

**Werkzeuge und Methoden zur Verbesserung der
automatisierten Demontage elektrischer Antriebsaggregate –
Ein Beitrag zur Circular Economy im Elektromobilitätssektor**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Florian Alexander Hansen, M.Sc.

aus Mönchengladbach, Nordrhein-Westfalen

Genehmigt von der

Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technische Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:

03.11.2023

Dekan

Prof. Dr. mont. Leonhard Ganzer

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Gutachterin:

Prof. Dr.-Ing. Christine Minke

Dissertation Technische Universität Clausthal 2023

© Autor

Danksagung und Vorwort

Zu Beginn meines Studiums bestand bereits der Traum, eines Tages als Doktor die Universität verlassen zu können. Die damit verbundene Erstellung der Dissertationsschrift ist jedoch eine etwas größere Herausforderung. Diese hätte ich vermutlich ohne die Unterstützung aus meinem Umfeld nicht gemeistert. Daher möchte ich zunächst meinen Gutachtern und Betreuern danken: Daniel Goldmann, der mich durch seine Ratschläge auf dem richtigen Weg gehalten hat und Christine Minke, die sich bereit erklärt hat, die Zweitbetreuung zu übernehmen. Weiterhin möchte ich meinem alten Chef Torsten Zeller und meinem neuen Chef Andreas Sauter danken, die mich in der Abteilung Ressourcentechnik und -systeme am CUTEK aufgenommen haben und mir die Entwicklungsmöglichkeiten geboten haben, die ich gesucht habe. Herzlich aufgenommen hat mich zudem auch die gesamte Abteilung RTS, in der ich neben Kollegen auch echte Freunde gefunden habe. Dabei möchte ich insbesondere meinen beiden Mitstreitern Jan Seelig und Daniel Hochstädt danken, mit denen ich die Hoch- und Tiefphasen der Promotion durchlebt habe und aus den gemeinsamen „Disser-Runden“ viel Motivation schöpfen konnte. Mein besonderer Dank gilt auch dem besten Büropartner Oliver Keich, mit dem ich die hochwertigsten Diskussionen führen konnte, sowie Sven Birkenfeld, mit dem ich viele Stunden im Technikum verbracht habe und die Allüren der Roboter kennenlernen durfte. Weiterhin möchte ich besonders Manuel Nielinger und Lucas Spihl danken, ohne die die hardwareseitige Umsetzung meiner Experimente nicht möglich gewesen wäre. Auf der anderen Seite war die softwareseitige Unterstützung sowie die fachlichen Diskussionen zur Graphentheorie mit Bernd Nawothnig sehr hilfreich, weswegen Ihm mein besonderer Dank gilt. Darüber hinaus möchte ich Friedrich Westhof und Mohamed Ahmed danken, mit denen ich tolle Ergebnisse erarbeiten konnte.

Auch auf privater Ebene möchte ich einigen Menschen danken. Zunächst meiner Familie, dabei besonders meinen Eltern Yvonne und Herbert Hansen als auch meinen Bruder Sebastian, die immer an mich geglaubt haben und damit ein wichtiger Rückhalt waren. Weiterhin gilt mein Dank meinen Großeltern, Marlene und Elmar Schmitz-Dörner, die sich meine Promotion am meisten gewünscht haben. Darüber hinaus möchte ich meinen Tanten und Onkeln danken, insbesondere Sylvia Korres, die mich schon in jungen Jahren mit Literatur gefüttert und somit auf spätere Herausforderungen vorbereitet hat.

Mein ganz besonderer Dank gilt auch meiner Freundin Mona Achtelik, die mich für den größten Teil der Dissertation begleitet hat und immer an meiner Seite stand. Dabei hat sie mir die nötigen Freiräume zur Fertigstellung der Dissertation ermöglicht und geduldig den Beschreibungen der besonderen Herausforderungen gelauscht.

Darüber hinaus möchte ich besonders Vinzent Olszok danken, mit dem ich so viele gemeinsame Abenteuer erleben durfte und der speziell zur wissenschaftlichen Anregung beigetragen hat. Weiterhin möchte ich auch einem meiner ältesten Freunde, Lucas Lange danken, der mich schon durch die Schulzeit begleitet hat und seit jeher eine Konstante in meinem Leben war. Mein weiterer Dank gilt den Nachbarn und Freunden aus dem IMVT, Martin Weers und Leonard Hansen sowie Philipp Rembe, mit denen ich den „normalen Wahnsinn“ teilen konnte.

Weiterhin möchte ich Amelie Düe als meiner längsten gemeinsamen Kommilitonin danken, mit der ich wahnsinnig viele Vorlesungen und Lernsessions gemeinsam durchgemacht habe, sowie Kristin Osthöfer, die mir so viele gute Ratschläge gegeben hat.

Zusammenfassung

Durch die wachsende globale Bevölkerung und die immer größer werdende Nachfrage nach Ressourcen bedarf es neuer Möglichkeiten, vorhandene Ressourcen im Kreislauf zu führen. Eine Möglichkeit, die sich in den letzten Jahren immer weiter entwickelnde Elektromobilität noch ressourceneffizienter zu gestalten, ist die automatisierte Demontage der elektrischen Antriebsaggregate aus Elektrofahrzeugen. Dazu wurde ein interdisziplinärer Ansatz gewählt, der eine Industrieumfrage, die Entwicklung eines Demontagealgorithmus als auch die Konstruktion von Bauteilen und Werkzeugen nach Design-for-Recycling und Design-for-Disassembly-Ansätzen sowie den Aufbau von Testständen umfasst.

Um die automatisierte Demontage zu verbessern, wurde in der vorliegenden Dissertation unter anderem daran gearbeitet, optimale Demontagetiefen unter verschiedenen Gesichtspunkten zu identifizieren. Dazu wurde ein Demontgevorranggraph erstellt, in dem Knoten mit Werten und Demontageschritte (Kanten) mit Kosten versehen wurden. Der Demontgevorranggraph, eine Datenbasis sowie eine graphische Nutzeroberfläche und ein Algorithmus wurden in einem allgemein anwendbaren Programm implementiert. Hiermit konnte eine Sensitivitätsanalyse unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt werden, wobei optimale Demontagetiefen und -gewinne für unterschiedliche Szenarien ermittelt wurden.

Weiterhin wurden basierend auf realen Problemstellungen Werkzeuge für Roboter konstruiert, mit denen unterschiedliche Handling-, Greif-, Schraub- und weitere Demontageoperationen durchgeführt werden konnten. Ebenso wurden iterativ Bauteile entworfen, die für eine vereinfachte automatisierte Demontage geeignet sind. Diese wurden sowohl simulativ untersucht als auch in skalierten Praxisversuchen an eigens gebauten Testvorrichtungen erprobt. Dabei wurden unterschiedliche Aspekte des Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly für die robotergestützte Demontage berücksichtigt.

Zur Einordnung der Ergebnisse und zur Darstellung des industrieseitigen Bedarfs der entwickelten Lösungen wurde eine Industrieumfrage mit Unternehmen des VDMA und des VDA sowie dessen Mitarbeitenden durchgeführt.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass tendenziell ein Zielkonflikt zwischen ökologischen und ökonomischen Aspekten der Baustruktur elektrischer Antriebsaggre-

gate besteht. Weiterhin stellen laut Sensitivitätsanalyse besonders werthaltige Bauteilgruppen oftmals sogenannte Leuchtturmbauteilgruppen dar, die tendenziell häufiger als andere Bauteilgruppen demontiert werden sollten, sofern diese nicht als Trägerplattform für viele andere Bauteilgruppen fungieren.

Abstract

Due to the growing global population and the ever-increasing demand for resources, there is a need for new ways to recycle existing resources. One way of making electromobility, which has continued to develop in recent years, even more resource-efficient is the automated disassembly of electric drive units from electric vehicles. To do this, an interdisciplinary approach was chosen that includes an industry survey, the development of a disassembly algorithm and the design of components and tools according to design-for-recycling and design-for-disassembly methods as well as the construction of test benches.

In order to improve automated disassembly, this dissertation focused, among other things, on identifying optimal disassembly depths from various perspectives. For this purpose, a disassembly precedence graph was created in which nodes were assigned values and disassembly steps (edges) were assigned costs. The dismantling priority graph, a database, a graphical user interface and an algorithm were implemented in a user-friendly program. This enabled a sensitivity analysis to be conducted under close-to-reality conditions, whereby optimum dismantling depths and profits were identified for different scenarios.

Furthermore, tools for robots were developed based on real problems, with which different handling, gripping, screwing and other disassembly operations could be carried out. Components suitable for simplified automated disassembly were also designed iteratively. These were both simulatively examined and tested in scaled practical trials on specially built test systems. Different aspects of design-for-recycling / design-for-disassembly for robot-assisted disassembly were taken into account.

An industry survey was carried out among VDMA and VDA companies and their employees in order to evaluate the findings and to illustrate the needs of the industry for the solutions developed.

Overall, it was shown that there tends to be a conflict of objectives between ecological and economic aspects of the structure of electric drive units. Furthermore, according to the sensitivity analysis, particularly valuable component groups often represent so-called lighthouse component groups, which should tend to be disassembled more frequently than other component groups, unless they act as a carrier platform for many other component groups.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Motivation / Aufgabenstellung.....	1
1.2	Zielsetzung / Vorgehensweise	2
2.	Technisch-wirtschaftlicher Hintergrund.....	4
2.1	Elektrisches Antriebsaggregat	4
2.1.1	Elektrische Maschine.....	4
2.1.2	Leistungselektronik	8
2.1.3	Getriebe	11
2.2	Recycling von Elektroantrieben	12
2.2.1	Marktsituation von Elektroantrieben in PKW	12
2.2.2	Wiederverwendung und Weiterverwendung	13
2.2.3	Stofflich verwertete Bauteile	15
2.2.4	Kreislaufwirtschaft, Kaskadennutzung und Circular Economy	16
2.2.5	Rechtlicher Rahmen	18
2.3	Automatisierte Demontage	19
2.3.1	Automatisierung durch Industrieroboter	19
2.3.2	Definition Demontage	21
2.3.3	Das Projekt DeMoBat.....	21
2.4	Design-for-Recycling, Design-for-Disassembly, Design-for-X und Circular Design.....	23
2.4.1	Abgrenzung unterschiedlicher Begrifflichkeiten.....	23
2.4.2	Gestaltungsgrundregeln	24
2.4.3	Wirkprinzipien von Bauteilverbindungen	26
2.5	Identifikation optimaler Demontagetiefen	28
2.5.1	Darstellung der Präzedenzbeziehungen als Digraph	28
2.5.2	Algorithmen und Herausforderungen der Graphentheorie	32

2.5.3	Alternative Lösungsansätze	36
2.6	Allgemeine Erkenntnisse aus der Industrieumfrage	38
3.	Methoden und Vorgehensweise	43
3.1	Industrieumfrage.....	43
3.2	Tool zur Ermittlung optimaler Demontagetiefen	45
3.3	Design der Werkzeuge und Testbench	46
3.4	Roboterprogrammierung	47
4.	Industrieumfrage.....	48
4.1	Thesen.....	48
4.2	Ergebnisse und deskriptive Analyse der speziellen Fragen	50
4.3	Auswertung der Thesen	62
5.	Demontagetiefe.....	65
5.1	Umsetzung des Algorithmus zur Ermittlung optimaler Demontagetiefen in einem Programm	65
5.2	GUI.....	67
5.3	Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Demontagetiefen.....	67
5.3.1	Basisszenario	69
5.3.2	Variation des Werts des elektrischen Antriebsaggregats	70
5.3.3	Variation Demontagezeit	72
5.3.4	Variation Zustandsfaktor	74
5.3.5	Variation Wert des Demontagemoduls.....	75
5.3.6	Variation Re-X Faktor	76
6.	Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly	79
6.1	Bestimmung von Kriterien für Demontagefreundlichkeit.....	79
6.2	Ermittlung verbesserungsbedürftiger Bauteile am EAA	81
6.2.1	Empirisch ermittelte Fehler	81
6.2.2	Manuelle Demontageversuche	84

6.2.3	Baustruktur	87
6.3	Ausarbeitung demontageoptimierter Bauteile und Werkzeuge.....	91
6.3.1	Auswahl von Bauteilen für prototypische Modifikationen	91
6.3.2	Prototypische Bauteilmodifikationen und Werkzeuge	93
6.3.3	Experimente an Bauteilmodifikationen und Werkzeugen.....	114
7.	Diskussion	122
7.1	Industrienumfrage.....	122
7.2	Demontagealgorithmus.....	125
7.3	Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly	131
8.	Fazit	140
9.	Ausblick.....	144
10.	Literaturverzeichnis	I
11.	Anhang	XV
11.1	Anhang 1: Fragenkatalog der Industrienumfrage	XV
11.2	Anhang 2: Demontagegraph des EAA mit Knotennummern.....	XXII
11.3	Anhang 3: Zustands- und Re-X Faktoren im Basisszenario.....	XXIV
11.4	Anhang 4: Bewertung der Anwendung der Gestaltungsgrundregeln angelehnt an die VDI-Richtlinie 2243 am Beispiel des EAA ...	XXVII
11.5	Anhang 5: Logik der Demontagesequenz auf der Testbench..	XXVIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über Leistungsmerkmale verschiedener Bauweisen elektrischer Maschinen	5
Tabelle 2:	Wirkprinzipien von Bauteilverbindungen mit Bewertung relevanter Eigenschaften	27
Tabelle 3:	Zuweisung der Fragen unterschiedlicher Frageblöcke zu aufgestellten Thesen	49
Tabelle 4:	Angenommene Werte für zugrunde gelegte Kriterien der Demontagetiefe.....	69
Tabelle 5:	Gewichtungen der Gestaltungsgrundregeln aus VDI-Richtlinie 2243	79
Tabelle 6:	Übersicht über Bauteile mit den meisten direkten und indirekten Nachfolgern	88
Tabelle 7:	Exzentrizität und Erfolgsquote des alten und des neuen Demontageschraubers im Vergleich.....	117
Tabelle 8:	Übersicht über Ergebnisse des Spreizversuchs in der Testeinrichtung	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Grundlegende Struktur der vorliegenden Dissertation	3
Abbildung 2:	Beispielhaftes EAA des Herstellers ZF Friedrichshafen AG	4
Abbildung 3:	Einfach geschränkter Kurzschlussläuferkäfig (a), ausgebauter Rotor aus dem EAA (b)	7
Abbildung 4:	Offengelegte Leistungselektronik des EAA mit Schnitt durch Modul für Steuerung und Leistungsüberwachung	9
Abbildung 5:	Aufgeklappte Leistungselektronik (a) und ausgebautes Steuermodul (b)	10
Abbildung 6:	Geöffnetes Getriebe des EAA mit Sicht auf zwei schrägverzahnte Stirnradpaare	11
Abbildung 7:	Vergangene und prognostizierte Bestandsentwicklung von Elektroautos	12
Abbildung 8:	Begriffsabgrenzung unterschiedlicher Recyclingstrategien	14
Abbildung 9:	Darstellung des Cascade Use	17
Abbildung 10:	Prinzip der Circular Economy	18
Abbildung 11:	Demontagetechnik am CUTEC Forschungszentrum zur Demontage von EAA im Rahmen des Projekts DeMoBat	22
Abbildung 12:	Beispielhafter Ausschnitt aus dem Demontagegraphen des EAA	29
Abbildung 13:	Eingefärbter Demontagegraph des EAA	30
Abbildung 14:	Sicht auf Kunststoffspange	32
Abbildung 15:	Beispiel für ein Open Pit Problem	35
Abbildung 16:	Geschätztes Umweltbewusstsein der befragten Unternehmen ..	39
Abbildung 17:	Verbreitung verschiedener Managementsysteme in Unternehmen	39
Abbildung 18:	Bedeutung von Ressourceneffizienz hinsichtlich Energie und Material	40
Abbildung 19:	Geschätzte Bezugsbereitschaft der Kunden wiederaufbereiteter Produkte und Ersatzteile	42
Abbildung 20:	Geschätzter Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele	50

Abbildung 21:	Höhe der Abhängigkeit der Teilnehmenden von Zuliefern und Auftraggebern, sodass Produktmodifikationen schwerer umgesetzt werden können	51
Abbildung 22:	Rücksichtsmaßnahmen im Konstruktionsprozess für leichteres Recycling am EoL.....	52
Abbildung 23:	Hintergründe für recyclinggerechte Konstruktion in der Produktentwicklung.....	53
Abbildung 24:	Geschätzter erforderlich Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion	54
Abbildung 25:	Einstellung der Teilnehmenden zum Zusammenhang von frühzeitiger recyclinggerechter Konstruktion und leichterem Automatisierung der Demontage ihrer Produkte.....	56
Abbildung 26:	Geschätzter erforderlicher Mehraufwand für demontagerechte Konstruktion	57
Abbildung 27:	Hindernisse der Steigerung der Demontierbarkeit von Produkten.....	57
Abbildung 28:	Herausforderungen bei vollständiger Automatisierung der Demontage.....	59
Abbildung 29:	Wichtigste Aspekte für die Wiederverwendbarkeit von Produkten der jeweiligen Branchen.....	60
Abbildung 30:	Geschätzte durchschnittliche Lebensdauer der Produkte der Unternehmen der Teilnehmenden	61
Abbildung 31:	Architektur und Datenflüsse zwischen Code, Datenbasis und GUI im Programm zur Ermittlung optimaler Demontagetiefen.....	65
Abbildung 32:	GUI zur Darstellung optimaler Demontagetiefen	67
Abbildung 33:	Ultimate Spare bzw. bei optimaler Demontagetiefe inbegriffene Bauteilgruppen im Basisszenario.....	70
Abbildung 34:	Ultimate Spares von unterschiedlichen EAA-Werten	71
Abbildung 35:	Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche EAA-Werte.....	71
Abbildung 36:	Demontagequote und -gewinn für unterschiedliche Demontagezeiten	72
Abbildung 37:	Ultimate Spares von unterschiedlichen Demontagezeiten	73

Abbildung 38:	Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche Zustandsfaktoren	74
Abbildung 39:	Ultimate Spares von unterschiedlichen Zustandswerten	75
Abbildung 40:	Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche Investitionen in das Demontagemodul	75
Abbildung 41:	Ultimate Spares unterschiedlicher Investitionen in das Demontagemodul	76
Abbildung 42:	Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche Re-X Faktoren	77
Abbildung 43:	Ultimate Spares unterschiedlicher Re-X Faktor Modifikatoren	78
Abbildung 44:	Bewertung der Anwendung der Gestaltungsgrundregeln angelehnt an die VDI-Richtlinie 2243 am Beispiel des EAA ...	80
Abbildung 45:	Ursachen für niO-Status bei End-of-Line EAA	81
Abbildung 46:	Symptome bei niO-Status von End-of-Line EAA.....	82
Abbildung 47:	Ursachen für niO-Status beim EAA im Feld.....	82
Abbildung 48:	Symptome für niO-Status beim EAA im Feld	83
Abbildung 49:	Bauteile der Leistungselektronik im Demontagegraph	84
Abbildung 50:	Verdeckte Schraube zur Fixierung der Starkstromkabel am EAA	85
Abbildung 51:	Dichtung zwischen dem getriebeseitigen Gehäusedeckel und dem Hauptgehäuse des EAA	85
Abbildung 52:	Abdeckung für den Sicherungsring mit spitzen Enden, der getriebeseitig die Rotorwelle sichert	86
Abbildung 53:	Darstellung der relativen Anzahl an Verbindungen zu jeweiligen Vorgängern und Nachfolgern jeder Bauteilgruppe im Demontagegraph des EAA.....	90
Abbildung 54:	Nach Demontage des Gehäusedeckels zurückbleibende Dichtmasse auf aufgerauten Stirnflächen des Hauptgehäuses ..	92
Abbildung 55:	CAD-Modell des Dummy-EAA.....	93
Abbildung 56:	Handlingwerkzeug SGripper_01 zum formschlüssigen Halten des Dummy-EAA (a+b), Dummy-EAA mit vier Haltenocken als standardisierte Schnittstellen (c)	94

Abbildung 57:	Simulation des SGripper_01 aus PLA mit 100 N Zugbelastung in axialer Richtung an der Standardschnittstelle	95
Abbildung 58:	Simulation des SGripper_01 aus PLA mit 100 N Zugbelastung quer (a) und schräg (b).....	96
Abbildung 59:	Simulation der verbesserten Greifeinheit des SGripper_01 aus PLA bei einer axialen Zugbelastung von 100 N	97
Abbildung 60:	Simulation der verbesserten Greifeinheit des SGripper_01 aus PLA mit 100 N Zugbelastung quer (a) und schräg (b).....	97
Abbildung 61:	SGripper_01 mit verbesserten Fingern (a) und im Close-Up (b)	98
Abbildung 62:	Simulation des aus Aluminium gefertigten, verbesserten SGripper_01 mit 1000 N a) und 2000 N b) axialer Zugbelastung.	98
Abbildung 63:	Simulation des aus Aluminium gefertigten, verbesserten SGripper_01 mit 1 kN Querbeltung (a), 2 kN Querbeltung (b) sowie 1 kN Schrägbeltung (c) und 2 kN Schrägbeltung (d)	99
Abbildung 64:	Mit ovalen Wechselspitzen ausgestattet Demontagewerkzeug zum Aufhebeln von Gehäusedeckeln (SGripper_02).....	101
Abbildung 65:	Simulation des SGripper_02 aus Aluminium und Stahl bei einer Haltekraft von 100 N und einer Zugkraft von 200 N	102
Abbildung 66:	Simulation des SGripper_02 aus PLA bei einer Haltekraft von 100 N und einer Zugkraft von 200 N	102
Abbildung 67:	Simulation des SGripper_02 aus Aluminium und Stahl bei einer Haltekraft von 500 N und einer Zugkraft von 1000 N ...	103
Abbildung 68:	Simulation des verbesserten SGripper_02 aus Aluminium und Stahl bei einer Haltekraft von 500 N und einer Zugkraft von 1000 N	104
Abbildung 69:	a) Gehäusedeckel mit eingelegter Dichtung, b) große und kleine Dichtung für beide Dummydeckel mit Laschen zur vereinfachten Demontage	105
Abbildung 70:	Parallelgreifer zur Entfernung der Einlegedichtungen am Dummy-EAA	105

