberen Rand liefern Informationen zu Personal-/Energiebedarf bzw. Betriebsmitteln, während jene am unteren Rand zur Definition von Emissionen bzw. Reststoffen etc. verwendet werden. Entsprechende Details sollen durch Bewegungen des Mauszeigers über die Symbole bzw. detailliert durch Mausklicks dem Benutzer dargestellt werden.

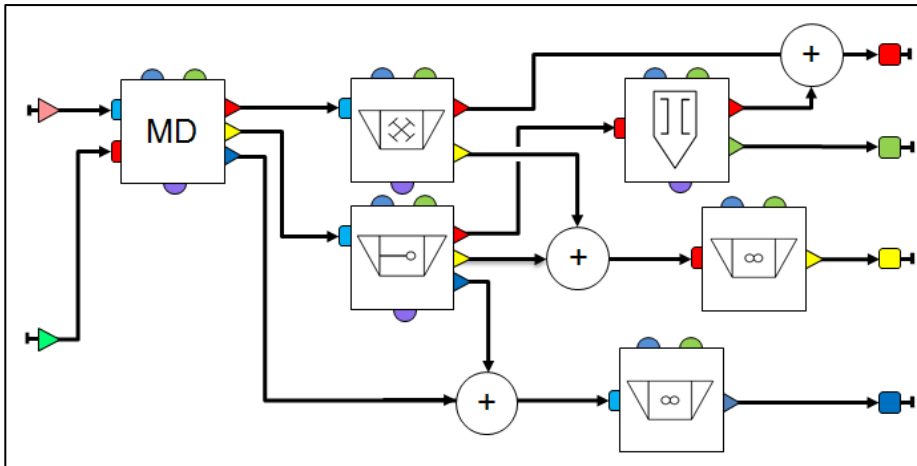


Abbildung 7-4: Darstellungsbeispiel für Planung einer Demontagefabrik

Die Definition von Betriebseinheiten geschieht wahlweise durch Auswahl bereits existierender Anlagen aus der Datenbank (vgl. Abbildung 7-5) oder durch Erstellung eigener Typen. Die kreisförmigen Symbole (Logistikknoten) dienen zur Darstellung von Zusammenführungen bzw. Trennungen von Stoffströmen und können beispielsweise Lager oder verschiedene Behälter repräsentieren. Die Pfeile symbolisieren die im System dargestellten Stoffströme und können ebenfalls je nach modellierter Ebene verschiedenen realen Umsetzungen entsprechen, so etwa Förderbändern, Gabelstaplern/Paletten, Transporten per Straße oder Bahn, etc.. Entsprechende Details werden dem Nutzer wiederum bei Bedarf per Mausklick angezeigt, wie in Abbildung 7-6 verdeutlicht.

Typ/Modell	Hersteller
<ul style="list-style-type: none"> ▲ Zerkleinerungsmaschinen <ul style="list-style-type: none"> ▷ Schredder ▲ Schrottschere <ul style="list-style-type: none"> ▷ Pressende Schrottschere ▷ Guillotineschere ▷ Alligatorschere ▷ Baggerschere ▲ Hydraulische Handschere <ul style="list-style-type: none"> ICU 02 Holmatro ICU 10 A10 Holmatro <li style="background-color: #e0f0ff;">ICU 05 Holmatro ICU 40 A30 Holmatro ▲ Hydraulische Kabelschere <ul style="list-style-type: none"> ES 120/120 ES ▲ Motorbrecher <ul style="list-style-type: none"> JMC 1200 JMC ▲ Pressen <ul style="list-style-type: none"> ▷ Schrottpresse ▷ Spänpresse ▷ Klappdeckelpresse ▷ Separator ▷ Kabelrecycling ▷ Computerschrottanlage 	

Abbildung 7-5: Auswahl von Betriebseinheiten aus der Datenbank

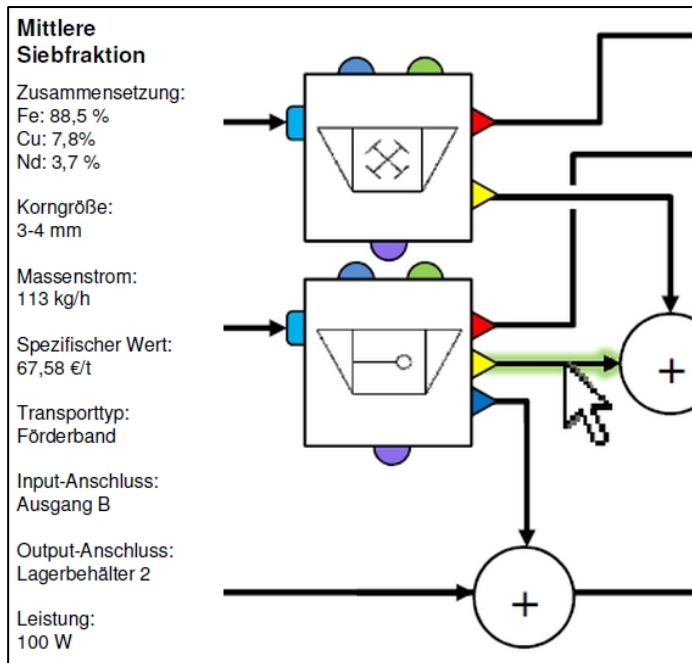


Abbildung 7-6: Beispiel für Detailinformationen zu Einzelkomponenten

7.3.3 Daten

Eine Softwarelösung zur Planung einer Demontagefabrik im urbanen Raum benötigt bzw. basiert auf einer Fülle von Daten. Dazu gehören:

- ▶ Von außen einzupflegende Daten:
 - Detaillierte Informationen (Datenblätter) über die auf dem Markt verfügbaren und für diesen Zweck geeigneten Demontageeinheiten
 - Informationen über den Aufbau und die Materialaufschlüsselung der zu demontierenden Objekte
 - Informationen über die Materialien
 - Preisinformationen
 - Informationen, um eine Ökobilanz erstellen zu können (etwa Ecoinvent).
- ▶ Von der Software generierte Daten:
 - Verwendete Komponenten innerhalb einer Modellierung
 - Ressourcen-Informationen (z. B. elektrische Energieversorgung, Kühlmöglichkeiten, etc.)
 - Emissionen, z. B. Lärm, Abgase, Abwärme, etc.
- ▶ Weitere Anforderungen an die Verwaltung der Daten sind:
 - Daten können asynchron, also unabhängig von der Nutzung der Planungssoftware anfallen und sollten ohne Störung des Ablaufs so schnell wie möglich eingepflegt werden können. Das gilt etwa für Preisinformationen, die sich

täglich ändern können.

- Nicht alle Daten sollten für jeden Benutzer gleichermaßen sichtbar sein (Stichwort Datensicherheit).
- Leichte Nutzbarkeit von Daten aus anderen Quellen (etwa Ecoinvent)
- Mögliche Nutzbarkeit der Daten auch durch andere Programme
- Es muss die einfache Möglichkeit von Backups geben, um Datenverlust zu vermeiden.
- Rückverfolgbarkeit und Möglichkeit der Revision von Änderungen
- Unterstützung der Mehrsprachigkeit der Daten.

7.3.3.1 Datenbank

Aus den Anforderungen ergibt sich die Notwendigkeit, diese Daten zuverlässig abzuspeichern, den parallelen Zugriff darauf zu organisieren und eine einfache, robuste und einheitliche Schnittstelle zwischen den Daten und der bzw. den Anwendungen zu schaffen.

Dabei ist eine relationale Datenbank das geeignete Mittel, um diese Anforderungen sicher und auch zuverlässig zu erfüllen. Dazu muss die verwendete Datenbank das ACID-Konzept (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) [Haerder et al. 1983] erfüllen, was aber bei den meisten erhältlichen Datenbanksystemen der Fall ist.

Um den Anforderungen nach Sicherheit gerecht zu werden, wird auf die strikte Einhaltung folgender drei Abstraktionsebenen geachtet:

- ▶ physikalische Ebene (interne Dateien des Datenbankservers)
- ▶ Konzeptionsebene (Tabellen)
- ▶ Benutzerebene (Sichten und Funktionen, englisch: API, Application Programming Interface).

Benutzer haben dabei nur Zugriff auf die letzte Ebene, also die Sichten und Funktionen.

Bei der Konzeption der Datenbankschemata wird darauf geachtet, dass hierarchische Strukturen korrekt abgebildet und ggf. auch wieder so extrahiert werden können. Dadurch sind trotz einfacher Grundkonzeption auch sehr komplexe Strukturen abbildbar. So sind beispielsweise sowohl die Materialien als auch die Verarbeitungseinheiten hierarchisch strukturiert, d.h. Materialien können wiederum aus einfacheren Materialien und Verarbeitungseinheiten (z. B. Anlagen) aus elementarerer Verarbeitungseinheiten (z. B. Maschinen) aufgebaut sein (siehe Beispiel, Abbildung 7-7).

So kann sowohl mit dem speziellen Material als auch mit der übergeordneten Kategorie gearbeitet werden, wenn dies sinnvoll ist oder die Datenlage keine genauere Spezifikation zulässt.

	id integer	parent integer	name_path integer[]	name integer	Name path text[]	Name text
71	71	70	{9327,9363,9364}	9364	{Metalle,Alkalimetalle,Caesium}	Caesium
72	72	70	{9327,9363,9365}	9365	{Metalle,Alkalimetalle,Kalium}	Kalium
73	73	70	{9327,9363,9366}	9366	{Metalle,Alkalimetalle,Lithium}	Lithium
74	74	70	{9327,9363,9367}	9367	{Metalle,Alkalimetalle,Natrium}	Natrium
75	75	70	{9327,9363,9368}	9368	{Metalle,Alkalimetalle,Rubidium}	Rubidium
76	76	34	{9327,9369}	9369	{Metalle,Erdalkalimetalle}	Erdalkalimetalle
77	77	76	{9327,9369,9370}	9370	{Metalle,Erdalkalimetalle,Barium}	Barium
78	78	76	{9327,9369,9371}	9371	{Metalle,Erdalkalimetalle,Beryllium}	Beryllium
79	79	76	{9327,9369,9372}	9372	{Metalle,Erdalkalimetalle,Calcium}	Calcium
80	80	76	{9327,9369,9373}	9373	{Metalle,Erdalkalimetalle,Magnesium}	Magnesium
81	81	76	{9327,9369,9374}	9374	{Metalle,Erdalkalimetalle,Strontium}	Strontium
82	82	34	{9327,9375}	9375	{Metalle,Übergangsmetalle}	Übergangsmetalle
83	83	34	{9327,9376}	9376	{Metalle,"Seltene Erden"}	Seltene Erden
84	84	83	{9327,9376,9377}	9377	{Metalle,"Seltene Erden",Scandium}	Scandium
85	85	83	{9327,9376,9378}	9378	{Metalle,"Seltene Erden",Lanthan}	Lanthan
86	86	83	{9327,9376,9379}	9379	{Metalle,"Seltene Erden",Cer}	Cer
87	87	83	{9327,9376,9380}	9380	{Metalle,"Seltene Erden",Praseodym}	Praseodym
88	88	83	{9327,9376,9381}	9381	{Metalle,"Seltene Erden",Neodym}	Neodym
89	89	83	{9327,9376,9382}	9382	{Metalle,"Seltene Erden",Promethium}	Promethium
90	90	83	{9327,9376,9383}	9383	{Metalle,"Seltene Erden",Samarium}	Samarium
91	91	83	{9327,9376,9384}	9384	{Metalle,"Seltene Erden",Europium}	Europium
92	92	83	{9327,9376,9385}	9385	{Metalle,"Seltene Erden",Yttrium}	Yttrium
93	93	83	{9327,9376,9386}	9386	{Metalle,"Seltene Erden",Gadolinium}	Gadolinium
94	94	83	{9327,9376,9387}	9387	{Metalle,"Seltene Erden",Terbium}	Terbium
95	95	83	{9327,9376,9388}	9388	{Metalle,"Seltene Erden",Dysprosium}	Dysprosium
96	96	83	{9327,9376,9389}	9389	{Metalle,"Seltene Erden",Holmium}	Holmium
97	97	83	{9327,9376,9390}	9390	{Metalle,"Seltene Erden",Erbium}	Erbium
98	98	83	{9327,9376,9391}	9391	{Metalle,"Seltene Erden",Thulium}	Thulium
99	99	83	{9327,9376,9392}	9392	{Metalle,"Seltene Erden",Ytterbium}	Ytterbium
100	100	83	{9327,9376,9393}	9393	{Metalle,"Seltene Erden",Lutetium}	Lutetium
101	101	34	{9327,9394}	9394	{Metalle,Legierung}	Legierung
102	102	101	{9327,9394,9395}	9395	{Metalle,Legierung,Bronze}	Bronze
103	103	101	{9327,9394,9396}	9396	{Metalle,Legierung,Gusseisen}	Gusseisen
104	104	101	{9327,9394,9397}	9397	{Metalle,Legierung,Messing}	Messing
105	105	101	{9327,9394,9398}	9398	{Metalle,Legierung,Stahl}	Stahl
106	106	101	{9327,9394,9399}	9399	{Metalle,Legierung,Weichlot}	Weichlot
107	107		{9400}	9400	{Schrott}	Schrott
108	108	107	{9400,9401}	9401	{Schrott,Mischschrott}	Mischschrott
109	109	107	{9400,9402}	9402	{Schrott,Elektroschrott}	Elektroschrott
110	110		{9403}	9403	{Fett}	Fett
111	111	110	{9403,9404}	9404	{Fett,Schmierfett}	Schmierfett
112	112		{9405}	9405	{Kabel}	Kabel
113	113		{9406}	9406	{Kondensatoren}	Kondensatoren

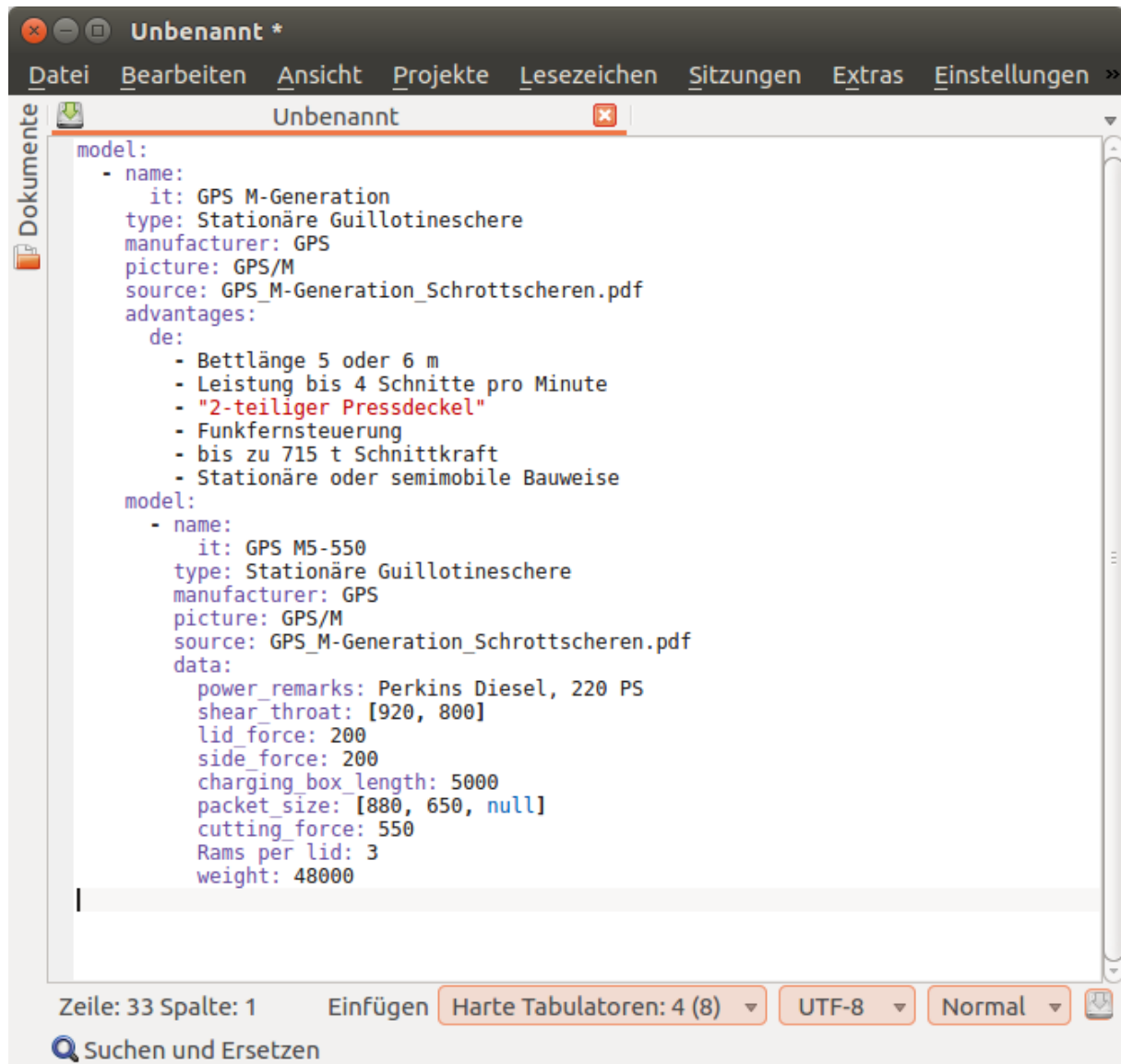
139 Zeilen.

Abbildung 7-7: Ausschnitt aus der Sicht der hierarchischen Struktur der Materialien im Administrationstool pgadmin

7.3.3.2 Sichern und Wiederherstellen

Um ein einfaches Sichern und späteres Wiedereinlesen (Export/Import) aller Daten auch bei geänderter Datenbankstruktur (bedingt durch nötige Anpassungen im Rahmen der Entwicklung) leicht zu ermöglichen, ist ein flexibles und gleichzeitig gut lesbares Format nötig. So können nötigenfalls die Daten vor dem Wiedereinlesen leicht angepasst oder modifiziert werden, etwa um den Veränderungen in der Datenbankstruktur Rechnung zu tragen. Dadurch wird auch die langfristige Wartbarkeit deutlich erleichtert. Auch kann das Einpflegen – etwa von Datenblättern der Hersteller von Verarbeitungseinheiten – komfortabel auf diesem Wege erfolgen. Als geeignetes Format für diese rein textuelle Repräsentation wurde das Format

YAML gewählt, welches die Daten auch für Ungeübte selbst auf dieser Ebene noch gut lesbar macht (Beispiel siehe Abbildung 7-8).



```
model:
  - name:
      it: GPS M-Generation
      type: Stationäre Guillotineschere
      manufacturer: GPS
      picture: GPS/M
      source: GPS_M-Generation_Schrottscheren.pdf
      advantages:
        de:
          - Bettlänge 5 oder 6 m
          - Leistung bis 4 Schnitte pro Minute
          - "2-teiliger Pressdeckel"
          - Funkfernsteuerung
          - bis zu 715 t Schnittkraft
          - Stationäre oder semimobile Bauweise
    model:
      - name:
          it: GPS M5-550
          type: Stationäre Guillotineschere
          manufacturer: GPS
          picture: GPS/M
          source: GPS_M-Generation_Schrottscheren.pdf
          data:
            power_remarks: Perkins Diesel, 220 PS
            shear_throat: [920, 800]
            lid_force: 200
            side_force: 200
            charging_box_length: 5000
            packet_size: [880, 650, null]
            cutting_force: 550
            Rams per lid: 3
            weight: 48000
```

Abbildung 7-8: Die processing unit models im YAML export/import-Format

7.3.3.3 Rückverfolgbarkeit und Revision von Änderungen

Um Änderungen an den Daten besser zurückverfolgen zu können, werden die dazu benötigten Informationen bereits in der Datenbank automatisch erhoben und mit abgespeichert. Es kann also von jedem Datensatz beliebig viele, über Zeitstempel und Benutzer eindeutig identifizierbare Versionen geben. Durch diese Vorgehensweise können Verursacher von Fehlern identifiziert und Fehler im Nachhinein leichter behoben werden.

7.3.3.4 Mehrsprachigkeit

Um zukünftig auch eine Anwendung im internationalen Kontext zu ermöglichen, wurde die Unterstützung der Mehrsprachigkeit aller relevanten Texte durch die Datenbank vorgesehen. Dabei werden alle Sprachen gemäß ISO 639 unterstützt (Beispiel in Abbildung 7-9). Auf eine Suchanfrage in einer spezifischen Sprache können so auch Suchergebnisse in sämtlichen Sprachen gefunden werden.

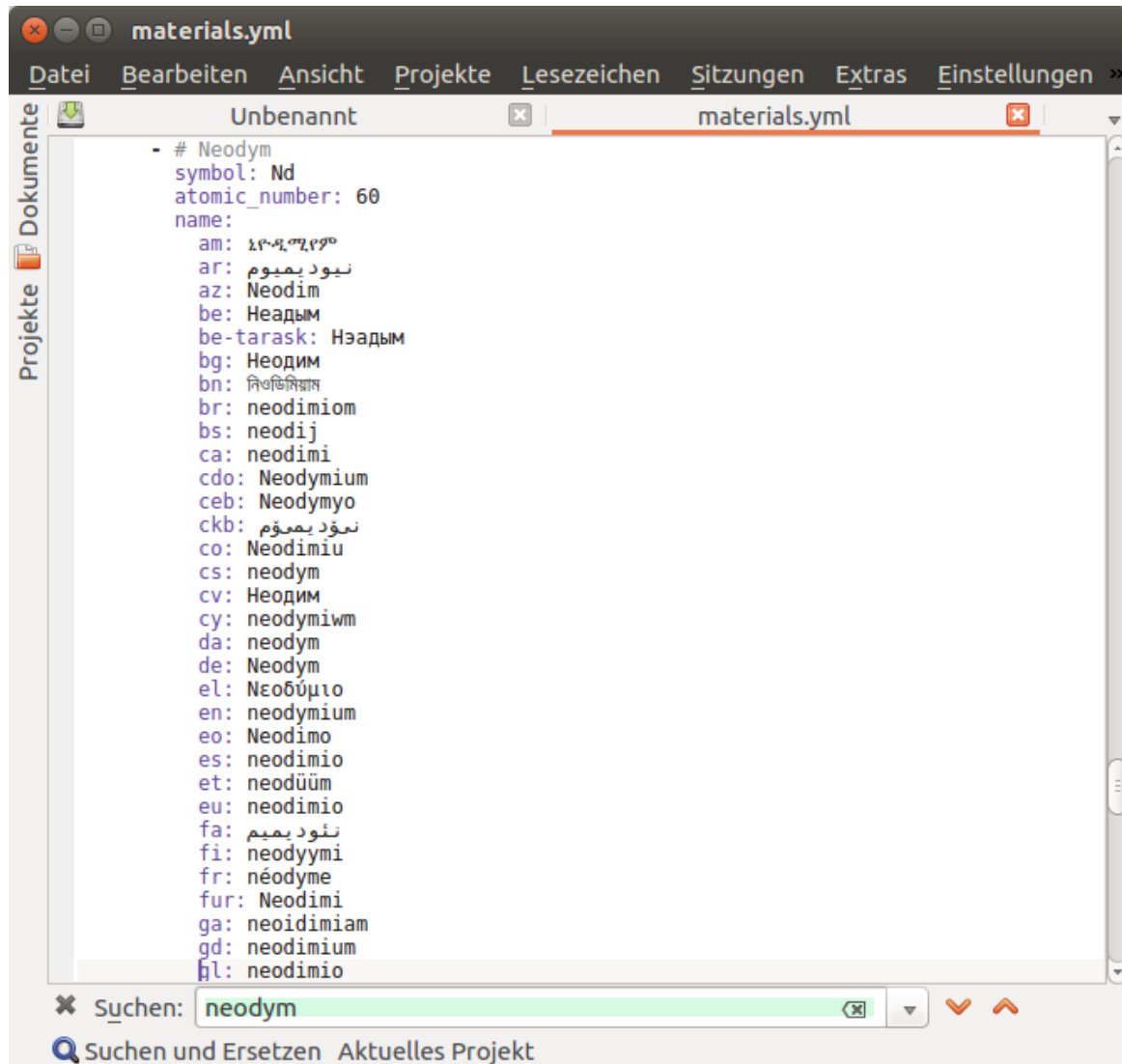


Abbildung 7-9: Mehrsprachigkeit am Beispiel des Materials Neodym

7.3.3.5 Datensicherheit

Die nötige Datensicherheit wird durch geeignete Rechtevergabe bereits auf der Ebene der Datenbank realisiert, so dass jeder Benutzer nur die Daten sehen kann, für die er vom Administrator die entsprechenden Rechte erhalten hat. Dazu werden geeignete Rollen für Gruppen und einzelne Benutzer angelegt, die dann die Zugriffsrechte feingranuliert steuern können.