Abbildung 71:	Aufbau des alten und neuen Demontageschraubers im Vergleich	106
Abbildung 72:	Schraubenabstreifer MK IV (links) und Induktionssensor zur Erfolgskontrolle des Abstreifvorgangs.....	107
Abbildung 73:	Mit Umlaufnut versehene Bitnüsse im Bitnusswechselsystem	108
Abbildung 74:	Schraubenabstreifer MK V mit Pneumatikzylinder und ausgefräster Abstreifscharte	108
Abbildung 75:	Zentrischgreifer („CGripper_01“) MK I	109
Abbildung 76:	Simulation des CGripper_01 mit Fingern aus PLA bei einer Zugbelastung von 100 N	110
Abbildung 77:	Verbesserte Finger des CGripper_01 mit aufgebautem Material (grau) an den stärker belasteten Bereichen	111
Abbildung 78:	Simulation des verbesserten CGripper_01 mit Fingern aus PLA und einer Zugbelastung von 100 N.....	111
Abbildung 79:	Simulation des verbesserten CGripper_01 mit Fingern aus Aluminium und einer axialen Zugbelastung von 2000 N	112
Abbildung 80:	Verwendeter Camloc Schnellverschluss Modell 99F.....	113
Abbildung 81:	Demontagewerkzeug für Camloc Schnellverschlüsse mit Schlitzkopf (a) und montierte Camloc Schnellverschlüsse im Dummy-EAA (b).....	113
Abbildung 82:	Testbench zu Demontage des Dummy-EAA mit ausgerüsteten KR 10 und KR 4 sowie ausgestattetem Werkzeugbahnhof.....	114
Abbildung 83:	Mit bereits gelösten Schrauben bestückter Schraubversuchsstand mit Schraubenabstreifer MK III.....	116
Abbildung 84:	Geprüfte Belastungen am SGripper01.....	119
Abbildung 85:	Testeinrichtung für SGripper_02.....	120
Abbildung 86:	Beide Demontageroboter der Testbench während der gemeinsamen Demontage einer Dichtung.....	139

Abkürzungsverzeichnis

AfA	Absetzung für Abnutzung
AltfahrzeugV	Altfahrzeugverordnung
ASM	Asynchronmaschine
BMF	Bundesministerium für Finanzen
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
CAD	Computer Aided Design
CD	Circular Design
CUTEC	Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum
D4X	Design-for-X
DeMoBat	Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für die E-Mobilität
DfD	Design-for-Disassembly
DfR	Design-for-Recycling
EAA	Elektrisches Antriebsaggregat
EoL	End-of-Life
Eurostat	Statistisches Amt der Europäischen Union
FEM	Finite-Elemente-Methode
FESM	Fremderregte Synchronmaschine
FFA	Algorithmus von Ford und Fulkerson
F-Störung	Funktionsstörung
GSM	Gleichstrommaschine
GUI	Graphical User Interface
IGBT	Insulated Gate Polar Transistor
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MEB	Modularer E-Antriebsbaukasten
MQB	Modularer Querbaukasten
n.a.	not applicable

niO	nicht in Ordnung
OEM	Originalhersteller (Original Equipment Manufacturer)
PLA	Polylactid
PSM	Permanentmagnetische Synchronmaschine
RM	Reluktanzmaschine
SM	Synchronmaschine
SSP	Scalable Systems Platform
UBA	Umweltbundesamt
UPP	Ultimate Pit Problem
US	Ultimate Spare
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WEEE	Elektro- und Elektronikaltgeräte-Abfall (Waste of Electrical and Electronic Equipment)

1. Einleitung

1.1 Motivation / Aufgabenstellung

Die Weltbevölkerung wächst stetig und wird in absehbarer Zukunft vermutlich die Zahl von 10.000.000.000 Menschen auf der Erde erreichen. Gleichzeitig streben die größten Nationen der Erde nach (immer mehr) Wohlstand. Beide Trends führen zu einem starken Anstieg im Bedarf an verschiedenen Ressourcen, die jedoch endlich sind. Daher wird eine Strategie zum effizienteren Umgang mit unseren Ressourcen benötigt. Das Jahr 2050 wird häufig als Stichjahr genannt, bis 2050 möchte beispielsweise die EU im Rahmen des *Green Deal* Klimaneutralität, vollständig nachhaltiges Wirtschaften und die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erreichen.

Heute (ver-)brauchen die etablierten Industrienationen bereits überproportional viele Rohstoffe und der Wohlstandsanspruch der aufstrebenden Industrienationen verschärft die Situation zusätzlich. Insbesondere Nationen mit dem notwendigen technischen Know-How sind also verstärkt in der Pflicht, Ressourcen effizienter zu nutzen und eine Kreislaufwirtschaft beziehungsweise die Circular Economy zu etablieren. Auch historisch lässt sich anhand verschiedener global und national umgesetzter Klimaabkommen, Europäischen Gesetzen und darauf aufbauend den jeweiligen länderspezifischen Ausführungen zeigen, dass ökologisches Bewusstsein und damit verbunden die Schonung von Ressourcen zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Eine Möglichkeit, die Ressourceneffizienz in der Circular Economy zu erhöhen, bietet die automatisierte Demontage von elektrischen Antriebsaggregaten (EAA). Wird die automatisierte Demontage den üblichen Recyclingprozessen vorgeschaltet, kann zum einen die zerstörungsfreie Bergung von Komponenten für eine Wiederverwendung und zum anderen die Trennung von Komponenten an ihren Bauteilgrenzen erfolgen, sodass sortenreinere Stoffströme erzielt werden können [Zusmann et al., 1994].

Historisch gesehen stellt die Automobilindustrie (insbesondere in Deutschland) einen besonderen Wachstums- und Innovationsträger dar. Bei Automobilen handelt es sich um relativ große und werthaltige Produkte, die mit gut recyclebaren Materialien und teilweise modularen Baustrukturen Musterbeispiele für Recycling sein können. So ist es seit vielen Jahrzehnten gängige Praxis, End-of-Life Fahrzeuge auf Wertstoffhöfen komplett „auszuschlachten“, wobei allen Aspekten des Recyclings Sorge getragen wird. Durch die Entfrachtung von Betriebsmitteln wird der Gefahrenabwehr nachgekommen, durch die Demontage von funktionsfähigen Baugruppen (Radios, Lichtmaschinen etc.) wird die Vorbereitung zur Wiederverwertung verfolgt. Das Freilegen des Chassis führt zum Recycling durch stoffliche Verwertung der besonders eisen- und aluminiumhaltigen Komponenten,

die demontierten kunststoffreichen Komponenten wie Sitze, Armaturen und Dekorelemente können einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

Da die Produkte der Automobilindustrie momentan dem starken Wandel hin zur Elektromobilität unterliegen, sollte sich vor dem Hintergrund der immer strengeren Gesetzgebung im Recyclingbereich auch die Recyclingtechnologie dahingehend wandeln, dass Elektrofahrzeuge entsprechend effizient recycelt werden können. Durch die Verwendung von Elektromotoren in Kraftfahrzeugen werden neben besonders werthaltigen Elementen (Gruppe der Seltenen Erden) auch Massenmetalle wie Kupfer in erhöhtem Maß verbaut. Darüber hinaus wird die Knappheit solcher Rohstoffe insbesondere auch durch den für die Elektromobilität notwendigen Ausbau des Netzes von Ladestationen für Elektroautos verstärkt.

Die Wiederverwendung ist als höchste Form des Recyclings im Sinne des Cascade-Use primär anzustreben. Insbesondere komplexe Produkte wie ein elektrischer Antriebsstrang aus einem Elektrofahrzeug zeichnen sich durch hohe Herstellungskosten pro Bauteil aus. Daher kann bereits aus ökonomischen Gesichtspunkten die Wiederverwendung solcher Bauteile zweckmäßig sein. Im Hochlohnland Deutschland ist die gezielte Demontage einzelner werthaltiger Bauteile allerdings neben relativ hohen Personalkosten auch technischen Herausforderungen unterworfen. Insbesondere die angestrebte Wiederverwendung von Bauteilen bedingt eine zerstörungsfreie Demontage, um eine aufwendige Refabrikation zu vermeiden. Da viele Bauteile jedoch sehr fest bis zerstörungsfrei nicht trennbar miteinander verbunden sind, bedarf es besonderer Demontagemethoden. Eine Lösungsmöglichkeit kann hier die automatisierte Demontage durch Industrieroboter sein. Die Automatisierte Demontage durch Industrieroboter eröffnet neue Möglichkeiten für die Demontage, birgt allerdings auch eine Reihe weiterer Herausforderungen. Ansätze des Design-for-Recycling und des Design-for-Disassembly können in Abstimmung mit der automatisierten Demontage zu deutlich effizienteren Demontageprozessen führen, indem beispielsweise Verbindungen von Bauteilen und -gruppen für die automatisierte Demontage durch Industrieroboter optimiert werden. Darüber hinaus kann auch die Optimierung individueller Demontagetiefen zu effizienteren Prozessen führen.

1.2 Zielsetzung / Vorgehensweise

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist, herauszufinden, mit welchen Werkzeugen und Methoden die automatisierte Demontage von EAA verbessert werden kann. Dazu sollen der Demontagealgorithmus und das Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly (DfR / DfD) umfangreich untersucht werden. Eine durchgeführte Industrieumfrage soll die Ergebnisse unterstützen und deren praktische Relevanz unterstreichen.

Die folgende Abbildung 1 zeigt die grundlegende Struktur der vorliegenden Dissertation:

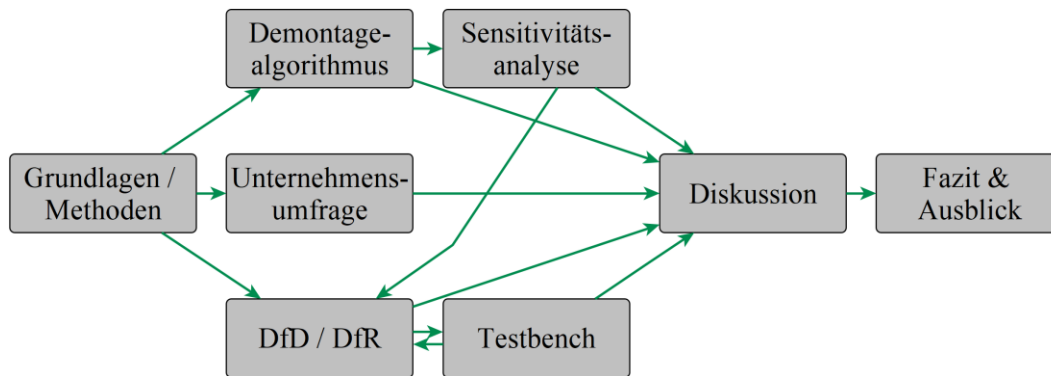


Abbildung 1: Grundlegende Struktur der vorliegenden Dissertation

Zunächst werden die Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik, der Kreislaufwirtschaft, der recyclinggerechten Konstruktion sowie der Graphentheorie erläutert. Ergänzt wird der technisch-wirtschaftliche Hintergrund um erste Erkenntnisse aus der durchgeführten Industrieumfrage, die den Bedarf an der zugrundeliegenden Forschungsarbeit darstellt. Darauf folgend werden die verwendeten Methoden dargelegt. Im Hauptteil der Dissertation werden zunächst die speziellen Erkenntnisse der durchgeführten Industrieumfrage herausgearbeitet. Diese fließen später in die Diskussion ein. Danach wird gezeigt, wie der Algorithmus zur Berechnung optimaler Demontagetiefen realisiert wurde. Ergänzt wird dies durch eine Sensitivitätsanalyse, in der unterschiedliche Parameter der Demontagetiefe variiert werden, sodass ermittelt wird, wie sich welche Parameter auf Demontagequote und -gewinne auswirken. Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse fließen wiederum in das Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly ein: Die Bauteile, die gerade nicht ökonomisch tragfähig demontiert werden können, stellen potenzielle Bottlenecks für die Demontage dar und könnten durch geeignete Maßnahmen verbessert werden und so zu höheren Demontagequoten und -gewinnen führen. Zur Verfolgung der Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly Ansätze werden zunächst Kriterien bestimmt, die zu einer Erhöhung der Demontagequote führen können. Danach werden anhand unterschiedlicher Methoden Bauteilgruppen für die Verbesserung ausgewählt. Die ausgewählten Bauteilgruppen werden iterativ modifiziert, simuliert und praktisch getestet. Für die praktischen Tests wurden mehrere Versuchsstände aufgebaut, darunter ein umfangreicher Versuchsstand („Testbench“), der mittels zweier Industrieroboter ein vollständig modifiziertes Dummy-EAA vollautomatisiert demontieren kann. Alle Erkenntnisse werden gebündelt und in der Diskussion zunächst im Kontext und danach gemeinsam diskutiert. Mit einem Fazit und Ausblick schließt die Dissertation ab.

2. Technisch-wirtschaftlicher Hintergrund

2.1 Elektrisches Antriebsaggregat

Der Begriff „Elektrisches Antriebsaggregat“ (EAA) soll im Folgenden die Baugruppe in einem Elektrofahrzeug beschreiben, die die elektrische Maschine („Elektromotor“), die Leistungselektronik und ein integriertes Getriebe umfasst. Die einzelnen Baugruppe sollen folgend näher erläutert werden.

Die gezeigte Abbildung 2 stellt den beispielhaften Aufbau eines EAA dar¹.

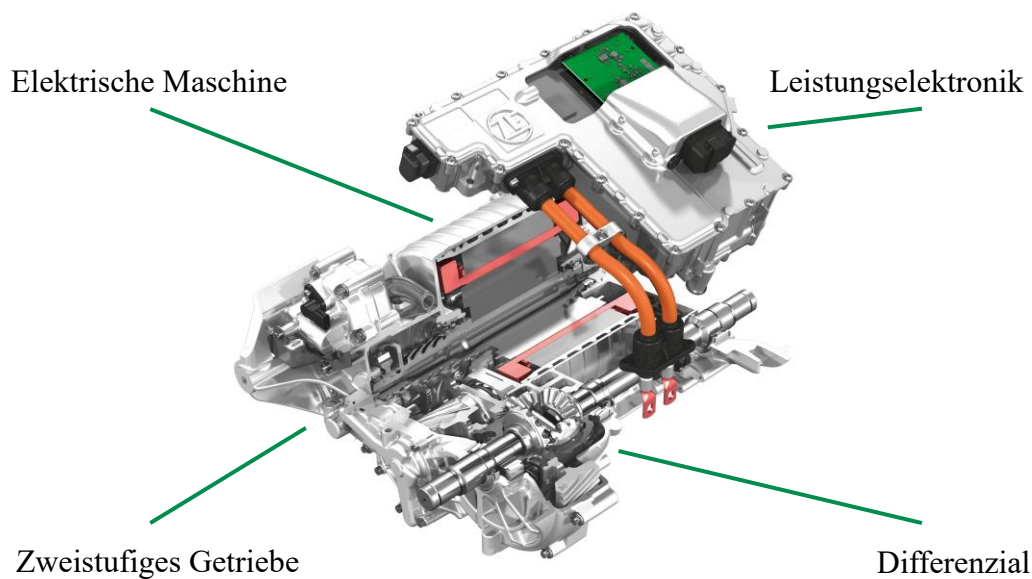


Abbildung 2: Beispielhaftes EAA des Herstellers ZF Friedrichshafen AG [ZF Friedrichshafen, 2020]

Der Schnitt bis zur Motorwelle zeigt die elektrische Maschine, sowie ein zweistufiges Stirnradgetriebe. Neben der elektrischen Maschine umfasst das EAA auch eine Leistungselektronik und ein Differential, welches hinter das Getriebe geschaltet ist.

2.1.1 Elektrische Maschine

Elektrische Maschinen, auch als Elektromotoren bekannt, sind elektromechanische Energiewandlungsmaschinen, die elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln können. Dabei können typenabhängig sowohl Wechselstrom (alternating current, AC), Drehstrom, als auch Gleichstrom (direct current, DC) als Stromform genutzt werden. Elektromotoren zeichnen sich allgemein im Vergleich zu Verbrennungsmotoren durch hohe Energieeffizienzen und hohe Drehmomente aus, die insbesondere bei niedrigen Drehzahlen

¹ Der Hersteller oder die Typenbezeichnung des in der vorliegenden Dissertationsschrift behandelten EAA darf aus Gründen der Geheimhaltung nicht genannt werden. Der Begriff „EAA“ soll im Folgenden ebenfalls synonym für das betrachtete Aggregat verwendet werden.

abgerufen werden können [Vidyanandan, 2018]. Insbesondere durch die hohe Energieeffizienz, auch bei Betrachtung der Energieeffizienz im Gesamtsystem, gewinnen Elektromotoren im automobilen Bereich immer mehr an Bedeutung [Randelhoff, 2020]. In Elektrofahrzeugen kommen im Bereich des Antriebsstranges unterschiedliche Bauweisen von Elektromotoren zum Tragen. Die wesentlichen Bauweisen von elektrischen Maschinen für Antriebe in Elektrofahrzeugen sind:

- Asynchronmaschine (ASM)
- Synchronmaschine (SM)
 - Fremderregte SM (FESM)
 - Permanentmagnetische SM (PSM)
- Reluktanzmaschine (RM)
- Gleichstrommaschine (GSM)

Die unterschiedlichen Bauweisen elektrischer Maschinen differieren in ihren Leistungsmerkmalen – die folgende Tabelle 1 soll eine Übersicht dazu geben:

Tabelle 1: Übersicht über Leistungsmerkmale verschiedener Bauweisen elektrischer Maschinen [Kampker, 2014]

	ASM	FESM	PSM	RM	GSM
Leistungsdichte	+	o	++	+	--
Wirkungsgrad	o	+	++	+	--
Max. Drehzahl	++	+	++	++	--
Geräusch	+	+	++	--	-
Zuverlässigkeit	++	+	+	++	-
Koste Maschinen	+	-	-	++	--
Kosten Gesamtsystem	++	o	o	+	+
Stand der Technik	++	--	++	o	++
Regel-/ Steuerbarkeit	o	+	+	+	++

Die Bauweisen ASM, PSM und RM weisen vergleichsweise viele Vorteile gegenüber anderen Bauformen auf, daher sind diese Bauweisen besonders bevorzugt in EAA. Im vorliegenden EAA ist eine ASM verbaut, daher soll diese näher erläutert werden. ASM können

als Käfigläufer, als Widerstandsläufer oder als Schleifringläufer gebaut werden. Käfigläufer haben per se ein recht geringes Anlaufmoment, was insbesondere für das Anfahren eines Elektrofahrzeugs weniger geeignet ist. Bei Widerstandsläufer hingegen wird ein relativ hoher ohmscher Widerstand im Käfig integriert, sodass die Anlaufmomente bei geringen Anlaufströmen erhöht werden können. Diese Bauform ist allerdings besonders energieineffizient, was besonders im dauerhaften Betrieb (der bei einem Elektrofahrzeug gegeben ist) von Nachteil ist. Alternativ können Schleifringläufermotoren als eine Bauweise von Asynchronmaschinen eingesetzt werden, wobei der ohmsche Widerstand des Läufers / Rotors von außen über die Verbindung mit Schleifkontakten gesteuert werden kann. Somit lassen sich beim Anlaufen hohe ohmsche Widerstände im Läufer realisieren, sodass hohe Anlaufmomente erzielt werden können und im dann bei steigender Drehzahl die ohmschen Widerstände reduziert werden, sodass bei sinkendem Abgreifdrehmoment am Rotor eine höhere Energieeffizienz im Dauerbetrieb realisiert werden kann. Letztendlich dient die Kontaktierung des Läufers von außen der Variation des ohmschen Widerstands. Dabei gilt zu beachten, dass die Schleifkontakte abnutzen und den Motor somit deutlich wartungsbedürftiger machen. Moderne ASM können jedoch auch als reine Kurzschlusskäfigläufer gebaut werden, sodass der Rotor keine elektrische Kontaktierung nach außen aufweist. Diese Bauform ist deutlich verschleißärmer. Insbesondere moderne Leistungselektroniken können vergleichsweise verlustarm Frequenzen modulieren und mittels Anlaufschaltungen das Problem der niedrigen Anlaufmomente beim Kurzschlusskäfigläufer umgehen. ASM haben einige wesentliche Vorteile gegenüber anderen Antriebskonzepten. Bei nicht anliegender Blindleistung kann eine ASM im Betrieb mitlaufen, ohne als Generator zu wirken. Somit ist bei niedrigen Leistungsbedarfen und insbesondere im Langzeitbetrieb eine Energieersparnis gegenüber anderen Antriebskonzepten zu vermerken [Binder, 2017]. Weiterhin sind ASM in der Lage, über die eigentliche Nennleistung hinaus belastet zu werden, sodass eine „Boostfunktion“ für kurzzeitige, besonders leistungsintensive Beanspruchungen bereitgestellt werden kann, beispielsweise für einen Überholvorgang [Binder, 2017].