7.3.3.6 Datenimport

Zur Erhöhung der Flexibilität des Planungswerkzeugs ist es wünschenswert, dass Daten auch aus anderen Quellen (beispielsweise aus Life-Cycle-Datenbanken) leicht und ohne großen Aufwand genutzt werden können. Dazu bieten sich im Fall der verwendeten PostgreSQL-Datenbank sogenannte Foreign Tables an, also die Möglichkeit, Tabellen anderer Datenbanken in die Daten genauso einzubinden wie interne Daten. Zusätzlich bietet die implementierte YAML-Schnittstelle die Möglichkeit, Daten notfalls auch manuell mit vertretbarem Aufwand einzupflegen, was die Flexibilität weiter erhöht.

7.3.3.7 Stand der Implementierung

Alle wesentlichen Tabellen des Datenbankschemas wurden im Projektverlauf implementiert und können mit einem ebenfalls bereits erstellten Satz von Skripten und YAML-Dateien vollautomatisch mit Daten gefüllt werden. All dies geschieht durch ein ebenfalls bereits erstelltes Framework, welches unter dem Punkt „Sichern und Wiederherstellen“ bereits beschrieben wurde und mit dem man die Datenbank jederzeit ohne größeren Aufwand auch nach Änderungen am Schema (Weiterentwicklung) erneut mitsamt Daten aufsetzen kann. Dies ist mit den üblichen Datenbankwerkzeugen nicht möglich, da diese nur eine Wiederherstellung mit demselben Datenbankschema erlauben.

In der Datenbank sind folgende Funktionalitäten realisiert:

- ▶ Das Abrufen, Einpflegen und Verändern einzelner Verarbeitungseinheiten (Maschinen, Anlagen, Wirtschaftsräume...)
- ▶ Die Unterstützung mehrerer Versionen eines Datensatzes
- ▶ Die Benutzerebene (siehe Kapitel 7.3.3.1) ist angelegt und mit entsprechenden Sichten und Funktionen gefüllt.

7.3.4 Zukünftige Möglichkeiten

Der bereits existierende Ansatz bietet ein vielfältiges Potential zur Erweiterung des bestehenden Planungsmodells durch Informationseinbindung, wie etwa von ökologischen Kennzahlen aus LCA-Datenbanken. Dazu sind datenbankseitig bereits die nötigen strukturellen Anpassungen vorgenommen worden.

Auch kann man durch Schaffung geeigneter Add-On das Planungstool für den konkreten Anlagenbau einsetzbar machen. Die Visualisierung kann dazu von der derzeitigen zweidimensionalen Konzeptionssicht um eine umschaltbare 2D- oder 3D-Sicht der kompletten Anlage erweitert werden, so dass man die zu erstellende Fabrik bereits virtuell begehen kann.

Dazu bieten sich folgende Wege an:

- 1) Implementierung eines oder mehrerer Add-Ons innerhalb der bestehenden Software. Diese Vorgehensweise ist zwar am flexibelsten und bietet die meisten Möglichkeiten, ist aber gleichzeitig auch die aufwendigste.
- 2) Entwicklung eines oder mehrerer Plugins für existierende CAD-Software, um bei Planung/Konstruktion von Produkten bereits Zahlen zu Materialbedarf, Ökobilanz etc. verfügbar zu haben. Dadurch könnte bestehende Software genutzt werden, allerdings werden dadurch die Möglichkeiten bei der Ausgestaltung dieser Plugins limitiert.

Zudem hängt dies stark von der jeweiligen Schnittstelle bzw. der CAD-Software ab. Viele existierende CAD-Programme bieten solche Schnittstellen an.

- 3) Entwicklung einer Exportschnittstelle, um so das erstellte Modell im geeigneten Format (etwa DXF) an eine dann weiter zu verwendende CAD-/Planungssoftware zu übergeben. Vorteil ist hier der vergleichsweise geringe Kostenaufwand. Allerdings stehen einem dann natürlich auch nur die Möglichkeiten der verwendeten CAD-Software zur Verfügung.
- 4) Beliebige Kombinationen aus den obigen Möglichkeiten sind natürlich ebenfalls denkbar, so dass sich dadurch die Vorteile bündeln ließen, ohne die Nachteile zu sehr ins Gewicht fallen zu lassen. So schließt etwa eine DXF-Exportschnittstelle nicht die zusätzliche Implementation von Add-Ons aus. Auch kann es ausreichen, nur einige Aspekte über spezielle Add-Ons detaillierter zu behandeln, während man dann den ganzen Rest dem bereits vorhandenen CAD-Programm überlässt.

8 Konzeptionelle Entwicklung der Demontagefabrik

8.1 Ausgestaltung einer Demontagefabrik

8.1.1 Grundlegender Aufbau

Folgend soll die mögliche Ausgestaltung einer Demontagefabrik zur Verarbeitung von Industrie-Elektromotoren sowie Fahrantrieben und Nabendynamos aus dem Fahrradbereich dargestellt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrradkomponenten bereits ausgebaut in die Demontagefabrik gelangen. Aufgrund der Stellung der Demontagefabrik als zentralisierte Einrichtung sollte, mit dem Ziel der Vermeidung unnötiger Transportaufwände, die vorbereitende Arbeit des Ausbaus an den jeweiligen Sammelstellen erfolgen.

Die Entscheidung darüber, ob die Verarbeitung eines spezifischen Gerätes aus ökonomischen oder ökologischen Gesichtspunkten vorteilhaft ist, sollte nicht erst in der Demontagefabrik erfolgen. Vielmehr ist auch das Treffen dieser Entscheidung bereits an den jeweiligen Sammelstellen erforderlich, um die anderenfalls entstehenden Transportaufwände zu vermeiden. Zu diesem Zweck ist die Nutzung der zentralen Demontage-Datenbank vorgesehen, zu der Sammelstellen oder Entsorgungsbetriebe entsprechend Zugang haben sollten. Durch die RFID-Markierung und das Bereitstellen einer entsprechenden automatisierten Datenauswertung ist die Entscheidungsfindung schnell und ohne weiteres Detailwissen möglich.

Von den Sammelstellen werden voraussichtlich gemischte Chargen der Zielgeräte geliefert. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus [Spitzbart et al. 2008] wurde daher eine Vorselektion der zu demontierenden Geräte im Anschluss an die zentrale Anlieferung eingeplant.

Die Verarbeitung der Altgeräte beginnt bei der Vorselektion mit dem Einlesen der UHF-RFID-Tags, welche durch Anbindung an die zentrale Demontage-Datenbank Anschluss über die Materialinhalte, Demontagewege und Demontagezeiten gibt. Auf Basis dieser Daten werden bei der Vorselektion folgende Kategorien erzeugt:

- ▶ Industrie-Elektromotoren
- ▶ Nabendynamos
- ▶ Nabenantriebe
- ▶ Mittelmotor-Antriebe
- ▶ Sonderpositionen.

Diese Aufteilung richtet sich nach der unterschiedlichen Konstruktionsweise der Geräte. Die Separation bedingt eine Minimierung der nötigen Werkzeugwechsel an den Demontageplätzen. Zu diesem Zweck ist ebenfalls eine weitere Unterteilung innerhalb der vier Kategorien denkbar, die sich an einer tiefergehenden Ähnlichkeit einzelner Geräte orientiert. Beispielsweise könnte auch die Größe der Industrie-Elektromotoren ein Kriterium sein.

Zu den Sonderpositionen werden Geräte gezählt, die eines der folgenden Merkmale aufweisen:

- ▶ Fehlende/fehlerhafte RFID-Kennung
- ▶ Schäden durch Korrosion oder Transport, welche eine standardisierte Demontage voraussichtlich verhindern
- ▶ Beinhaltung schadstoffbelasteter Bauteile.

Im Anschluss an die Vorselektion werden Chargen der Kategorien an entsprechend ausgerüstete Demontageplätze verteilt. Der erste Arbeitsschritt ist hier die Prüfung auf mögliche Wiederverwendung. Dies wird nur bei solchen Geräten durchgeführt, für die aus Erfahrung eine Nachfrage besteht bzw. für die es gelingt, einen Markt zu erzeugen. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Testprozeduren ist auch hierbei die automatische Erkennung per RFID von Vorteil, durch die Informationen über die Notwendigkeit der Prüfung und die dabei nötige Vorgehensweise aus der Datenbank bereitgestellt werden können. Funktionsfähige Geräte werden dementsprechend repariert und können vermarktet werden.

Defekte Geräte werden demontiert, was entweder manuell oder durch Einsatz entsprechender Roboter realisiert wird. Die demontierten Wertstoffe werden an den Demontageplätzen in separaten Behältern gesammelt, was nach Erkenntnissen aus [Spitzbart et al. 2008] eine hohe Trennqualität bedingt. Die erhaltenen Fraktionen sind:

- ▶ Kupfer
- ▶ Aluminium
- ▶ Eisen (inklusive Elektroblech)
- ▶ Magnetmaterial Ferrit
- ▶ Magnetmaterial NdFeB
- ▶ Kunststoff
- ▶ Mischschrott
- ▶ Elektroschrott
- ▶ Kondensatoren (gefährliche Inhaltsstoffe).

Wie im Ergebnisteil in den Kapiteln 5.1.2.1 bis 5.1.2.3 erwähnt, gestaltet sich die Wiedergewinnung der hinsichtlich des Wiederverkaufswertes wichtigen Kupferfraktion bei den verschiedenen Geräten unterschiedlich. Die lackgetränkten Statoren der Nabenantriebe und Industrie-Elektromotoren gelangen nach deren Separation in die Lösemittelbehandlung. Nach entsprechender Einwirkzeit ist bei dieser eine Spülung zur Neutralisation erforderlich. Anschließend werden die Kupferdrähte maschinell aus den Blechpaketen entfernt.

Um einen möglichst hohen Verkaufspreis für die erzeugte Kupferfraktion zu erzielen, wäre anzustreben, die höchstmögliche Qualitätsstufe am Schrottmarkt (Millberry) zu erreichen. Millberry-Kupfer sind saubere, blanke Drähte mit einem Durchmesser von mindestens einem Millimeter, die keine Rückstände oder Verfärbungen aufweisen, welche auf ein Abbrennen hindeuten [Schrottpreise 2016]. Da die in den verarbeiteten Geräten verbauten Kupferwicklungen allesamt mit Isolierlack versehen sind, müsste dazu auch dieser entfernt werden. Gegen chemische Angriffe müssen die heute verwendeten Kupferdrahtlacke jedoch weitgehend beständig sein, so dass deren vollständige Entfernung nicht auf gleichem Wege wie die Entfernung der Tränklacke erfolgen kann. Von einer weiteren Laugung des Kupferdrahtes innerhalb der Demontagefabrik wird daher abgesehen.

8.1.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Auf Basis eines Microsoft EXCEL-basierten Simulationswerkzeuges (siehe Abbildung 8-1) wurde eine grobe monetäre Bewertung der beschriebenen Demontagefabrik durchgeführt.

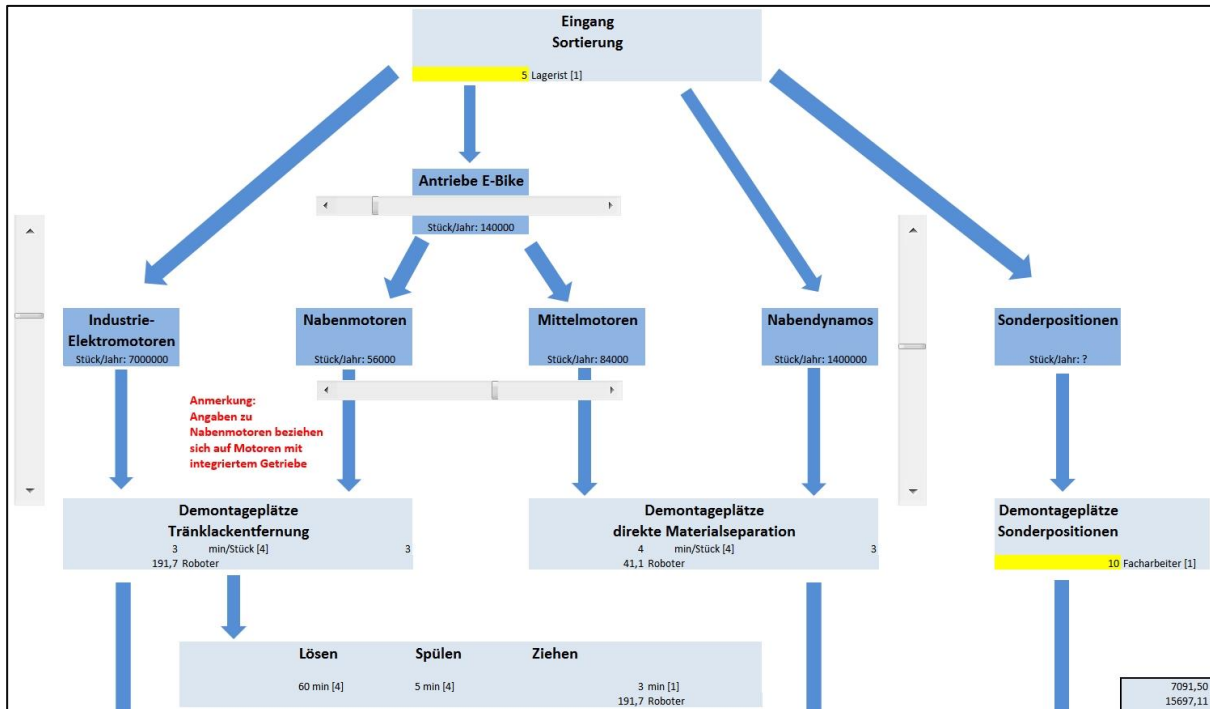


Abbildung 8-1: Screenshot des Excel-basierten Simulationswerkzeuges mit Abbildung des grundlegenden Aufbaus einer Demontagefabrik für die Beispielstoffströme

Die manuelle Demontage wurde dabei der robotergestützten Demontage gegenübergestellt. Teil der Betrachtung waren:

- ▶ Kosten für Personal
- ▶ Kosten für Roboter
- ▶ Kosten für die Lauge
- ▶ Kosten für die Entsorgung der Lauge
- ▶ Transportkosten
- ▶ Erlöse aus den erzeugten Fraktionen.

8.1.2.1 Stoffströme

Für die Modellrechnung wurden die drei Stoffströme E-Fahrrad-Antriebe, Nabendynamos und Industrie-Elektromotoren gewählt. Aufgrund der in Kapitel 5.1.2.4 vorgestellten Ergebnisse wurden Kleinmotoren aus dem Kfz-Bereich nicht in die Betrachtung einbezogen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Kapitel 4.4 bis 4.6 wurden folgende Abschätzungen zu den in eine Demontagefabrik aus Deutschland einführbaren Geräteanzahlen getroffen:

- ▶ 140.000 E-Fahrrad-Antriebe (aufgeteilt in 60 % Mittelmotoren und 40 % Nabenantriebe) (etwa 70 % der derzeitigen Abfallmenge in Deutschland)
- ▶ 1.400.000 Nabendynamos (etwa 70 % der anzunehmenden Abfallmenge)
- ▶ 700.000 Elektromotoren aus Industrieanwendungen in der Leistungsklasse bis 90 kW (etwa 70 % der Menge, die durch Verrechnung des weltweiten Bestandes mit der durchschnittlichen Lebensdauer und dem Anteil Deutschlands am weltweiten Bruttoinlandsprodukt von 3,38 % als jährlich in Deutschland anfallende Abfallmenge angenommen werden kann)

Für die Berechnung der erhaltenen Massenströme in den unterschiedlichen Materialfraktionen wurden die in den Demontageversuchen ermittelten Massen herangezogen.

8.1.2.2 Bilanzierungsgrundlage

Die Anzahl nicht maschinell demontierbarer Geräte wurde nicht abgeschätzt, es wurden jedoch – unabhängig davon, ob die Demontage durch Roboter oder Arbeiter durchgeführt werden sollte – zehn Arbeiter für diese Sonderfälle in die Bilanzierung einbezogen. Außerdem wurden jeweils fünf Arbeiter als Lageristen sowohl in der Anlieferung, als auch im Warenausgang vorgesehen sowie fünf Arbeiter auf Meister-Niveau für die Koordination der Arbeiten und weitere Aufgaben. Die Demontagefabrik ist demnach in der Bilanzierung als zentrale Einrichtung vorgesehen. Bei Zugrundelegung mehrerer Standorte würden sich die benötigten Anzahlen an Lageristen und Koordinatoren entsprechend erweitern. Ob eine zentrale Einrichtung aus Gründen der Logistik und der Akzeptanz sinnvoll ist, konnte im Rahmen des Projektes nur begrenzt berücksichtigt werden und sollte daher im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten betrachtet werden.

Für sämtliche Arbeiter und auch die Roboter wurde eine Arbeitszeit von 230 Tagen pro Jahr zu je acht Stunden angenommen. Die Personalkosten wurden mit 40 €/h für Lageristen und Facharbeiter in der Demontage und 50 €/h für die Meister (je inklusive Arbeitgeberanteil) geschätzt. Eine Roboterarbeitsstunde wurde inklusive Instandhaltungs- und Energiekosten nach [Focus Online 2015] mit 6 €/h veranschlagt, wobei Investitions-, Energie-, und Wartungskosten berücksichtigt sind.

Die für die eigentlichen Demontagearbeiten benötigten Arbeiter bzw. Roboterarbeitsplätze wurden durch das Simulationswerkzeug dynamisch berechnet. Für die manuellen Demontagezeiten der einzelnen Gerätetypen dienten die Ergebnisse der Demontageversuche als Orientierung. Die Zeitersparnis, welche durch Einsatz von automatischen Schraubwerkzeugen zu erzielen ist, wurde dabei berücksichtigt (Zeitangaben in Tabelle 8-1). Die Zeiten für die robotergestützte Demontage wurden im Modell variiert, um die nötige Zeitersparnis gegenüber der manuellen Demontage zum Erreichen einer kostendeckenden Arbeitsweise („schwarze Null“) zu ermitteln.

Tabelle 8-1: Manuelle Demontagezeiten für die verschiedenen Gerätetypen

Gerätetyp	benötigte Demontagezeit [min]
Nabenantrieb	20
Mittelmotor	25
Nabendynamo	17
Industrie-Elektromotor	20

Die Kosten des Laugebades wurden in Form der Einkaufskosten des Kaliumhydroxids sowie der Entsorgungskosten der 20 %igen Lauge einkalkuliert. Die Einkaufskosten wurden mit 400 Euro pro Tonne berechnet. Die Entsorgung der Lauge kostet nach persönlicher Aussage eines spezialisierten Entsorgungsunternehmens etwa 450 €/t. Für jede Tonne Kupfer, die im Laugebad verarbeitet wird, wird ein Laugebedarf von 200 Kilogramm einkalkuliert (Eine Tonne Lauge pro Tonne Kupfer bei fünfmaligem Gebrauch der Lauge vor deren Entsorgung).

Für den Ankauf der Geräte wurde ein Marktpreis für Elektromotorschrott von 280 Euro pro Tonne zu Grunde gelegt. Ein weiterer in die Betrachtung eingeflossener Kostenfaktor sind die Transportkosten. Es wurde von einem Transport per 40-Tonner LKW ausgegangen. Diese fahren zu einem Preis von etwa einem Euro pro Kilometer [Kille et al. 2008] und verfügen über eine Zuladung von 25 Tonnen. Dies bedingt Kosten von vier Cent pro Tonne und Kilometer. Da für die Demontagefabrik zunächst eine deutschlandweite Anlieferung in Betracht gezogen wird, wurde eine Transportentfernung von 500 Kilometern gewählt. Dies gilt sowohl für die Anlieferung als auch für die anschließende Verbringung der erzeugten Fraktionen. Aufgrund eventuell auftretender, massenbezogener unvollständiger Auslastung der LKWs wurde zusätzlich ein Mehraufwand von 50 % der Kosten angenommen. Somit fallen zusammenfassend 60 Euro pro Tonne verarbeiteter Altgeräte an Transportkosten an.

Die Erlöse der Demontagefabrik ergeben sich aus den erzeugten Massen der Fraktionen sowie deren Marktpreisen. Als Grundlage wurden die Preise des Business Plan Calculation Tools For Manual E-Waste Dismantling Facilities [Spitzbart et al. 2013] verwendet. Diese sind in folgender Tabelle 8-2 dargestellt.

Tabelle 8-2: Marktpreise der erzeugten Fraktionen nach [Spitzbart et al. 2013]

Fraktion	Erlös [€/kg]
Kupfer	3,32
Eisen	0,18
Aluminium	1,00
Ferrit-Magnet	0*
NdFeB-Magnet	5,35
Kunststoff	0**
Mischschrott	0,11
Elektroschrott	0,40

*für Ferritmagnete konnte kein Marktpreis ermittelt werden – es scheint kein Markt zu bestehen

**Je nach Art der Kunststoffe entstehen Kosten für die Entsorgung oder sind Erlöse zu erzielen, daher wurde in der Kalkulation mit dem Wert Null gerechnet

8.1.2.3 Ergebnis

Auf Basis der unter 8.1.2.2 gegebenen Bilanzierungsgrundlage, ergaben sich für die manuelle bzw. robotergestützte Demontage folgend dargestellte Ergebnisse.

In der Demontagefabrik werden nach der Modellrechnung insgesamt 8,54 Mio. Altgeräte mit einer Gesamtmasse von 75.479 Tonnen pro Jahr verarbeitet. Tabelle 8-3 zeigt die Massen der erzeugten Fraktionen.

Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung

Tabelle 8-3: *Jährlich in der bilanzierten Demontage-Modellfabrik anfallende Massen der erzeugten Fraktionen und resultierende Erlöse*

Fraktion	Jährlich anfallende Masse [t]	Jährliche Erlöse [€]
Kupfer	7.092	23.543.793
Aluminium	8.615	8.615.320
Eisen	39.058	7.030.382
Mischschrott	18.660	2.052.561
Elektroschrott	1.228	491.299
NdFeB-Magnet	25	135.569
Kunststoff	712	0
Ferrit-Magnet	89	n.n.
Gesamt	75.479	41.868.924

Der deutlich größte Massenanteil fällt dabei mit 39.058 Tonnen als Eisenschrott an, gefolgt von Mischschrott mit 18.660 Tonnen. Das NdFeB-Magnetmaterial stammt in der Modellrechnung (nach Datengrundlage aus den Demontageversuchen) ausschließlich aus dem Fahrradbereich. Im Vergleich zu der relativ geringen Masse hat das NdFeB-Magnetmaterial einen relativ hohen Gesamtwert von etwa 135.500 €. Über die Hälfte trägt das gewonnene Kupfer zu den jährlichen Erlösen bei.

Die Gesamtbilanz unter Einbezug der Ausgaben ist in folgender Tabelle 8-4 dargestellt.

Tabelle 8-4: *Gegenüberstellung der Kosten und Erlöse der Demontage-Modellfabrik bei Einsatz manueller sowie robotergestützter Demontage (Ziel Kostenneutralität)*

Posten	Kosten bzw. Erlöse [€/a]	
	manuell	robotergestützt
Kosten Geräteankauf	- 21.133.927	- 21.133.927
Personal-/Roboterkosten	- 86.250.000	- 15.456.000
Transportkosten	- 4.528.699	- 4.528.699
Kosten Kaliumhydroxid	- 112.568	- 112.568
Entsorgung Lauge 20 %ig	- 633.195	- 633.195
Erlös Sekundärrohstoffe	+ 41.868.924	+ 41.868.924
Saldo Pro Jahr	- 70.614.843	4.535

Abgesehen von den Personal- bzw. Roboterkosten fallen bei beiden Modellrechnungen identische Kosten und Erlöse an. Die manuelle Verarbeitung würde bei Verarbeitung der angegebenen Stückzahlen einen Verlust von etwa 80 Mio. Euro verursachen und erlaubt keine wirtschaftliche Betriebsweise einer Demontagefabrik. Bei der robotergestützten Demontage sind weiterhin Arbeiter in der Demontagefabrik beschäftigt, wenn auch in weitaus geringerem Umfang. Diese Technisierung ermöglicht nach der Modellrechnung die kostenneutrale Wirtschaftsweise einer Demontagefabrik unter der Voraussetzung, dass die Demontage durch Roboter den Zeitaufwand um 33,2 % verringern kann. Die manuelle Demontage müsste hingegen für diese Zielstellung eine Reduktion des zeitlichen Aufwandes um etwa 84 % erreichen. Die jeweils erforderlichen Demontagezeiten sind in Tabelle 8-5 dargestellt.

Tabelle 8-5: Für kostenneutrale Wirtschaftsweise der Demontagefabrik zu erreichende Demontagezeiten

Gerätetyp	für kostenneutrale Wirtschaftsweise erforderliche Demontagezeit [min]	
	manuelle Demontage	robotergestützte Demontage
Nabenantrieb	3,2	13,4
Mittelmotor	4,0	16,7
Nabendynamo	2,7	11,4
Industrie-Elektromotor	3,2	13,4

Den Berechnungen liegen weitgehend lineare Zusammenhänge zugrunde. Daher ist ein im Grundsatz identisches Ergebnis auch bei variierendem Umfang der Input-Stoffströme zu verzeichnen, wie es beispielsweise durch zukünftig steigende Abfallmengen oder gegenüber den getroffenen Annahmen geringere Erfolge bei der Erfassung bedingt sein kann.