Eine Asynchronmaschine besteht im Wesentlichen aus einem Rotor und einem Stator. Der Stator besteht in der Regel aus drei Wicklungssträngen, beziehungsweise Spulen, die in Elektroblech² eingefasst sind. Über dreiphasigen Drehstrom werden in den Wicklungssträngen Magnetfelder erzeugt, die um die Rotationsachse des Motors rotieren [Spring, 2009]. Die neueste Entwicklung für Statoren ist die sogenannte Hairpin-Technologie. Mo-

² Bei Elektroblech handelt es sich um eine Fe-Si-Legierung, die geblecht und gegeneinander isoliert gestapelt wird. Elektroblech dient der gezielten Bündelung magnetischer Felder bei gleichzeitiger Minimierung auftretender Wirbelströme, um den Wirkungsgrad des Motors zu erhöhen [DIN Deutsches Institut für Normung, 2016; DIN Deutsches Institut für Normung, 2022 (1)].

derne Statoren werden dabei nicht länger mit Kupferkabeln gewickelt, sondern feste Kupferstäbe werden in das Elektroblech des Stators eingelassen und miteinander verschweißt. Durch den rechteckigen Querschnitt der Hairpins kann die Packungsdichte der „Wicklungen“ verbessert und somit der Bauraum reduziert oder die Leistung erhöht werden [Lindner et al., 2019].

Der Rotor einer ASM setzt sich zusammen aus dem sogenannten Kurzschlussläuferkäfig, der ebenfalls in Elektroblech eingefasst ist. In den Käfigstäben, die rund um die Rotationsachse angeordnet sind, werden durch die rotierenden Magnetfelder des Stators Ströme induziert. Bei einer ASM läuft der Rotor dem rotierenden Magnetfeld hinterher (Schlupf), ein asynchroner Lauf tritt auf – daher der Name *Asynchronmaschine* [Delbrück, 1998].

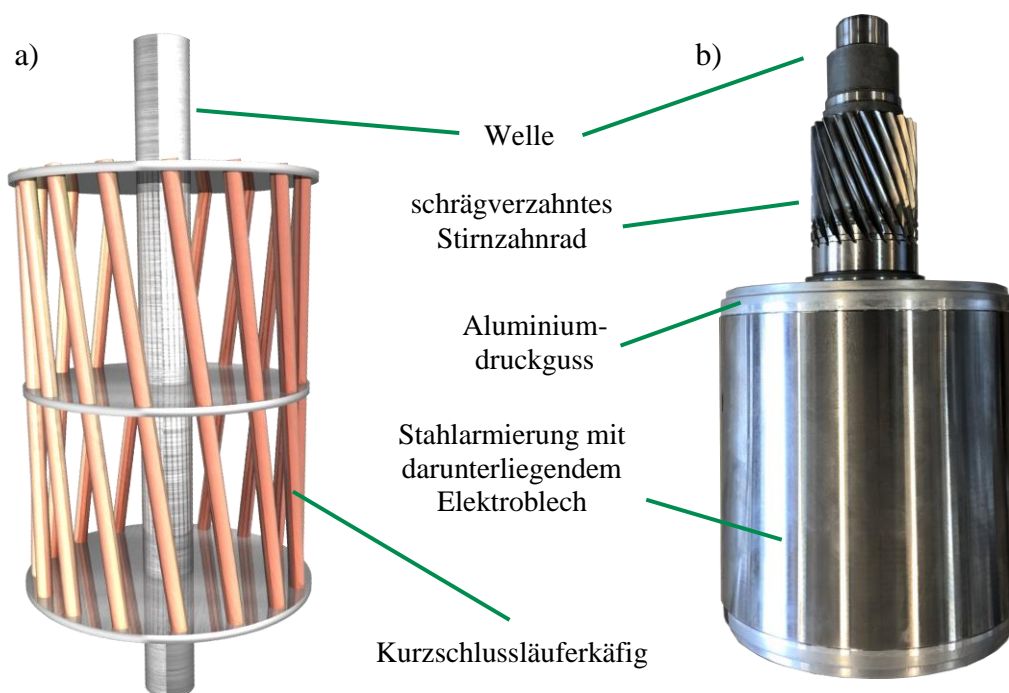


Abbildung 3: Einfach geschränkter Kurzschlussläuferkäfig (a), ausgebauter Rotor aus dem EAA (b) [Manemann, 2017]

Abbildung 3 zeigt den Rotor der in der vorliegenden Dissertation behandelten elektrischen Maschine (b). Dieser besteht im vorliegenden Fall aus einem Kurzschlussläuferkäfig, der im Elektroblech eingelassen und in Aluminium druckgegossen ist. Der Druckguss wird zusätzlich durch einen Stahlmantel armiert, sodass Kriechen im Betrieb reduziert werden kann. Zentral befindet sich eine gehärtete Stahlhohlwelle, die von innen gekühlt werden kann. Am Ende der Hohlwelle ist ein schrägverzahntes Stirnrad aufgefräst.

Die geschränkte Anordnung der Käfigstäbe (siehe Abbildung 3) sorgt für einen im Vergleich zur parallelen Anordnung der Käfigstäbe homogenen Lauf des Elektromotors [Binder, 2017]. Die geschränkte Anordnung der Käfigstäbe steigert jedoch die Komplexität

der Montage als auch einer zerstörungsfreien Demontage des Rotors. Durch den Aluminiumdruckguss wird eine tiefere Demontage von Kurzschlusskäfigen in zerstörungsfreier Form unmöglich. Laut Beringer [2019] liegen momentan erreichbare Wirkungsgrade von ASM im Automobilbereich bei über 97 %.

Die hauptsächlich in einer ASM verwendeten Materialien sind Eisenlegierungen (insbesondere für Elektroblech, Rotorwelle und Lager), Aluminiumlegierungen (insbesondere für Gehäuse und Rotor) sowie Kupferlegierungen (Kabel, Statorwicklungen, Kurzschlussläuferkäfig). Somit kann in der ASM selbst weitestgehend auf wirtschaftskritische Rohstoffe verzichtet werden [Kausch et al., 2014].

2.1.2 Leistungselektronik

Eine Leistungselektronik dient allgemein der Wandlung von Spannungsform, Strom-, sowie Spannungshöhe als auch der Frequenz von elektrischen Spannungen. In Elektrofahrzeugen dient die Leistungselektronik³ dabei der Bereitstellung von elektrischer Energie für den Antrieb. Darüber hinaus kann eine Leistungselektronik durch Rekuperation auch die Rückgewinnung kinetischer Energie in die Akkumulatoren bewirken (bidirektionaler Leistungsfluss) [Böcker, 2019; Spichartz und Sourkounis, 2013].

Abhängig von der Art des elektrischen Antriebs finden verschiedene Komponenten Einzug in die Leistungselektronik. Wenn der Antrieb durch ASM erfolgt, wird zunächst die am Akkumulator anliegende Gleichspannung mittels eines Wechselrichters in Drehspannung umgewandelt. Für eine Variation der an der ASM anliegenden Drehzahl wird die Spannungsfrequenz mittels eines Umrichters umgeformt [Böcker, 2019].

Der Wirkungsgrad einer Leistungselektronik spielt eine entscheidende Rolle für den Betrieb und die Reichweite eines Elektrofahrzeugs [Gulde, 2021]. Daher werden in Leistungselektroniken allgemein nur Bauteile verbaut, die geringe Leistungsverluste erzeugen können: Kondensatoren, Spulen und Drosseln, Transformatoren sowie Schalter [Böcker, 2019].

Vor dem Hintergrund des Wirkungsgrades kommt insbesondere Schaltern eine hohe Bedeutung zu, da letztendlich hohe elektrische Leistungen über den Schalter an die elektrische Maschine transportiert werden. Dazu werden sogenannte Leistungshalbleiter verbaut, die üblicherweise aus reinem Silizium bestehen. Leistungshalbleiter sind in der Lage, entweder durch Anlegen von elektrischen Spannungen oder elektrischen Feldern kontrolliert die eigene elektrische Leitfähigkeit und damit die „durchfließende“ Leistung zu ändern. Eine

³ Im Folgenden bezieht sich der Begriff *Leistungselektronik* auf Leistungselektroniken in automobilen Anwendungen

häufig verbaute Variante sind sogenannte Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT [Insulated Gate Bipolar Transistor]) [Winterhagen, 2018]. Im Folgenden soll ein Modul mit einer Reihe von IGBTs als *IGBT-Modul* bezeichnet werden.

Um bei höheren, an Leistungshalbleitern anliegenden Spannungen dennoch einen hohen Wirkungsgrad halten zu können, kann in weiterentwickelten Leistungselektroniken anstelle von reinem Silizium auch Siliziumkarbid verwendet werden [Winterhagen, 2018]. Heutige Leistungselektroniken erreichen Wirkungsgrade von weit über 90 %. Für die Leistungselektronik *Generation 3evo* der *Robert Bosch GmbH* wird ein Wirkungsgrad von bis zu 97 % angegeben, somit lässt sich ein Systemwirkungsgrad im Verbund mit Elektromotor und Getriebe von bis zu 93 % erzielen [Bosch Mobility Solutions, 2020]. Die auch bei hohen Wirkungsgraden auftretenden Leistungsverluste werden in Form von Wärmeenergie abgeführt, sodass alle Komponenten der Leistungselektronik idealerweise in ihren jeweils thermischen Betriebsoptima betrieben werden können. Bei einem Wirkungsgrad von 97 % und einer beispielhaften Systemleistung von 200 kW müssen immer noch 6 kW an Leistung abgeführt werden, dies entspricht ungefähr der Leistung von zwei bis drei handelsüblichen Backöfen [HEA, 2020]. Insofern eine Leistungselektronik in der Nutzung nicht übermäßig thermisch beansprucht wurde, kann sie auch zur Wiederverwendung eignet sein⁴ [Schneider et al., 2016].

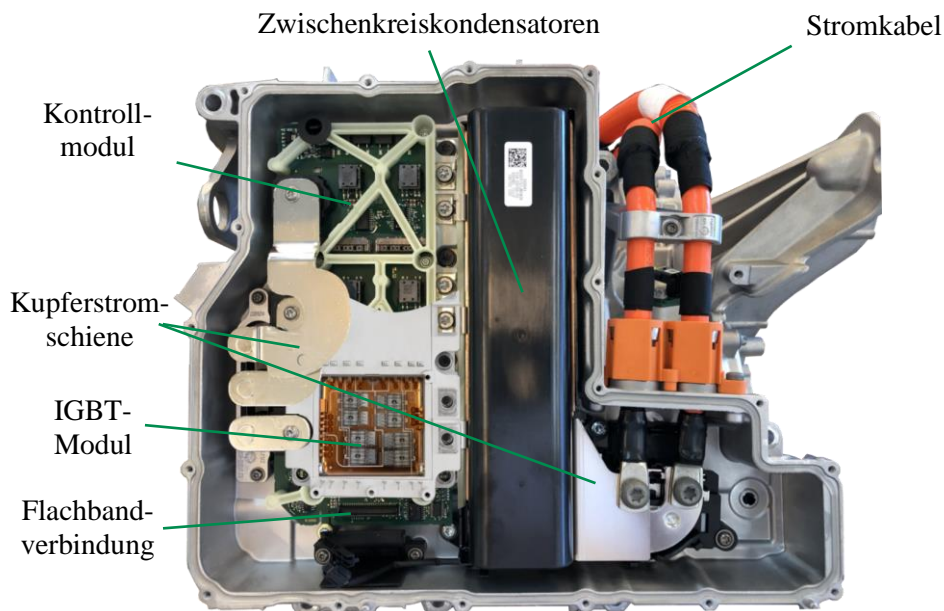


Abbildung 4: Offengelegte Leistungselektronik des EAA mit Schnitt durch Modul für Steuerung und Leistungsüberwachung

⁴ Laut einer Simulation von Schneider und Öttl (2016) weist eine Leistungselektronik im leistungsintensivsten Zustand, dem Fahrbetrieb des Fahrzeuges, eine Lebensdauer von circa 50.000 h auf [Schneider et al., 2016].

Abbildung 4 zeigt den offengelegten unteren Teil der Leistungselektronik des EAA. Dabei wurde ein Schnitt durch das Kontrollmodul gezogen, sodass das (geöffnete) IGBT-Modul sichtbar ist.

Die Energiezufuhr erfolgt über die Stromkabel, die auf die verzinnnten Kupferstromschienen geschraubt sind. Die Kupferstromschienen (Abbildung 4, rechts) sind mit den Zwischenkreiskondensatoren verbunden, diese wiederum kontaktieren das IGBT-Modul. Aus dem IGBT-Modul führen drei Kupferstromschienen (Abbildung 4, links) durch das Gehäuse der Leistungselektronik heraus und kontaktieren den Stator des EAA. Über dem IGBT-Modul liegt ein Kontrollmodul, das induktiv den Strom misst, der durch die drei Kupferstromschienen in den Stator fließt. Über die Flachbandverbindung werden alle oben genannten Komponenten mit einem Steuermodul verbunden (Abbildung 5 a)).

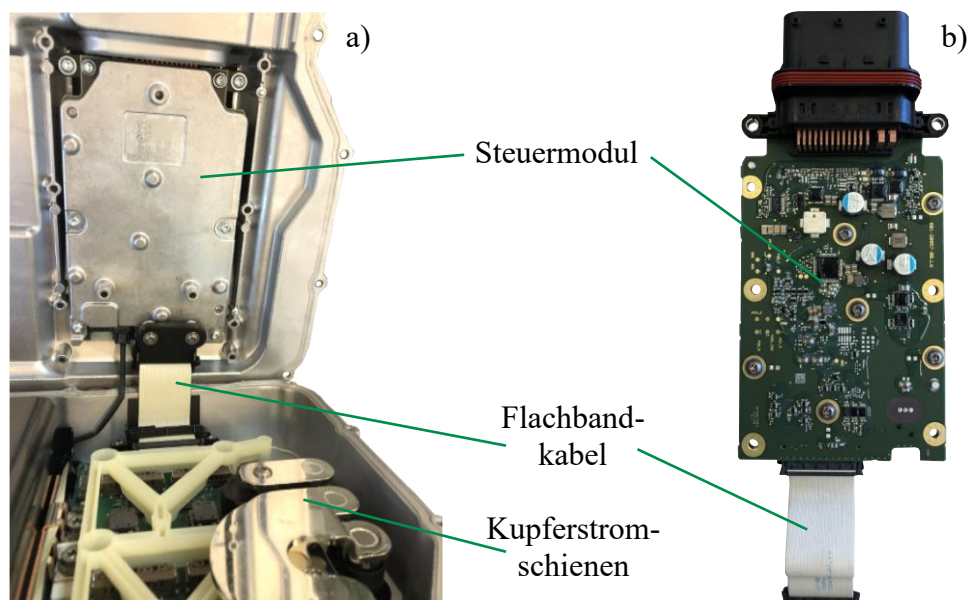


Abbildung 5: Aufgeklappte Leistungselektronik (a) und ausgebautes Steuermodul (b)

Durch die gegenseitigen Überlappungen der Komponenten erhöht sich tendenziell die Menge vorher zu demontierenden Bauteile, wenn bestimmte Bauteile aus der Leistungselektronik ausgebaut werden sollen. Zusätzlich sind alle stromleitenden Schraubverbindungen mit Aluminiumschrauben verschraubt, sodass eine höhere elektrische Leitfähigkeit gegeben ist. Die fehlenden ferromagnetischen Eigenschaften von Aluminiumschrauben können eine besondere Herausforderung für die automatisierte Demontage darstellen, da kein magnetischer Abtransport (beispielsweise mit magnetischen Schraubenbits) realisiert werden kann.

In der vorliegenden Leistungselektronik liegt eine aktive Flüssigkühlung vor, dabei liegt ein Teil der Leistungselektronik, sowie Rotor und Stator (die wesentlichen zu kühlenden Komponenten) im selben Kühlkreislauf. In der Leistungselektronik besonders wichtig zu kühlen sind das IGBT-Modul und die Zwischenkreiskondensatoren. Das IGBT-Modul liegt

direkt im aktiven Kühlkreislauf, die Zwischenkreiskondensatoren sind mit einem Wärmeleitpad im Gehäuse verklebt. Die Verschraubung aller stromführenden Verbindungen in der Leistungselektronik mit Aluminiumschrauben sorgt für eine im Vergleich zu Stahlschrauben verbesserte Wärmeleitfähigkeit.

2.1.3 Getriebe

Ein Getriebe ist ein Maschinenelement, welches zur Umwandlung von Drehmomenten, Kräften, Drehzahlen sowie Drehrichtungen dient. Nach dem VDI dienen Getriebe zur Übertragung und Umformung von Bewegungen, Energie und / oder Kräften [VDI, 1993]. Im vorliegenden EAA befinden sich sowohl ein zweistufiges Stirnradgetriebe⁵ als auch ein Differential (Umlaufgetriebe).

Elektromotoren bieten gegenüber Verbrennungsmotoren ein vergleichsweise breiteres Drehzahlpektrum mit einem effizienteren Betriebspunkt. Das breite Drehzahlpektrum ermöglicht den Fahrbetrieb eines Elektrofahrzeugs mit Verzicht auf schaltbare Getriebe. Der Trend zukünftiger Generationen von Elektrofahrzeugen kann sich allerdings wieder hin zu der Nutzung schaltbarer, mehrstufiger Getriebe entwickeln, sodass Elektromotoren im optimalen Betriebspunkt genutzt werden können und in der Folge eine vergleichsweise höhere Effizienz ermöglicht werden soll [Küçükay, 2012]. Das im vorliegenden Getriebe befindliche Differential dient der Lastverteilung zwischen den beiden Seiten der Abtriebswelle des Elektromotors. Insbesondere in Kurvenlagen wird über das Differential die unterschiedliche Drehzahl der Reifen des Elektrofahrzeuges ausgeglichen. Im Vergleich zu Radnabenantrieben erfolgt der beschriebene Ausgleich für das EAA mechanisch [Schindler und Müller, 2019].

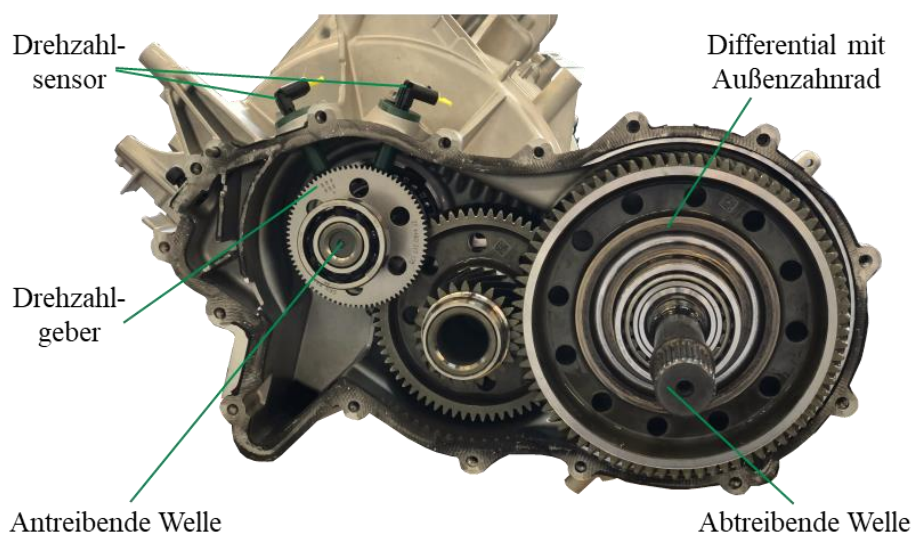


Abbildung 6: Geöffnetes Getriebe des EAA mit Sicht auf zwei schrägverzahnte Stirnradpaare

⁵ Das Getriebe des behandelten EAA ist nicht schaltbar.

Die in Abbildung 6 dargestellten Elemente des Getriebes überlappen sich gegenseitig. Durch die Schrägverzahnung der Zahnräder sind die Zahnräder zusätzlich ineinander geschränkt und lassen sich nur durch eine Kombination translatorischer und rotatorischer Bewegungen demontieren. Insbesondere bei der automatisierten Demontage stellt die genannte Bewegungskombination eine nichttriviale Herausforderung dar, da der Drehwinkel der jeweilig zu demontierenden Zahnräder und deren Abnutzungsgrad berücksichtigt werden muss. Eine weitere Herausforderung stellt das im Getriebe befindliche Getriebeöl dar, welches der Reibungsminderung und Wärmeableitung dient: Für die Weiterverwendung von Bauteilen muss gewährleistet werden, dass Bauteile ölfrei sind, da ölhaltige Rückstände im späteren Betrieb des Demontagetechnikums zu unvorhersagbaren Defekten führen können.

2.2 Recycling von Elektroantrieben

2.2.1 Marktsituation von Elektroantrieben in PKW

In den vergangenen Jahren hat die Elektromobilität immer weiter an Bedeutung zugenommen. Sowohl national als auch international steigen, durch verschiedene wirtschaftspolitische Incentives gefördert, die Verkaufszahlen von elektrisch betriebenen Fahrzeugen⁶ [Kraftfahrt-Bundesamt, 2019].

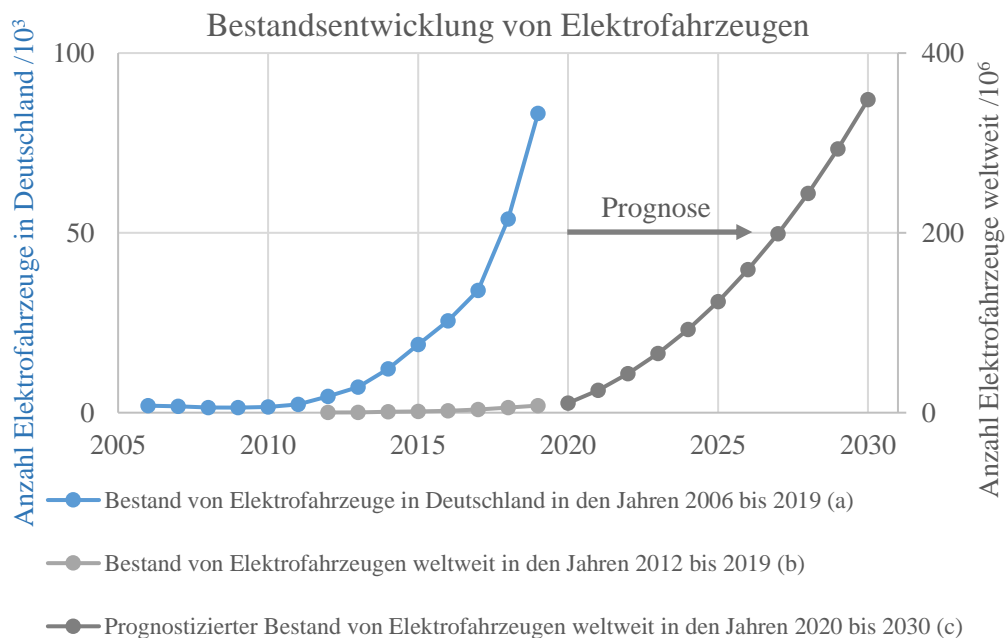


Abbildung 7: Vergangene und prognostizierte Bestandsentwicklung von Elektroautos [a) Kraftfahrt-Bundesamt, 2019; b) ZSW, 2020; c) Spiegel, 2019]

⁶ Der Begriff „elektrisch betriebenes Fahrzeug“ umfasst Batterieelektrofahrzeuge, extern aufladbare Hybridelektrofahrzeuge als auch Brennstoffzellenfahrzeuge [§ 2, EmoG].

Da Elektroantriebe ein wesentlicher Bestandteil von Elektrofahrzeugen sind, nimmt deren Bedeutung für den Mobilitätssektor ebenso zu. Im Zuge der Etablierung der Kreislaufwirtschaft ist die Kreislaufführung der Elektroantriebe folglich von besonderer Relevanz. Abbildung 7 zeigt die Zunahme des Bestandes von Elektrofahrzeugen in Deutschland (blau) und global (grau). Die Bestandsentwicklung ab dem Jahr 2020 basiert auf geschätzten jährlichen Neuzulassungen der Jahre 2020, 2025 und 2030. Es zeigt sich ein klar steigender Trend in der Verbreitung von Elektro-Kfz, mit einer steigenden Zahl an jährlichen Neuzulassungen [Kraftfahrt-Bundesamt, 2019; ZSW, 2020; Spiegel, 2019].

Mit der steigenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen im Mobilitätssektor ist zu erwarten, dass auch der Markt für Reparaturen an Elektrofahrzeugen weiterwächst. Die Automobilwerkstätten laufen den Entwicklungen der Hersteller jedoch immer eine gewisse Zeit hinterher [Nolte, 2020], wodurch der Markt für Elektrofahrzeugersatzteile bisher vergleichsweise klein ist. Die zunehmende Qualität von Fahrzeugen generell und insbesondere vergleichsweise wartungsarme Elektrofahrzeuge führen zu einem geringeren Wartungsaufwand für Elektroautos [Dispan, 2017]. Folglich ist der Bedarf an Ersatzteilen für Elektrofahrzeuge im Verhältnis zur Gesamtmenge an Elektrofahrzeugen kurzfristig eher geringer einzuschätzen. Darüber hinaus sehen Automobilwerkstätten noch Bedarf, sich auf die Reparatur von Elektrofahrzeugen vorzubereiten [Jackowski, 2017]. Aufwendige Schulungen für den Umgang mit Hochvoltssystemen⁷ als auch neue Komponenten im Fahrzeug stellen eine Herausforderung für Automobilwerkstätten dar [Dispan, 2013]. Langfristig lässt sich vermuten, dass, sobald Elektrofahrzeuge im Markt etabliert sind, die genannten Herausforderungen überwunden werden können und entsprechend Ersatzteile von Originalherstellern (OEM) und Drittanbietern auf den Ersatzteilmarkt gebracht werden.

2.2.2 Wiederverwendung und Weiterverwendung

Allgemein wird zwischen einer Wiederverwendung, einer Weiterverwendung, einer Wiederverwertung und einer Weiterverwertung unterschieden⁸ (siehe Abbildung 8).

⁷ Hochvoltssystem bezeichnet hier Wechselspannung ab 25 V und Gleichspannung ab 60 V [DGUV, 2012]

⁸ Für ein besseres Leseverständnis sollen die genannten Strategien allgemein als *Recycling* bezeichnet werden.

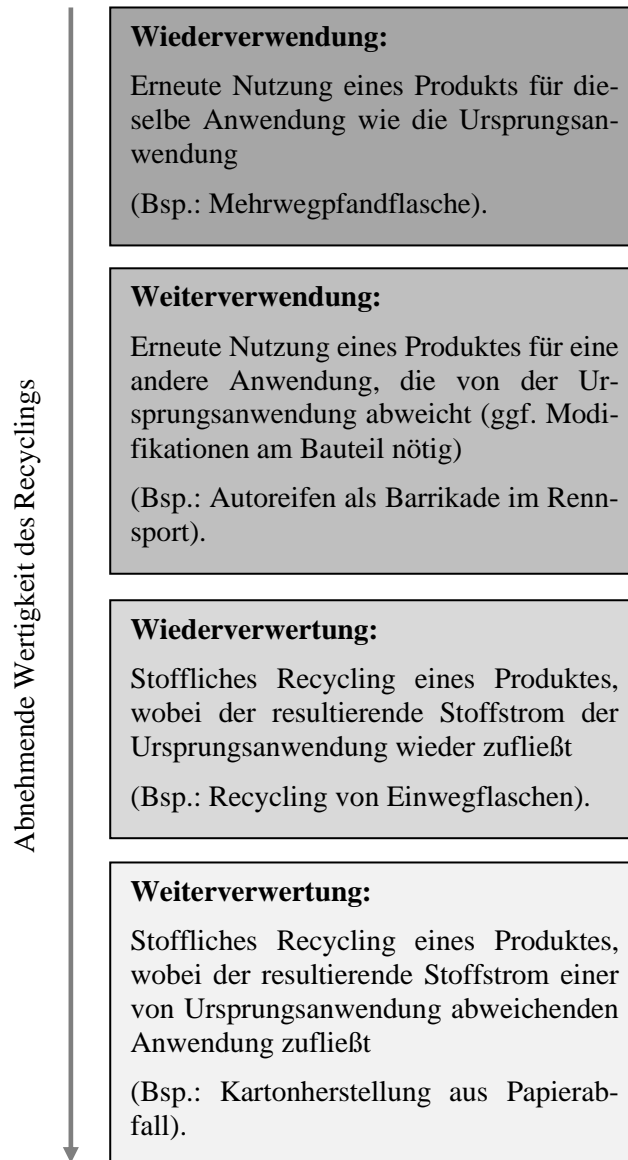


Abbildung 8: Begriffsabgrenzung unterschiedlicher Recyclingstrategien
[Umweltdatenbank, 2021 (1-4); Spengler, 1994]

Wie in Abbildung 8 gezeigt, gibt es unterschiedlich wertige Recyclingverfahren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird vorrangig die wertigste Form des Recyclings angestrebt, die Wiederverwendung, beziehungsweise *Reuse*. Entsprechend sollen Demontageprozesse gestaltet werden.

Nach einer international durchgeführten Umfrage bezüglich des Recyclings von automobilen Komponenten, weißer Ware und sonstigem Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall (WEEE) hat sich gezeigt, dass durchschnittlich insbesondere das Recycling und die Wiederaufbereitung von automobilen Komponenten als profitabel gelten. Dabei sticht ein Ergebnis aus den USA heraus, wobei es um die Wiederverwendung von Motorkomponenten geht: Im Vergleich zu den anderen Ergebnissen der Studie wird bei höchstem Automatisierungsgrad und ohne ein vorhandenes Strafsystem für Nicht-Recycling ein hochprofitables

Geschäft mit der Wiederverwendung von Automobilbauteilen identifiziert [Duflou et al., 2008].

Parallel zum Ersatzteilmarkt von Neuteilen kann mit zeitlichem Verzug zum Marktstart ein Markt für gebrauchte Ersatzteile entstehen – jedoch nur, wenn Ersatzteile in verkaufsfähigen, beziehungsweise gebrauchsfähigen, Qualitäten aus (Alt-) Fahrzeugen geborgen werden [Czwajda et al., 2019]. In der Regel sind manuell ausgebaute Bauteile aus fahrtüchtigen Fahrzeugen der eigentliche Grund für den Austausch, daher stellen insbesondere funktionstüchtige Bauteile aus Altfahrzeugen die Basis für einen Ersatzteilmarkt dar. Bestehen Antriebsstränge konventionell angetriebener Kraftfahrzeuge aus verschiedenen Baugruppen wie Getriebe, Kupplung, Motor, Motorsteuerung, etc. handelt es sich bei elektrischen Antriebssträngen häufig um hochintegrierte Aggregate, die eine Vielzahl der genannten Baugruppen vereinen⁹ (siehe Kapitel 2.1). Da diese hochintegrierten Aggregate im Ganzen aus Altfahrzeugen ausgebaut werden, können intakte Ersatzteile nicht mehr direkt aus dem Altfahrzeug entfernt werden, sondern müssen aus dem Aggregat geborgen werden. Die Art der Demontage (zerstörend oder zerstörungsfrei) ist dabei entscheidend für eine mögliche Wiederverwendung von Bauteilen.

In der Regel weisen zerstörungsfrei demontierte Bauteile einen höheren Wert als (halb-) zerstörte Bauteile auf. Einige Bauteile lassen sich jedoch kaum zerstörungsfrei demontieren (bspw. Nieten, verklebte Bauteile), stellen für eine Wiederverwendung ein zu großes Risiko dar (bspw. Schrauben) oder weisen einen sehr geringen Wert auf (bspw. O-Ring) und eignen sich daher per se schlecht für eine Wiederverwendung. Daher ist im Hinblick auf die Wiederverwendung von Bauteilen von einer (meistens) aufwendigen, zerstörungsfreien Demontage abzusehen. Laut Zussmann et al. [1994] hängt der Wert eines Bauteils letztendlich vom jeweiligen Substitutionswert ab. Der Substitutionswert stellt den größten Wert dar, den ein Bauteil in einer Folgeanwendung erfüllt. Dabei kann die Folgeanwendung eine Wieder- / Weiterverwendung bzw. -verwertung oder ein stoffliches / energetisches Recycling sein. Der Substitutionswert eines Bauteils ist für die Demontagetiefe entscheidend, darauf wird im folgenden Kapitel 5 Demontagetiefe näher eingegangen.

2.2.3 Stofflich verwertete Bauteile

Es gibt vielfältige Gründe, warum Bauteile aus Kraftfahrzeugen nicht einer Wiederverwendung zugeführt werden. Ein der Gründe für eine stoffliche Verwertung ist der nutzungsbedingte Verschleiß von Bauteilen. Auch fehlerhafte Demontageschritte, die in der Zerstörung eines Bauteils resultieren, eine mögliche Kontamination, die nicht ohne unerheblichen Aufwand eliminiert werden kann oder nicht zerstörungsfrei demontierbare Bauteile sind zu

⁹ Bei nicht geschalteten Asynchronmaschinen entfällt der Bedarf einer Kupplung

nennen. Darüber hinaus gibt es geringwertige Bauteile, deren Ausfallrisiko bei einer Wiederverwendung jedoch nicht unerheblich ist (bspw. Schrauben). Weiterhin gibt es Bauteile und Baugruppen, die durch gesetzliche Vorschriften nicht wiederverwendet werden können (bspw. Airbags) [Hebisch et al., 2011].

Auch ökonomische Aspekte sind relevant: Insbesondere kleine Bauteilgruppen, die günstig produziert werden können, sind einem Reuse oft nicht ökonomisch zuführbar. Zusätzlich können, auf Basis sogenannter Rebound-Effekte¹⁰, Effizienzsteigerungen von Bauteilgruppen zu einem vorzeitigen Austausch und daraus resultierenden Obsoleszenz dieser führen. Folglich kann der Bedarf an Vorgängergenerationen von Bauteilgruppen sinken, sodass eine stoffliche Verwertung dieser wahrscheinlicher wird [de Haan et al., 2015].

Ob Bauteilgruppen nach der Demontage oder im montierten bzw. teildemontierten Zustand einem stofflichen Recycling zugeführt werden, hängt wesentlich von den Demontagekosten und den Kosten dem eigentlichen Recycling vorgeschalteter Prozesse ab. Weiterhin sind die Kosten für das eigentliche Recycling als auch der Sekundärmaterialpreis besonders relevant. Ist die (automatisierte) Demontage einer Bauteilgruppe günstiger als die Kosten für Trennung, Sortierung und Sichtung, kann es ökonomisch sinnvoll sein, diese zu demontieren, anstatt diese zu schreddern und zu sortieren. Nichtsdestotrotz ist es meist das Ziel, Materialien möglichst sortenrein zu trennen und zu recyceln, um Verunreinigungen und damit potenzielle Qualitätsminderungen zu vermeiden. Da Verunreinigungen mit vielen anderen Materialien auftreten können, kommt der Vorsortierung (auch möglich durch automatisierte Demontage) eine besondere Bedeutung zu. Weiterhin kann durch eine Vorsortierung der Bedarf an nachgeschalteten Trenn- und Sichtverfahren reduziert werden [Martens und Goldmann, 2016].

2.2.4 Kreislaufwirtschaft, Kaskadennutzung und Circular Economy

Kreislaufwirtschaft bezeichnet ein Modell, nach dem Produkte, Komponenten und Materialien möglichst lange genutzt und in einem Kreislauf geführt werden. Dabei spielen Wiederverwendung, Reparatur, Aufbereitung und Recycling entscheidende Rollen, um den Kreislauf möglichst lange aufrecht zu erhalten [Korhonen et al., 2018; Europäisches Parlament, 2018]. Die vier Hauptmotive für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft sind [Martens und Goldmann, 2016]:

¹⁰ Der Rebound-Effekt entspricht jener Ressourcen-Mehrnachfrage, welche durch eine erhöhte Ressourcen-Effizienz induziert wurde [de Haan et al., 2015].

- *Ökonomische Vorteile* durch Nutzung von Restwerten
- *Ressourcenschonung* durch Mehrfachnutzung von Rohstoffen
- *Reduzierung von Schadstoffemissionen*
- *Vermeidung von Deponiekosten & Erhaltung der Landschaft*

Endlagerung und die damit einhergehenden Deponiekosten lassen sich jedoch nicht vollständig vermeiden [Kral et al., 2018]. Die Realisierung der Kreislaufwirtschaft wird in Deutschland mittels des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) umgesetzt. Laut KrWG ist der Zweck des Gesetzes, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen [§ 1, KrWG]. Konkret rechnet die Europäische Kommission mit Nettoeinsparungen in Höhe von 600 Mrd. Euro, was einem Jahresumsatz von 8 % aller europäischen Unternehmen entspricht. Gleichzeitig wird eine Reduktion der Treibhausgasemission um 2 – 4 % erwartet [Europäische Kommission, 2015].

Es gilt, dass eine möglichst hochwertige Verwendung der Abfälle anzustreben ist [§ 8, Abs. 1, KrWG]. Diese Rangfolge der möglichen Verwendungen wird als *Kaskadennutzung* bezeichnet (siehe Abbildung 9) [§ 8, Abs. 2, Satz 2, KrWG]:

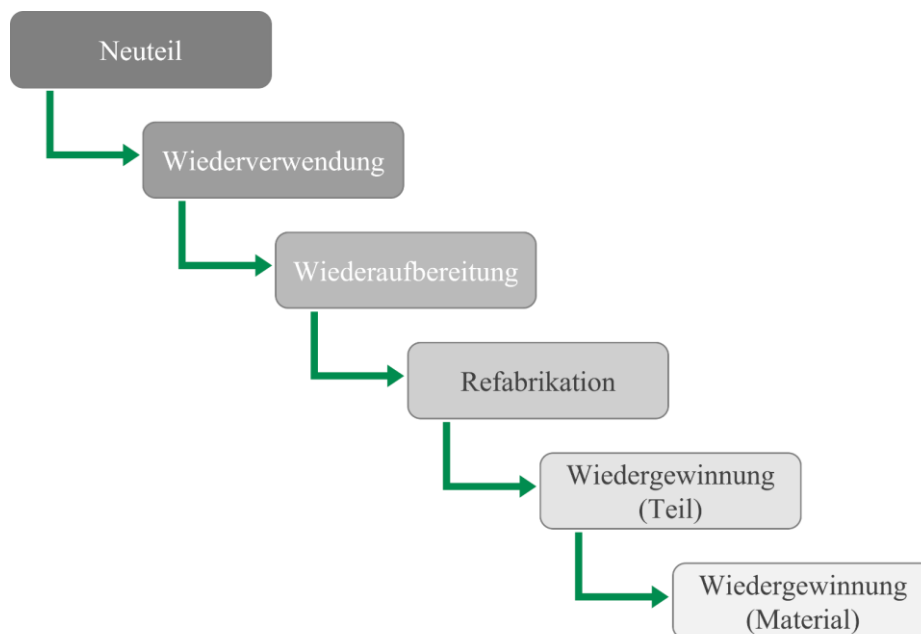


Abbildung 9: Darstellung des Cascade Use angelehnt an Seelig et al. [2019]

Wie Abbildung 9 zeigt, ist die Wiederverwendung von Produkten primär anzustreben, gefolgt von der Wiederaufbereitung und der Refabrikation. Wenn dies nicht möglich ist, wird eine Wiedergewinnung von Teilen und danach eine Wiedergewinnung von Materialien angestrebt [Seelig et al., 2019]. Die beschriebene Kaskadennutzung kann realisiert werden, wenn auf der jeweiligen Stufe die Verwertung technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist [§ 7, Abs. 4, KrWG]. Während die Kreislaufwirtschaft vor allem zirkuläre

Ströme auf stofflicher Basis betrachtet, umfasst der Begriff *Circular Economy* auch das gesamte Wirtschaftssystem [Gründerplattform, 2023].

Durch die Realisierung der Circular Economy können Herausforderungen des Klimawandels, Verlust an Biodiversität sowie Vermeidung von Abfällen und Umweltverschmutzung aufgenommen werden, indem ökonomische Aktivitäten vom Konsum endlicher Ressourcen abgekoppelt werden. Dabei basiert nach der Definition der Ellen MacArthur Foundation auf drei Prinzipien [Ellen MacArthur Foundation, 2023 (1)]:

- Beseitigung von Abfall und Verschmutzung
- Kreislaufführung von Produkten und Materialien (zum ihrem höchsten Wert)
- Regeneration der Natur

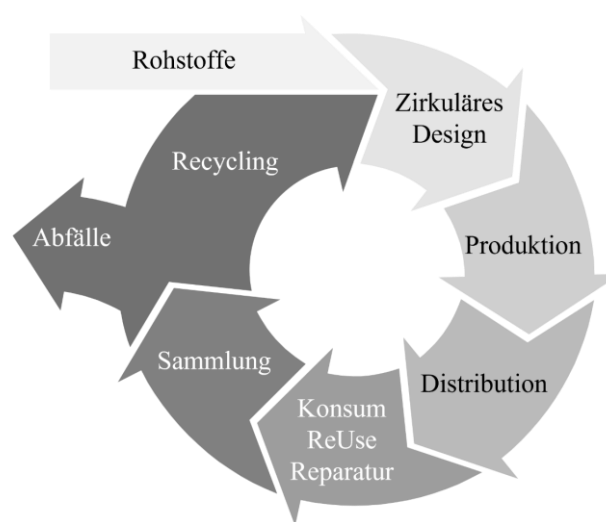


Abbildung 10: Prinzip der Circular Economy [Europäisches Parlament, 2023]

Hinsichtlich der Kreislaufführung von Produkten und Materialien verdeutlicht eine Infographik des Europäischen Parlaments das Prinzip der Circular Economy, in der beispielsweise bereits in der Produktentstehungsphase das zirkuläre Produktdesign einbezogen wird [Europäisches Parlament, 2023]. Trotz allen Bemühungen der Kreislaufschließung sollten trotzdem Senken für Materialien vorgehalten werden, da einige Materialien durch erneute Nutzung an Qualität verlieren oder schädliche Stoffe aus dem Kreislauf entfernt werden sollen [Kral et al., 2013]. Diese finalen Senken sollten dabei möglichst klein gehalten und Materialien möglichst lange und hochwertig im Kreis geführt werden [Kral et al., 2018].

2.2.5 Rechtlicher Rahmen

Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft dient die Europäische Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge als

Basis für die Umsetzung der Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (AltfahrzeugV) in Deutschland. Die wesentlichen Ziele der Europäischen Richtlinie 2000/53/EG sind dabei die Erhöhung der Wiederverwertungs- und Wiederverwendungsrate von Altfahrzeugen¹¹ auf mindestens 95 Gewichtsprozent, beziehungsweise die Erhöhung der Wiederverwendungsrate und der stofflichen Verwertungsrate auf mindestens 85 Gewichtsprozent ab dem 1. Januar 2015 [§ 5, Abs. 1, Satz 2, AltfahrzeugV]. Darüber hinaus wird ein deutschlandweit flächendeckendes Rücknahmesystem für Altfahrzeuge eingeführt [§ 3, Abs. 3, AltfahrzeugV].

Laut der AltfahrzeugV der Bundesregierung, basierend auf den Kreislaufwirtschaftsgesetzen der EU, sind in Deutschland Autohersteller generell verpflichtet, Altfahrzeuge vom Letztbesitzer zurückzunehmen. Die Rücknahmepflicht besteht auch nach tieferegreifenden Veränderungen oder Entnahmen von Teilen am Automobil, jedoch kann die Rücknahme in der Folge kostenpflichtig sein. Darüber hinaus schreibt Paragraph 8 des AltfahrzeugV unter anderem vor, bei der Konstruktion und Produktion (des Kfz) der Demontage, der Wiederverwendung und Verwertung von Bauteilen und Werkstoffen umfassend Rechnung zu tragen. Weiterhin wird gefordert, bei der Herstellung von Fahrzeugen verstärkt Recyclingmaterial zu verwenden [§ 8, Abs. 1, Satz 2, 3, AltfahrzeugV].