8.2 Ansätze für die Erfassung von wertstoffhaltigen Abfällen

Um wertstoffhaltige Abfallströme gezielt der Demontagefabrik zuzuführen, müssen bestehende Erfassungssysteme in geeigneter Weise angepasst und zum Teil auch neue Erfassungswege etabliert werden. Voraussetzung dafür ist zunächst die Identifikation und Einbindung geeigneter Akteure. Geeignete Akteure finden sich dabei nicht ausschließlich im Entsorgungsbereich, sondern sollten vielmehr schon während der Produktion und der Nutzungsphase beteiligt werden. Auf diese Weise können im Rahmen der Demontagefabrik auch Produktionsabfälle oder während der Instandsetzung anfallende Abfälle erfasst werden. Dabei sollte das Ziel verfolgt werden, möglichst sortenreine Abfallströme mit gleichzeitig möglichst geringem Aufwand in Richtung einer gezielten Demontage und anschließend einem hochwertigen Recyclingverfahren zu lenken. Die Identifizierung einiger möglicher Akteure und die möglichen Einbindungsoptionen werden im Folgenden mit Fokus auf die im Rahmen des Projekts untersuchten Modellstoffströme diskutiert. Die Erkenntnisse sollen damit die grundlegenden Ansätze liefern, um die zielgerichtete Lenkung weiterer wertstoffhaltiger

Abfallströme in Richtung der Demontagefabrik zu ermöglichen.

8.2.1 Gesteigerte Erfassung wertstoffhaltiger Komponenten aus Altfahrzeugen

Die in Kapitel 4.4.1 dargestellte Diskrepanz zwischen endgültig stillgelegten und den tatsächlich in zertifizierten Verwertungsbetrieben behandelten Fahrzeugen verdeutlicht, dass insbesondere im Bereich der Erfassung von Altfahrzeugen und der darin enthaltenen Komponenten erheblicher Handlungsbedarf besteht. Im Rahmen einer von Seiten des Umweltbundesamtes beauftragten Studie werden derzeit Lösungsvorschläge (einschließlich rechtlicher Instrumente) entwickelt, die zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen beitragen sollen. Diese Studie, die voraussichtlich im August 2016 abgeschlossen sein wird, strebt jedoch nur eine Verbesserung der Datenlage an, eine Optimierung der Erfassung bleibt dort unberücksichtigt. Dass im Rahmen der Erfassung erhöhter Handlungsbedarf besteht, bestätigt auch [Kaerger 2014], der von einem starken Rückgang von Fahrzeugzuläufen in auf die Teilegewinnung spezialisierte Verwertungsbetriebe berichtet. Insbesondere im Bereich der Oberklasse erfolgt, mit Ausnahme von Unfallfahrzeugen, kaum ein Fahrzeugzulauf in die entsprechenden Verwertungsbetriebe [Kaerger 2014].

Zielsetzung sollte somit eine Erhöhung der inländischen Erfassungsquote sein. Dies gilt sowohl für komplette Fahrzeuge, aber auch einzelne Komponenten und Bauteile. Anreizsysteme wie beispielsweise die im Jahr 2009 von Seiten der Bundesregierung beschlossene Umweltprämie für Altfahrzeuge („Abwrackprämie“) führen nachweislich zu einer deutlichen Steigerung der Erfassungsmenge. So wurden im Jahr 2009 in Deutschland etwa viermal so viele Altfahrzeuge erfasst wie dies in der Regel im Jahresmittel der Fall ist [Eurostat 2015]. Im Jahr 2010 sanken die Erfassungsmengen wiederum auf das Niveau der vorherigen Jahre. Es ist davon auszugehen, dass eine dauerhafte Einführung einer solchen Umweltprämie zwar die Sammelmengen erhöhen könnte; kritisch ist jedoch anzumerken, dass es dadurch auch zu einer vorzeitigen Verschrottung von Fahrzeugen kommen könnte, die grundsätzlich noch fahrtauglich wären.

Da nur der Export von Altfahrzeugen aus der EU in Nicht-OECD Länder untersagt ist und die meisten exportierten Fahrzeuge als Gebrauchtwagen gelten, kann das Problem im Falle von Personenkraftwagen nicht durch ein „Schließen der Grenzen“ entscheidend gelöst werden. Es gibt zwar Bestrebungen auf EU-Ebene durch Handhabe strengerer Kriterien für die Abgrenzung zwischen Gebrauchtfahrzeug und Altfahrzeug den Export von „Schrottfahrzeugen“ in Drittstaaten einzuschränken und damit die Materialströme in europäische Kreislaufwirtschaftssysteme zuzuführen. Dennoch dürfte ein großer Teil der heute (legal und illegal) exportierten Gebrauchtfahrzeuge auch weiterhin in Drittstaaten exportiert werden [Buchert 2010]. An dieser Stelle setzt die Idee eines Best-of-two-Worlds Ansatzes (Bo2W) an, der auf eine globale Kreislaufführung strategischer Metalle abzielt. So akkumuliert sich in Schwellen- und Entwicklungsländern mit hohem Tempo eine stetig wachsende Menge an strategischen Metallen, die in End-of-Life Gütern eingebunden sind [Buchert und Manhart 2013]. Hierzu zählen insbesondere auch Altfahrzeuge und die darin enthaltenen Komponenten. Ziel des Bo2W Ansatz ist es, in den Empfängerländern wie Ghana oder Ägypten (Pilotländer im Rahmen des B2oW Projektes) umweltgerechte Sammel- und

Zerlegestrukturen zu etablieren und an die entwickelten Systeme in Europa anzubinden. An dieser Stelle wäre auch eine Vernetzung mit dem vorliegenden Konzept der Demontagefabrik in Form eines Wissenstransfers oder gemeinsamen Weiterbildungsmaßnahmen denkbar.

Um die Erfassung relevanter Fahrzeugkomponenten zu erhöhen und diese gezielt einer Demontagefabrik zuführen zu können, ist ein Konzept erforderlich, das an allen maßgeblichen Stufen der Wertschöpfungskette ansetzt. Nachfolgend wird dargestellt, wie die einzelnen Akteure in ein mögliches Konzept der Bauteil- und Materialerfassung eingebunden werden könnten.

Automobilhersteller und Sublieferanten: Die Einbindung von Automobilherstellern und deren Sublieferanten wäre grundsätzlich an zwei Stellen denkbar. Dies gilt zum einen für den Bereich der Produktion, bei der sowohl klassische Produktionsabfälle anfallen, die relevante Rohstoffe enthalten können, als auch für fehlerhafte oder defekte Bauteile, die aus dem Produktionsprozess als Ausschuss ausgeschleust werden. Einen anderen wichtigen Teil stellt nach [Holzhauer 2015] die Aufarbeitung ausgewählter Baugruppen wie Motoren, Anlasser, Lichtmaschinen usw. dar, welche auf einem hohen technischen Niveau realisiert und ebenfalls durch die Automobilzulieferer und die Automobilhersteller dominiert wird. Ziel ist dabei, die relevanten Baugruppen aufzuarbeiten und wieder in den Markt zu bringen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei diesem Konzept nicht alle Teile aufgearbeitet werden können und ein Teil als irreparabel eingestuft wird bzw. die Aufarbeitung nicht wirtschaftlich ist. Diese ausgemusterten Bauteile stellen ebenfalls einen interessanten Stoffstrom für die Demontagefabrik dar.

In beiden Fällen gilt es jedoch, Anreize für eine gezielte innerbetriebliche Sammlung und Lagerung sowie eine Zuführung dieser Fraktionen in die Demontagefabrik zu schaffen. Einen wichtigen Aspekt bildet hier sicherlich auch das Bedürfnis der Hersteller nach einer Wahrung von Firmeninterna. So müsste beispielsweise sichergestellt werden, dass über die Andienung von schadhaften Bauteilen aus der Produktion oder der Aufbereitung, keinerlei schützenswerte Informationen (z. B. zu bestimmten Bauweisen, Materialien oder Technologien) an Dritte gelangen. Hier wäre es denkbar Logistiksysteme zu etablieren, die in Belangen der Sicherheit ähnlich agieren wie Unternehmen, die im Bereich der Aktenvernichtung tätig sind.

Freie- und Vertragswerkstätten: Der Ausbau defekter Bauteile und Komponenten erfolgt in aller Regel in Automobilwerkstätten. Je nach Hersteller, Zustand, Alter und Reparaturfähigkeit des Bauteils werden diese entweder entsorgt oder wie zuvor beschrieben dem Hersteller zur Aufarbeitung zur Verfügung gestellt. Dementsprechend erscheint es sinnvoll Komponenten, die bisher vorwiegend unspezifisch über Schrotthändler entsorgt werden, in Richtung der Demontagefabrik zu lenken.

Altfahrzeugverwerter: Wie bereits in Kapitel 4.4.2 beschrieben, werden funktionsfähige Einzelkomponenten als Ersatzteile aus den Fahrzeugen entnommen, sofern diese auf dem Gebrauchtteilemarkt ausreichend nachgefragt werden. Dementsprechend verbleiben unter Umständen werthaltige Komponenten im Fahrzeug sofern für sie kein Markt besteht und der Ausbau für den Verwerter nicht rentabel ist. Dementsprechend gilt es beim Verwerter Anreize für eine gesteigerte Demontage von elektrischen und elektronischen Komponenten zu schaffen. Gegebenenfalls wäre es hier sinnvoll, eine Lenkung verschiedener Komponenten zwischen der Demontagefabrik und den Verwertungsbetrieben anzustreben. So wäre es denkbar, dass Bauteile, die in der Demontagefabrik anfallen, an Verwerter zur

Weitervermarktung als Ersatzteil abgegeben werden. Notwendige Voraussetzungen hierfür wären, dass die Bauteile funktionsfähig sind, nicht wie oben beschrieben einer Form der Geheimhaltung unterliegen und dass eine entsprechende Nachfrage auf dem Gebrauchtteilemarkt besteht, sodass der Verwerter hieraus Erlöse erzielen kann. Im Gegenzug demontiert der Verwertungsbetrieb Bauteile, deren Entnahmen für ihn aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit oder Nachfrage uninteressant war und leitet diese gezielt an die Demontagefabrik weiter.

Grundsätzlich wird es an allen Stufen der Wertschöpfungskette notwendig sein, Anreize zu schaffen, die die jeweiligen Akteure dazu veranlassen relevante Fraktionen zu sammeln, zu lagern und der Demontagefabrik zuzuführen.

8.2.2 Gesteigerte Erfassung von wertstoffhaltigen Komponenten aus Industriemotoren

Bei den Industriemotoren wurde in den geführten Expertengesprächen bestätigt, dass Motoren höherer Leistungsklassen in der Regel repariert beziehungsweise einem Re-Manufacturing zugeführt werden. Optimierungspotenzial hinsichtlich des Recyclings besteht dabei in der Erfassung von defekten Komponenten oder Verschleißteilen, die im Rahmen von Reparaturen anfallen. Zudem können möglicherweise nicht alle Motoren erfolgreich in Stand gesetzt werden und sollen nach der Entnahme von Ersatzteilen einer möglichst hochwertigen Verwertung zugeführt werden. Daher ist es für eine Erhöhung der Recyclingquote von kritischen Metallen aus diesen Motoren erforderlich, Dienstleister im Bereich der Anlageninstandsetzung und Reparaturbetriebe für Motoren sowie Motorenhersteller mit Rücknahmesystemen in die Sammelstruktur der Demontagefabrik einzubinden. So kann vermieden werden, dass beispielsweise enthaltene Elektronikschrott-Bestandteile oder Magnete gemeinsam mit Eisenschrott entsorgt werden. Als Anreize für eine getrennte Entsorgung von demontierbaren Bestandteilen, die Metalle enthalten, welche in den klassischen Recyclingrouten nicht zurückgewonnen werden, sollten finanzielle und administrative und/ oder organisatorische Vorteile für den Abfallbesitzer gewährt werden. Eine Grundvoraussetzung wäre beispielsweise, dass der Abfallbesitzer für die ausgebauten wertstoffhaltigen Komponenten, wie zum Beispiel Magnete, mindestens den Erlös erhält, den er, je nach Zuordnung, für die gleiche Menge an Metallschrott erhält. Monofraktionen wie beispielsweise Aluminiumgehäuse können dagegen wie bisher direkt den klassischen Metallverwertern angedient werden.

Für Motoren kleinerer Leistungsklassen, welche im Schadensfall komplett entsorgt werden, ist dagegen die generelle Einbeziehung von Unternehmen vor allem im Bereich des verarbeitenden Gewerbes, von Dienstleistern im Bereich Anlageninstandhaltung, von Motorenherstellern mit Rücknahmesystemen sowie von Metallaufbereitern und -händlern erforderlich. Hier sollten die Motoren, gegebenenfalls nach Ausbau aus größeren Maschinen, der Demontagefabrik komplett zugeführt werden. So kann vermieden werden, dass diese gemeinsam mit dem Eisenschrott entsorgt werden, da eine spätere Entnahme und Verwertung der Motoren mit Abtrennung des enthaltenen Kupfers nicht in jedem Fall sichergestellt werden kann.

In der Demontagefabrik können aus den erfassten Motoren beziehungsweise Motorbestandteilen Konzentrate von Massenmetallen wie Kupfer oder Eisen, aber auch bisher

noch nicht separierte Fraktionen wie Magnetschrotte, gewonnen werden. Elektronikkomponenten und Kabel können im Anschluss auch an EAG-Aufbereitungsbetriebe weitergeleitet werden. Die Demontagefabrik kann auch für Massenmetalle eine gegenüber der verfügbaren Aufbereitung hochwertigere Verwertung ermöglichen, wenn zusätzlich eine Sortierung nach verschiedenen Legierungszusammensetzungen ermöglicht wird.

8.2.3 Gesteigerte Erfassung von wertstoffhaltigen Komponenten aus Fahrrädern und E-Rädern

Wie in Kapitel 4.6 beschrieben, existiert in Deutschland kein etabliertes Erfassungs- und Verwertungssystem für Fahrräder oder einzelne Fahrradkomponenten. Neben der Abgabe auf Wertstoffhöfen erscheint es sinnvoll, perspektivisch eine Erfassung, vor allem werthaltiger Komponenten, unter Einbeziehung der Händler zu etablieren. Nach [Lichtl 2016] kann eine Rücknahme über Händler einen positiven Imagetransfer zwischen Produkt und Abfall bewirken. Um eine zielgerichtete Steuerung von Fahrrädern, E-Bikes und einzelnen Fahrradkomponenten zu erreichen, kann die Einführung von Anreizsystemen hilfreich sein. Beispielsweise wäre es denkbar, bei der Abgabe auf Wertstoffhöfen ein Bonussystem zu etablieren, das die Ausgabe von Coupons vorsieht, deren Sammlung eine Gutschrift bei den Abfallgebühren ermöglicht. Bei einer Abgabe beim Händler wäre die Ausgabe von Coupons für Gewinnspiele [Lichtl 2016] oder Gutscheine zum kostenlosen Fahrradcheck denkbar, was für den Händler den Vorteil einer engeren Kundenbindung mit sich bringen würde. Eine regelmäßige Abholung ausgedienter Fahrräder und Komponenten als Serviceleistung von Seiten der Demontagefabrik könnte einen weiteren Anreiz für Händler bieten, sich dieser Form der Rücknahme anzuschließen.

8.3 Möglichkeiten zur Einbindung der Öffentlichkeit

Die Motivation des Bürgers stellt eines der wichtigsten Kernelemente dar, wenn es darum geht, Sammelmengen und Qualitäten von Abfallströmen aus Konsumabfällen zu erhöhen. Insbesondere das Recycling kritischer Rohstoffe scheitert oftmals an einer mangelnden Wirtschaftlichkeit der oftmals komplexen Rückgewinnungsverfahren, was nicht zuletzt auch durch zu geringe Inputmengen begründet ist. Eine zielgerichtete Lenkung werthaltiger Stoffströme in die entsprechenden Verwertungswege, was im Rahmen der vorliegenden Studie einer gezielten Zuführung in die Demontagefabrik entsprechen würde, erscheint also zwingend notwendig. Eine fundierte Wissensbasis beim Bürger bildet dafür eine notwendige Voraussetzung. Hier können gezielte Informations- und Sensibilisierungskampagnen ein hilfreiches Instrument bei der Bewusstseinsbildung des Bürgers darstellen. Diese Bewusstseinsbildung kann auf mehreren Ebenen ansetzen. Einerseits sollte dem Bürger verdeutlicht werden, dass ein unzureichendes Recycling zu einem fortschreitenden Abbau von Primärrohstoffen führt, was insbesondere bei kritischen Rohstoffen mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden ist. Andererseits kann es hilfreich sein, dem Bürger zu veranschaulichen welche Auswirkungen eine unsachgemäße Entsorgung werthaltiger Abfallströme, wie beispielsweise von Elektroaltgeräten, haben kann. Hierfür kann durchaus Bildmaterial verwendet werden, das anhand plakativer und drastischer Darstellungen (z. B. große Rohstoffminen in Förderländern, Verbrennung von E-Schrott in Westafrika) Aufmerksamkeit und Interesse weckt und auf bestehende Probleme hinweist. So hebt [Lichtl 2016] hervor, dass sich eine emotionale Inszenierung bei der Erfassung spezifischer Abfallströme durchaus bewähren kann. Wichtig ist es jedoch dem Bürger im Umkehrschluss unmittelbar aufzuzeigen, was er selbst dazu beitragen kann, um diesen Missständen entgegenzutreten

Im Rahmen einer Studie, die sich explizit mit Steuerungs- und Kommunikationsmaßnahmen zur Verbesserung von Sammelergebnissen für Elektro-Altgeräte und Batterien befasste [Schulze Wettendorf 2015], wurde anhand von vier Beispielregionen untersucht, welche die von der Bevölkerung bevorzugten Informationsarten bzw. Medien sind, über die sie in Bezug auf abfallwirtschaftliche Themen informiert werden möchten. Dabei lag der klassische Abfallkalender bei 88,7 % der insgesamt 2000 Befragten an erster Stelle. Aber auch Informationen am Point of Sale und Informationen und Entsorgungshinweise auf Verpackungen werden von den Bürgern als probate Informationsquelle bewertet. Elektronischen Medien, wie Kinospots, Hinweise auf Facebook oder auch YouTube Videos hingegen wurde im Rahmen der Studie von Seiten der Befragten eher eine untergeordnete Bedeutung beigemessen [Schulze 2015]. Jedoch ist hier zu beachten, dass elektronische und soziale Medien insbesondere jüngere Generationen adressieren und damit perspektivisch einen positiven Einfluss haben können.

Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass der Bürger bei Themen der Entsorgung regional denkt [Schulze 2015]. Der nach wie vor bestehende Trend hin zu einer verstärkten Regionalität könnte somit auch im Bereich der Abfallwirtschaft einen positiven Einfluss auf das Entsorgungsverhalten der Bürger haben. Eine im urbanen Raum angesiedelte Demontagefabrik würde diesem Konzept entsprechen und könnte als lokale Marke inszeniert werden (Rohstoffe aus der Stadt, für die Stadt). In diesem Kontext erscheint es sinnvoll, über die Schaffung von Transparenz teilweise bestehende Vorurteile von Bürgern gegenüber der

Abfallwirtschaft auszuräumen. Die oftmals auf Unwissenheit beruhende Skepsis hinsichtlich bestehender Erfassungs- und Verwertungswege könnte durch regelmäßige Informationsveranstaltungen (z. B.: Tag der offenen Tür, spezifische Sammelaktionen) vermindert werden. So könnten im Rahmen von Sammelaktionen Neuwaren präsentiert werden, die aus Sekundärrohstoffen / Recyclaten hergestellt wurden, um dem Bürger den direkten Zusammenhang zwischen abzugebendem Wertstoff und Neuware unmittelbar vor Augen zu führen [StMUV 2015]. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll diverse Serviceleistungen wie beispielsweise Repair-Cafés oder auch Tauschbörsen im direkten Umfeld der Demontagefabrik zu etablieren oder stoffstromspezifische Flohmärkte zu veranstalten. Dies würde dem Aufbau einer Erlebniswelt mit Lifestyle Orientierung entsprechen, was nach [Lichtl 2016] ebenfalls ein gutes Instrumentarium darstellt um Bürger für abfallwirtschaftliche Themen zu gewinnen.

Um langfristig die Sensibilität für den Rohstoffgehalt relevanter Stoffströme in der Gesellschaft zu steigern, ist es unerlässlich, das entsprechende Bewusstsein möglichst frühzeitig zu schaffen und zu schärfen. Die Integration dieser Themen im Bereich der Schulbildung könnte hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. Im Schulalltag kann dies beispielsweise durch Projektstage, Schulausflüge in die Demontagefabrik, oder Spiele und Wettbewerbe zum Thema realisiert werden. So können die Themen Mülltrennung, Wertstoffeffassung oder auch Ressourceneffizienz über die Kinder in die Familien getragen werden und durch ein gestärktes Bewusstsein langfristig zu einer optimierten Wertstoffeffassung führen [StMUV 2015].

9 Schnittstellenanalyse zur Ultraeffizienzfabrik

9.1 Einbindung in den „UEF check basic“

Eine Schnittstelle zwischen den Projekten Demontagefabrik und Ultraeffizienzfabrik stellt die Integration des Themas „Produktgestaltung“ in den bestehenden Online-Fragebogen „Ultra-F-Check Basic“ dar. Unternehmen können den Basic-Check bereits nutzen, um mögliche Optimierungspotenziale z. B. in den Bereichen Ressourcen- und Energieverbrauch, Emissionen sowie zu anderen urbanen oder sozialen Aspekten zu identifizieren. Zur Verknüpfung mit dem Projekt der Demontagefabrik im urbanen Raum wurde der Fragebogen des Basic Checks um die Themen „reparatur- und demontagegerechtes Produktdesign“ bzw. „umwelt- und recyclinggerechtes Produktdesign“ erweitert. Die Auswertung der zusätzlichen Fragen soll in den bestehenden Berechnungsalgorithmus des Fragebogens eingebunden werden. Deshalb orientieren sich die Antwort-Matrizen am bestehenden Format. Im Folgenden werden die ausgewählten Fragen, Antwortmöglichkeiten und die erwarteten Ergebnisse sowie deren Aussagekraft für den zu ergänzenden Fragebogenteil dargestellt und näher erläutert. Dabei sollen die Schwerpunkte Bedeutung und Maßnahmen hinsichtlich „reparatur- und demontagegerechtem Produktdesign“ bzw. „umwelt- und recyclinggerechtem Produktdesign“, Produktinformations- oder Kennzeichnungssysteme sowie Rücknahme-, Reparatur-, Verwendungs- und/oder Verwertungssysteme angesprochen werden.

1. Bedeutung von „reparatur- und demontagegerechtem Produktdesign“ bzw. „umwelt- und recyclinggerechtem Produktdesign“ in den Unternehmen und relevante Bereiche

Frage und Antwortmöglichkeiten: „Welche Bedeutung haben die Themen „reparatur- und demontagegerechtes Produktdesign“ bzw. „umwelt- und recyclinggerechtes Produktdesign“ in folgenden Bereichen für Ihr Unternehmen?“

	nicht wichtig	nicht sehr wichtig	durchschnittlich wichtig	wichtig	sehr wichtig
ökonomisch					
Außenwirkung / als Verkaufsargument					
Innenwirkung / Mitarbeiter					

Unternehmen treffen durch die Beantwortung von Frage 1 eine gewichtete Selbsteinschätzung zu den genannten Bereichen. Die Aussagen sind nicht quantifizierbar und stellen eine subjektive, allgemeingültige Einschätzung dar.

2. Maßnahmen für „reparatur- und demontagegerechtes Produktdesign“ bzw. „umwelt- und recyclinggerechtes Produktdesign“

Frage und Antwortmöglichkeiten: „Welche Maßnahmen gehören beim Thema „reparatur- und demontagegerechtes Produktdesign“ bzw. „umwelt- und recyclinggerechtes Produktdesign“ in Ihrem Unternehmen zur Praxis?“

	Ja	Nein	geplant
Reparatur- und demontagegerechtes Design durch:			
optimierte Verbindungsarten (zugänglich, einfach lös- oder zerlegbar (z. B. Schrauben statt Kleben oder Schweißen), gleichartige Verbindungstypen)			
austauschbare Verschleißteile			
Zerstörungsfreie Entnahmemöglichkeiten für Baugruppen/-teile			
Variabilität von Baugruppen/-teilen für Austausch			
Prüffähigkeit der Funktionalität demontierter Baugruppen/-teile			
Möglichkeit zum Upgrading oder Refurbishing			
Umwelt- und recyclinggerechtes Design durch:			
weniger Materialvielfalt			
weniger Verbundstoffe			
Verwendung umweltverträglicher Materialien bzw. leichte Separierbarkeit umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe			

3. Produktinformations- oder Kennzeichnungssysteme

Frage und Antwortmöglichkeiten: „Welche Produktinformations- oder Kennzeichnungssysteme verwenden Sie in Ihrem Unternehmen?“

	Ja	Nein	geplant
Informationen zu Materialien (Stoffe, Gehalte, Anordnung) in Produktbeschreibung oder technischer Dokumentation			
Materialkennzeichnung			
Kennzeichnung des Produkttyps mit z. B. Barcodes oder RFID-Tags			
Ausgabe von Reparatur- oder Demontageanleitung			

4. Rücknahme-, Reparatur-, Verwendungs- und/oder Verwertungssysteme

Fragen und Antwortmöglichkeiten:

	Ja	Nein	geplant
Gibt es Rücknahmesysteme für Ihre Produkte?			
Bieten Sie Reparaturen Ihrer Produkte zur Verlängerung der Lebensdauer an?			
Demontieren oder zerlegen Sie bzw. andere Dienstleister zurückgenommene Produkte, um Baugruppen/-teile wieder oder weiter zu verwenden?			
Demontieren oder zerlegen Sie zurückgenommene Produkte, um die stoffliche Verwertung zu optimieren bzw. Schad-/Störstoffe zu separieren?			