Weiterhin sind die Hersteller von Fahrzeugen dazu verpflichtet, Kennzeichnungsnormen für Bauteile und Werkstoffe zu verwenden, sodass geeignete Bauteile nach der Demontage leichter wiederverwendet oder wiederverwertet werden können. Demontageinformationen müssen spätestens sechs Monate nach Inverkehrbringen eines neuen Fahrzeugmodells für anerkannte Demontagebetriebe bereitgestellt werden [§ 9, Abs. 1, 2, AltfahrzeugV].

2.3 Automatisierte Demontage

Automatisierte Demontage beschreibt Demontageprozesse, die mittels Nutzung spezieller Werkzeuge, (Industrie-)Roboter, Fördersysteme, Sensorsystemen und entsprechenden Datenbanken sowie Hintergrundinformationen durchgeführt werden können. Im folgenden Kapitel werden die Begriffe *Automatisierung*, *Industrieroboter* und *Demontage* näher beleuchtet.

2.3.1 Automatisierung durch Industrieroboter

Die Automatisierung von Prozessen durch Industrieroboter ist ein grundlegendes Thema für die vorliegende Dissertation und soll daher kurz umrissen werden. Automatisierung wird als das Ergebnis des Einsatzes eines Automaten definiert [Voigt, 2018]. Ein Automat

¹¹ Bei Altfahrzeugen handelt es sich um abgemeldete Kfz, die nicht wieder (im In- oder Ausland) angemeldet, sondern entsorgt werden.

ist dabei ein selbsttätig arbeitendes künstliches System, dessen Verhalten entweder schrittweise durch vorgegebene Entscheidungsregeln oder zeitkontinuierlich durch festgelegte Beziehungen bestimmt wird und dessen Ausgangsgrößen aus seinen Eingangs- und Zustandsgrößen gebildet werden [DIN Deutsches Institut für Normung, 2014]. Als die wesentlichen Ziele bei der Automatisierung sind eine Erhöhung der Produktivität, Verkürzung von Fertigungszeiten, die Erleichterung menschlicher Arbeit, Senkung von Kosten sowie eine Erhöhung der Qualität zu nennen [Heinrich et al., 2020].

Ein möglicher Aktuator in einem Automaten kann ein Industrieroboter sein. Es wird zwischen unterschiedlichen Typen von Industrierobotern differenziert, die sich wesentlich durch ihre Kinematik unterscheiden: Portalroboter mit drei linearen Achsen, Deltaroboter mit 3 Rotationsachsen, SCARA-Roboter, die drei parallele Rotationsachsen und eine Linearachse nutzen, sowie Knickarmroboter, die in der Regel zwischen vier und sieben Rotationsachsen aufweisen. Knickarmroboter können heutzutage kollaborationsfähig ausgelegt werden und sind somit befähigt, Tätigkeiten gemeinsam mit Menschen durchzuführen. Knickarmroboter zeichnen sich durch eine Flexibilität in der Anwendung aus, können mit Werkzeugwechselsystemen ausgestattet werden und sind in Ihrer Bewegung durch die Vielzahl an Achsen wenig eingeschränkt. Industrieroboter können Lasten zwischen 0,5 kg und 2.300 kg bei Arbeitsreichweiten zwischen 0,3 m und knapp 4,7 m bewegen [Fanuc, 2023; RBTX, 2023]. Insgesamt zeigt sich, dass der Einsatz von Robotern in unterschiedlichen Industrien global immer weiter zunimmt und eine höhere Bedeutung erfährt [IFR, 2019; Schmidt et al., 2016].

Die Automatisierung durch Industrieroboter kann neben üblichen, produktions- oder serviceorientierten Lösungen auch in der Demontage von Produkten eingesetzt werden. Dies zeigt auch die Forschungsaktivität der letzten Jahre – für eine Übersicht sollen exemplarisch einige Projekte genannt werden:

- Recycling 4.0, 2018-2021, Digitalisierung als Schlüssel für die Advanced Circular Economy am Beispiel innovativer Fahrzeugsysteme [Lawrenz et al., 2023]
- Industrielle Demontagefabrik 4.0, 2018-2021, Nachhaltige Digitalisierung – Ultraeffizienz und Digitalisierung [Zeller et al., 2021]
- AgiProbot, 2019-2024, Agiles Produktionssystem mittels mobiler, lernender Roboter mit Multisensorik bei ungewissen Produktspezifikationen [AgiProbot, 2023]
- DeMoBat, 2019-2023, Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren [Baazouzi und Halt, 2023]
- DemoSens, 2020-2023, Digitalisierung einer automatisierten Demontage und sensorgestützten mechanischen Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien für ein hochwertiges Recycling [DemoSens, 2023]

- ZirkulEA, 2022-2025, Kreislauffähigkeit des Elektro-Antriebsstrangs durch intelligente Demontage und Nachverfolgung [ZirkulEA, 2023]

Einige der im Rahmen des Projekts DeMoBat (siehe auch folgendes Kapitel 2.3.3) gewonnene Erkenntnisse sollen im Rahmen der vorliegenden Dissertation vorgestellt werden.

2.3.2 Definition Demontage

Demontage umfasst alle Vorgänge, die eine Vereinzelung von Mehrkörpersystemen zu Baugruppen, Bauteilen und formlosen Stoffen erreichen. Dabei umfasst Demontage neben dem eigentlichen *Trennen* auch *Handhaben*, *Kontrollieren* und *Sonderoperationen* [Seligler, 2019]. Es werden verschiedene Ziele durch eine Demontage von Produkten verfolgt: Das primäre Ziel ist die Wiedergewinnung von Baugruppen und -teilen sowie sekundär die Bergung von Materialien [Duflou et al., 2008]. Dadurch kann die Schonung natürlicher Ressourcen, eine Schonung der Umwelt durch Isolierung von Wert- und Schadstoffen, höhere wirtschaftliche als auch politische Unabhängigkeit sowie eine Reduzierung des Depo- niebedarfs erreicht werden (siehe Kapitel 2.2.4).

Grundsätzlich wird zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Demontage unterschieden. Zerstörende Demontage kann durch *Zerteilen*, *Spanen mit geometrisch bestimmter* oder *unbestimmter Schneide* sowie *Abtragen* erzielt werden. Zerstörungsfreie Demontage hingegen kann durch einzelne Verfahren des *Zerlegens*, spezieller unter anderem durch *Auseinandernehmen* oder *Lösen kraftschlüssiger Verbindungen* vorgenommen werden [DIN Deutsches Institut für Normung, 2003]. Für eine Wiederverwendung von Baugruppen und Bauteilen ist eine zerstörungsfreie Demontage anzustreben [Gupta und McLean, 1996]. Eine ganze Reihe von unternehmensinternen und -externen sowie ökonomischen und technischen Einflussgrößen wirkt sich auf die Planung der Demontage aus und zeigt deren Komplexität [Schneider, 1999].

2.3.3 Das Projekt DeMoBat

Das Projekt *Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für die E-Mobilität* (DeMoBat), gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg wurde durch eine Reihe von Forschungs- und Industriepartnern bearbeitet. Am CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC) ist dabei das Teilprojekt 3 *Industrielle Demontage von E-Antriebsaggregaten* angesiedelt. Im Rahmen von Teilprojekt 3 wird ein elektrisches Antriebsaggregat beispielhaft automatisiert demontiert. Das Projektziel in Teilprojekt 3 ist dabei, in erster Linie Bauteile und Baugruppen zerstörungsfrei zu demontieren, um diese einer Wiederverwendung zuzuführen. Falls dies aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht machbar ist, sollen Bauteile an ihren Bauteilgrenzen getrennt werden, sodass diese einem möglichst sortenreinem stofflichen Recycling

zugeführt werden. Für den Bau des Demontagetechnikums wurden eine Reihe von Industrierobotern der Firma KUKA angeschafft (KUKA KR 180, KR 70, KR 16 und KR 10 [jeweils 1x]), die durch zwei Positioniersysteme (KUKA DKP 400) und eine Linearachse (KUKA KL 250) ergänzt werden.

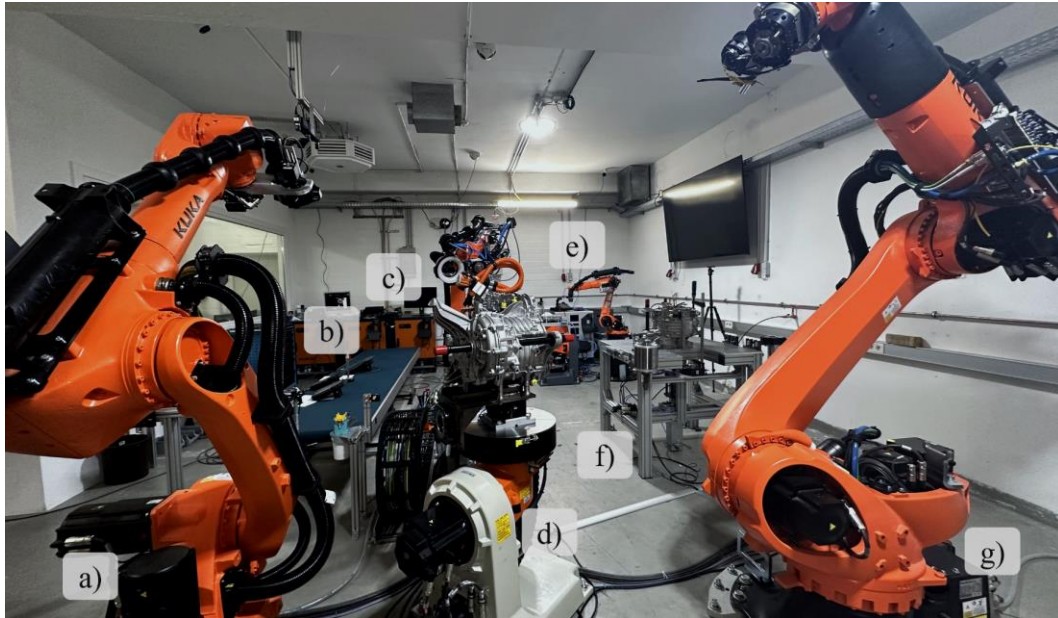


Abbildung 11: Demontagetechnikum am CUTEC Forschungszentrum zur Demontage von EAA im Rahmen des Projekts DeMoBat. a) KR 70 für mittlere Lasten; b) Förderband zum virtuellen Abtransport; c) KR 16 auf Linearachse KL 250; d) DKP 400 als zentrale Produktaufnahmestation; e) KR 10 im Bereich der Demontage der Leistungselektronik; f) Austreibetisch für Rotor und Stator; g) KR 180 für Schwerlastaufgaben

Der KR 180 (g) ist für besonders schwere Handling- und Demontageprozesse vorgesehen und kann den Austreibetisch (f) bestücken. Am Austreibetisch kann die zerstörungsfreie Demontage der besonders werthaltigen Bauteilgruppen Rotor und Stator durchgeführt werden. Der KR 70 (a) nimmt mittelschwere Demontageprozesse, beispielsweise im Bereich des Getriebes vor. Beide können zusammen an EAA arbeiten, die auf dem DKP 400 (d) befestigt sind; dieser verfügt über eine Aufnahme für eine Adapterplatte am EAA. Der DKP 400 dient ausschließlich Handlingaufgaben. Der KR 16 (c), der auf der Linearachse KL 250 befestigt ist, kann sowohl im vorderen Demontagebereich für die elektrische Maschine und das Getriebe als auch im hinteren Demontagebereich zur Demontage der Leistungselektronik arbeiten. Er dient als Springer, übernimmt Schraubaufgaben und kann Bau(-teil-)gruppen zwischen beiden Bereichen transportieren. Im Bereich zur Demontage der Leistungselektronik befindet sich ein KR 10 (e), der filigrane Demontageaufgaben übernimmt. Demontierte Bauteilgruppen werden auf dem Förderband (b) abgelegt und für den Abtransport aus dem Demontagetechnikum vorbereitet. Für die Durchführung der Demontageschritte werden vor allem pneumatische Greifsysteme der Firma Schunk SE & Co

KG genutzt, die mit individuellen, modular wechselbaren Greiffingern und -backen ausgestattet wurden. An einigen Robotern sind RobotVision Systeme der Firma Keyence Corporation angebracht, die den Robotern präzises selbstständige Bahnplanung auf den letzten Zentimetern einer Trajektorie und eine höhere Flexibilität ermöglichen (Torres et al., 2004).

2.4 Design-for-Recycling, Design-for-Disassembly, Design-for-X und Circular Design

2.4.1 Abgrenzung unterschiedlicher Begrifflichkeiten

Das Design eines Produktes ist entscheidend für den ökologischen Footprint, laut Radjou und Prabhu [2014] entscheiden sich in der Designphase über 70 % der Lebenszykluskosten und des ökologischen Fußabdrucks. Entsprechend wird in der Literatur zwischen unterschiedlichen Designmethoden unterschieden, die jeweils unterschiedliche Ansätze verfolgen, jedoch durch das gemeinsame Ziel des Designs ökologischerer Produkte vereint sind. Um die für die vorliegende Arbeit Relevantesten zu nennen, sollen das *Design-for-Recycling* (DfR) oder synonym *recyclinggerechte Konstruktion* sowie *Design-for-Disassembly* (DfD), *Design-for-X* (D4X) als auch das *Circular Design* (CD) kurz erläutert werden. Beim DfR gilt es, Produkte so zu designen, dass der Recyclingprozess am End-of-Life¹² (EoL) möglichst effizient durchgeführt werden kann, sodass vergleichsweise hohe Mengen Material in möglichst sortenreinen Fraktionen gewonnen werden können [EU-Recycling, 2022]. Beim DfD steht in erster Linie die optimierte Demontage eines Produktes im Fokus, hierbei kann durch die Zerlegung in einzelne Bauteile auch das stoffliche Recycling verbessert werden; angestrebt ist jedoch eine Demontage der Produkte für eine Wiederverwendung [Broughton, 2023]. Der Begriff D4X soll DfR und DfD kombinieren, da häufig von der Designphase bis hin zum EoL eines Produktes nicht klar ist, ob ein stoffliches Recycling oder eine Wiederverwendung einzelner Bauteile die ökologisch beste Option darstellt [Hansen et al., 2023]. Der Begriff CD oder auch Design-for-Circular-Economy verallgemeinert den Gedanken eines ökologischen Designs und umfasst das Design von Produkten und Services, sodass diese für die Circular Economy optimiert sind [Ellen MacArthur Foundation, 2023 (2)].

Für die vorliegende Arbeit soll primär der Begriff DfR / DfD verwendet werden, da im Vergleich zum CD keine Services bearbeitet werden.¹³ Beim DfR / DfD steht die Recyclingfähigkeit durch komplexe Zusammenhänge mit unterschiedlichen Stakeholdern im

¹² End-of-Life (dt.: Ende des Lebens) bezeichnet die letzte Phase des Lebenszyklus eines Produktes

¹³ DfR / DfD soll ebenfalls verwendet werden, wenn in der Literatur D4X, CD, recyclinggerechte Konstruktion oder ähnliche Begriffe verwendet werden. Insbesondere in der früheren Literatur

Spannungsfeld verschiedener Zielanforderungen [Rozenfeld, 2007]. Die Zusammenarbeit mit allen im Produktentstehungsprozess eingebunden Instanzen wie Entwicklungs-, Einkaufs-, Produktions- und Vertriebsabteilungen wird erfordert. Allgemein gilt, dass durch eine frühe Berücksichtigung des Recyclings im Produktentstehungsprozess die EoL-Kosten drastisch gesenkt werden können. Dabei hat der Konstrukteur den größten Einfluss auf die Recyclingfähigkeit eines Produktes [VDI, 2002; Zussman et al., 1994; Nickel et al., 1996]. Aus oben genannten Gründen fordert Ruhland [2006] die frühe Einbindung von Gestaltungshilfen im Produktentstehungsprozess, Methoden zur Bewertung von Lösungen als auch eine Anpassung von Organisationsformen, sodass Gestaltungshilfen und Bewertungen implementiert werden können.

2.4.2 Gestaltungsgrundregeln

In der VDI-Richtlinie 2243 werden einige allgemeingültige Gestaltungsgrundregeln genannt, die allgemein die Recyclingfähigkeit von Produkten erhöhen. Im Folgenden wird eine Übersicht aus der VDI-Richtlinie gegeben [VDI, 2002]:

Baustruktur:

- A1. Funktional modularen Aufbau vorsehen
- A2. Horizontale Strukturen bevorzugen
- A3. Kreislaufgeeignete und / oder zu demontierende Komponenten und Materialien zugänglich und leicht demontierbar anordnen
- A4. Einfache Entfernung von Betriebsstoffen gewährleisten, ausführen und leicht zugänglich machen
- A5. Kabelbäume und elektrische Netze leicht demontierbar gestalten und anordnen
- A6. Elektrische und elektronische Komponenten / Baugruppen leicht zugänglich / demontierbar und möglichst in der obersten Demontageebene anordnen

Materialien und Oberflächen:

- B1. Kennzeichnung von Materialien nach einschlägigen Normen und Regelwerken
- B2. Vermeidung recyclingkritischer Substanzen, Schad- und Gefahrstoffe
- B3. Einsatz stofflich wirtschaftlich wiederverwertbarer Werkstoffe
- B4. Einsatz verwertungskompatibler Werkstoffe nach Herstellerempfehlungen in Modulen / Baugruppen insbesondere bei Materialverbunden

wird vermehrt nicht zwischen stofflichem Recycling und Wiederverwendung differenziert, wobei explizit beides gemeint ist [siehe auch VDI, 2002]. Daher soll die damals auf *Recycling* bezogene Literatur nun entsprechend verwendet werden.

- B5. Reduzierung der Materialvielfalt und werkstoffliche Vereinheitlichung in Modulen / Baugruppen
- B6. Oberflächenschichten möglichst verwertungskompatibel mit Trägermaterial bzw. Substrat auslegen
- B7. Einsatz recyclingfreundlicher Lacke und Beschichtungen
- B8. Bei Kunststoffteilen Rezyklateinsatz vorsehen und metallischer Inserts vermeiden
- B9. Einsatz halogenfreier Leiterplatten anstreben

Demontage und Verbindungstechnik:

- C1. Anzahl und Vielfalt der Verbindungselemente minimieren
- C2. Verbindungselemente vereinheitlichen
- C3. Einheitliche Demontagerichtungen, vorzugsweise axial in Demontagerichtung vorsehen
- C4. Zerstörungsfrei lösbar ausgelegte Verbindungen leicht lösbar, auch noch nach der geplanten Produktnutzungsdauer, erkennbar und zugänglich gestalten
- C5. Schnappverbindungen, wenn möglich, Schraubverbindungen vorziehen
- C6. Unlösbare Verbindungsarten – wie z.B. Schweißen, Nieten, Kleben – minimieren und möglichst nur bei verwertungskompatiblen Materialien verwenden
- C7. Einsatz von Demontage-Standardwerkzeugen vorsehen und Zugänglichkeit gewährleisten
- C8. Bei Flachbaugruppen außenliegende Schnappverbindungen einsetzen und Schraubverbindungen vermeiden
- C9. Befestigungselemente für elektromechanische Komponenten auch ohne vorhandene Stromversorgung zugänglich gestalten (z.B. elektrisch verstellbare Autositze)

Betriebsstoffentnahme:

- D1. Betriebsflüssigkeiten unabhängig voneinander einfach, schnell und vollständig entfernbar auslegen
- D2. Ablassmöglichkeiten vorsehen und gute Erkennbarkeit und Zugänglichkeit gewährleisten
- D3. Wenn keine Ablassmöglichkeit gegeben, Markierung für zerstörenden Eingriff in flüssigkeitstragendes Bauteil vorsehen

Neben der Berücksichtigung von Gestaltungsgrundregeln gilt es auch, deren Vor- und Nachteile über die Lebensdauer eines Produktes abzuschätzen. Zussman et al. [1994] bezeichnen diesen Ansatz als *Life Cycle Design*. Es wird das Beispiel eines im Hinblick auf seine Recyclingfähigkeit optimierte Automobil genannt, das durch die getroffenen Maßnahmen erheblich schwerer wird und dementsprechend über seine Lebensdauer einen deutlich erhöhten Schadstoffausstoß verursacht. Dem genannten Beispiel folgend lässt sich in

der nachkommenden Tabelle 2 feststellen, dass eine Schraube-Mutter Verbindung aus Stahl nach allen bewerteten Kategorien mindestens so geeignet ist, wie eine Klebeverbindung. Aktuelle Trends zeigen jedoch, dass Klebeverbindungen, insbesondere in Automobilen, eine immer größere Rolle zukommt [Wintermann, 2015]. Entsprechend gilt es, im Sinne des *Life Cycle Designs* einen Kompromiss zwischen recyclingorientierten Gestaltungsgrundregeln und den, während der Lebensdauer eines Produktes anfallenden, Nachteilen zu wählen.

Im Hinblick auf die automatisierte Demontage von EAA soll vertieft auf die Demontage und Verbindungstechnik eingegangen werden. Diese bietet die Möglichkeit, die Recyclingfähigkeit eines Produktes zu erhöhen. Häufig sind Produkte so konstruiert, dass Verbindungen der Produktkomponenten nicht zerstörungsfrei voneinander getrennt werden können (bspw. die meisten Schweißverbindungen). Nicht zerstörungsfreie Verbindungen werden aufgrund hoher erwarteter Lebensdauern und hohen Belastbarkeiten verwendet, sodass letztendlich die Lebensdauer des Produktes erhöht werden kann. Für das Recycling am EoL können schwer trennbare Verbindungen jedoch eine besondere Herausforderung darstellen, da eine vor dem eigentlichen Recyclingprozess vorgeschaltete Stoffsortierung durch Demontage erschwert werden kann. Die Eignung der genannten Gestaltungsgrundregeln und der entsprechend umzusetzenden Verbindungstypen gilt es vor dem Hintergrund der automatisierten Demontage im Verlauf der vorliegenden Arbeit zu untersuchen.

2.4.3 Wirkprinzipien von Bauteilverbindungen

Für die automatisierte Demontage sind die im zu demontierenden Produkt anzutreffenden Wirkprinzipien von Bauteilverbindungen von entscheidender Bedeutung, da diese im Demontageprozess in den meisten Fällen rückgängig gemacht werden müssen. Allgemein wird angestrebt, Montage- und Demontagewerkzeuge aneinander anzugleichen, sodass bei der Rücknahme von Produkten bestehende Werkzeuge für die Demontage genutzt werden können. Im Falle eines speziellen Demontagemoduls, wie es in dieser Arbeit behandelt wird, kommt dem Angleichen der Werkzeuge eine untergeordnete Rolle zu [Beitz, 1996]. Die folgende Tabelle 2 zeigt gängige Wirkprinzipien mit einer Grobbewertung auf:

Tabelle 2: Wirkprinzipien von Bauteilverbindungen mit Bewertung relevanter Eigenschaften (+ ≙ bevorzugt; o ≙ weniger geeignet; - ≙ weniger geeignet)
[angelehnt an Beitz, 1996]

Verhalten der Verbindung	Verbindungsprinzip	Stoffschluss		Kraftschluss				Formschluss						
		Kunststoff-/Metallkleben	Schweißen	Magnetverschluss	Klettverschluss	Schraube / Mutter Stahl	Kunststoff	Schnappverschluss	Schnappverschluss	Spannverschluss	¼ Drehverschluss	Druck-Drehverschluss	Druck-Druckverschluss	Band mit Schloss
Tragfähigkeit / Belastbarkeit	ruhend	o	+	o	-	+	o	o	+	+	o	o	+	+
	schwingend	o	+	o	-	+	o	o	+	+	o	o	-	o
Fügeaufwand	Fügen	o	o	+	+	o	o	+	+	+	+	+	+	+
	Kontrolle	-	-	o	+	o	o	+	+	+	+	+	+	o
Löseaufwand	zerstörungsfreies Lösen	-	-	+	+	o	o	+	+	+	+	+	+	o
	zerstörendes Lösen	o	o			o	+	+	o	o	o	o	+	+
Recyclingeignung	Produktrecycling	-	-	o	o	o	+	+	+	-	+	+	+	+
	Materialrecycling	o	+	o	o	o	+	+	+	+	+	o	o	+

Die in Tabelle 2 dargestellten Wirkprinzipien werden nach Kategorien *Stoffschluss*, *Kraftschluss* und *Formschluss* getrennt. Das Verhalten der Wirkprinzipien wird nach den Kategorien *Tragfähigkeit / Belastung*, *Fügearaufwand*, *Löseaufwand* und *Recyclingeignung* bewertet. Es zeigt sich, dass formschlüssige Spanner und Verschlüsse im Vergleich eher bevorzugt werden sollten als beispielsweise stoffschlüssige Verbindungen. Laut einer Umfrage unter Konstrukteuren von Blessing und Klett wird geschlussfolgert, dass die Belastbarkeit recyclingfreundlicher Verbindungen unterschätzt wird und relevante Kenndaten der Belastbarkeit nicht ausreichend zur Verfügung stehen. Weiterhin wird anhand des laut Tabelle 2 zu bevorzugenden Verbindungsprinzips $\frac{1}{4}$ *Drehverschluss* gezeigt, dass die Belastbarkeit tatsächlich unter der einer entsprechen Schraubverbindung einzuordnen ist. Geeignete Modifikationen und Test sollen das Verbindungsprinzip $\frac{1}{4}$ *Drehverschluss* jedoch konkurrenzfähig machen (siehe auch Kapitel 6.3) [Blessing und Klett, 2007].

Neben dem $\frac{1}{4}$ Drehverschluss stellen Schraubverbindungen ein Wirkprinzip dar, das je nach Material eine geeignete bis bevorzugte Tragfähigkeit sowie Recyclingeignung aufweist. Da Schraubverbindungen im vorliegenden EAA vergleichsweise häufig vorkommen, sollen auch diese experimentell untersucht werden.

2.5 Identifikation optimaler Demontagetiefen

Die Planung des Demontageprozesses ist von besonderer Bedeutung für die Einsparung monetärer und zeitlicher Ressourcen und kann den Demontagegrad erhöhen sowie die Qualität der demontierten Bauteile verbessern [Moore et al., 2001]. Daher soll im Folgenden die Identifikation optimaler Demontagetiefen zunächst theoretisch betrachtet werden.

2.5.1 Darstellung der Präzedenzbeziehungen als Digraph

Einzelne Bauteile und Baugruppen eines elektrischen Antriebsaggregates können mit unterschiedlichen monetären Werten beziffert werden. Abhängig von der Betrachtungstiefe können bspw. der Zustand bzw. Abnutzungsgrad, etwaige Recyclingpfade, der Bedarf sowie ökologische Auswirkungen eines Bauteils / einer Baugruppe diesen Wert bestimmen.

Bei der Demontage von Bauteilen und Baugruppen muss in einer bestimmten Reihenfolge vorgegangen werden. Bestimmte Bauteile blockieren die Demontage weiterer Bauteile, zwischen diesen Bauteilen herrscht somit eine Präzedenzbeziehung. Alle Präzedenzbeziehungen aller Bauteile zueinander können in einem sogenannten Demontagegraph dargestellt werden [Hui et al., 2008].

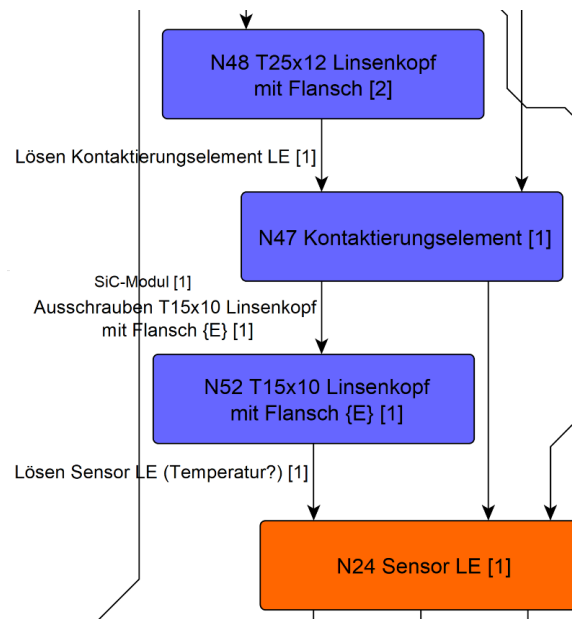


Abbildung 12: Beispielhafter Ausschnitt aus dem Demontagegraphen des EAA

Zur vereinfachten Darstellung und Reduzierung der Laufzeit der Berechnung der optimalen Demontagetiefen wurden verschiedene Bauteile jeweils in einem Knoten zusammengefasst. Dies gilt insbesondere für Schrauben desselben Typs, die im realen Demontageprozess direkt nacheinander gelöst werden¹⁴. Durch die beschriebene Vereinfachung kann die Anzahl der zu benötigten Knoten von über 200 auf knapp 100 reduziert werden¹⁵.

Die Demontagereihenfolge ist nicht mit einem System von Präzedenzbeziehungen von Bauteilen zu verwechseln. Eine Demontagereihenfolge stellt eine festgelegte Sequenz aller Bauteile dar, ein System von Präzedenzbeziehung stellt lediglich den Rahmen dar, in dem sich eine Demontagereihenfolge bewegen muss. Durch die Verwendung eines Systems von Präzedenzbeziehungen wird der Demontageprozess nichtlinear, was eine höhere Flexibilität der Demontage zur Folge hat. In der folgenden Abbildung 13 wird eine Übersicht über alle Präzedenzbeziehungen des EAA gegeben:

¹⁴ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll eine (Weg-)Optimierung einzelner Ausschraubprozesse nicht betrachtet werden.

¹⁵ Da der Unterschied zwischen Bauteil und Baugruppe fließend sein kann (bspw. bei einer Platine, wo die Unterscheidung maßgeblich von der angestrebten Demontagetiefe abhängt) und gleichzeitig die Demontage mehrerer gleicher Bauteile i.d.R. zusammengefasst wird, sollen diese als *Bauteilgruppen* bezeichnet werden. Der Begriff *Baugruppe* wird weiterhin für Gruppen unterschiedlicher Bauteile verwendet.

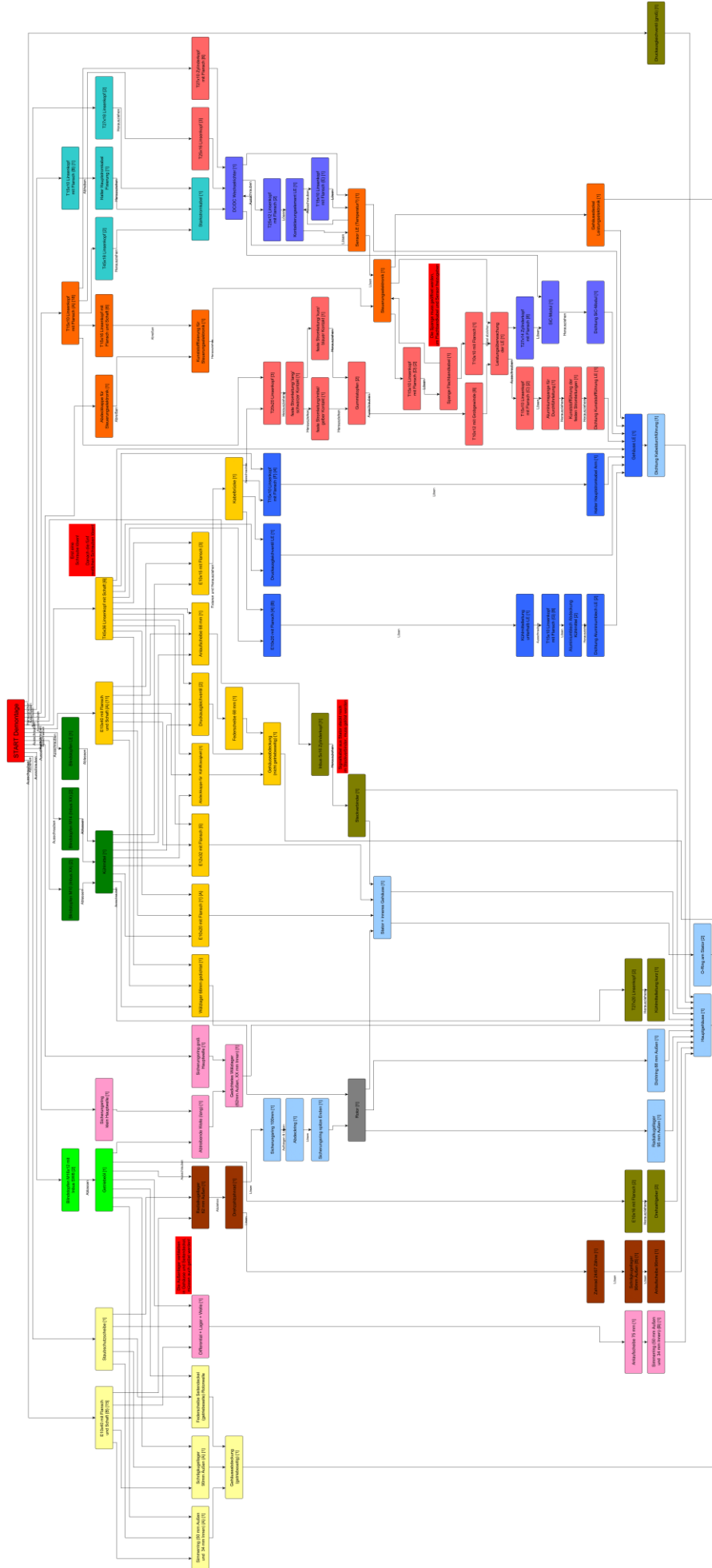


Abbildung 13: Eingefärbter Demontagegraph des EAA. Knoten gleichen Farbe gehören baulich zueinander und dienen einer qualitativen, optischen Clustering (Vergrößerter Demontagegraph mit Legende für Knotenbezeichnungen in Anhang 2 und 3 angehängt)

Der gezeigte Demontagegraph zeigt alle Bauteile, in die das EAA sinnvoll zerlegt werden kann. Zusätzlich wurde ein Knoten für den Start und ein Knoten für das Ende der Demontage eingefügt. Bei der Erstellung des Graphen ist die Färbung der Knoten qualitativ nach der örtlichen Zugehörigkeit der Bauteile zueinander gewählt worden. Nachdem die Präzedenzbeziehungen eingefügt wurden und der Graph mittels einer automatischen Hierarchie-Anordnung ausgerichtet wurde, zeigt die grob erhaltene Nähe farblich identischer Knoten, dass räumliche Nähe häufig in einer Präzedenzbeziehung resultiert.

Die Bezeichnungen der Knoten folgen dieser Nomenklatur:

$$\text{Nummer des Knotens} + \text{Name des Bauteils} + [\text{Anzahl}] + \{\text{Index}\}$$

Der Name des Bauteils beinhaltet distinktive Informationen über das Bauteil. In eckigen Klammern wird die Anzahl der Bauteile angegeben, die zusammengefasst durch einen Knoten dargestellt werden und eine Bauteilgruppe bilden. Da einige identische Bauteilgruppen an grundsätzlich unterschiedlichen Stellen des EAA vorkommen und daher zu grundsätzlich unterschiedlichen Demontageschritten gehören, wurde ein Index eingeführt, um diese voneinander zu differenzieren (in geschweiften Klammern).

Für ein zu demontierendes Produkt können mehrere, leicht voneinander abweichende Demontagegraphen gebildet werden, die entsprechend unterschiedliche Demontagewinne und -quoten erzielen können, wenn die betroffenen Bauteile positive und negative Werte aufweisen. Beispielsweise kann, wenn zwei zusammenhängende Bauteilgruppen aus einer Baugruppe demontiert werden, die Reihenfolge der Demontage dieser frei variiert werden. So liegt im vorliegenden Demontagegraph der *Stator + inneres Gehäuse* vor dem *O-Ring am Stator*. Da der O-Ring im Gegensatz zum Stator einen negativen Wert aufweist, wird lediglich der Stator demontiert und der O-Ring verbleibt (obwohl er quasi demontiert ist), wodurch sich die tatsächliche Demontagequote verringern kann.

Weiterhin ist wichtig für die Ermittlung einer optimalen Demontagetiefe, dass durch Präzedenzbeziehungen keine Schleifen im Netzwerk entstehen¹⁶. Durch den komplexen Aufbau von elektrischen Antriebsaggregaten können jedoch natürliche Schleifen entstehen, die jedoch durch die Einführung von Dummy-Knoten verhindert werden können. Wenn ein Bauteil in zwei Demontageschritten demontiert werden muss und zwischen selbigen ein anderes Bauteil demontiert wird, wird ein Dummy-Knoten benötigt. Dieser wird als wertloser Knoten vor der eigentlichen Schleife platziert und spiegelt somit die Präzedenzbeziehung wider, fließt allerdings nicht in die monetäre Bewertung ein. Ein potenzieller Gewinn durch die Demontage kann entsprechend erst mit dem zweiten (realen) Knoten realisiert

¹⁶ Durch eine Schleife werden alle Knoten innerhalb dieser automatisch demontiert, was in verzerrten Ergebnissen hinsichtlich Demontagequote und -gewinn resultieren kann.

werden. Folgende Abbildung 14 zeigt eine Bauteilgruppe des EAA, welche im Demontagegraph einen Dummy-Knoten benötigt:

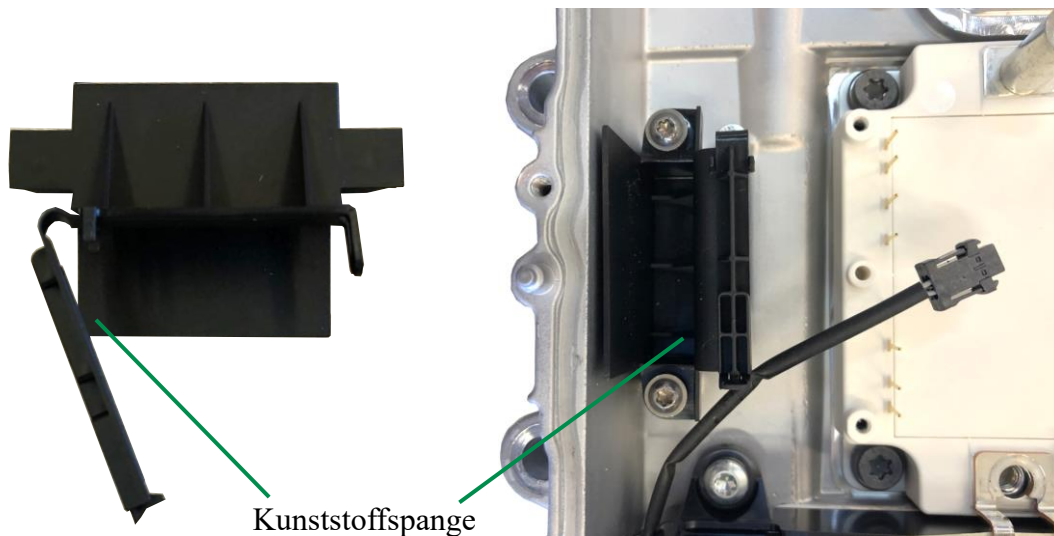


Abbildung 14: Sicht auf Kunststoffspange (links: Demontierter Zustand, rechts: Im Gehäuse der Leistungselektronik halbdemontierter Zustand)

Im Demontageprozess blockiert die Kunststoffspange die Demontage eines Flachbandkabels (nicht im Bild), daher muss die Kunststoffspange vor der Demontage des Flachbandkabels geöffnet werden. Für die endgültige Demontage der Kunststoffspange müssen dann zunächst noch zwei Schrauben gelöst werden, danach kann die Kunststoffspange aus dem Gehäuse der Leistungselektronik gezogen werden. Die erforderlichen Dummy-Knoten sind in Abbildung 13 nicht eingezeichnet.

2.5.2 Algorithmen und Herausforderungen der Graphentheorie

Aufbauend auf dem Labeling Algorithmus von Ford und Fulkerson [Ford-Fulkerson Algorithmus (FFA)] kann das ursprünglich aus dem Tagebau stammende Ultimate Pit Problem¹⁷ (UPP) gelöst werden. Das Ultimate Pit Problem kann in weiten Teilen für die Identifikation optimaler Demontagetiefen adaptiert werden. Im Folgenden soll die Thematik näher erläutert werden.

¹⁷ In der Literatur auch als Open Pit Problem bezeichnet

Labeling Algorithmus von Ford und Fulkerson

Der Labeling Algorithmus von Ford und Fulkerson ist ein Algorithmus der Graphentheorie. Wie L. R. Ford, Jr. und D. R. Fulkerson im Jahr 1956 zeigen konnten, wird der FFA genutzt, um einen maximalen Fluss¹⁸ in einem Digraphen¹⁹ zu finden, der jeweils eine Quelle und eine Senke aufweist [Ford und Fulkerson, 1956]. Da laut dem *Max-Flow-Min-Cut-Theorem* der maximale Fluss in einem Netzwerk gerade den Wert des minimalen Schnitts hat, kann der maximale Fluss entweder durch die Identifikation des minimalen Schnitts oder die sukzessive Suche von Pfaden mit freien Restkapazitäten gefunden werden [Menger, 1927]. Laut Rhys und Balinski kann die Ermittlung einer gewinnoptimierten Demontagetiefe nach der Verrechnung von Kosten der jeweiligen Demontage mit dem Wert des jeweiligen Blocks und weiteren Transformationen des Demontagegraphen als Maximalflussproblem dargestellt werden [Rhys, 1970; Balinski, 1970].

Ultimate Pit Problem

Die Lösung des Ultimate Pit Problems wird auch als Ultimate Spare (US) bezeichnet. Das Ultimate Pit Problem ist ein Problem aus dem Bereich des Tagebaus, wobei das UPP umfasst, welche Kontur eine offene Grube annehmen soll, sodass eine gewinnmaximierende Menge werthaltigen Materials aus der Grube ausgebracht werden kann. Um festzustellen, welcher geometrische Volumenkörper in der Grube tatsächlich ausgebracht werden soll, wird ein dreidimensionales Raster durch den Erdkörper gelegt und den somit entstandenen Blöcken ein Wert zugewiesen. Der Wert der Blöcke hängt von den jeweils enthaltenen, werthaltigen Materialien sowie den für die Ausbringung jeweils aufzuwendenden Kosten ab und soll daher folgend als *Nettowert* bezeichnet werden²⁰. Der Nettowert eines Blocks kann folglich negativ sein. Weiterhin können (wie bei der Demontage eines Produkts) Blöcke die Ausbringbarkeit anderer Blöcke beeinflussen (im Tagebau typischerweise benachbarte Blöcke), somit herrschen zwischen unterschiedlichen Blöcken ebenfalls Präzedenzbeziehungen [Lerchs und Grossmann, 1965] [Bai et al., 2017].

¹⁸ Eine klassische Anwendung des FFA und die Ermittlung des maximalen Flusses findet in Transportnetzwerken statt, beispielsweise Stromtrassen, Datennetzwerke, Abwasserkanäle, etc. Der maximale Fluss bezeichnet dabei die maximale Menge, die von einer Quelle zu einer Senke über die jeweiligen Knoten und Kanten transportiert werden kann.

¹⁹ Gerichteter Graph. In einem gerichteten Graph sind gerichtete Kanten enthalten, die nur eine Richtung durchlaufen werden können.