Durch die Beantwortung der Frageblöcke 2-4 können Unternehmen Angaben zum Produktdesign, zur Verwendung von Produktinformations- oder Kennzeichnungssystemen und über Rücknahme-, Reparatur-, Verwendungs- und/oder Verwertungssysteme geben. Aufgrund der konkreten Angaben und der „Ja“/„Nein“-Antwortmöglichkeiten soll eine zu positive subjektive Selbsteinschätzung verhindert und über die Antwortmöglichkeit „geplant“ ein Ausblick gegeben werden.

Mit sämtlichen Fragen und den zugehörigen Antwortmöglichkeiten sollen die Unternehmen zudem informiert und zur Einführung der dargestellten Maßnahmen und Systeme motiviert werden.

9.2 Nutzung des Konzepts der Ultraeffizienzfabrik zur Konzeption einer effizienten Demontagefabrik

Im vorliegenden Kapitel werden Faktoren zur Konzeption einer effizienten Demontagefabrik in Anlehnung an das Projekt der „Ultraeffizienzfabrik“ betrachtet. Das Leitbild der Ultraeffizienzfabrik beinhaltet die Erzeugung qualitativ hochwertiger Produkte bei möglichst vollständiger Verwertung eingesetzter Ressourcen und möglichst geringen Emissionen [Fraunhofer IAO 2016]. Für die Demontagefabrik wird das Leitbild in dem Sinne angepasst, dass Erzeugnisse und Produkte am Ende ihrer Lebensdauer möglichst vollständig für eine Verwertung bei möglichst geringem Ressourcen- und Energieverbrauch und geringstmöglichen Emissionen demontiert werden. Dazu wird ein ganzheitlicher Betrachtungsansatz aufgebaut, dessen Ziel eine optimale Gestaltung aller relevanten Bereiche wie Technologie, Mensch und Organisation ist. Im Weiteren soll dazu auf die in Tabelle 9-1 dargestellten Handlungsfelder (nach [Bauernhansl 2015]) und -säulen – eingegangen werden.

Tabelle 9-1: Handlungsfelder (nach [Bauernhansl 2015]) und -säulen –für die Konzeption einer effizienten Demontagefabrik

Handlungssäule	Handlungsfeld			
	Material	Energie	Emissionen	Urbane und soziale Aspekte
Standortwahl		✓	✓	✓
Bauweise des Gebäudes	✓	✓	✓	✓
Büro- und Haustechnik		✓	✓	✓
Energiekonzepte		✓	✓	
Logistik		✓	✓	✓
Maschinen- und Verfahrenstechnik / Automatisierung	✓	✓	✓	✓
Abfallmanagement und Recycling	✓	✓	✓	✓
Emissionsschutz			✓	✓
weitere ...				

In Abhängigkeit von der betrachteten Handlungssäule sind zudem verschiedene, größenabhängige Ebenen in die Konzeption einzubeziehen (siehe Tabelle 9-2).

In der Zusammenschau aus verschiedenen Handlungssäulen und –feldern sowie Betrachtungsebenen ergeben sich für die optimale Konzeption der Demontagefabrik im urbanen Raum eine Vielzahl von Optionen, die von der Detailebene – z. B. mit Bezug auf einzelne Demontageschritte – bis hin zur Einbindung gewonnener Wertstoffströme in globale Wirtschaftsketten reichen können.

Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung

Tabelle 9-2: Handlungssäulen und Betrachtungsebenen für die Konzeption einer effizienten Demontagefabrik

Handlungssäule	Betrachtungsebene					
	global	regional	lokal (urban)	Fabrik	Demontage	Prozess
Standortwahl		✓	✓	✓		
Bauweise des Gebäudes		✓	✓			
Büro- und Haustechnik		✓	✓			
Energieversorgung		✓	✓			
Logistik	✓	✓	✓	✓	✓	
Maschinen- und Verfahrenstechnik					✓	✓
Abfallmanagement und Recycling		✓	✓	✓	✓	✓
Emissionsschutz		✓	✓	✓	✓	✓
weitere ...						

Ausgewählte Kombinationsbeispiele sollen im Folgenden beschrieben werden:

- ▶ **Optimale Standortwahl:** Durch umfassende Partizipation soll ein optimaler Standort im urbanen Raum gefunden werden, der eine breite Akzeptanz bei sämtlichen Beteiligten („kurze Wege“ für Bürger als Anlieferer, Anwohner und/oder Mitarbeiter; sonstige Anlieferer; Bekanntheit und Wahrnehmung als innovatives Recyclingcenter) ermöglicht. Der urbane Raum kann neu gestaltet (positives Image durch „emissions-/gefahrloses“ Recycling dadurch ggf. Entschärfung des Spannungsfeldes einer „Fabrik“ im wohnnahen Raum) oder „wiederbelebt“ (Nutzung von stillgelegten Gewerbe- oder Industrieobjekten, ggf. auch als Treffpunkt für Erwerb/Tausch von gebrauchten Geräten und/oder Bauteilen) werden. Eine optimale logistische Anbindung sorgt für geringe Emissionen durch Anlieferverkehr und beim Abtransport (ggf. Gleisanschluss) der demontierten Güter und Materialien für die weitergehende Verwertung. Die Nähe zu Anlagen für die Erzeugung von regenerativer Energie (Elektroenergie und/oder Wärme/Kälte) oder ein Anschluss an das Fernwärmenetz ermöglichen eine möglichst regionale oder lokale und nachhaltige Energieversorgung.
- ▶ **Nachhaltiges Fabrikgebäude inklusive effizienter Büro- und Haustechnik sowie regenerative Energieversorgung und Emissionsschutz:** Im Falle des Neubaus bzw. bei Sanierung sollten nachhaltige und recyclingfähige Baustoffe bzw. – bei gleichwertiger Eignung – Recyclingbaustoffe nach Möglichkeit regionalem Ursprungs eingesetzt werden. Das Gebäude muss durch eine geeignete Konstruktion auf eine möglichst einfache Demontage und die Trennung der Baustoffe für die End-of-Life-Phase ausgerichtet werden. Rückgebaute Gebäudebauteile und –stoffe sind auf deren Wiederverwendbarkeit (Türen, Fenster) zu prüfen und Reststoffe möglichst vollständig stofflich oder energetisch zu verwerten. Das neu zu gestaltende Gebäude muss höchsten Standards hinsichtlich Energieeffizienz entsprechen, um Wärmeverluste bzw. erhöhten Kühlbedarf zu vermeiden. Durch entsprechende Emissionsschutzmaßnahmen werden sämtliche Emission wie Schall, Staub, Gerüche, Vibrationen, die die zulässigen Grenzwerte sowohl in der Demontagefabrik als auch in der Umgebung überschreiten, sicher verhindert. Damit wird der Arbeits- und Anwohnerschutz erfüllt und die Akzeptanz der Demontagefabrik erhöht. Interne Ver- und Entsorgungsanlagen für Wärme, Entlüftung, Beleuchtung, Kühlung, Druckluft sowie Bürotechnik usw. sind nur mit hoher Energieeffizienz zulässig und Energierückgewinnungssysteme vorzusehen. Bei der Errichtung bzw. Sanierung des Gebäudes und der Beschaffung von Haustechnik sollten vorrangig Beschäftigte und Firmen aus lokaler bzw. regionaler Umgebung eingesetzt werden. Die Energieversorgung sollte nach Möglichkeit vollständig aus regenerativen Quellen unter Einbezug standortspezifischer bzw. lokaler Gegebenheiten (Eignung von Dach-, Wand- und Außenflächen zur Gewinnung von Elektroenergie, Warmwasser; Windkraftanlagen; Kraftwärme-Kopplungs-Anlage; Erd-/Fernwärme, usw.) erfolgen. Für die Mitarbeiter werden ansprechende Pausen- und Schulungsräume errichtet.
- ▶ **Energieeffiziente Maschinen- und Verfahrenstechnik, interne Logistik:** Anlagen und Geräte, die zur teilautomatisierten bzw. manuellen Demontage und für fabrikinterne Transporte eingesetzt werden, sollten sich durch eine möglichst hohe Lebensdauererwartung und ein reparatur-/demontage- und recyclingfähiges Design auszeichnen, über einfach austauschbare Verschleißteile und höchste Standards hinsichtlich Energieeffizienz, aber auch Arbeitskomfort und –sicherheit (Ergonomie, Schallschutz) verfügen.

- ▶ Umweltmanagementsysteme und Recycling: Die Demontagefabrik sollte über ein umfassendes Umweltmanagementsystem (für z. B. Abfall und Energie) verfügen, das aktiv durch einen Beauftragten geführt und turnusmäßig fortgeschrieben wird. Es erfasst sämtliche festen, flüssigen, pastösen und gasförmigen Abfallstoffe. Durch Kontrolle und Einleitung von Maßnahmen wird die Umweltsituation z. B. durch strikte und weitestgehend getrennte Erfassung von Abfällen und deren internes oder externes Recycling kontinuierlich verbessert. Energieverbräuche werden überwacht und Schwachstellen (z. B. „Stromspitzen“, „Blindstrom“) identifiziert und beseitigt.

Im Ergebnis wird eine optimale Konzeption unter Einbezug der dargestellten Handlungssäulen und –felder bzw. Betrachtungsebenen die Basis für eine wirtschaftlich und nachhaltig operierende Demontagefabrik darstellen.

10 Executive Summary

Markiersysteme

Im Projekt wurden unterschiedliche Markiersysteme für Produkte betrachtet und auf ihre Eignung für die zukünftige Verbesserung des Recyclings überprüft. Als geeignetste Lösung erwies sich die Produktmarkierung mittels RFID-Technik. Dabei werden Produkte bzw. Produktkomponenten mit relativ kostengünstigen Datenspeichern, (RFID-Tags) ausgestattet, welche ein berührungsloses Auslesen der Informationen erlauben.

Die Technik hat entscheidende Vorteile. So ist gegenüber den weiteren betrachteten Markiersystemen während des Auslesens der Information kein direkter „Sichtkontakt“ zu den Produkten nötig, was eine Erfassung durch Hindernisse, wie Umverpackungen, möglich macht. Zum anderen erlaubt die Technik durch Vielfachzugriff das zeitgleiche Auslesen einer großen Anzahl von Informationsträgern, was für die industrielle Demontage unumgänglich sein wird.

Da die RFID-Technologie bereits für eine Reihe von Anwendungen in der Produktion und Logistik verwendet wird, würde die Anwendung in der End-of-Life-Phase des Produktlebenszyklus durch Implementation einer entsprechenden Standardisierung keine kosten- oder materialbezogenen Mehraufwendungen mit sich bringen. Im Zuge der Realisierung von Industrie 4.0-Anwendungen, bei denen die Produktionssysteme von Smart Products stets genaue Informationen über den jeweiligen Produktstatus erhalten, kann es durch die RFID-Technologie gelingen, die Konsistenz der produktbezogenen Daten bis zur EoL-Phase aufrecht zu erhalten und entsprechend zu nutzen.

Ein Anwendungsbeispiel ist die Einführung materialspezifischer Recyclingquoten für den untersuchten Fahrzeugbereich. Anstatt dabei für Fraktionen wie Kupfer oder Platinen zu recycelnde Tonnagen vorzugeben, könnten durch RFID-gestützte Datenbankanbindung die in individuellen Fahrzeugen verbauten Mengen registriert und eine prozentual berechnete Recyclingquote realisiert werden.

Neben einer gerätespezifischen Markierung ist ebenfalls die Markierung auf Bauteilebene denkbar. Im Bereich der Elektro(nik)altgeräte kann so die Übertragung detaillierter Informationen über Materialinhalte und deren Lokalisierung realisiert werden, was die Voraussetzung einer zielgerichteten industriellen Demontage darstellt. Ein wirtschaftliches Recycling von Technologiemetallen, wie etwa Tantal aus Kondensatoren, wird so ermöglicht.

Eine genauere Betrachtung der sich durch Markierung ergebenden Synergieeffekte wird daher für die Zukunft empfohlen.

Recyclinggerechtes Design

Die Befragung von Fahrzeug- und Industriemotorenherstellern ergab, dass der recyclinggerechten Produktgestaltung in der Praxis häufig eine eher geringe Bedeutung zukommt. Bestehende Vorgaben durch Kunden- und Kostenanforderungen sowie Normen werden im Produktdesign demgegenüber als prioritär betrachtet. Die Kundenwünsche selbst zielen, besonders im Fahrzeugbereich, eher auf Design- und Kostenaspekte ab. Auch wurde von den Herstellern darauf hingewiesen, dass recyclingfreundliches Produktdesign zum Teil mit anderen ökologischen Aspekten konkurriert. Im Automobilbereich wurde hier der Treibhausgasausstoß während der Nutzungsphase genannt.

Um Fortschritte im Bereich Produktdesign zu erlangen, sollten nachfolgend zunächst Instrumente analysiert und bewertet werden, welche konkrete Anreize zur stärkeren Berücksichtigung der demontage- und recyclingfreundlichen Produktgestaltung in Unternehmen setzen. Darauf aufbauend können Maßnahmen abgeleitet werden, welche die Attraktivität von demontagefreundlicher Gestaltung für Unternehmen erhöhen.

Zielführend ist es außerdem, den Demontageansatz zukünftig auf weitere Produktgruppen auszuweiten. Für die notwendige Praxisnähe sollten zunächst Befragungen von Herstellern und Entsorgern durchgeführt werden. Darauf aufbauend können gezielte Forschungsvorhaben gestartet werden, die Aspekte wie Demontagetiefe, Materialauswahl und Verbindungstypen bei relevanten Produkten detailliert beleuchten. Das Ziel ist dabei die Entwicklung von konkreten und übertragbaren Handlungsempfehlungen für die Industrie, wie ein höherwertiges Recycling durch Design for Recycling sinnvoll gestalten werden kann. Dabei soll ein direkter Praxisbezug durch eine enge Kooperation mit Unternehmen und die Durchführung von Demontageversuchen erreicht werden. Die Design for Recycling-Ansätze sind einerseits auf die derzeitige Recyclingpraxis zu beziehen und andererseits im Hinblick auf die robotergestützte Demontage, welche anders gelagerte Schwerpunkte bedingt.

Die Demontageversuche dienen weiterhin der Erweiterung der Datengrundlage, welche für die wirtschaftliche Planung von industriellen Demontageaktivitäten notwendig ist.

Planungssoftware

Die erfolgversprechende Planung und Modellierung einer modernen Demontagefabrik ist im Zeitalter von Industrie 4.0 nur mittels Unterstützung durch geeignete Software möglich. Im Rahmen des Projektes sind verschiedene Anforderungen an eine solche Software identifiziert worden. Diese beinhalten insbesondere die Erfassung und das Management umfassender produkt- und anlagenbezogener Daten unter Einbindung aller beteiligten Akteure des Wertschöpfungsprozesses sowie das Monitoring aller relevanten Parameter wie Stoffströme, Energie, Zeit und Kosten für die modellierten Betriebseinheiten.

Die Aufgabe einer solchen Software ist einerseits die Darstellung, Planung und Simulation ganzheitlicher Systemabläufe auf verschiedenen Ebenen mit dem Ziel einer optimierten Entsorgungslogistik und einer möglichst vollständigen Verwertung von Abfallströmen. Andererseits sollte ein solches Planungstool auch in der Lage sein, bereits bestehende LCA- bzw. Ökobilanzierungsdatenbanken zur Integration umfassender Prozessinformationen zu nutzen und weiterhin Unterstützungsmöglichkeiten zur konkreten Produkt- und Anlagenplanung bereitzustellen.

Eine Analyse der am Markt verfügbaren Softwareprodukte hat gezeigt, dass die identifizierten Anforderungen mit den erhältlichen Produkten nicht oder nur mit erheblichem Aufwand ganzheitlich erfüllt werden können. Eine Umsetzung des im Rahmen dieses Projektes entwickelten Softwarekonzeptes wird daher als zielführend – besonders auch für den Ansatz der „Eco Industrial Parks“ – angesehen.

Implementation robotergestützter Demontage

Die in dem hier beschriebenen Projekt durchgeführten Demontageversuche dienen als Datengrundlage für eine gegenüberstellende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung manueller und robotergestützter Demontage im industriellen Maßstab. Es wurde nachgewiesen, dass durch Einsatz von Robotern die Rückgewinnung wirtschaftlich relevanter Rohstoffe mittels Demontage in den Bereich der Wirtschaftlichkeit gelangen kann. Dafür ist eine

Beschleunigung der Demontagevorgänge im realistisch erscheinenden Bereich notwendig, deren Erreichen durch Implementation einer roboterbasierten Demontagestrecke unter Beweis gestellt werden sollte.

Um dem Ziel einer industriellen Demontage näher zu kommen, sollte zunächst eine Realisierung im Technikumsmaßstab erfolgen, welcher eine sehr realitätsnahe und dabei kostengünstige Möglichkeit zur Optimierung von Konfiguration und Programmierung darstellt. Dabei sollte von Beginn an die enge Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgen, um vorhandenes Know-How gezielt anzuwenden.

Abgesehen von der möglichen Ausweitung auf EoL-Produkte größeren Maßstabs durch Einsatz stärkerer Roboter würde das Upscaling in eine industrielle Demontage anschließend hauptsächlich durch Einsatz paralleler Demontagestrecken erfolgen. Die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Realisierung im industriellen Maßstab könnte daher durch die Entwicklung im Technikumsmaßstab bereits sehr genau abgeschätzt werden.

Ausgehend von den so gewonnenen Erfahrungen sollte im Nachgang der Fokus auf die Wiedergewinnung weiterer Rohstoffe ausgeweitet werden. Ein denkbarer Ansatz ist beispielsweise die automatisierte Rückgewinnung von Tantal aus Kondensatoren.

Schnittstellenanalyse zur Ultraeffizienzfabrik

Das unter der Trägerschaft des baden-württembergischen Umweltministeriums entwickelte Konzept der Ultraeffizienzfabrik zielt auf eine effektive und effiziente industrielle Produktion mit minimierten Umweltbelastungen ab [Fraunhofer IAO 2016]. Unter anderem wurde ein online-Fragebogen entwickelt, durch den interessierte Unternehmen Informationen über individuelle Effizienzsteigerungspotenziale erhalten.

Um die Nachnutzungsphase der jeweils hergestellten Produkte dabei zu berücksichtigen, wurde aus den im Projekt Demontagefabrik gewonnenen Erkenntnissen ein weiterer Fragebogenabschnitt entwickelt, welcher im Nachgang in das bestehende Online-Angebot integriert wird. Damit wird eine Sensibilisierung der Nutzer des Online-Tools für die Themen umweltfreundliches und demontage- bzw. recyclinggerechtes Produktdesign angestrebt.

Perspektivisch sollten, ausgehend von den enthaltenen Kernfragen, zielgerichtete spezifische Leitfäden entwickelt werden, die relevante Themenfelder und geeignete Handlungsempfehlungen zum demontage- und recyclingfreundlichen Produktdesign benennen und damit die Unternehmen zur Umsetzung konkreter Maßnahmen motivieren. Darüber hinaus wurden für die ersten Ansätze zur Konzeption der Demontagefabrik auch die im Ultraeffizienzkonzept definierten Handlungsfelder berücksichtigt.

11 Anhang

11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Kritikalitätsscreening für die deutsche Rohstoffversorgung. (aus [Erdmann et al. 2011]).....	10
Abbildung 2-2:	Kritische Rohstoffe für die baden-württembergische Industrie laut „Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg“. [Kroop et al. 2014]	10
Abbildung 2-3:	Die Demontagefabrik als Innovationsmotor zwischen Forschung und Entwicklung und der Markteinführung. [Eigene Darstellung].....	11
Abbildung 4-1:	Beispiel eines 1D-Barcodes	15
Abbildung 4-2:	Beispiel für einen GTIN-13 Strichcode	16
Abbildung 4-3:	Beispielhafte Darstellung verschiedener 1D-Barcodes.....	16
Abbildung 4-4:	Beispiel eines QR-Code.....	17
Abbildung 4-5:	Beispielhafte Darstellung eines iQR-Codes (quadratische und rechteckige Ausführung) und eines Micro-QR-Codes.....	19
Abbildung 4-6:	Beispiele für die Nadelmarkierung (links) sowie die Nadel-Ritzmarkierung. Bildquelle: [Markator Manfred Borries GmbH 2016].....	21
Abbildung 4-7:	Beispiel eines Microdots. Aus [Alpha Dot]	24
Abbildung 4-8:	Für das Auslesen der enthaltenen Information wichtige Elemente eines QR-Codes (im Bild farbig markiert) [Hengstbach 2011]	25
Abbildung 4-9:	Entwicklung der statistisch erfassten Altfahrzeuge in Deutschland und den Nachbarländern von 2006 bis 2013 [Eurostat 2015]	32
Abbildung 4-10:	Aufbau permanenterregte Gleichstrommaschinen (links) und permanenterregte Synchronmaschinen (rechts) nach [Hering et al. 2012].....	34
Abbildung 4-11:	Stoffliche Anteile in Elektromotoren (Anzahl 48) und Lautsprechern (Anzahl 3) nach [Kohlmeyer et al. 2015].....	34
Abbildung 4-12:	Beispielhafte Lage von Elektromotoren in Pkw (Kleinmotoren, die mehrmals verbaut sind, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur einmal dargestellt) [Kohlmeyer et al. 2015, Werkstätten 2015, Gresch 2011]; Hintergrundbild: [bimmertoday.de 2016]	38
Abbildung 4-13:	Abschätzung der Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl von Kleinmotoren in Altfahrzeugen von 2013 bis 2025 in Deutschland anhand von [DAT 2001 bis DAT 2013, Kohlmeyer et al. 2015, Werkstätten 2015].....	39
Abbildung 4-14:	Wertstoffgehalt in Kleinmotoren der im Jahr 2013 verwerteten Altfahrzeuge in Baden-Württemberg, Deutschland und im benachbarten Ausland	42
Abbildung 4-15:	Magnetbestückte Rotoren eines Synchronmotors (rechts: bandagiert) [VEM 2016]	45

Abbildung 4-16: Entwicklung der Bestandszahlen von Fahrrädern (inkl. E-Räder) in Deutschland [ZIV 2016a, ZIV 2013]	53
Abbildung 4-17: Verkauf von Fahrrädern und E-Bikes in Deutschland [ZIV 2016a, ZIV 2013].....	54
Abbildung 4-18: Anzahl der im Zeitraum von 2007 bis 2015 in Deutschland verkauften E-Räder [Statista 2015b, UBA 2014].....	55
Abbildung 4-19: Verkaufszahlen von Fahrrädern und E-Rädern in den Nachbarländern (2005: exklusive Schweiz) [CONEBI 2015, Velosuisse 2015].....	56
Abbildung 4-20: Länderspezifische Verkaufszahlen in den Nachbarländern im Jahr 2014 [CONEBI 2015, COLIBI 2013]	56
Abbildung 4-21: Verkaufte E-Räder in der EU 28 von 2006 bis 2014 [CONEBI 2015].....	57
Abbildung 4-22: Im Jahr 2014 verkaufte E-Räder (in 1.000 Stück) nach Ländern [CONEBI 2015]	58
Abbildung 4-23: Entwicklung des Abfallaufkommens von E-Rädern in Deutschland und Europa (inklusive der Schweiz), auf Grundlage von [Statista 2015b, UBA 2014, CONEBI 2015, Velosuisse 2015, Masih-Tehrani et al. 2015]	59
Abbildung 4-24: Komponenten eines Pedelecs bei Mittelmotorantrieb [Wrede 2011].....	61
Abbildung 4-25: Durchschnittliche werkstoffliche Zusammensetzung von 13 Nabendynamos.....	63
Abbildung 4-26: Durchschnittliche werkstoffliche Zusammensetzung von fünf Antriebsmotoren aus E-Rädern	64
Abbildung 4-27: Wertstoffpotenzial in Nabendynamos in den in Baden-Württemberg, Deutschland und den Nachbarländern verkauften Fahrrädern aus dem Jahr 2015	66
Abbildung 4-28: Wertstoffpotenzial in den Antrieben der im Jahr 2017 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder.....	67
Abbildung 4-29: Wertstoffpotenzial in den Antrieben der im Jahr 2020 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder.....	68
Abbildung 4-30: Wertstoffpotenzial in den Antrieben der im Jahr 2024 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder.....	69
Abbildung 4-31: Entwicklung des aggregierten Wertstoffpotenzials in den Antrieben der bis 2024 in Deutschland und Europa voraussichtlich anfallenden EoL E-Räder	70
Abbildung 5-1: Graphische Darstellung der Arbeitsschritte zur Demontage eines Industrie-Elektromotors. [Eigene Darstellung]	76
Abbildung 5-2: Bruchkanten eines Aluminium- und eines Graugussgehäuses nach Öffnung durch Hammerschlag	78
Abbildung 5-3: Versuchsaufbau der Zugversuche.....	80
Abbildung 5-4: Separierte Bauteile eines Nabenantriebes	85
Abbildung 5-5: Innenansicht eines Mittelmotors.....	86
Abbildung 5-6: Im Gehäuse eines Mittelmotors integrierter Stator des Antriebsmotors	87