²⁰ Der Bruttowert eines Blocks und die mit der Ausbringung verbundenen Kosten können direkt miteinander verrechnet werden (\rightarrow Nettowert), da die Ausbringung jedes Blocks immer mit einem definierten Aufwand verbunden ist und dieser nicht von den umliegenden Blöcken abhängt. Ökonomische Interdependenzen zu anderen Blöcken werden durch Präzedenzbeziehungen ausgedrückt [siehe auch Rhys, 1970; Balinski, 1970].

Wie kann das Ultimate Pit Problem gelöst werden?

Eine Möglichkeit zur Lösung des UPP kann nach Picard durch Modifikationen am ursprüngliche Demontagegraph G vorgenommen werden [Picard, 1976].

1. Die Kanten der Präzedenzbeziehungen werden umgekehrt und mit einem Wert λ versehen, der hoch genug ist, um nicht als Bottleneck eine optimale Lösung zu blockieren (üblicherweise $\lambda = \infty$)
2. Eine Quelle s (engl. start) und eine Senke t (engl. target) werden eingefügt
3. Blöcke mit einem positiven Nettowert werden von der Quelle angebunden; Blöcke mit negativem Nettowert werden an die Senke angebunden. Der Betrag des jeweiligen Werts jedes Knotens wird zur Kapazität der jeweils neu eingefügten Kante.

Das zugrundeliegende Problem kann als Maximierungsproblem angesehen werden, wobei:

$$\text{Max } z = \sum_{i=1}^n m_i x_i$$

$$x_i \leq x_j \text{ für } (v_i, v_j) \in A$$

$$x_i = 0, 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

z = Wert des maximal closure / US m = Nettowert Knoten

A = Menge aller Kanten im Graphen G v = Knoten

v_j = notwendig zu demontierender direkter Vorgänger von v_i

Durch Einfügen von λ und $a_{ij}x_i(-1 + x_j) = 0$ sowie Transformierung in Minimierungsproblem kann das Problem wie folgt dargestellt werden:

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i=1}^n -m_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda a_{ij} x_i (1 - x_j)$$

$$x_i = 0, 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Wobei a_{ij} ein Element (i, j) der Inzidenzmatrix G ist:

$$a_{ij} = 1, \text{ für } (v_i, v_j) \in A$$

$$a_{ij} = 0, \text{ sonst}$$

Folgend soll ein Beispiel für ein Open Pit Problem gegeben werden:

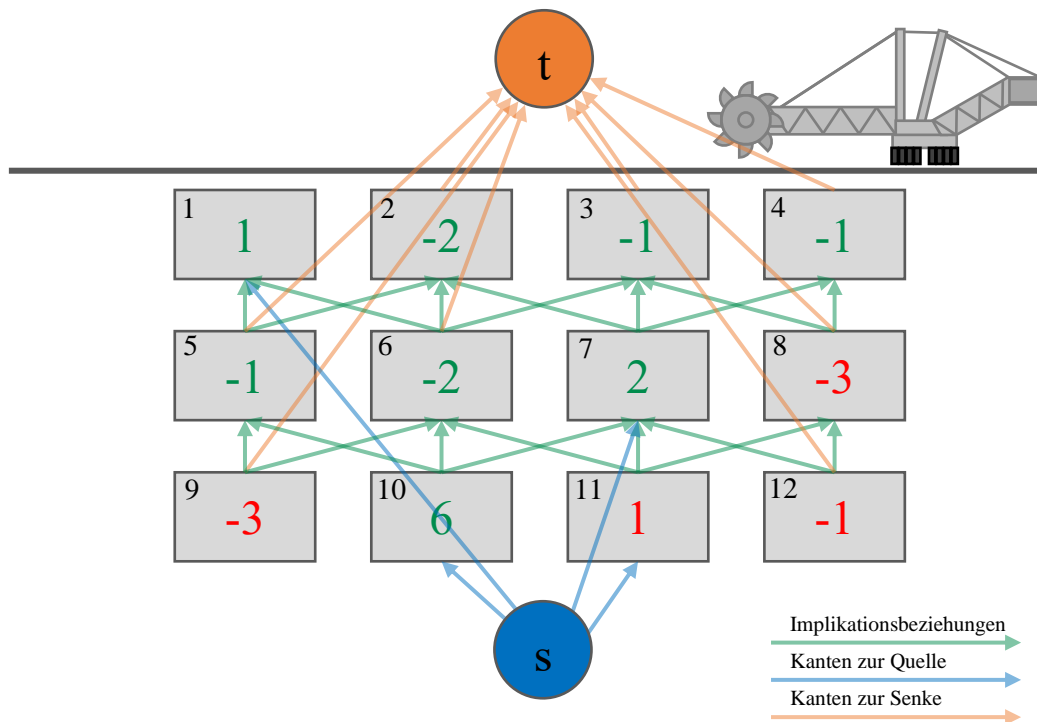


Abbildung 15: Beispiel für ein Open Pit Problem

Im in Abbildung 15 dargestellten Open Pit Problem wurden bereits die Modifikationen nach Picard vorgenommen. Die schwarzen Ziffern dienen als Index der Blöcke. Mittig in jedem Block / Knoten wird der Nettowert dargestellt, wobei grün gefärbte Blöcke / Knoten später im maximal closure enthalten sind, sprich demontiert werden, rot gefärbte Blöcke / Knoten werden nicht demontiert. Die Blöcke 1 – 4 liegen an der Oberfläche und unterliegen keinen Demontagerestriktionen. Das Maximierungsproblem kann auch als lineares Problem dargestellt werden:

$$\text{Max } x = x_1 - 2x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - 2x_6 + 2x_7 - 3x_8 - 3x_9 + 6x_{10} + x_{11} - x_{12}$$

$$x_5 \leq x_1, x_6 \leq x_1, x_5 \leq x_2, x_6 \leq x_2,$$

$$x_7 \leq x_2, x_6 \leq x_3, x_7 \leq x_3, x_8 \leq x_3,$$

$$x_7 \leq x_4, x_8 \leq x_4, x_9 \leq x_5, x_{10} \leq x_5,$$

$$x_9 \leq x_6, x_{10} \leq x_6, x_{11} \leq x_6, x_{10} \leq x_7,$$

$$x_{11} \leq x_7, x_{12} \leq x_7, x_{11} \leq x_8, x_{12} \leq x_8,$$

$$x_i = 0, 1, \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

Das Problem lässt sich mit dem FFA oder nach dem Max-Flow-Min-Cut-Theorem lösen, wobei alle in letzter Instanz gelabelte Knoten im maximal closure / US enthalten sind. Die Summe der Nettowerte aller im maximal closure enthaltenen Knoten / Blöcke entspricht dem Wert des maximal closure [Picard, 1976].

Graphisch lässt sich die Lösung wie folgt darstellen: Nach der Durchführung vom FFA werden alle Kanten, die nicht ausgelastet sind, geschnitten. Im maximal closure sind nun alle Knoten / Blöcke enthalten, die direkt oder über Umwegen von der Quelle aus erreicht werden können.

Wie lässt sich das Ultimate Pit Problem auf die Demontage elektrischer Antriebsaggregate beziehen?

Die Demontage von Bauteilen aus einem elektrischen Antriebsaggregat ist insofern mit einem Tagebau vergleichbar, als dass die Anwesenheit bestimmter Bauteile die Demontierbarkeit anderer Bauteile verhindern kann, also ebenfalls Implikationsbeziehungen vorhanden sind. Weiterhin kann jedem Bauteil und jedem Demontageschritt gerade ein Wert zugewiesen werden, sodass eine optimale Demontagetiefe ermittelt werden kann [Westhof, 2021]. Letztendlich ist die oberste Schicht eines Tagebaus mit den initial zu demontierenden Bauteilgruppen im elektrischen Antriebsaggregat sowie das „Graben in die Tiefe“ mit der „Demontage in das Produkt hinein“ zu vergleichen.

Annahmen und Abgrenzungen

Der Restwert eines teildemontierten Produktes wird bei der Anwendung des Ultimate Pit Ansatzes in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt, da nicht klar ist, welche weiteren Schritte mit dem teildemontierten Produkt vollzogen werden. Gegebenenfalls ist es ökonomisch sinnvoll, teildemontierte Aggregate für eine spätere Demontage einzulagern und nicht direkt stofflich zu recyceln. Die Demontage könnte fortgeführt werden, wenn der Wert für bestimmte Bauteile ansteigt. Im teildemontierten Zustand fallen aufgrund des geringeren Platzbedarfs vermutlich geringere Lagerkosten an als im vollständig demontierten Zustand. Weiterhin sollen die Werte aller Bauteile nach einer initialen Zustandsprüfung des Gesamtaggregats als gegeben angenommen werden.

Ergänzend wird die Demontagetiefe nicht in Relation zur aufzuwendenden Demontagezeit betrachtet, die relevant für den ökonomischen Betrieb eines Demontagemoduls ist [Zeller et al., 2016]. Die Demontagezeit wird anderweitig einbezogen, indem die Kosten der Nutzungsdauer des Demontagetechnikums auf die Demontagedauer jedes Bauteils heruntergerechnet werden.

2.5.3 Alternative Lösungsansätze

Neben dem in der vorliegenden Arbeit gewählten Ansatz zur Optimierung der Demontagetiefe werden in der Literatur eine Reihe unterschiedlicher Ansätze verfolgt. Einige sollen folgend kurz beschrieben werden:

Hochbaum und Chen [2000] untersuchen die Performance des o.g. Algorithmus von Lerchs und Grossman [1965] und vergleichen diese mit dem *Push-Relabel-Algorithmus* nach

Goldberg und Tarjan [1988] beim Open Pit Mining Problem. Dabei zeigt sich, dass der Push-Relabel-Algorithmus bei der Vielzahl an Szenarien deutlich schneller ist, jedoch höhere Speicherkapazitäten benötigt. Durch den modularen Aufbau von Elektrofahrzeugen kann die Gesamtanzahl von Bauteilen in einem Fahrzeug in jeweils abgeschlossene, kleinere Untermengen zerlegt werden (Beispiel: EAA). Die Laufzeit des in Kapitel 5 beschriebenen Programms bei circa 100 Knoten und circa 180 Kanten beläuft sich auf Hundertstel-sekunden²¹. Entsprechend ist eine kürzere Laufzeit nicht von entscheidender Bedeutung für die vorliegende Herausforderung.

Der von Güngör und Gupta [2001] erarbeitete Ansatz nutzt einen Branch-and-Bound Algorithmus zur Identifikation optimaler Demontagetiefen in einem Demontagebaum²². Dieser wird durch einen Computer-Aided-Design (CAD) basierten Algorithmus, der geometrische Zusammenhänge der zu demontierenden Bauteile untersucht, automatisiert erstellt [Güngör und Gupta, 2001]. Der beschriebene Ansatz ist nicht vollständig auf das vorliegende Problem übertragbar, da Bauteile im elektrischen Antriebsaggregat nicht nur durch rein geometrische Zusammenhänge blockiert werden. Beispielsweise werden bestimmte Klebeverbindungen, die Ausbringung von Betriebsmitteln wie Getriebeöl oder die Berücksichtigung von spezifischen Demontageschritten nicht berücksichtigt. Hierzu sollen als Beispiel multilateral zugängliche Bauteile genannt werden, die kraftschlüssig montiert wurden; diese können unter Umständen im Hinblick auf zerstörungsfreie Demontage nicht durch Ziehen demontiert werden, sondern müssten herausgedrückt werden – wodurch eine entsprechende Seite des Bauteils trotz offensichtlicher Zugänglichkeit nicht genutzt werden kann, und eine andere Seite des Bauteils erst freigelegt / demontiert werden muss.

Neben den o.g. genannten Algorithmen haben Baazouzi et al. [2021] einen genetischen Algorithmus zur Optimierung der Demontagetiefe von Traktionsbatterien verwendet. Durch den quasi-linearen Demontagegraphen der verwendeten Traktionsbatterie ist eine Vergleichbarkeit mit dem vorliegenden Problem nicht gegeben. Nach Anwendung des genetischen Algorithmus kann daher beispielsweise eine fixierte Demontagesequenz erzeugt werden. Aufgrund der im Vergleich deutlich geringeren Anzahl von Knoten und Kanten kann ebenfalls keine vergleichende Aussage über die Laufzeit getätigt werden. Baazouzi et al. [2021] erreichen vergleichsweise hohe Demontagequoten und beschreiben Ihren Lösungsansatz als recheneffizient. Hui et al. [2008] nutzen in Ihrem Ansatz zur Demontageplanung ebenfalls einen genetischen Algorithmus, dabei wird der zugrundeliegende Demontagegraph auf Basis von CAD Daten erzeugt. Hierbei fließt die Anzahl der Knoten laut

²¹ Gemessen auf einem Laptop der gehobenen Mittelklasse, Baujahr 2021.

²² Knoten in einem Demontagebaum weisen im Gegensatz zu einem allgemeineren Demontagegraph immer genau einen direkten Vorgänger auf und sind daher nicht zu verwechseln.

Hui et al. wesentlich in die Laufzeit der Bildung des eigentlichen Demontagegraphs ein, da pro Knoten / Bauteil zusätzlich die Greiferart und die Demontagerichtung einbezogen werden. Bei Versuchsläufen wurden 120 von 200 Knoten vom Demontagealgorithmus besucht; für das vorliegende Problem wird allerdings eine ganzheitliche Betrachtung des Demontagegraphs bevorzugt.

2.6 Allgemeine Erkenntnisse aus der Industrieumfrage

Für die vorliegende Dissertation wurde eine Umfrage [Hansen und Seelig, 2021] durchgeführt, in der Unternehmen deutscher Schlüsselindustrien zu den Themen recyclinggerechte Konstruktion und Demontage befragt wurden. Die Methoden und die Vorgehensweise dieser Umfrage werden im folgenden Kapitel 3.1 näher erläutert. Insbesondere die spezifischen Thesen und Fragen sollen im folgenden Kapitel 4 detailliert bearbeitet und später diskutiert werden. Die allgemeinen Erkenntnisse der Umfrage sollen zunächst an dieser Stelle betrachtet werden und die Thematik näher einleiten sowie die Bedeutung der in der vorliegenden Dissertation behandelten Themen darstellen.

Zunächst sollen einige allgemeine Fragen zum Teilnehmendenfeld einen Eindruck über dieses schaffen. Es zeigt sich, dass ein Großteil der Teilnehmenden aus der Branche *Anlagenbau* stammt (Frage 1, n = 110, Mehrfachauswahl), was durch die explizite Einladung an Mitglieder des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und des Verbands der Automobilindustrie (VDA) erklärt werden kann. Darüber hinaus produziert mit knapp 60 % die Mehrheit der teilnehmenden Unternehmen Endprodukte (Frage 2, n = 107, Mehrfachauswahl). Vor dem Hintergrund der erweiterten Herstellerverantwortung, die im Rahmen der EU-Richtlinie 2018/851 verankert wurde, sind insbesondere die Hersteller von Endprodukten angehalten, eine Kreislaufführung ihrer Produkte zu beachten [Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2018].

Die Antworten der dritten Frage (n = 106, Einfachauswahl) zeigen, dass die Teilnehmenden eher kleine bis mittelständische Unternehmen [Klodt, 2018] sind, über die Hälfte der teilnehmenden Unternehmen beschäftigt weniger als 250 Mitarbeitende.

Weiterhin wurde gefragt, für wie umweltbewusst die Teilnehmenden ihre Unternehmen halten (Frage 5, n = 96, Schieberegler):

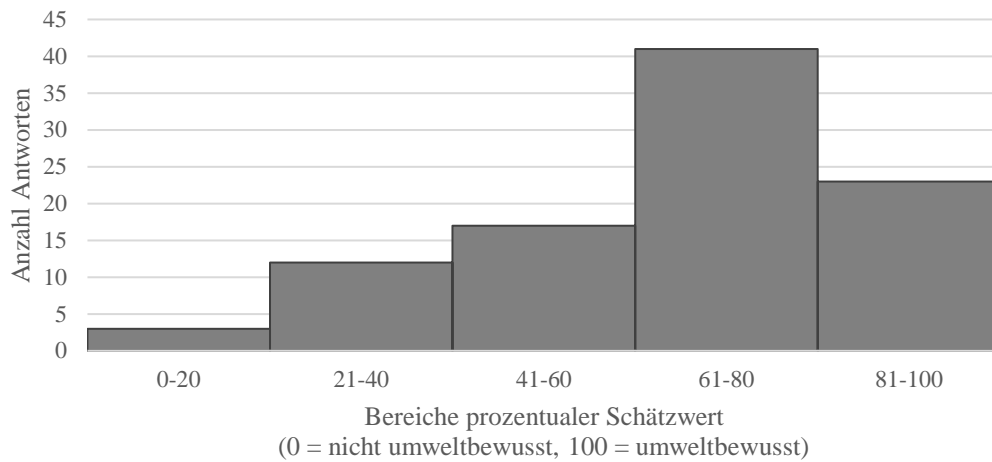


Abbildung 16: Geschätztes Umweltbewusstsein der befragten Unternehmen

Dabei zeigt sich, dass sich die Teilnehmenden tendenziell als umweltbewusst einschätzen. Der Mittelwert liegt bei 64,84, die Standardabweichung liegt bei circa 21,21.

Für die befragten Unternehmen stehen unterschiedliche Managementsysteme bereit, unter anderem für das Management von Umwelt, Nachhaltigkeit, Ideen oder Energie (Frage 6, Schieberegler):

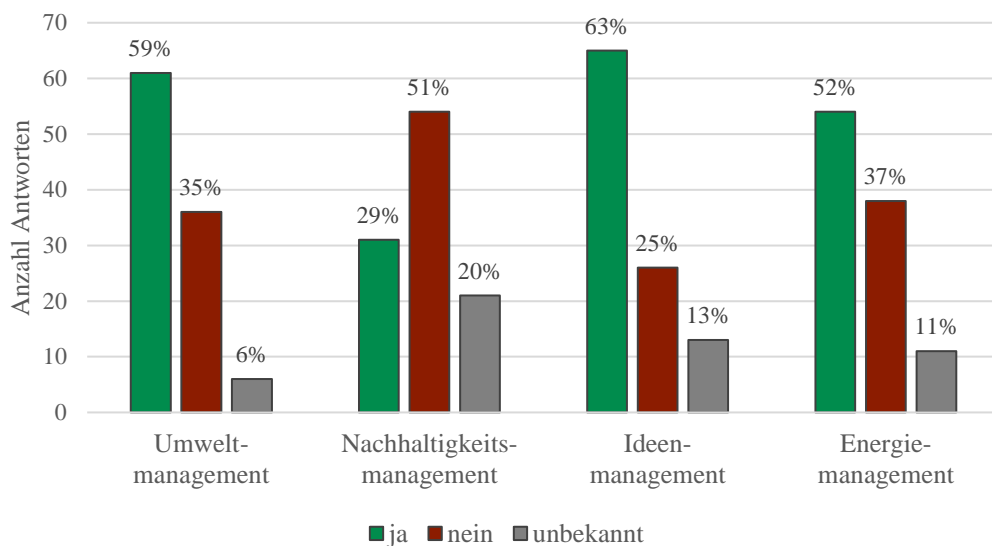


Abbildung 17: Verbreitung verschiedener Managementsysteme in Unternehmen

Im Teilnehmendenfeld zeigt sich, dass insbesondere Managementsysteme für Ideen (63 %, n = 104) sowie Umwelt (59 %, n = 103) vorhanden sind. Nachhaltigkeitsmanagementsysteme sind bei einer knappen Mehrheit der Teilnehmenden nicht vorhanden (51 %, n = 106). Laut Schaltegger et al. [2012] sind vor circa zehn Jahren immer mehr Nachhaltigkeitsmanagementsysteme in Unternehmen implementiert worden, es stellt sich an dieser Stelle jedoch die Frage, wie nachhaltig die von Schaltegger et al. aufgezeigte Entwicklung war.

Weiterhin zeigt sich, dass Ressourceneffizienz bei den teilnehmenden Unternehmen eine eher hohe Bedeutung hat (Frage 7, Schieberegler):

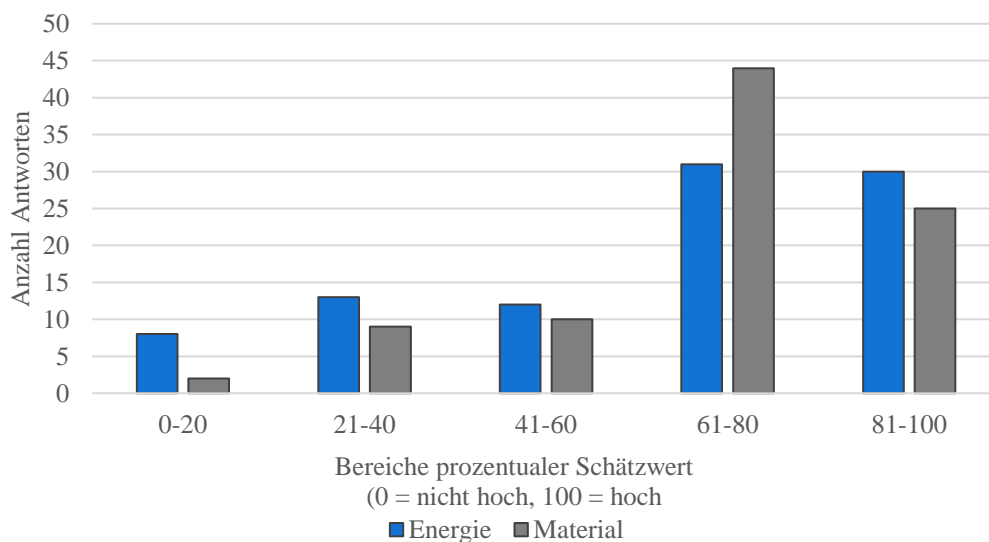


Abbildung 18: Bedeutung von Ressourceneffizienz hinsichtlich Energie und Material

Die Mittelwerte liegen bei 64,57 (Energie) und 70,17 (Material), die Standardabweichungen bei 26,55 (Energie, $n = 94$) und 21,53 (Material, $n = 90$). Die Antworten der Teilnehmenden korrelieren nach Bravais-Pearson mit circa 0,43, entsprechend liegt ein tendenziell positiver Zusammenhang zwischen Ressourceneffizienz hinsichtlich Energie und Material bei den befragten Unternehmen vor. Insgesamt hat Ressourceneffizienz eine eher hohe Bedeutung in den befragten Unternehmen, sodass die Vermutung angestellt wird, dass diese tendenziell offen für Maßnahmen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz sein könnten.