Abbildung 5-7:	Werkstofffraktionen eines typischen Käfigläufermotors nach der Demontage	91
Abbildung 5-8:	Prozentuale Massenanteile der Fraktionen aus den demontierten Industrie-Elektromotoren	91
Abbildung 5-9:	Zeitbilanz der Demontage der Industrie-Elektromotoren	93
Abbildung 5-10:	Ergebnis des Zugversuches: a) Stator mit verbliebenen Kupfersträngen, b) Zugklemme mit herausgezogenen Kupfersträngen	95
Abbildung 5-11:	DSC-Kurve des UP-Tränklackes (T _g = Glasübergangstemperatur).....	96
Abbildung 5-12:	TGA-Kurve des UP-Tränklackes	97
Abbildung 5-13:	a) Beispiel eines Zugversuches nach thermischer Behandlung, b) Stator und Wicklungen nach dem Zugversuch	99
Abbildung 5-14:	Proben nach dem Lösemittelversuch mit organischen Lösemitteln bei Zimmertemperatur.....	100
Abbildung 5-15:	Proben nach dem Lösemittelversuch bei 60 °C	101
Abbildung 5-16:	Getrocknete Tränklackproben nach dem Lösemittelversuch bei 60 °C....	101
Abbildung 5-17:	Laugungsversuch eines Stators, a) zu Beginn der chemischen Vorbehandlung, b) zum Ende der chemischen Vorbehandlung	103
Abbildung 5-18:	Separierte Werkstoffgruppen aus demontierten Fahrradnabendynamos (Teile aus einem Exemplar plus Kupferspule aus einem weiteren Modell)	106
Abbildung 5-19:	Massenbilanzen der in den Demontageversuchen zerlegten Fahrraddynamo- Modelle des Herstellers Shimano.....	107
Abbildung 5-20:	Zeitbilanz der Demontageversuche an Fahrraddynamos	108
Abbildung 5-21:	Beispielhafte Darstellung eines Nabenantriebes ohne Getriebe (links) und eines Nabenantriebes mit Getriebe und integrierter Elektronik (rechts).....	110
Abbildung 5-22:	Massenbilanz der in den Demontageversuchen zerlegten E-Bike-Antriebe	110
Abbildung 5-23:	Demontierte Komponenten nach den ersten Zerlegungsschritten des Motors zum Aus- und Einfahren der Antenne.....	114
Abbildung 5-24:	Stator des Motors der Motorlüftung Modell 2 (VW) mit beschädigten Magneten.....	115
Abbildung 5-25:	Rotor des Motors der Motorlüftung Modell 2 (VW).....	115
Abbildung 5-26:	Zeitlicher Aufwand für die Demontage der Kleinmotoren aus Kfz	116
Abbildung 5-27:	Bewertung der Demontierbarkeit und Kennzeichnung der Kleinmotoren aus Kfz	117
Abbildung 5-28:	Masse der in den einzelnen demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Bauteile, inklusive Halterungen und Anbindungen	119
Abbildung 5-29:	Massenbezogene Anteile der in den einzelnen demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Bauteilen, exklusive Halterungen und Anbindungen.....	120

Abbildung 5-30: Massenbezogene Anteile der in den einzelnen demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Stoffgruppen, exklusive Halterungen und Anbindungen.....	121
Abbildung 5-31: Summierte, massenbezogene Anteile der in den demontierten Kleinmotoren aus Kfz enthaltenen Stoffgruppen, exklusive Halterungen und Anbindungen, in Ma-%.....	122
Abbildung 7-1: Benutzeroberfläche der Kopplung von HSC SIM und GaBi [van Schaik und Reuter 2014].....	136
Abbildung 7-2: Model-View-Controller Schema.....	138
Abbildung 7-3: Hauptfenster nach Programmstart	141
Abbildung 7-4: Darstellungsbeispiel für Planung einer Demontagefabrik	142
Abbildung 7-5: Auswahl von Betriebseinheiten aus der Datenbank.....	142
Abbildung 7-6: Beispiel für Detailinformationen zu Einzelkomponenten	143
Abbildung 7-7: Ausschnitt aus der Sicht der hierarchischen Struktur der Materialien im Administrationstool padmin.....	145
Abbildung 7-8: Die processing unit models im YAML export/import-Format	146
Abbildung 7-9: Mehrsprachigkeit am Beispiel des Materials Neodym	147
Abbildung 8-1: Screenshot des Excel-basierten Simulationswerkzeuges mit Abbildung des grundlegenden Aufbaus einer Demontagefabrik für die Beispielstoffströme.....	152
Abbildung 11-1: Demontierte Komponenten des Motors zum Antrieb des Scheibenwischers	203
Abbildung 11-2: Demontierte Komponenten des Motors des Zusatzgebläses der Heizung.....	203
Abbildung 11-3: Demontierte Komponenten nach den ersten Zerlegungsschritten des Motors des Fensterhebers	204
Abbildung 11-4: Demontierte Komponenten nach den ersten Zerlegungsschritten des Motors zum Aus- und Einfahren der Antenne.....	204
Abbildung 11-5: Demontierte Komponenten des Innenaufsatzes der Motoren zur Spiegeljustierung	205
Abbildung 11-6: Demontierte Komponenten der Motoren zur Leuchtweitenregulierung Modell 3 (links) und Modell 1 (rechts).....	205
Abbildung 11-7: Demontierte Komponenten des Motors zur Leuchtweitenregulierung (Modell 2).....	206
Abbildung 11-8: Demontierte Komponenten der Motorlüftung (Modell 1)	206
Abbildung 11-9: Demontierte Komponenten der Motorlüftung (Modell 2)	207
Abbildung 11-10: Demontierte Komponenten des Anlassers	207
Abbildung 11-11: Leiterplatte der Leuchtweitenregulierung Modell eins (7,4 g) (vgl. Motor f), Modell1).....	208
Abbildung 11-12: Leiterplatte der Leuchtweitenregulierung Modell zwei (13,45 g) (vgl. Motor f), (Modell 2).....	208

<i>Abbildung 11-13: Leiterplatte der Leuchtweitenregulierung Modell 3 (6,5 g) (vgl. Motor f), (Modell 1).....</i>	<i>208</i>
<i>Abbildung 11-14: Leiterplatte des Motors zum Antrieb des Scheibenwischers (20 g) (vgl. Motor a).....</i>	<i>208</i>
<i>Abbildung 11-15: Leiterplatte des Motors zum Antrieb der Antenne (4,7 g) (vgl. Motor d))</i>	<i>208</i>

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Eigenschaften verschiedener 2D-Barcode-Typen. Aus [Yokota 2009].....	18
Tabelle 4-2:	Eigenschaften von RFID-Systemen unterschiedlicher Frequenzbereiche (aus [Lampe et al. 2005]).....	26
Tabelle 4-3:	Daten zur jährlich behandelten bzw. insgesamt anfallenden (d. h. endgültig stillgelegten) Anzahl an Altfahrzeugen im benachbarten Ausland	30
Tabelle 4-4:	In Klein- und Hilfselektromotoren aus 100 durchschnittlichen Pkw enthaltene Elemente nach [Widmer 2015]	35
Tabelle 4-5:	Abschätzung der Anzahl typischer elektrisch motorisierter Anwendungen in aktuell anfallenden, ausgedienten Pkw in Anlehnung an [Kohlmeyer et al. 2015, Werkstätten 2015].....	37
Tabelle 4-6:	Gewichte verschiedener Kleinmotoren [Kohlmeyer et al. 2015, eigene Untersuchungen]	40
Tabelle 4-7:	Anzahl der potenziell enthaltenen Kleinmotoren in verwerteten und endgültig stillgelegten Altfahrzeugen in Baden-Württemberg und Deutschland im Jahr 2013 [KBA 2015b, UBA 2015, StaLa BW 2015].....	41
Tabelle 4-8:	Unterteilung von Motorenarten nach Stromart und Wirkungsweise [Fischer 2011, Buchert et al. 2014]	44
Tabelle 4-9:	Globaler Bestand von Elektromotoren für alle Anwendungsbereiche nach Leistungsklassen [Plötz und Eichhammer 2011]	49
Tabelle 4-10:	Hochrechnung der jährlich global anfallenden Abfallmenge an Elektromotoren nach [Plötz und Eichhammer 2011, Buchert et al. 2014].....	50
Tabelle 4-11:	Deutsche Motorenproduktion der Jahre 2012 bis 2014 in Stück nach [Destatis 2015].....	51
Tabelle 4-12:	Im- und Export von Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren sowie Teilen davon in den Jahren 2012 bis 2014 nach [Destatis 2015a]	51
Tabelle 4-13:	Gegenüberstellung der Massen konventioneller Fahrräder und E-Bikes nach [Bieberstein 2015, Greenfinder 2015a].....	61
Tabelle 5-1:	Übersicht über die verwendeten Lösemittel	82
Tabelle 5-2:	Methodik zur Bewertung der recyclinggerechten Konzeption von Elektrogeräten nach [Bartnik et al. 2013]	89
Tabelle 5-3:	Mittlere Massen und Massenanteile der Werkstoffe aus den demontierten Industrie-Elektromotoren	92
Tabelle 5-4:	Mittlere benötigte Zeiten für die einzelnen Demontageschritte von Industrie-Elektromotoren	94
Tabelle 5-5:	Ergebnisse der Zugversuche nach thermischer Vorbehandlung der Statoren.....	99
Tabelle 5-6:	Massenbilanzen der Lösemittelversuche nach 24 h.....	102
Tabelle 5-7:	Übersicht der Ergebnisse der Zugversuche für die Kupferstränge (rein mechanisch sowie mit thermischer und chemischer Vorbehandlung)	103

Tabelle 5-8:	Masse der Nabendynamos nach Modelltyp	105
Tabelle 5-9:	Mittelwerte der Massen und prozentualen Massenanteile der aus den Fahrradnabendynamos demontierten Werkstofffraktionen.....	107
Tabelle 5-10:	Ausgangsmassen der E-Bike-Antriebe	109
Tabelle 5-11:	Massen und prozentuale Massenanteile der Baugruppen in den demontierten E-Bike-Antrieben.....	109
Tabelle 5-12:	Demontagezeiten bis Rotor, Stator, Getriebe und Magnete separat vorlagen.....	111
Tabelle 5-13:	Durchschnittliche Zeitbilanz der Demontageschritte eines getriebelosen Nabenantriebs	112
Tabelle 5-14:	Übersicht über die zerlegten Kleinmotoren aus Kfz	113
Tabelle 5-15:	Übersicht über Bauteile auf den Leiterplatten der betrachteten Elektromotoren	123
Tabelle 5-16:	Magnetmaterial-Analyseergebnis der Magnete aus E-Fahrrad-Antrieben (Analyse mittels ICP-OES).....	124
Tabelle 5-17:	Magnetmaterial-Analyseergebnis der Magnete aus Nabendynamos	125
Tabelle 5-18:	Zusammensetzung der Dauermagnete aus den untersuchten Elektromotoren in Massenprozent nach REM-EDX	126
Tabelle 5-19:	Beispielhafte Gegenüberstellung der Analyseergebnisse eines Antennen-Servomotormagneten mittels REM-EDX und ICP-OES	127
Tabelle 5-20:	Gegenüberstellung der Ergebnisse der EDXRF- und der ICP-Analyse des Magnetmaterials aus einem Nabendynamo vom Typ DH-S701 des Herstellers Shimano (grau hinterlegt = Seltene Erden)	128
Tabelle 8-1:	Manuelle Demontagezeiten für die verschiedenen Gerätetypen	154
Tabelle 8-2:	Marktpreise der erzeugten Fraktionen nach [Spitzbart et al. 2013]	155
Tabelle 8-3:	Jährlich in der bilanzierten Demontage-Modellfabrik anfallende Massen der erzeugten Fraktionen und resultierende Erlöse	156
Tabelle 8-4:	Gegenüberstellung der Kosten und Erlöse der Demontage-Modellfabrik bei Einsatz manueller sowie robotergestützter Demontage (Ziel Kostenneutralität)	156
Tabelle 8-5:	Für kostenneutrale Wirtschaftsweise der Demontagefabrik zu erreichende Demontagezeiten.....	157
Tabelle 9-1:	Handlungsfelder (nach [Bauernhansl 2015]) und -säulen –für die Konzeption einer effizienten Demontagefabrik.....	167
Tabelle 9-2:	Handlungssäulen und Betrachtungsebenen für die Konzeption einer effizienten Demontagefabrik	168
Tabelle 11-1:	Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Scheibenwischermotor	209
Tabelle 11-2:	Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Heizungs-/Gebläsemotor.....	210

Tabelle 11-3: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor des Fensterhebers	211
Tabelle 11-4: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Antenne	212
Tabelle 11-5: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Spiegeljustierung	213
Tabelle 11-6: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Leuchtweitenregulierung (Modell 1)	214
Tabelle 11-7: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Leuchtweitenregulierung (Modell 2)	215
Tabelle 11-8: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Leuchtweitenregulierung (Modell 3)	216
Tabelle 11-9: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motorlüftung (Modell 1)	217
Tabelle 11-10: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motorlüftung (Modell 2)	218
Tabelle 11-11: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Elektromotor Anlasser	219
Tabelle 11-12: Übersicht über die Funktionalitäten, welche die am Markt erhältliche Planungssoftware für den Umweltbereich abdeckt (Kriterien zur Einordnung siehe Kapitel 7.2; die zugehörigen URLs sind unter dem jeweiligen Namen der Software im Literaturverzeichnis zu finden).....	220

11.3 Literaturverzeichnis

- 360report Software 360report, URL:
<http://www.360report.org/de/>, letzter Zugriff am 16.06.16
- 3S 2016 3S: Secutag, URL:
<http://www.secutag.com/index.php>, abgerufen am 11.05.2016
- Adlershof Online 2012 Adlershof Online: Künstliche DNA gegen Produktpiraterie. Berlin Adlershof, URL: <http://www.adlershof.de/news/kuenstliche-dna-gegen-produktpiraterie/>, abgerufen am 11.01.2016
- ABB 2015 ABB Group: Mechanischer Aufbau der Schleifringläufermotoren. 2015, URL:
<http://www.abb.de/product/ap/seitp322/747e0148eb244a90c1256e6200610127.aspx>, abgerufen am 11.08.2015
- ADEME 2009 Waste figures for France, agence de l'environnement et de la maitrise de l'energie (ADEME), Angers, 2009. URL:
http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/69417_6768_waste_figures_for_france_interactif_def.pdf, abgerufen am 08.02.2016
- ADFC 2016 ADFC: Technik, Fahrradteile und Zubehör: Die neuen Beleuchtungsvorschriften. URL:
<http://www.adfc.de/technik/fahrradteile-und-zubehoer/beleuchtung/beleuchtungsvorschriften/die-neuen-beleuchtungsvorschriften>, abgerufen am 13.04.2016
- AISCI ident GmbH 2016a AISCI ident GmbH: RFID Reader für den hochfrequenten Bereich (HF). URL:
<http://www.aisci.de/produkte/rfid/rfid-reader-hf.html>, abgerufen am 15.06.2016
- AISCI ident GmbH 2016b AISCI ident GmbH: RFID Reader für den ultrahochfrequenten Funkbereich (UHF). URL:
<http://www.aisci.de/produkte/rfid/rfid-reader-uhf.html>, abgerufen am: 15.06.2016
- Aktiv Radfahren 2014 Aktiv Radfahren: Test Nabendynamos: Kraftwerke für unterwegs. Ausgabe 9-10/2014, BVA Media Group, 2014, S. 38-45
- Alpha Dot 2016 Alpha Dot: Alpha Dot – The UK's Number One Security Marking System. URL: <http://www.alpha-dot.co.uk/>, abgerufen am 18.04.2016

- Alwaeli 2013 Alwaeli, M.: End-of-Life Vehicles Recycling and The Route to Compliance With EU Directive Targets: The Case of Poland, Gliwice, 2013. URL: <http://www.josunas.org/login/index.php/josunas/article/viewFile/246/201>, abgerufen am 15.02.2015
- Angerer et al. 2009 Angerer G., Marscheider-Weidemann F., Lüllmann A., Erdmann L., Scharp M. Handke V., Marwede M: Rohstoffe für Zukunftstechnologie, Schlussbericht. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (ISI) und Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT gGmbH, 2009
- AUDIT Software AUDIT, Solutions-GmbH, URL: <http://www.solutions-gmbh.com/>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Auriga+ Software Auriga+, URL: <http://auriga-plus.com/de/>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Bartnik et al. 2013 Bartnik S., Löhle S., Müller M., Kerkhoff M.: Recyclinggerechte Produktkonzeption von Elektro- und Elektronikgeräten – Erstellung eines Kriterienkataloges zur Bemessung und dessen praktische Anwendung. Cyclos GmbH, Osnabrück, 2013
- Bast et al. 2014 Bast U.; Blank R.; Buchert M.; Elwert T.; Finsterwalder F. et al.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben Kennwort: MORE (Motor Recycling). Abschlussbericht zum Verbundvorhaben, Projektträger Jülich 2014, 114 S.
- Bauernhansl 2015 Bauernhansl, T.: Konzept der Ultraeffizienzfabrik. Vortrag auf der Konferenz Ultraeffizienzfabrik am 09.12.2015 in Stuttgart. URL: http://wp12434357.server-he.de/fileadmin/rueckblick/01_Bauernshansl_Fraunhofer.pdf, abgerufen am 09.08.2016
- BDG 2011 Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG), Deutsches Kupferinstitut: Guss aus Kupfer und Kupferlegierungen, technische Richtlinien. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, Düsseldorf, 2011. URL: http://www.kug.bdguss.de/fileadmin/content/Publikationen-Normen-Richtlinien/Guss_aus_KupfSeiter_und_Kupferlegierungen.pdf, abgerufen am 15.11.2015
- Bergischer Abfallwirtschaftsverband 2015 Bergischer Abfallwirtschaftsverband: Fahrräder nicht wegwerfen, Bergischer Abfallwirtschaftsverband, Engelskirchen, 2015. URL: <http://www.bavweb.de/abfallberatung/abfalltipps/fahrraeder-nicht-wegwerfen/>, abgerufen am 10.11.2015

- Bieberstein 2011 Bieberstein, W.: Das Fahrradgewicht. Stand 2011. URL: <http://www.fahrradhaus.de/fahrradgewicht.htm>, abgerufen am 10.11.2015
- bimmertoday.de 2016 BimmerToday.de, Ggf. inhaltlich Verantwortlicher: Jürgen Hiltcher. URL: <http://cdn.bimmertoday.de/wp-content/uploads/bmw-5er-f10-abmessungen.jpg>, abgerufen am 09.06.2016
- Binder 2012 Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe - Grundlagen, Betriebsverhalten. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2012. 1249 S.
- Binnemans et al. 2013 Binnemans, K.; Jones, P. T.; Blanpain, B.; van Gerven, T.; Yang, Y.; Walton, A.; Buchert, M.: Recycling of rare earths: a critical review, In: Journal of Cleaner Production 51 (2013), S. 1–22
- Blepp et al. 2011 Blepp, M.; Marquardt, M.; Quack, D.: PROSA Kurzstudie Personenaufzüge – Entwicklung von Vergabekriterien für ein klimabezogenes Umweltzeichen, Freiburg 2011, 61 S.
- BMVI 2014 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Radverkehr in Deutschland - Zahlen, Daten, Fakten, Berlin 2014. 44 S.. URL: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/K/radverkehr-in-zahlen.pdf?__blob=publicationFile, abgerufen am 22.06.2016
- Brand 2014 Brand, R.: Elektromotoren am Limit - Blechpakete für Stator und Rotormagnetsystem bei Synchronmotoren, elektronikJOURNAL, Ausgabe 5, Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC), URL: http://www.vacuumschmelze.de/fileadmin/Medienbibliothek_2010/Downloads/HT/VAC-Sonderdruck-Antriebstechnik.pdf, abgerufen am 15.08.2015
- Buchert 2010 Buchert, M.: Recycling, Exportproblematik und Reimportchancen? Werthaltige Komponenten am Beispiel des Katalysators, in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; , Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe, Band 3, TK Verlag, Neuruppin 2010, S. 575 - 584
- Buchert 2012 Buchert M., Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV Fachbericht 38, Recklinghausen, 2012

- Buchert et al. 2011 Buchert, M.; Jenseit, W.; Dittrich, S.; Hacker, F.; Schüler-Hainisch, E.; Ruhland, K.; Knöfel, S.; Goldmann, D.; Rasenack, K.; Treffer, F.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Freiburg 2011, 108 S.
- Buchert et al. 2014 Buchert, M., Manhart, A., Sutter, J.: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, Freiburg, 2014
- Buchert und Manhart 2013 Buchert, M.; Manhart, A.: Globale Kreislaufführung strategischer Metalle: Best-of-two-Worlds Ansatz (Bo2W), in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; , Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe, Band 6, TK Verlag, Neuruppin 2013, S. 419 – 431
- car drawings 2015 Skizze aus car-drawings, URL: <http://www.car-drawings.narod.ru/images/bmw/bmw-3-sedan-e90.gif>, aufgerufen am 14.10.2015
- Caritas 2015 Caritasverband für die Stadt Bonn e.V. / Radstation, Bonn. URL: <http://www.radstationbonn.de>, abgerufen am 10.11.2015
- CO2-Rechner PRO Software CO2-Rechner PRO, URL: https://klimaktiv.co2-pro.de/de_DE/page/start/, letzter Zugriff am 16.06.16
- COLIBI 2013 COLIBI - Association of the European Bicycle Industry: European Bicycle Market. Edition 2013. Industry and Market Profile (2012 statistics), Brüssel 2013, 65 S.. URL: <http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwj1267CxrVNAhWMC8AKHaHZAIQFgg1MAM&url=http%3A%2F%2Fasociacionambe.es%2Fwp-content%2Fuploads%2F2014%2F12%2FEuropean-Bicycle-Market-Industry-Profile-Edition-2013.pdf&usq=AFQjCNHnID0S8jNLVcShxy6LjflFXdxl5g&bvm=bv.125221236,d.bGs>, abgerufen am 20.06.2015
- CONEBI 2015 CONEBI - Confederation of the European Bicycle Industry: European Bicycle Market. Edition 2015. Industry and Market Profile (2014 statistics), Brüssel, 2014, 76 S.. URL: http://www.ziv-zweirad.de/uploads/media/European_Bicycle_Market_Profile_2015_by_CONEBI_01.pdf, abgerufen am 15.06.2016
- credit 360 Software credit 360, URL: <https://cr360.com/de-de>, letzter Zugriff am 16.06.16

CSR Toolkit	Software CSR Toolkit, URL: https://www.ic.gc.ca/eic/site/csr-rse.nsf/eng/h_rs00597.html , letzter Zugriff am 16.06.16
DAT 2001 bis DAT 2013	Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): DAT-Reports aus den Jahren 2001 bis 2013. Deutsche Automobil Treuhand GmbH, Ostfildern, 2015. URL: https://www.dat.de/angebote/verlagsprodukte/dat-report.html , abgerufen am 15.05.2016
DAT 2014	Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): DAT-Report 2015. Deutsche Automobil Treuhand GmbH, Ostfildern, 2015. URL: https://www.dat.de/fileadmin/media/download/DAT-Report_2015.pdf , abgerufen am 18.01.2016
DB 2014	Deutsche Bahn (DB): Unsere Flotten und Netzwerke 2014, URL: https://www1.deutschebahn.com/file/ecm2-db-de/1488952/Y3xQhCuKJT39fGYWo-nnkerB2-Q/9067532/data/2014_flotte.pdf , abgerufen am 14.06.2016
DB 2016	Deutsche Bahn AG (DB): Redesign verlängert Einsatzdauer und schon Ressourcen. URL: https://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/oekologie/ressourcen/redesign.html , abgerufen am 13.06.2016
Del Duce 2011	Del Duce, A.: Ökobilanzierung von Fahrrädern und Elektrofahrrädern - Vortrag im Rahmen der Eurobike 2011, Friedrichshafen, 02.09.2011
DENSO WAVE 2015	DENSO WAVE: History of QR Code. URL: http://www.qrcode.com/en/history/ , abgerufen am 21.09.2015
Destatis 2015	Statistisches Bundesamt (Destatis): Produktionsstatistik des verarbeitenden Gewerbes, für Gruppe Nr. 27 „Elektrische Ausrüstungen“ (nach Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken (GP 2009)), für die Jahre 2012 bis 2014, auf Anfrage bereitgestellt durch das Statistische Bundesamt, Wiesbaden. Stand: 13.11.2015
Destatis 2015a	Statistisches Bundesamt (Destatis): Außenhandelsstatistik (über GENESIS-Online Datenbank), nach Warensystematik, Aufgeschlüsselt nach GP 2009 (4-Steller). URL: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=6E8447CB96DEA09898D0B0186F302D90.tomcat_GO_2_1?operation=previous&levelindex=2&step=1&titel=Tabellen&levelid=1447435434394&levelid=1447435422431 , abgerufen am 13.11.2015

Destatis 2015b	Persönliche Mitteilung Mitarbeiter des Bereiches Außenhandelsstatistik im Statistischen Bundesamt Wiesbaden am 13.11.2015
Destatis 2015c	Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2015, Kapitel 6: Einkommen, Konsum, Lebensbedingungen. Wiesbaden, 2015
Destatis 2015d	Statistisches Bundesamt: Pressemitteilung Zahl der Woche vom 2. Juni 2015: 1,2 Millionen Haushalte in Deutschland mit Elektrofahrrad. URL: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2015/PD15_023_p002pdf.pdf;jsessionid=A87A82B1534F61998338C2444A8FF26B.cae1?__blob=publicationFile , abgerufen am 14.12.2015
Destatis 2016	Statistisches Bundesamt (DESTATIS): Fahrzeugbestand – Kraftfahrzeuge und Schienenbestand im Jahr 2010. URL: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/UnternehmenInfrastrukturFahrzeugbestand/Tabellen/Fahrzeugbestand.html , abgerufen am 14.06.2016
DIN 2002	Normenausschuss Kunststoffe (FNK) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Die Europäische Norm EN ISO 1043-1:2001, Kennbuchstaben und Kurzzeichen, Teil 1: Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften. Berlin, 2002. URL: https://www.w-hs.de/fileadmin/public/dokumente/erkunden/fachbereiche/FB8/pers.Seiten/Dipl.%20Chem.Ing.Junghans/kunststoffe/DIN_EN_ISO_1043-1.pdf , abgerufen am 13.10.2015
Ebike 2014	ebike.de – Faszination E-Bike: Internationale Verkaufszahlen im Vergleich. URL: https://www.ebike.de/blog/ebikes-internationale-verkaufszahlen-im-vergleich-0108 , abgerufen am 17.02.2016
Eco-cockpit	Software Eco-cockpit, URL: https://www.eco-cockpit.de/index.php?id=eco-cockpit0 , letzter Zugriff am 16.06.16
ecoinvent	Software ecoinvent, URL: http://www.ecoinvent.org/ , letzter Zugriff am 16.06.16
ECODESIGN	Software ECODESIGN, URL: http://www.ecodesign.at/methodik/software/index.de.html , letzter Zugriff am 16.06.16
EcoWebDesk	Software EcoWebDesk, URL: https://www.ecointense.de/ , letzter Zugriff am 16.06.16

- Ehrenfried 2013 Ehrenfried, F.: E-Bikes knacken in Europa demnächst die Millionenmarke (Stand 05.08.2013). WirtschaftsWoche Online (wiwo.de). URL: <http://green.wiwo.de/studie-e-bikes-knacken-in-europa-demnächst-die-millionenmarke/>, abgerufen am 10.11.2015
- Elantas 2016 Elantas Electrical Insulation: Sekundärisolation. URL: <http://www.elantas.de/produkte-service/sekundaerisolation.html>, abgerufen am 20.03.2016
- ELCD Software ELCD. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability: ELCD – European reference Life Cycle Database, URL: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>, letzter Zugriff am 16.06.16
- EMAS-cockpit Software EMAS-cockpit, URL: <http://www.avanti-greensoftware.com>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Enablon SD-EHS Software Enablon SD-EHS, URL: <http://www.enablon.de/produkte/qehs-management.aspx>, letzter Zugriff am 16.06.16
- ENerGO+ Software ENerGO+, URL: <http://www.berg-energie.de/produkte/energiemanagement/energo>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Entsorger 2015 Befragung verschiedener Entsorgungsunternehmen. Persönliche Mitteilungen, 2015
- Envis Software Envis, URL: http://www.mkv-consulting.eu/konzept_envis_recht.html, letzter Zugriff am 16.06.16
- EPM Kompas Software EPM Kompas, URL: https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_wirtschaftswissenschaften/bwl/bu/forschung/projekte/epm_kompas_software/software, letzter Zugriff am 16.06.16
- EPOMM 2013 European Platform on Mobility Management (EPOMM): e-update Newsletter März 2015: Die Revolution des Elektrofahrrads: hin zu einem Marktanteil über 20%. URL: http://www.epomm.eu/newsletter/electronic/0213_EPOMM_enews_DE.pdf, abgerufen am 08.02.2016
- Erdmann et al. 2011 Erdmann L.; Behrendt S.; Feil M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), adelphi, Berlin, 2011, 13 S.
- eSight Software eSight, URL: <http://www.esightenergy.com/de>, letzter Zugriff am 16.06.16

- EuKomm 2016 Europäische Kommission: Quick Response Code - QR. URL: http://ec.europa.eu/ipg/standards/qr_code/index_en.htm, abgerufen am 18.02.2016
- Eurostat 2015 Eurostat: End-of-life vehicles: Reuse, recycling and recovery, Totals. Stand 2015 URL: http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-datasets/-/ENV_WASELVT, abgerufen am 15.01.2016
- Fahrradbeleuchtung Info 2016 Fahrradbeleuchtung Info: Marktübersicht Nabendynamos vom 16. März 2016. URL: <http://fahrradbeleuchtung-info.de/nabendynamos-marktuebersicht-und-empfehlungen>, abgerufen am 23.03.2016
- Febelauto 2014 Collecting Results End-of-Life Vehicles in Belgium, 2014. URL: <http://www.febelauto.be/userfiles/file/collection%20and%20recovery%20results%202010-2014.pdf>, abgerufen am 19.02.2014
- Feifel et al. 2009 Feifel, S.; Walk, W.; Wursthorn, S.; Schebek, L.: Ökobilanzierung 2009: Ansätze und Weiterentwicklungen zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit, Tagungsband Ökobilanz-Werkstatt 2009, Freising 2009, 295 S.
- FH Nordhausen et al. 2005 Fachhochschule Nordhausen, MIFA AG Sangerhausen, ADGC Bremen: Nachhaltigkeitsbezogene Produktinnovationen und Produktneuplanungen – untersucht am Beispiel der Entwicklung von Fahrrädern. Nordhausen, Sangerhausen, Bremen, Oktober 2005, 418 S.
- Finkenzeller 2012 Finkenzeller K.: RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. Carl Hanser Verlag, München 2012, S. 235–258
- Fischer 2011 Fischer, R.: Elektrische Maschinen. 15. aktualisierte Ausgabe, Carl Hanser Verlag, München, 2011. 420 S.
- Focus Online 2015 Focus Online: VW will Menschen durch Roboter ersetzen. Focus Online, URL: http://www.focus.de/finanzen/boerse/aktien/kosten-hoechstens-sechs-euro-pro-stunde-roboter-statt-arbeiter-vw-will-die-kosten-senken_id_4444544.html, abgerufen am 27.05.2016
- Fraunhofer IAO 2016 Fraunhofer IAO, IPA und IGB: Leitbild Ultraeffizienzfabrik. URL: <http://wp12434357.server-he.de/ultraeffizienzfabrik/leitbild/>, abgerufen am 09.08.2016
- FridaCarb Software FridaCarb, URL: <https://frida.dfge.de/fridacarb/frida.php>, letzter Zugriff am 16.06.16

- GaBi Software GaBi, URL:
<http://www.gabi-software.com>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Gallenkemper et al. 2015 Gallenkemper B.; Breer J.; INFA-ISFM e.V. (Ahlen); Umweltbundesamt: Analyse der Datenerhebung nach ElektroG über die Berichtsjahre 2011 und 2012 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflicht 2014. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015, 75 S.
- GEMIS Software GEMIS, URL:
<http://www.iinas.org/gemis-info-de.html>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Gößling-Reisemann et al. 2013 Gößling-Reisemann, S.; Zimmerman, T.; Sander, K.: Potential availability of secondary scarce metals from selected applications in Germany. World Resources Forum Davos, 2013
- Greenfinder 2015a Greenfinder UG, Bammental: Auszüge der E-Bike Studie 2014, 7. Gewicht. URL: <http://www.greenfinder.de/e-bikes/ratgeber/auszuege-der-e-bike-studie-2014/7-gewicht/>, abgerufen am 10.11.2015
- Greenfinder 2015b Greenfinder UG, Bammental: Ratgeber E-Bike Akku, Infos zu Leistung & Lebensdauer. URL: <http://www.greenfinder.de/e-bikes/ratgeber/technische-details-praxiswissen/e-bike-akku/>, abgerufen am 10.11.2015
- Greenfinder 2015c Greenfinder UG, Bammental: Auszüge der E-Bike Studie 2014, 8. Antriebskonzepte & Motorposition. URL: <http://www.greenfinder.de/e-bike-studie/auszuege-der-e-bike-studie-2014/8-antriebskonzepte-motorposition/>, abgerufen am 13.11.2015
- Greenfinder 2015d Greenfinder UG, Bammental: Auszüge der E-Bike Studie 2014. Infos zum Aufbau eines E-Bikes. URL: <http://www.greenfinder.de/e-bikes/ratgeber/auszuege-der-e-bike-studie-2014/3-aufbau-eines-e-bikes/>, abgerufen am 13.11.2015
- Grellmann et al. 2011 Grellmann W.; Seidler S.: Kunststoffprüfung. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2011. 739 S.
- Gresch 2011 Gresch, P. (Brose): Trends in der Automobil-Elektronik unter dem Einfluss steigender Elektrifizierung. Präsentation, Peter Gresch, Geschäftsführer Entwicklung Brose Gruppe, 2011. 30 S.. URL: http://www.automobilproduktion.de/uploads/2011/05/Gresch_aktuell.pdf, abgerufen am 03.12.2015
- Gruden 2008 Gruden D.: Umweltschutz in der Automobilindustrie: Motor, Kraftstoffe, Recycling. 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008. 414 S.

- gutwin Software gutwin, URL:
<http://www.gutwinski.at/gutwin-software/software/legal-compliance-software/>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Haerder et al. 1983 Haerder T.; Reuter A.: Principles of Transaction-Oriented Database Recovery. ACM Comput. Surv. 15 (4), 1983, S. 287–317
- Hengstbach 2011 Hengstbach A.: QR-Codes: lesen, erzeugen, verstehen. Computer BILD, 2011 URL:
<http://www.computerbild.de/artikel/cb-Tipps-Wissen-QR-Codes-Barcode-EAN-6122468.html>, abgerufen am 11.02.2016
- Hering et al. 2012 Hering E., Martin R., Gutekunst J., Kempkes J., Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer. 2. Auflage, Springer-Verlag, 2012. 571 S.
- Holzhauser 2015 Holzhauser R.: Altauto-Demontage - Bisherige Entwicklungen und Realität. In: Recycling und Rohstoffe, Band 8. Thomé-Kozmiensky, K. J. , Goldmann, D. (Hrsg), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2015, S. 151–171
- Hörnig 2015 Hörnig G.: Recycling von NdFeB-Magneten aus elektrischen Antrieben. In: Recycling und Rohstoffe, Band 8. Thomé-Kozmiensky, K. J. , Goldmann, D. (Hrsg), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2015, S. 219–231
- Hurst und Gartner 2012 Hurst, D.; Gartner, J.: Electric Bicycles – Global market opportunities, barriers, technology issues, and demand forecast for E-Bicycles, Pedal-Assist Bicycles and E-Bicycle Batteries, Executive Summary. Boulder (USA), 2012, 53 S.
- Hüttenbetreiber 2015 Befragung verschiedener Metallhüttenbetreiber. Persönliche Mitteilung, 2015
- IAT 2004 Institut Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement Universität Stuttgart (IAT): Produktrecycling in der Pumpenindustrie, Abschlussveranstaltung des Forschungsvorhabens Pump up. Dortmund 2004, 233 S.
- IDEMAT Software IDEMAT, URL:
http://www.idemat.nl/Onl_db/od_frame.htm, letzter Zugriff am 16.06.16
- IDIS Software IDIS, URL:
<http://www.idis2.com/>, letzter Zugriff am 16.06.16

- ILEA 2008 Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe der Universität Stuttgart: Grundlagenpraktikum Versuch Drehstrom-Asynchronmaschine (DAM). April 2008. URL: http://www.ilea.uni-stuttgart.de/dateien/gp/Versuch_007_Asynchronmaschine.pdf, abgerufen am 13.11.2015
- iPoint Software iPoint, URL: <http://www.ipoint-systems.com/> letzter Zugriff am 16.06.16
- iSystain Software iSystain, URL: <http://www.isystain.com>, letzter Zugriff am 16.06.16
- IUWA Software IUWA, URL: <http://s531050366.online.de/abfallmanager/>, letzter Zugriff am 16.06.16
- IVAM Software IVAM, URL: <http://www.ivam.uva.nl/en/>, letzter Zugriff am 16.06.16
- IZT/ISI 2009 Institut für Zukunftstechnologien und Technologiebewertung (IZT), Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI): Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, 15.05.2009, Karlsruhe, Berlin, 2009
- Jannasch 2016 Jannasch, S.: So will Apple den Smartphone-Schrott retten. Amsterdam 2016, URL: <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/elektroschrott-zu-schade-fuer-die-tonne-1.3011484>, abgerufen am 25.06.2016
- Jordan 2013 Jordan, M.: „Mit über 100 kleinen Stellmotoren – die neue S-Klasse“, Juli 2013, URL: <http://blog.mercedes-benz-passion.com/2013/07/mit-uber-100-kleinen-stellmotoren-die-neue-s-klasse/>, abgerufen am 13.11.2015
- Kärger 2014 Kaerger W.: Markt der Gebrauchtersatzteile im Wandel. In: Recycling und Rohstoffe, Band 7. Thomé-Kozmiensky, K. J. , Goldmann, D. (Hrsg), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2014, S. 127–135
- KBA 2014 Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): Fahrzeugzulassungen – Neuzulassungen, Besitzumschreibungen, Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Jahr 2013. Flensburg, Dezember 2014, S. 138. URL: http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz7_2013_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3, abgerufen am 07.04.2015

- KBA 2015a Kraftfahrtbundesamt (KBA): Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2015. URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html, abgerufen am 19.02.2016
- KBA 2015b Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (Hrsg.): Löschungen in den Jahren 1955 bis 2006 und Außerbetriebsetzungen in den Jahren 2007 bis 2014 nach Fahrzeugklassen. Flensburg, 2015. URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Ausserbetriebsetzungen/FahrzeugklassenAufbauarten/a_fzkl_zeitreihe.html, abgerufen am 14.07.2015
- KBA 2016 Kraftfahrtbundesamt (KBA): Bestand an PKW am 01. Januar 2016 nach ausgewählten Kraftstoffarten. URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2016_b_umwelt_dusl.html?nn=663524, abgerufen am 22.06.2016
- Kieseberg et al. 2010 Kieseberg P.; Leithner M.; Mulazzani M.; Munroe L.; Schrittwieser S.; et al.: QR code security. Proc. 8th Int. Conf. Adv. Mob. Comput. Multimed. - MoMM '10, 2010, S. 430–435
- Kille et al. 2008 Kille, C.; Schmidt, N.; Schroer, B.; Wandel: Wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Güterverkehrs. Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen (IIS), Arbeitsgruppe für Technologien der Logistik-Dienstleistungswirtschaft (ATL); AKPGM, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008, 87 S.
- Kohlmeyer et al. 2015 Kohlmeyer R., Groke M., Sander K., Bergamos M.: Perspektiven der zunehmenden Fahrzeugelektronik für das Altfahrzeugrecycling, Recycling und Rohstoffe, TK Verlag, S. 183–206, Neuruppin, 2015
- Kovac 2013 Kovac F.: Untersuchung der Auswirkungen einer RFID-gestützten Bauzustandsdokumentation auf die Dokumentationsqualität in der Erprobungsphase am Beispiel ausgewählter Baureihen eines Automobilunternehmens. Dissertation. Wissenschaftliche Berichte, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), BAND 79. KIT Scientific Publishing, 2013, 198 S.
- Kroop et al. 2014 Kroop S.; Kaufhold T.; Lohmeyer R.; Mocker M.; Franke M.; et al.: Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Sulzbach-Rosenberg; Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, Stuttgart, 2014, 274 S.

- KUKA 2016 KUKA Aktiengesellschaft: Zwischenbericht Q1/2016, URL: <https://www.kuka.com/de-de/investor-relations/berichte-und-pr%C3%A4sentationen>, abgerufen am 20.06.2016
- Kupferinstitut 2011 Deutsches Kupferinstitut: Sparen mit dem Sparmotor - Energieeffiziente Antriebsstränge mit Motoren nach IEC 60034-30. Düsseldorf 2011. URL: https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Anwendung/Elektrotechnik/brosch26.pdf, abgerufen am 21.03.2016
- Kupferinstitut 2012 Deutsches Kupferinstitut: Niedriglegierte Kupferwerkstoffe, Technologie Forum Kupfer, Düsseldorf, 2012. URL: https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/i008.pdf, abgerufen am 13.11.2015
- Lampe et al. 2005 Lampe M.; Flörkemeier C.; Haller S.: Einführung in die RFID-Technologie. In: Das Internet der Dinge. Ubiquitous computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005, S. 69–86
- Landt 2005 Landt J.: The history of RFID. IEEE Potentials 24, 2005, S. 8–11.
- Lange 2013 Lange U.: Evaluation of informal sector activities in Germany under consideration of electrical and electronic waste management systems. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2013, 174 S.
- Laser Photonics 2008 Laser Photonics: Handheld Fiber Laser Marking System. URL: http://laserphotonics.com/docs/Systems/HandHeld_Brochure_2008_Web.pdf, abgerufen am 17.09.2015
- Lempert et al. 2011 Lempert S.; Pflaum A.: Sensornetzbasierendes Supply Chain Event Management zur Optimierung des innerbetrieblichen Asset Managements am Fraunhofer IIS. In: Logistikmanagement - Herausforderungen, Chancen und Lösungen, Band I. Sucky, E. , Asdecker, B. , Dobhan, A. , Haas, S. , Wiese, J. (Hrsg.), University of Bamberg Press, Bamberg, 2011, S. 281–300
- Lewicki 2009 Lewicki, R.: End-of-life vehicles in the light of environmental benefits identified in the products' life cycle, Poznań, 2009. URL: http://t.tribologia.eu/plik/spm/spmom-09v44n1_p-077.pdf, abgerufen am 14.02.2016

- Lichtl 2016 Lichtl, M.: Küchenabfälle gehören in die Biotonne – eine Kampagne des hessischen Umweltministeriums gemeinsam mit Kommunen, in: Wiemer, K.; Kern, T.; Raußen, T. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung XI, 1. Auflage 2016, Witzhausen 2016, S. 183 – 188
- Lienhop et al. 2015 Lienhop, M.; Thomas, D.; Brandies, A.; Kämper, C.; Jöhrens, J.; Helms, H.: Pedelec – Verlagerungs- und Klimaeffekte durch Pedelec-Nutzung im Individualverkehr. Braunschweig, Heidelberg. September 2015. 308 S.
- Löhle 2012 Löhle S.: Smarte Produktkennzeichnung von Elektro- und Elektronikgeräten mittels RFID für ein gezieltes Stoffstrom- und Informationsmanagement. Universität Kassel, 2012
- Lucky Bike 2015 Lucky Bike.de GmbH, Bielefeld: Akkus für E-Bikes – Was Sie über E-Bike Akkus wissen sollten. Stand 20.05.2015. URL: <http://www.lucky-bike.de/blog/akkus-fuer-e-bikes-was-sie-ueber-akkus-wissen-sollten/>, abgerufen am 10.11.2015
- Luidold et al. 2013 Luidold, S. et al.: Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 11/2013, Wien 2013, 350 S.
- Markator 2016 Markator Manfred Borries GmbH: Nadelpräger, Ritzpräger. URL: http://www.markator.de/de/de/produkte/integrationseinheiten_nadelpraeger_ritzpraeger/, abgerufen am: 17.03.2016
- Martens 2011 Martens, H.: Recyclingtechnik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011. 345 S.
- Masih-Tehrani et al. 2015 Masih-Tehrani, M., Esfahanian, V., Esfahanian, M., Nehzati, H. und Esfandiari, M. J.: Hybrid energy storage optimal sizing for an e-bike. International Journal of Automotive Engineering, 5, 2015, S. 1016 - 1025. URL: http://www.iust.ac.ir/ijae/files/site1/user_files_62fop6/eng/hakim-A-10-63-100-c77efc1.pdf, abgerufen am 14.06.2016
- Matheus und Klumpp 2008 Matheus D.; Klumpp M.: Radio Frequency Identification (RFID) in der Logistik. Ild Schriftenreihe Logistikforschung, Band 4, 2008, 56 S. URL: https://www.fom.de/download/186-ild_Schriftenreihe_Logistikforschung_Band_4_01.pdf, abgerufen am 23.10.2015
- Motorenhersteller 2015 Befragung verschiedener Halbzeug- und Motorenherstellern. Persönliche Mitteilungen, 2015

- Müller et al. 2005 Müller B.; Gierich J.: Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland - Fallbeispiel Elektro- und Elektronikaltgeräte. IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, 2005, 151 S.
- NEEDS Software NEEDS, URL: <https://nexus.openlca.org/database/NEEDS>, letzter Zugriff am 16.06.16
- ORACLE Software ORACLE, URL: <https://www.oracle.com/de/products/applications/green/index.html>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Östling Marking Systems GmbH 2015 Östling Marking Systems GmbH: Lasermarkieren. URL: <http://www.oestling-markiersysteme.de/produkte/lasermarkiersysteme/>, abgerufen am 17.09.2015
- Östling Marking Systems GmbH 2016 Östling Marking Systems GmbH: Elektrolytische Markiersysteme. URL: <http://www.oestling-markiersysteme.de/produkte/elektrolytische-markiersysteme/>, abgerufen am 18.04.2016
- Outotec Software Outotec, URL: <http://www.outotec.com/en/Products--services/HSC-Chemistry>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Patent-Nr. DE 698 09 111 T2 Patent-Nr. DE 698 09 111 T2: Verfahren zum Verarbeiten von abgelegten Elektromotoren. 1997
- Patent-Nr. DE 39 11 490 C1 Patent-Nr. DE 39 11 490 C1: Vorrichtung zur Rückgewinnung von Kupfer bei der Verschrottung von Elektromotoren. 1989.
- Patent-Nr. US 2612994 A Patent-Nr. US 2612994 A, Woodland N. J.; Bernard S.: Classifying apparatus and method. 1952
- PAUL Software PAUL, URL: http://www.qumsult.de/paul_rechtsaktualisierung.htm, letzter Zugriff am 16.06.16
- Plötz und Eichhammer 2011 Plötz, P., Eichhammer W.: Zukunftsmarkt Effiziente Elektromotoren. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, 2011. 36 S.

Polysecure 2016	Polysecure: Markierung unterschiedlichster Materialien, URL: http://www.polysecure.eu/branchen-und-industrieanwendungen-plagiatschutz-und-sortiermaschinen/markierung-unterschiedlichster-materialien/ , abgerufen am 11.05.2016
ProBAS	Software ProBas Umweltbundesamt, URL: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php , letzter Zugriff am 16.06.16
QuB-Tool	Software QuB-Tool, URL: http://www.quh.de/qubtool.php , letzter Zugriff am 16.06.16
QUMcheck	Software QUMcheck, URL: http://www.qumedia.de/software_qualitaet_umwelt_arbeitsschutz.htm , letzter Zugriff am 16.06.16
RecyclingPortal 2014	RecyclingPortal.eu: Altfahrzeugrichtlinie: Österreich ist anderen EU-Staaten beim Vollzug weit voraus, Meldung vom 26.05.2014. URL: http://recyclingportal.eu/Archive/4205 , abgerufen am 19.02.2016
REGIS	Software REGIS, URL: http://www.sinum.com/angebot/software/ , letzter Zugriff am 16.06.16
Reparaturdienstleister 2016	Befragung verschiedener Reparaturdienstleister. Persönliche Mitteilungen, 2016
SARS 2014	Stiftung Auto Recycling Schweiz: Jahresbericht 2014, Bern. URL: http://c1940652.r52.cf0.rackcdn.com/55c0d129ff2a7c73630011b7/Jahresbericht_2014_d.pdf , abgerufen am 19.02.2016
Schilling Marking Systems 2016	Schilling Marking Systems: Signiertechnik von Schilling Marking Systems. URL: http://www.schilling-marking.de/DE_PRODUCT/ELEC/signiertechnik_electrolytic.html , abgerufen am 14.01.2016
Schindelar 2015	Schindelar GmbH: Persönliche Mitteilung, 18.11.2015
Schindler 2005	Environmental Fact Sheet – Elevator system Schindler, 2400/2500/2600 Traction, Version 1.1, Schindler, Luzern, 2005
Schmid und Zur-Lage 2014	Schmid D.; Zur-Lage L.: Perspektiven für das Recycling von Altfahrzeugen. In: Recycling und Rohstoffe, Band 7. Thomé-Kozmiensky, K. J. , Goldmann, D. (Hrsg), TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2014, S. 105–126
Schrotthandel 2015	Befragung verschiedener Schrotthandelsunternehmen. Persönliche Mitteilungen, 2015

- Schrottpreise 2016 Schrottpreise.eu: Aktuelle Schrottpreise - Milberry. URL: <http://schrottpreise.eu/kupferschrott/milberry/>, abgerufen am 28.04.2016
- Schulze et al. 2014 Schulze S.; Dittmar A.: Entschichtung von Weißblechschrotten als Beitrag einer innovativen Zinnrückgewinnung (ENWEI). Clausthaler Umwelttechnik-Institut, Clausthal-Zellerfeld, 2014, 55 S., URL: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30762.pdf>, abgerufen am 23.03.2016
- Schulze Wettendorf 2015 Schulze Wettendorf, T.: G2 Kommunikationsprojekt Steuerungs- und Kommunikationsmaßnahmen zur Verbesserung von Sammelergebnissen für Elektro-Altgeräte und Batterien, in: Tagungsband der Fachtagung des LfU gemeinsam mit der Deutschen Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. zum Thema „Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten nach dem neuen ElektroG“, Augsburg 2015, S. 25–37
- Schwartz 2011 Schwartz, F.G.: Mehr Diagnostik, mehr Gesundheit, Statement im Rahmen der Pressekonferenz des BARMER GEK Arztreport 2011, Berlin, 2011
- SDNA Technology GmbH 2012 SDNA Technology GmbH: SelectaDNA. URL: <http://www.selectadna.de/>, abgerufen am 13.01.2016
- Secolit® 2016 Secolit® - der temperaturbeständige Werkstoff für hochwertige Dauermagnete. Technische Dokumentation der Tridelta Magnetsysteme, Dortmund 2016, 6 S.
- SIC Marking 2015 SIC Marking: Lasermarkierung. URL: <http://www.sic-marking.de/lasermarkierung>, abgerufen am 17.09.2015
- SIC Marking 2016 SIC Marking: SIC Marking: Produkte. URL: <http://www.sic-marking.de/produkte>, abgerufen am 18.04.2016
- SimaPro Software SimaPro, URL: <https://www.pre-sustainability.com/simapro>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Sisma 2016 Sisma S.p.A.: Vergleich von Laserbeschriftung und anderen Verfahren. URL: <http://www.sisma-laser.de/vergleich-von-laserbeschriftung-und-anderen-verfahren/>, abgerufen am 18.04.2016
- SoFi Software SoFi, URL: <http://www.sofi-software.com>, letzter Zugriff am 16.06.16

- Spitzbart et al. 2008 Spitzbart M.; Schneider F.; Salhofer S.; Stengeli A.; Luger T.: Semimanuelle Demontage von Elektro(nik)-Kleingeräten. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 22/2008, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2008, 91 S.
- Spitzbart et al. 2013 Spitzbart M.; Herbeck E.; Schlupe M.; Blaser F.; et al.: Business Plan Calculation Tool for Manual E-waste Dismantling Facilities. United Nations University / StEP Initiative, 2013, URL: <http://www.step-initiative.org/business-plan-calculation-tool-for-manual-e-waste-dismantling-facilities.html>
- StaLa BW 2015 Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Erhebung über die Abfallentsorgung: Demontagebetriebe für Altfahrzeuge und demontierte Altfahrzeuge in Baden-Württemberg seit 2004. Schriftliche Auskunft vom 17.07.2015
- Statista 2015a Statista GmbH, Hamburg: Anzahl der aus Deutschland exportierten Pkw von 1990 bis 2014 (in Millionen), 2015, URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/166065/umfrage/export-von-pkw-aus-deutschland/>, aufgerufen am 17.08.2015
- Statista 2015b Statista GmbH, Hamburg: Fakten zum Thema Fahrrad. URL: <http://de.statista.com/themen/173/fahrrad/>, abgerufen am 10.11.2015
- SARS 2014 Stiftung Auto Recycling Schweiz: Jahresbericht 2014, Bern. URL: http://c1940652.r52.cf0.rackcdn.com/55c0d129ff2a7c73630011b7/Jahresbericht_2014_d.pdf, abgerufen am 19.02.2016
- StMUV 2015 Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV): Wertstoffhof 2020 – Neuorientierung von Wertstoffhöfen, München 2015, 81 S.
- TEAM Software TEAM, URL: <http://ecobilan.pwc.fr/boite-a-outils/team.html>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Technifor 2016 Technifor: Nadelmarkierer tragbar. URL: <http://www.technifor.de/de/produkte/nadelpraeger/tragbare-markiergeraete.html>, abgerufen am 23.02.2016
- Tieste 2010 Tieste K. Prof. Dr.-Ing.: Leistungselektronik, Komponenten und Methoden. Beitrag im Rahmen einer Vorlesung WS 2010, URL: https://www.ostfalia.de/export/sites/default/de/pws/tieste/tieste_alt/Lehre/vorlesungen/LE/LE2_WS10.pdf, aufgerufen am 14.10.2015

- Tridelta 2016 Tridelta Firmenwebseite: Informationen zu dauermagnetischen Kupplungen und Bremsen für die Antriebstechnik. URL: <http://www.tridelta-magnetsysteme.de/de/magnetische-bremsen-und-kupplungen.html>, abgerufen am 08.06.2016
- UBA 2014 Wachotsch, U.; Kolodziej, A.; Specht, B.; Kohlmeyer, R.; Petrikowski, F.: E-Rad macht mobil – Potenziale von Pedelecs und deren Umweltwirkung. Umweltbundesamt, Fachgebiet I 3.1 - Umwelt und Verkehr (Hrsg.). Dessau-Roßlau, 2014. 32 S.
- UBA 2015 Umweltbundesamt (UBA), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2013 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG - KOM-Tabellen und Qualitätsbericht, Dessau-Roßlau/Bonn, Juni 2015. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht_alfahrzeug_2013_bf.pdf, abgerufen am: 19.02.2016
- Umberto Software Umberto, ifu Hamburg – Institut für Umweltinformatik
URL: <http://www.umberto.de>, letzter Zugriff am 16.06.16
- Urban 2009 Urban, A. I.: Mit RFID zur innovativen Kreislaufwirtschaft. Prof. Dr.-Ing. Arnd I. Urban, Dipl.-Ing Gerhard Halm (Hrsg.), Kassel University Press, Kassel, 2009, 175 S.
- Vacuumschmelze 2012 Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC): Selten Erd (SE) Dauermagnete auf Basis Sm-Co und Nd-Fe-B, 2012, URL: <http://www.vacuumschmelze.de/de/forschung-innovation/werkstoffkompetenz/dauermagnetlegierungen.html>, abgerufen am 25.08.2015
- Vacuumschmelze 2015 Hr. Buchert, Vacuumschmelze GmbH & Co. KG: Persönliche Mitteilung, 09.11.2015
- van Schaik und Reuter 2014 van Schaik, A.; Reuter, M. A.: Product Centric Simulation Based Design for Recycling (DfR) and Design for Resource Efficiency (DfRE). MARAS - Material Recycling and Sustainability, Niederlande, 2014, 54 S.
- Velosuisse 2015 Velosuisse, Verband der Schweizer Fahrradlieferanten: Jahrestatistiken Fahrradmarkt Neuverkäufe Schweiz 2007 bis 2015, Bern 2015. URL: http://www.velosuisse.ch/de/statistik_aktuell.html, abgerufen am 14.06.2016

Verbände 2015	Befragung verschiedener Verbände. Persönliche Mitteilungen, 2015
Vereine 2015	Befragung gemeinnütziger Vereine, 2015
Welt a. S. 2008	Welt am Sonntag Newsticker: Ein Rad für alle Fälle. URL: http://www.welt.de/welt_print/article1898753/Ein-Rad-fuer-alle-Faelle.html , abgerufen am: 08.02.2016
Werkstätten 2015	Befragung verschiedener Kfz-Werkstätten bekannter Automobilhersteller. Persönliche Mitteilungen, 2015
Widmer 2015	Widmer R., Du X., Haag O., Restrepo E., Patrick A.: Scarce Metals in Conventional Passenger Vehicles and End-of-Life Vehicle Shredder Output. Environmental Science and Technology, 49, S. 4591–4599, American Chemical Society Publication (ACS), 2015
Winkler 2002	Winkler J.: Erbgut schützt vor Produktpiraten. Berliner Zeitung. URL: http://www.berliner-zeitung.de/archiv/kuenstliche-dna-in-aufklebern-und-etiketten-kann-illegale-nachahmungen-von-markenprodukten-nachweisen-erbgut-schuetzt-vor-produktpiraten,10810590,9986746.html , abgerufen am 16.09.2015
Wrede 2011	Wrede, J.: Elektromobilität, die heute schon funktioniert – das E-Bike. Vortrag im Rahmen der langen Nacht der Wissenschaften, Hochschule Pforzheim, 01. Juni 2011
Wuppertal Institut 2010	Wuppertal Institut: Energy Plus Pumps – Energieeffiziente Umwälzpumpen für Heizungsanlagen. URL: http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Ecolnno_Pumps_de.pdf , abgerufen am 21.06.2016
YES	Software YES, URL: http://sba-initiative.de/de/YES/ , letzter Zugriff am 16.06.16
Yokota 2009	Yokota S.: QR Code Overview & Progress of QR Code Applications. Vortrag, 2009. URL: http://www.gs1jp.org/pdf/001.pdf , abgerufen am 09.11.2015
Zbb 2010	Zbb - Zentralstelle für Berufsbildung im Handel e.V.: RFID – Einsatz im Handel. Zentrale Leitstelle für Innovation und Technologietransfer bei der Zentralstelle für Berufsbildung im Handel e.V., 2010, 16 S.

- Zepf 2015 Zepf V.: Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen Erden - Quantitative Ergebnisse für Neodym in Deutschland. In: Recycling und Rohstoffe, Band 8. Thomé-Kozmiensky, K. J. , Goldmann, D. (Hrsg), TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2015, S. 463–476
- ZIV 2013 Zweirad-Industrie-Verband e.V., Bad Soden/Hamburg: ZIV Wirtschaftspressekonferenz, Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland, Berlin 2013, 32 S. URL: http://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK_2013-ZIV_Praesentation_20-03-2013_oT.pdf, abgerufen am 22.06.2016
- ZIV 2014 Zweirad-Industrie-Verband e.V., Bad Soden/Hamburg: Recycling von Altbatterien voller Erfolg. ZIV und GRS Batterien stellen Erfolgskontrolle vor. Pressemitteilung, Pressedienst Fahrrad, 29. Juni 2014. URL: <http://www.pd-f.de/2014/07/29/recycling-von-altbatterien-voller-erfolg-ziv-und-grs-batterien-stellen-erfolgskontrolle-vor/>, abgerufen am 15.01.2016
- ZIV 2016 Zweirad-Industrie-Verband e.V., Bad Soden/Hamburg: Telefonische Auskunft zur Verwendung von Nabendynamos vom 13.04.2016
- ZIV 2016a Zweirad-Industrie-Verband e.V., Bad Soden/Hamburg: ZIV Wirtschaftspressekonferenz, Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland, Berlin 2016, 26 S. URL: http://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK_2016-ZIV_Praesentation_8.03.2016_oT_Presse.pdf, abgerufen am 22.06.2016
- ZIV 2016b Zweirad-Industrie-Verband e.V., Bad Soden/Hamburg: Telefonische Auskunft zur Verwendung von Nabendynamos vom 13.04.2016

11.4 Abbildungen Demontage Kleinmotoren aus Kfz

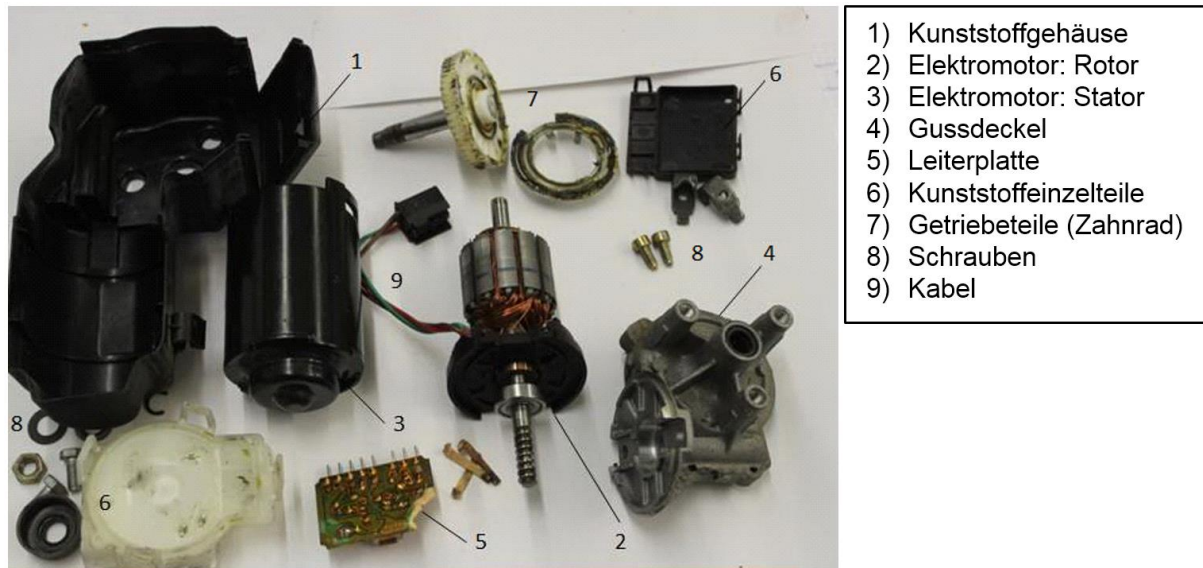


Abbildung 11-1: Demontierte Komponenten des Motors zum Antrieb des Scheibenwischers

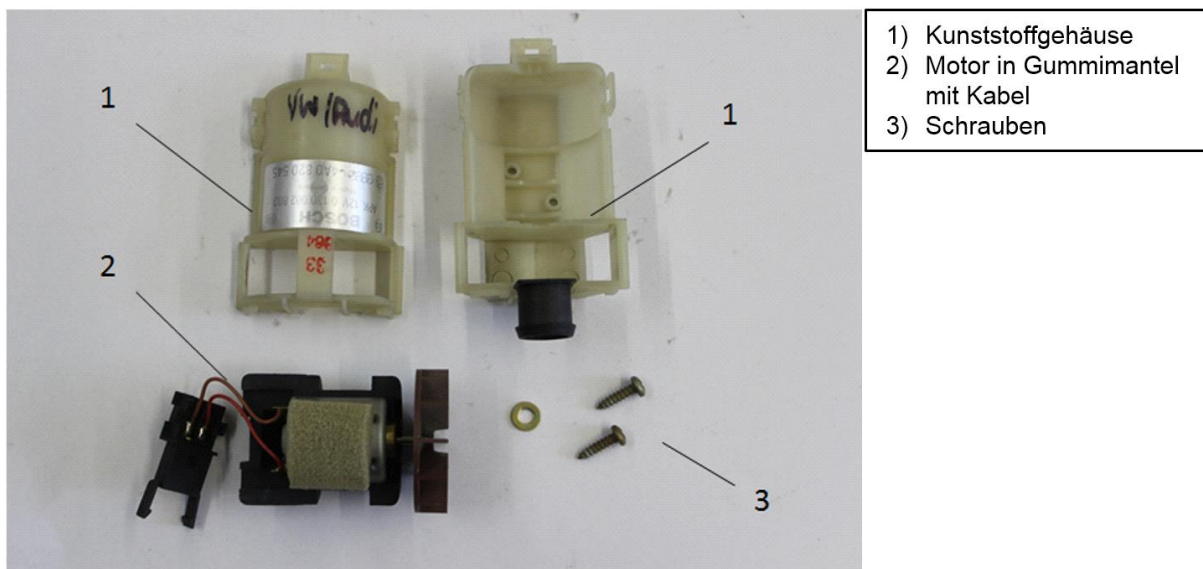


Abbildung 11-2: Demontierte Komponenten des Motors des Zusatzgebläses der Heizung

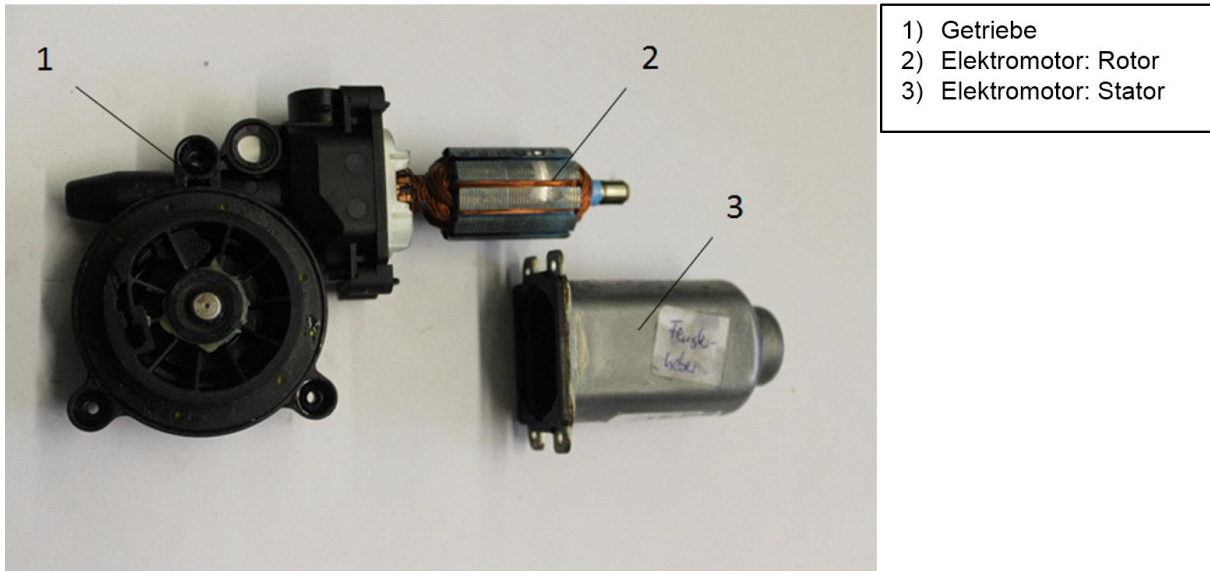


Abbildung 11-3: Demontierte Komponenten nach den ersten Zerlegungsschritten des Motors des Fensterhebers

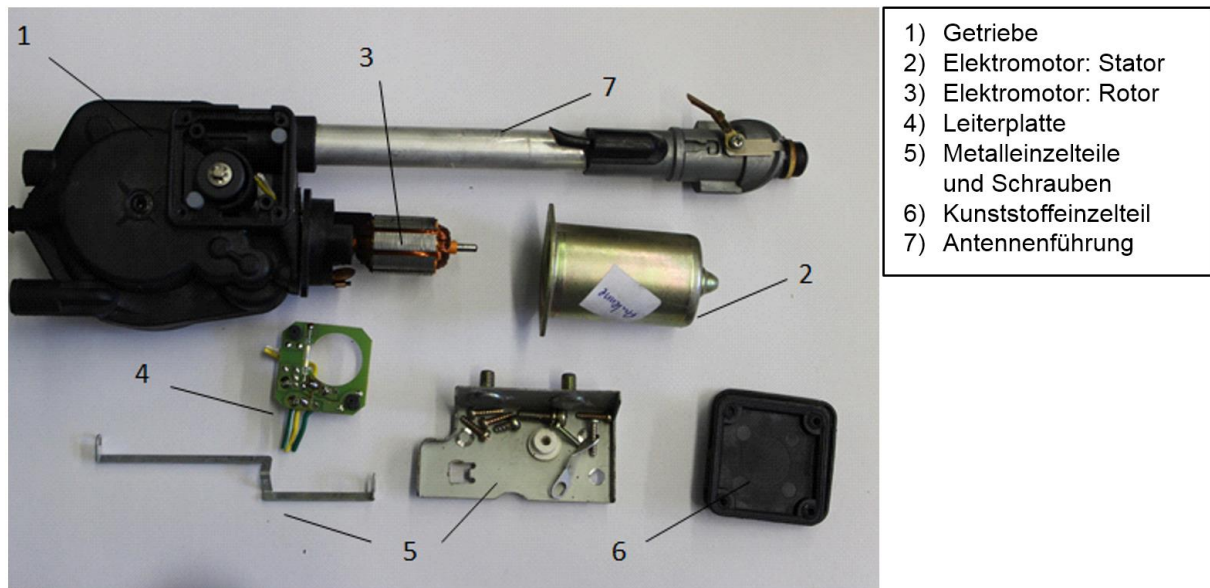
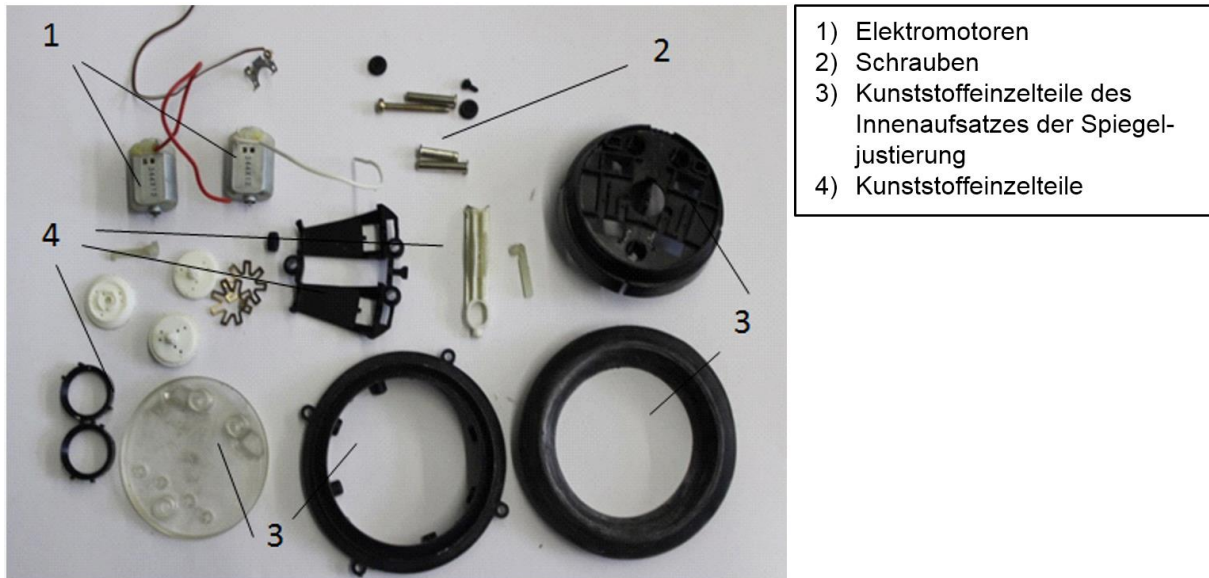
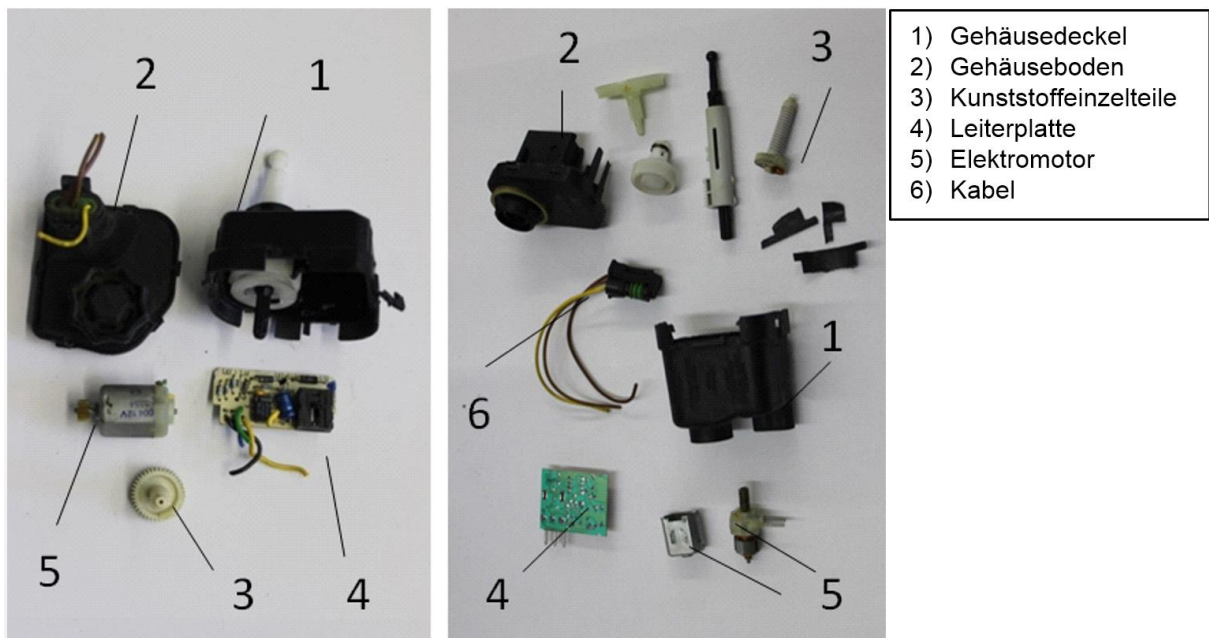


Abbildung 11-4: Demontierte Komponenten nach den ersten Zerlegungsschritten des Motors zum Aus- und Einfahren der Antenne



- 1) Elektromotoren
- 2) Schrauben
- 3) Kunststoffeilteile des Innenaufsatzes der Spiegeljustierung
- 4) Kunststoffeilteile

Abbildung 11-5: Demontierte Komponenten des Innenaufsatzes der Motoren zur Spiegeljustierung



- 1) Gehäusedeckel
- 2) Gehäuseboden
- 3) Kunststoffeilteile
- 4) Leiterplatte
- 5) Elektromotor
- 6) Kabel

Abbildung 11-6: Demontierte Komponenten der Motoren zur Leuchtweitenregulierung Modell 3 (links) und Modell 1 (rechts)

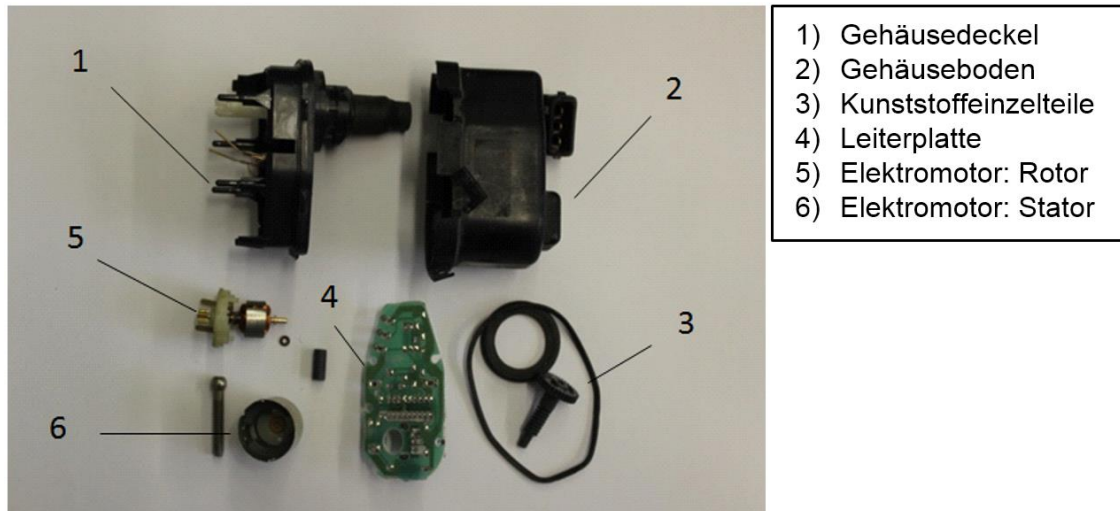


Abbildung 11-7: Demontierte Komponenten des Motors zur Leuchtweitenregulierung (Modell 2)

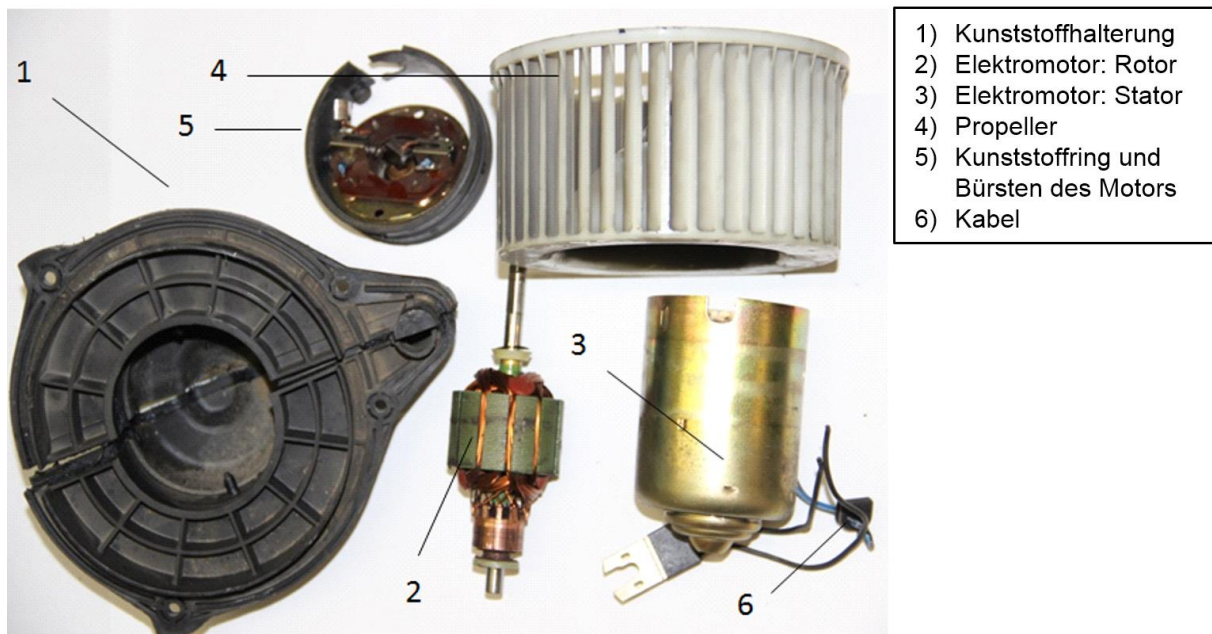


Abbildung 11-8: Demontierte Komponenten der Motorlüftung (Modell 1)

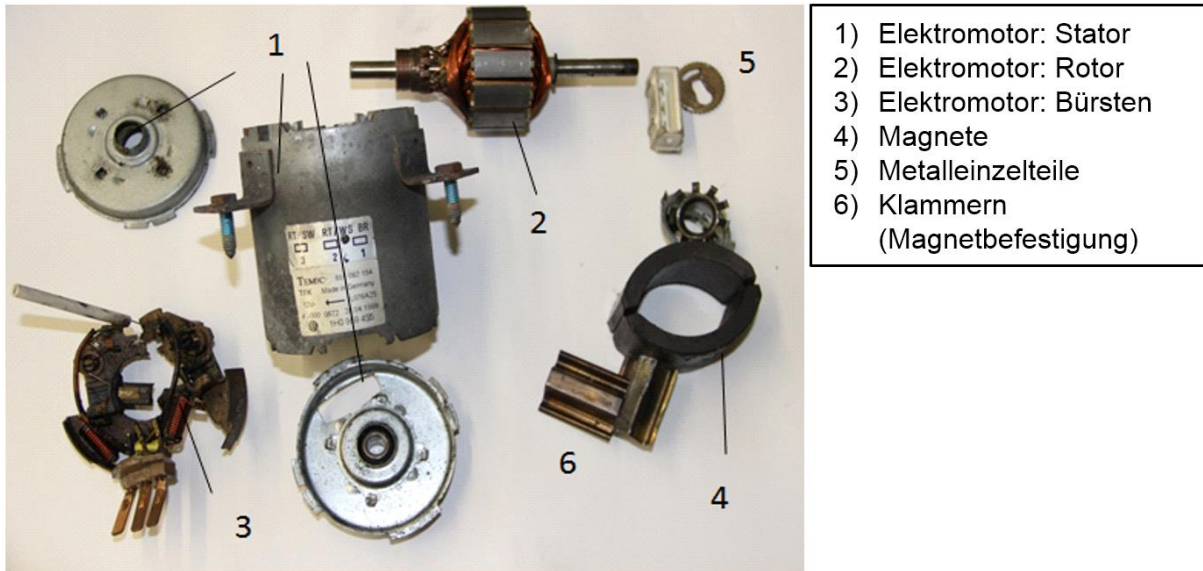


Abbildung 11-9: Demontierte Komponenten der Motorlüftung (Modell 2)

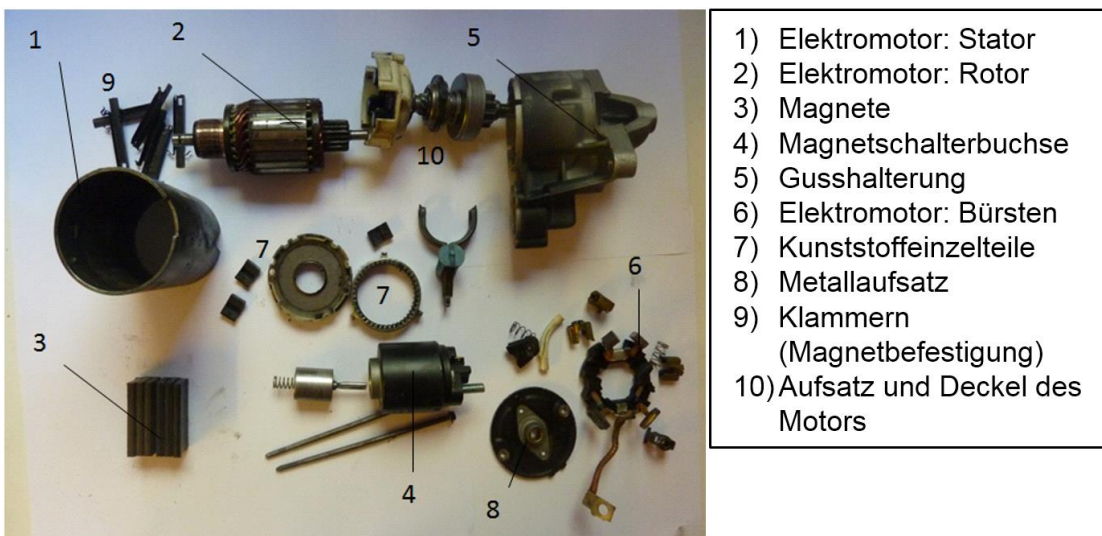


Abbildung 11-10: Demontierte Komponenten des Anlassers

11.5 Abbildungen Leiterplatten in Kleinmotoren aus Kfz

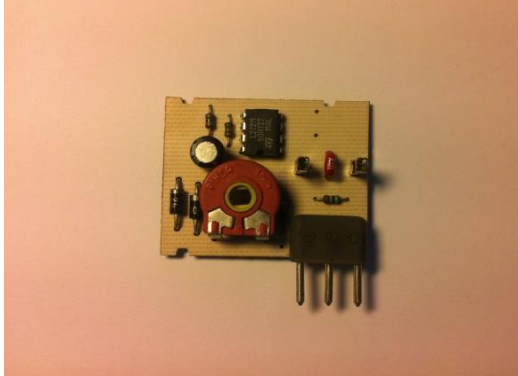


Abbildung 11-11: Leiterplatte der Leuchtweitenregulierung Modell eins (7,4 g) (vgl. Motor f), Modell1)

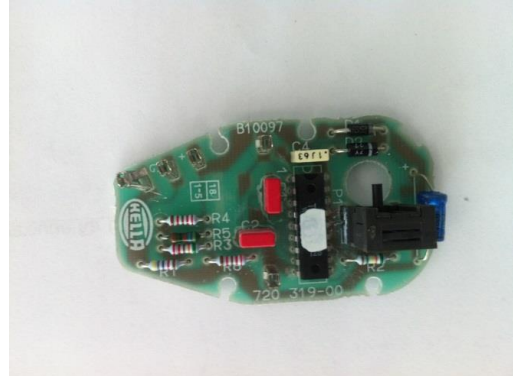


Abbildung 11-12: Leiterplatte der Leuchtweitenregulierung Modell zwei (13,45 g) (vgl. Motor f), (Modell 2)

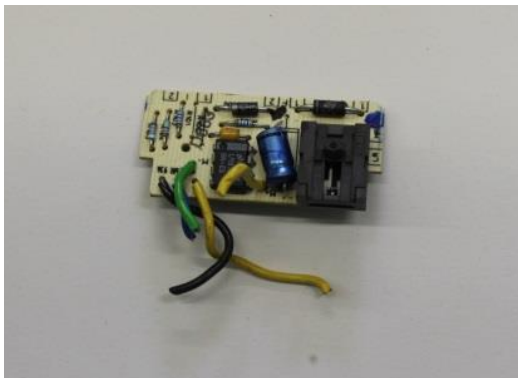


Abbildung 11-13: Leiterplatte der Leuchtweitenregulierung Modell 3 (6,5 g) (vgl. Motor f), (Modell 1)

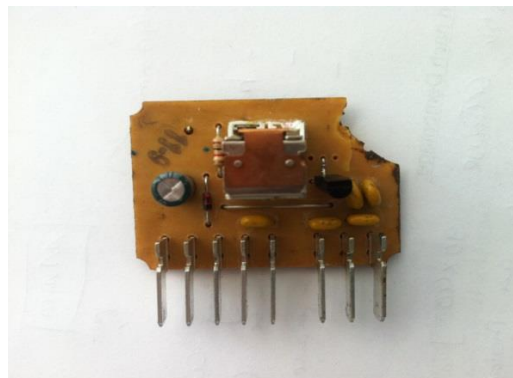


Abbildung 11-14: Leiterplatte des Motors zum Antrieb des Scheibenwischers (20 g) (vgl. Motor a)

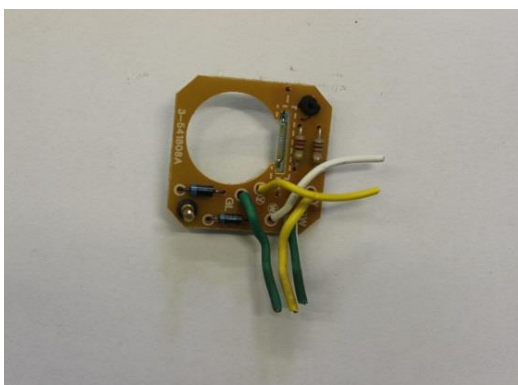


Abbildung 11-15: Leiterplatte des Motors zum Antrieb der Antenne (4,7 g) (vgl. Motor d)

11.6 Bewertung der Demontierbarkeit von Kleinmotoren aus Kfz

Tabelle 11-1: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit:
 Scheibenwischermotor

Automarke: Fiat		Masse: 1.081 g	Abmaß: 160 x 70 x 110 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Motor und Leiterplatte gesteckt in Kunststoff-gehäuse, Verschraubung der Gusskomponente und der Gehäuseschale	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Klammerung und Schrauben gut ersichtlich	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Die Leiterplatte ist bei der Entnahme aus dem Gehäuse gebrochen, Kupferwicklungen nicht von Eisenpaketen des Rotors trennbar	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine/erschwerete Trennbarkeit mittels manueller Demontage: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen, Leiterplatte mit Bauteilen, Erschwerte Trennbarkeit: Kunststoff-Zahnrad musste zersägt werden, um dieses von der Stahlachse zu trennen	möglich	größtenteils möglich	nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher, Zange, Sechskantschlüssel, Säge	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Geklemmt, gut lösbar	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25 g und ebenen Fläche von mind. 200mm)	Lediglich Produktkennzeichnungen vorhanden	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

Tabelle 11-2: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Heizungs-/Gebläsemotor

Automarke: VW/ Audi		Masse: 85 g	Abmaß: 90 x 40 (Durchmesser) mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Verschraubung Gehäuse, Klebung an Cu-Wicklung, Klammerung am Gehäuse des Stators	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Verschraubung klar ersichtlich, Aluminium Klammerung am Stator schwer ersichtlich	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Vergleichbar gute Lösbarkeit der groben Teile, Erschwerte Trennbarkeit: Stator zerstört zur Entnahme des Magneten	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Weitestgehend alle Bauteile verschiedener Werkstoffe problemlos trennbar, Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen	möglich	größtenteils möglich	nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher, Zange, Säge	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Magnet durchzieht komplette Statorwand, schwer trennbar, Statorgehäuse zerstört	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Kunststoffteile sind <25g, keine Kennzeichnung der Kunststoffarten vorhanden	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

Tabelle 11-3: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor des Fensterhebers

Automarke: Renault		Masse: 558 g	Abmaß: 80 x 95 x 47 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Verschraubung und gesteckte Teile	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Gut ersichtlich	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Gute Lösbarkeit der Komponenten, Magnet aus Statorhülle nicht ohne Zerstörung von Stator und des Magneten möglich	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen	möglich	größtenteils möglich	Nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher, Zange, Säge	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Magnet und Statorgehäuse mussten zerstört werden	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Einhausung des Getriebes: PBT ⁷ GF 20, weitere Kunststoffbestandteile nicht gekennzeichnet (jeweilige Masse unter 25 g)	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

⁷ PBT Polybutylenterephthalat

Tabelle 11-4: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Antenne

Automarke: nicht bekannt		Masse: 796 g	Abmaß: 300 x 82 x 59 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Verschraubung, gesteckte Leiterplatte	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Gut ersichtlich, Leiterplatte leicht entnehmbar	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Gute Demontierbarkeit großer Teile, Zerstörung des Stators zur Entnahme der Magnete	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen, Leiterplatte mit Bauteilen	möglich	größtenteils möglich	Nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher, Zange	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Entnahme der Magnete durch Zersägen des Statorgehäuses	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Keine Kennzeichnungen	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

Tabelle 11-5: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Spiegeljustierung

Automarke: Audi		Masse: 626 g	Abmaß: 260 x 115 x 100 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Verschraubung, Klammerung	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Plastikgehäuse gut, Gelenk für Spiegel keine gut ersichtliche Trennbarkeit	erfüllt	überwiegend erfüllt	Nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Plastikgehäuse gut lösbar, Gelenk für Spiegel sehr schwer zu trennen	Zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen	möglich	größtenteils möglich	nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher, Zange, Schraubstock	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Gut freizulegen nach Entfernen der Klammerung	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Nur am Spiegelgestell: ABS ⁸	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

⁸ ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol Kunststoff [DIN 2002].

Tabelle 11-6: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Leuchtweitenregulierung (Modell 1)

Automarke: Opel		Masse: 97 g	Abmaß: 80 x 50 x 40 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Kupferwicklung geklebt, Klammerung Gehäuse, Stator geklemmt an Rotordeckel	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Verbindungen schwer zugänglich	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Größtenteils gut, erschwerte Lösbarkeit: Kunststoff Klammerung musste gebrochen werden, keine nennenswerte Schädigung	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen, Leiterplatte mit Bauteilen, Kleber leicht lösbar	möglich	größtenteils möglich	Nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Geklemmt, gut lösbar	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Angaben auf Gehäuse: PA ⁹ 66 GF 30, Spindel: PA66GF30, Deckel: PP ¹⁰ GF20, Gehäuse: PA66 GF30, Ring und Korb: EPDM/PP	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

⁹ PA Polyamid

¹⁰ PP Polypropylen

Tabelle 11-7: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Leuchtweitenregulierung (Modell 2)

Automarke: VW		Masse: 132 g	Abmaß: 47 x 93 x 72 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Kunststoff Klammerung Gehäuse, Klebung an Cu- Wicklung, Aluminiumklammerung am Gehäuse des Stators	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Vergleichbar gut ersichtlich	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Größtenteils gut, erschwerte Lösbarkeit: Kunststoff Klammerung musste gebrochen werden (jedoch nur marginal zerstört)	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universal Werkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen, Leiterplatte mit Bauteilen, erschwerte Trennbarkeit: Kunststoffdeckel um Rotor mit Zange zerstört	möglich	größtenteils möglich	nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher, Zange	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Geklemmt, gut lösbar	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Keine ersichtlich	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

Tabelle 11-8: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motor der Leuchtweitenregulierung (Modell 3)

Automarke: VW		Masse: 104 g	Ab3: 52 x 97 x 57 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Vgl. Leuchtweitenregulierung Modell zwei	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Vgl. Leuchtweitenregulierung Modell zwei	erfüllt	überwiegend erfüllt	Nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	größtenteils gut, Kunststoff Klammerung musste gebrochen werden (marginal zerstört), Rotor schwer zu demontieren aufgrund Zahnradanbringung an Achse, Stator zerstört	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen, Leiterplatte mit Bauteilen	möglich	größtenteils möglich	nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubendreher, Säge	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Magnet muss trotz Klemmung gesägt werden	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	PBT ¹¹ GF 10, PA ¹² 66	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

¹¹ PBT Polybutylenterephthalat

¹² PA Polyamid

Tabelle 11-9: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motorlüftung (Modell 1)

Automarke: Mazda		Masse: 1.393 g	Abmaß: 155 x 140 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Stahlklammern und zusätzlich Klebung Kunststoffgehäuse, Verschraubungen	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Verbindungen schwer zugänglich	erfüllt	Überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Erschwert, große Einzelkomponenten schwer zu trennen, Stahlklammern an Kunststoffgehäuse	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen, Bürsten auf Metallaufsatz	möglich	größtenteils möglich	Nicht möglich
5	Werkzeuge:	Zangen, Schraubendreher	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Nicht ohne Zerstören des Magneten möglich	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Nicht vorhanden, trotz großer Kunststoffteile	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

Tabelle 11-10: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Motorlüftung (Modell 2)

Automarke: VW		Masse: 1.388 g	Abmaß: 300 x 155 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Verschraubungen, Klemmungen	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Gut ersichtlich	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Bis zum Rotor gute Lösbarkeit, Kunststoffaufsatz und Zahnrad schwer von Rotor zu trennen	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen	möglich	größtenteils möglich	Nicht möglich
5	Werkzeuge:	Schraubstock, Ringschlüssel, Hammer, Schraubendreher	wenige	mehrere	viele
6	Magnet Demontage:	Klemmung gut lösbar	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	PP ¹³ GF 30	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

¹³ PP Polypropylen [DIN 2002].

Tabelle 11-11: Geräteinformationen und Bewertung der Demontierbarkeit: Elektromotor Anlasser

Automarke: Renault		Masse: 4.534 g	Abmaß: 270 x 140 mm		
Nr.	Kriterium	Bemerkung	Einstufung		
			positiv	neutral	negativ
1	Verbindungsarten:	Verschraubung, Sperringe	wenige	mehrere	viele
2	Auffindbarkeit der Verbindungen:	Meist gut ersichtlich, Trennbarkeit, Trennung Magnetschalter nicht ersichtlich	erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt
3	Lösbarkeit der Verbindungen:	Sehr feste Verschraubung, Trennbarkeit Kupplungsteil nicht ersichtlich, jedoch Motor Komponente vergleichbar gut trennbar	zerstörungsfrei ohne Werkzeug	zerstörungsfrei mit Universalwerkzeug	zerstört
4	Trennbarkeit der Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen:	Keine Trennbarkeit: Rotor aus Stahllegierung und Kupferwicklungen, Trennbarkeit Magnetschalter nicht ersichtlich	möglich	größtenteils möglich	nicht möglich
5	Werkzeuge:	Ring- und Maulschlüssel, KreuzschlitzSchraubendreher und Akkubohrmaschine	wenige	mehrere	viele
6	Entnehmbarkeit des Magneten:	Leicht trennbar aus Statorinnenwand (Klemmung)	leicht	Stator zerstört	Magnet zerstört
7	Kunststoffkennzeichnung: (bei >25g und ebenen Fläche von mind. 200mm ²)	Keine Kunststoffteile mit dieser Größe/Gewicht	vollständig erfüllt	überwiegend erfüllt	nicht erfüllt

11.7 Tabelle zur Funktionalitätsübersicht der am Markt erhältlichen Planungswerkzeuge für den Umweltbereich

Tabelle 11-12: Übersicht über die Funktionalitäten, welche die am Markt erhältliche Planungssoftware für den Umweltbereich abdeckt (Kriterien zur Einordnung siehe Kapitel 7.2; die zugehörigen URLs sind unter dem jeweiligen Namen der Software im Literaturverzeichnis zu finden)

Bezeichnung	Bilanzen	Compliance	Planung	Dokumenten- verwaltung	Life Cycle Assessment
360report	x	x			
AUDIT	x	x		x	
Auriga+		x		x	
CO2-Rechner PRO	x				
credit 360	x	x			
CSR Toolkit	x	x			
Eco-cockpit	x	x	x		
ECODESIGN Pilot - EEG Pilot		x			
ecoinvent					x
EcoWebDesk	x	x	x		
ELCD					x
EMAS-cockpit		x	x		
Enablon SD-EHS		x	x	x	
ENerGO+	x	x			
Envis		x		x	
EPM Kompas		x	x		
eSight	x	x			
FridaCarb	x	x			
GaBi	x	x			x
GEMIS	x				x
gutwin		x		x	

Bezeichnung	Bilanzen	Compliance	Planung	Dokumenten- verwaltung	Life Cycle Assessment
IDEMAT					x
iPoint		x	x	x	x
iSystem	x	x	x	x	
IUWA	x	x		x	
IVAM					x
NEEDS					x
ORACLE(Green Applications)	x	x	x	x	
PAUL		x	x	x	
ProBas					x
QuB-Tool		x			
QUMcheck		x	x		
REGIS	x	x		x	
SimaPro	x	x			x
SoFi	x	x		x	x
TEAM					x
Umberto	x		x		x
YES (sba-initiative)		x			