Ergänzend wurden gefragt, ob den Teilnehmenden der Begriff *recyclinggerechte Konstruktion* bekannt ist (Frage 8, $n = 99$, Einfachauswahl). Dabei bejahen rund 55 % der Teilnehmenden diese Frage. Die Antworten von Frage 8 korrelieren punktbiserial mit der Bedeutung von Ressourceneffizienz (Frage 7) hinsichtlich *Energie* mit dem Faktor 0,24, hinsichtlich *Material* mit dem Faktor 0,18. Beide Korrelationen sind eher schwach positiv einzustufen, es wäre allerdings eher eine stärkere Korrelation zwischen recyclinggerechter Konstruktion und Ressourceneffizienz hinsichtlich Material zu erwarten gewesen, da recyclinggerechte Konstruktion eher die materialspezifischen Eigenschaften als die energiespezifischen Eigenschaften eines Produktes beeinflusst.

Die darauffolgende Frage 9 ($n = 48$, Freitext) war nur für Teilnehmende sichtbar, die Frage 8 bejaht haben. Es wurde offen gefragt: „Was verstehen Sie unter „recyclinggerechter Konstruktion“?“. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde der deduktiv-induktive Hybridansatz gewählt; nach diesem bedeutet *recyclinggerechte Konstruktion* vor allem die Trennfähigkeit von Produkten (34 Nennungen), daneben sind die Demontierbarkeit (25 Nennungen) sowie, in der vorherigen Frage erwartet, Materialien besonders wichtig

(20 Nennungen). Aufgrund der vorrangigen Nennung von Trennfähigkeit und Demontierbarkeit lässt sich vermuten, dass der thematische Fokus der vorliegenden Dissertation hinsichtlich Demontage sinnvoll ist.

Die darauffolgende Frage 10 war ebenfalls offen mit einem Freitextfeld gestellt (n = 66); es wurde nach der Rolle gefragt, die *recyclinggerechte Konstruktion* im Unternehmen der Befragten innehat. Für die Auswertung wurden die Antworten deduktiv nach Wichtigkeit der *recyclinggerechten Konstruktion* sowie Art der Motivation für diese (intrinsisch oder extrinsisch) geclustert. Dabei zeigt sich, dass recyclinggerechte Konstruktion bislang eine eher untergeordnete Rolle in den befragten Unternehmen spielt (Wichtigkeit: keine – 37 %, niedrig – 24 %, mittel – 26 %, hoch – 13 %). Unternehmen, die recyclinggerechter Konstruktion eine hohe Wichtigkeit zuweisen, weisen eine überdurchschnittliche Bedeutung von Ressourceneffizienz hinsichtlich Energie (72,3, circa 12 % über Durchschnitt) und Material (84,3, circa 20 % über Durchschnitt) auf.

Weiterhin sagt die Mehrheit der Teilnehmenden Unternehmen (circa 61 %), dass, auch nachdem innovativere Produktserien auf den Markt kommen, immer noch eine signifikante Nachfrage nach älteren Generationen der Produkte besteht (Frage 13, n = 89, Einfachauswahl). Daher lässt sich die Vermutung aufstellen, dass die Aufbereitung von Produkten in Herstellerqualität sinnvoll sein kann. Darüber hinaus gibt ein Großteil der Teilnehmenden an (circa 71 %), dass gebrauchte Produkte in Ihrem Unternehmen wiederaufbereitet werden (Frage 15, n = 91). Aus den Erkenntnissen aus den Fragen 10 und 13 lässt sich vermuten, dass es einen Markt für wiederaufbereitete Produkte gibt. Entsprechend gilt es, diesen mit geeigneten Technologien wie der automatisierten Demontage weiter zu bedienen.

Die Teilnehmenden, in deren Unternehmen gebrauchte Produkte nicht wiederaufbereitet werden, wurden gebeten, Gründe dafür zu nennen (Frage 16, n = 24, Freitext). Nach dem deduktiv-induktiven Hybridansatz wurden insbesondere *hohe Kosten / hoher Aufwand*, *hohe Lebensdauer der Produkte* sowie *technische Aktualität* als wesentliche Gründe genannt. Insbesondere am Punkt *hohe Kosten / hoher Aufwand* zeigt sich, dass ein Bedarf für günstigere Demontage besteht, der auch durch DfR / DfD und entsprechende Demontage-techniken gedeckt werden könnte.

Weiterhin wurden die Teilnehmenden (n = 66) gebeten zu schätzen, wie hoch die Bereitschaft ihrer Kunden ist, wiederaufbereitete Produkte / Ersatzteile zu beziehen (Frage 18, Schieberegler).

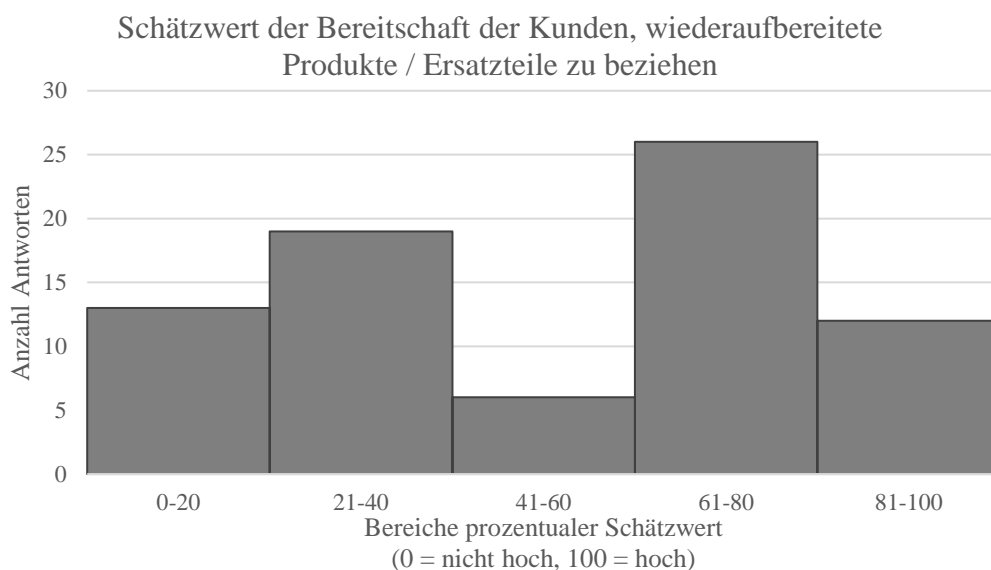


Abbildung 19: Geschätzte Bezugsbereitschaft der Kunden wiederaufbereiteter Produkte und Ersatzteile

Dabei zeigt sich eine tendenziell bimodale Verteilung der Antworten, der Mittelwert liegt bei 52,57, die Standardabweichung bei 30,06. Weiterhin wurden die Antworten der Fragen 13 und 18 punktbiserial korreliert – schätzen die Unternehmen, die eine signifikante Nachfrage nach älteren Produkten angeben, die Bezugsbereitschaft ihrer Kunden für wiederaufbereitete Produkte / Ersatzteile ebenfalls hoch ein? Die Antworten korrelieren leicht positiv mit dem Faktor 0,11, entsprechend wird vermutet, dass die Nachfrage älterer Produkte sich auf Neuprodukte bezieht. Daher werden zur Kontrolle die Fragen 15 und 18 punktbiserial korreliert – haben Unternehmen, die gebrauchte Produkte wiederaufbereiten auch Kunden, die eine entsprechende Bezugsbereitschaft dieser aufweisen? Beide Fragen korrelieren wie erwartet positiv recht stark mit dem Faktor 0,43. Zur weiteren Kontrolle wurden die Fragen 13 und 15 korreliert – bereiten die Unternehmen, deren Kunden auch ältere Produkte signifikant nachfragen, ihre Produkte wieder auf? Hierbei weisen die Antworten einen Phi-Koeffizienten von 0,13 auf, es besteht also ein schwach positiver Zusammenhang. Damit sind die Antworten der Fragen 13, 15 und 18 zueinander schlüssig, wenn auch die Frage zunächst offenbleibt, warum Unternehmen, die signifikante Nachfrage nach älteren Produkten aufweisen, ihre Produkte nicht aufbereiten. Über eine mögliche Antwort soll in Kapitel 4 genauer eingegangen werden.

Insgesamt zeigen die ersten allgemeinen Erkenntnisse der Umfrage, dass die befragten Unternehmen sich tendenziell für umweltbewusst halten und Ressourceneffizienz eher eine hohe Bedeutung zuweisen. Dabei geben viele Unternehmen an, dass auch ältere Produkte nachgefragt und auch Produkte teilweise im Unternehmen aufbereitet werden. Entsprechend lässt sich vermuten, dass unternehmensseitig ein Bedarf für Technologien besteht, Produkte automatisiert zu demontieren, um die anfallenden Teile dann einer Wiederverwendung zuzuführen und diese zu marktfähigen Produkten zusammenzusetzen.

3. Methoden und Vorgehensweise

3.1 Industrieumfrage

Zur Erfassung realitätsnaher Daten wurde eine empirische Industrieumfrage durchgeführt [Hansen und Seelig, 2021]. Die Umfrage wurde online durchgeführt und hat sich an Mitglieder des VDMA und des VDA gerichtet. Darüber hinaus wurden die Mitarbeitenden des VDMA zur Umfrage eingeladen. Die Industriezweige Maschinen- und Anlagenbau sowie Automobil stellen einen bedeutenden Teil der deutschen Industrie dar [Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022 (1), (2)]. Darüber hinaus sind die Produkte der genannten Industriezweige aufgrund ihrer komplexen Produktstruktur und der besonders werthaltigen Materialmischungen für ein hochwertiges Recycling geeignet [Hansen und Seelig, 2021]. Für die Durchführung der Umfrage wurde das webbasierte Umfragetool *LamaPoll* der Firma Lamano GmbH & Co. KG verwendet.

Onlineumfragen weisen im Vergleich zu anderen statistischen Erhebungsmethoden (Interviews, offline Fragebögen, Beobachtung, etc.) eine Reihe von Vorteilen auf. Unter anderem wird der Interviewende entlastet, Daten können direkt und übersichtlich dargestellt werden und es gibt keine Übertragungs- bzw. Eintragungsfehler durch Dritte (bspw. den Interviewenden). Weiterhin können eine höhere Objektivität und Standardisierung erreicht werden. Allgemein lassen sich ein vergleichsweise geringerer Aufwand, geringere Kosten und eine höhere Reichweite bei Onlineumfrage feststellen. Als Nachteile sind vor allem eine geringe Rückläuferquote durch niedrige Teilnahmebereitschaft sowie potenzielle auftretende systematische Fehler durch bspw. Computer-Hardware oder das Umfragelayout zu nennen [Faulbaum, 2019]. Insbesondere durch die Anfang 2020 ausgebrochene Covid-19 Pandemie und die damit verbundene, weitreichende Homeoffice-Pflicht hat sich eine Onlineumfrage als die geeignetste Umfragemethode herausgestellt.

Potenzielle Teilnehmende der Umfrage wurden Anfang März 2021 per E-Mail eingeladen. Dazu wurden in erster Instanz rund 4200 Emails versendet. Weitere rund 3500 Erinnerungsemails wurden an potenzielle Teilnehmende versendet, die nicht explizit um keine weiteren Einladungen zu Umfragen gebeten haben.

Die Umfrage war zwischen dem 01.03.2021 und dem 08.04.2021 zur Teilnahme freigegeben, wobei die letzte Teilnahme am 22.03.2021 verzeichnet wurde. Nach der ersten Email konnten 103 Teilnehmende registriert werden. Durch die Erinnerungsmail konnte die Anzahl der Teilnehmenden auf 167 gesteigert werden. In Summe haben 79 Teilnehmende die Umfrage bis zum Ende bearbeitet. Maximal konnten 40 Fragen, beziehungsweise offene

Antwortfelder²³, beantwortet werden. Da vier bedingt sichtbare Fragen genutzt wurden, konnte eine vollständige Beantwortung des Fragebogens mit 36 Antworten erreicht werden. Eine Auflistung aller Fragen befindet sich in Anhang 1.

Es wurden Fragen mit Mehrfach- und Einfachauswahl, Bewertungsfragen mittels Schieberegler als auch Fragen mit Freitextfeldern verwendet. Bei Fragen mit vorgegebenen Antwortmöglichkeiten wurde zudem die Antwortmöglichkeit durch ein Freitextfeld geschaffen. Bei Schieberegler wurde die Skalierung so gewählt, dass eine möglichst geringe Beeinflussung der Teilnehmenden durch die Formulierung entsteht. Beispielsweise konnte zwischen „hoch“ und „nicht hoch“ gewählt bewertet werden. Weiterhin konnte bei Schieberegler auch die Antwort „keine Antwort“ gewählt werden, sodass Antworten per Schieberegler, sobald dieser von einem Teilnehmenden bewegt wurde, wieder aus der Wertung genommen werden können. Somit sollte eine Verzerrung des Antwortbildes vermieden werden. Zur besseren Übersicht werden im folgenden Kapitel 4.2 die Antworten bei Fragen mit Schieberegler in Intervalle á 20 Prozentpunkte unterteilt. Bei Mehrfach- und Einfachauswahlfragen, bei denen die Antwortmöglichkeiten nominal skaliert sind, wurden Anzeigereihenfolge der Antwortmöglichkeiten für die Teilnehmenden randomisiert. Dies sollte ebenfalls zur Minderung einer Verzerrung des Antwortbildes beitragen [Zong, 2023]. Für die Auswertung der offenen Frage wird ein deduktiv-induktiver Hybridansatz²⁴ gewählt.

Teilnehmende, die lediglich Angaben zu Ihrem Arbeitgeber und Ihrer Rolle im Unternehmen gemacht haben und keine weiterführenden inhaltlichen Fragen beantwortet haben, werden nicht gewertet. Die Antworten von Teilnehmenden werden bis zur jeweils letzten Antwort gewertet, danach werden auch Fragen, die lediglich angesehen wurden, nicht mehr als beantwortet gewertet. Dadurch ergibt sich insbesondere bei den später gestellten Fragen eine im Vergleich geringere Anzahl an Teilnehmenden. Durch das konsequente Filtern von passiven Teilnehmenden soll ebenfalls eine Verzerrung des Antwortbildes vermieden werden. Weiterhin werden für die Korrelation von Antworten lediglich die Antwortpaare von Teilnehmenden gewertet, die beide Fragen beantwortet haben.

²³ Im Folgenden sollen Fragen und offene Antwortfelder zur besseren Darstellung gemeinsam als *Fragen* bezeichnet werden

²⁴ Beim deduktiv-induktiven Hybridansatz werden für die Auswertung der offenen Fragen zunächst aus der Frage abgeleitet sinnhafte Cluster gebildet, denen die Antworten zugewiesen werden können. Bei der tatsächlichen Sichtung der Antworten werden die deduktiven Cluster um weitere (induktive) Cluster ergänzt.

3.2 Tool zur Ermittlung optimaler Demontagetiefen

Für die Ermittlung optimaler Demontagetiefen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit unterschiedliche Computerprogramme gewählt. Die Auswahl der Programme basiert auf den von Westhof [2021] verwendeten Programmen.

Darstellung des Demontagegraphs

Zur Darstellung des Demontagegraphs wird das Programm yEd der yWorks GmbH verwendet. yEd arbeitet mit dem .graphml Dateiformat, welches für die Graphendarstellung optimiert ist, jedoch auf xml basiert und damit als gängige Schnittstelle mit Python interagieren kann. Eine Besonderheit von yEd ist die Möglichkeit, Knoten und Kanten mit bestimmten Algorithmen, deren Parameter frei wählbar sind, automatisiert graphisch anzuordnen. Entsprechend wurde für die Darstellung des Demontagegraphen ein hierarchischer Algorithmus angewandt. Im .graphml Dateiformat können u.a. neben dem Knotennamen weitere knotenspezifische Informationen gespeichert werden, sodass eine Pflichtdemontage hinterlegt werden kann. Daneben können optional auch Bauteilwerte gespeichert werden, da diese jedoch leichter in Excel für die Sensitivitätsanalyse modifiziert werden können, wird darauf verzichtet. Somit dient yEd in erster Instanz zur Darstellung der Logik des Demontagegraphen und nicht der Bauteilwerte.

Datenbasis

Zur Speicherung der Bauteilwerte wird das Programm Excel der Microsoft Corporation verwendet. Hierin können vergleichsweise nutzerfreundlich Bauteilwerte auf Basis und der durchgeführten Sensitivitätsanalyse modifiziert und die generierten Ergebnisse graphisch dargestellt werden. Vor allem die Veränderung ganzer Datensätze lässt sich im Vergleich zu yEd / .graphml leicht umsetzen. Da Excel das sehr verbreitete .xlsx Dateiformat nutzt, können leicht entsprechende Bibliotheken zum Lesen und Schreiben von Daten in Python implementiert werden.

Hintergrundberechnungen und Zusammenführung

Zur Implementation des Demontagealgorithmus, aller peripheren Berechnungen und der Zusammenführung der genutzten Programme wird ein Python-Script verwendet. Python ist eine sehr verbreitete Programmiersprache, die vergleichsweise leicht zu erlernen ist und durch die breite Nutzerbasis eine entsprechende Anzahl von Bibliotheken etc. aufweist.

Graphische Darstellung des Programms

Zur Ergebnisdarstellung und der Interaktion bzw. Modifikation des Graphen wird ein *Graphical User Interface* (GUI) genutzt, das auf dem Anwendungsframework Qt der Qt Group basiert. Für die Kommunikation zwischen Qt und Python sind gut funktionierende Biblio-

theiken vorhanden, weiterhin ist Qt besonders anwenderfreundlich. Qt kann zudem plattformübergreifend verwendet werden, sodass eine spätere Nutzung des Programms leichter gestaltet werden kann.

3.3 Design der Werkzeuge und Testbench

Für die Planung, die Konstruktion und das Design von Werkzeugen und der Testbench wurde die Software Creo Parametric 4.0 der PTC Inc. verwendet. Deren parametrische Funktionen ermöglichen vergleichsweise schnelle Änderungen an bereits entstanden Designs, sodass effizient unterschiedliche Modellvarianten eines Werkzeugs angefertigt werden konnten. In Creo Parametric können einzelne Bauteile zu Baugruppen zusammengefasst und beweglich eingebaut werden, sodass grundsätzliche Bewegungsabläufe digital untersucht geprüft werden konnten.

Da viele Werkzeuge mittels 3D-Drucker additiv gefertigt wurden, wurde die Software Ultimaker Cura (in verschiedenen Versionen) der Ultimaker BV genutzt, um die konstruierten Bauteile zu slicen und damit für den 3D-Druck vorzubereiten.

Bei einigen Bauteilen und Baugruppen wurde unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) statische Belastungssimulationen durchgeführt, um deren mechanische Eigenschaften zu untersuchen und konstruktive Optimierungen durchzuführen. Dazu wurden Bauteile und Baugruppen als .step Dateien von Creo Parametric zum Simulationsprogramm Ansys der Ansys Inc. überführt. Konkret konnten in Ansys in Bauteilen und Baugruppen auftretende Spannungen und Verformungen simuliert werden, sodass Schwachstellen identifiziert wurden. Anhand dieser wurden verbesserte Designs entworfen und ebenfalls getestet.

Produktentwicklung als iterativer Prozess

Bei der Entwicklung der Testbench als auch der Demontagewerkzeuge wurden sowohl fortschreitende als auch korrigierende Teilaspekte der iterativen Produktentwicklung verwendet [Gericke et al., 2021]. Konkret wurden unterschiedliche Ausprägungen der iterativen Produktentwicklung genutzt [Wynn und Eckert, 2017]:

- zufriedenstellende Lösungen wurden weiter optimiert, beispielsweise um eine potenzielle Standzeit zu erhöhen [„Konkretisierung“]
- Werkzeuge sind in Experimenten zerstört worden, sodass diese stabiler gestaltet wurden [„Exploration“]
- initiale, einfache Aufgaben wurden erfüllt, wodurch neue Problemstellungen aufgetreten sind, die vorher nicht bekannt waren und weitere Anpassungen am Werkzeug durchgeführt wurden [„inkrementelle Vervollständigung“]

- Werkzeuge haben nicht funktioniert, sodass neue Ansätze gewählt wurden, wobei Teilaspekte der ursprünglichen Lösung aufgegriffen wurden [„Aufwühlen“].

Neben der iterativen Produktentwicklung gibt es vielzählige weitere Methoden, die kurz genannt werden, allerdings in der vorliegenden Arbeit nicht näher verfolgt werden sollen. Zunächst ist der *Morphologische Kasten* oder auch *Zwicky-Box* zu nennen, bei dessen Anwendung eine mehrdimensionale Matrix aufgespannt wird, in der unterschiedliche Ausprägungen von Merkmalen miteinander kombiniert werden, um neue Lösungsansätze zu finden [Zwicky, 1989].

Ein weiterer Ansatz Produkte zu entwickeln, ist die sogenannte *Bionik*, ein Kofferwort aus Biologie und Technik. Bei der Bionik sollen in der Natur erfolgreich angewandte Lösungen adaptiert werden, sodass das Lösungsprinzip durch menschengemachte Technologie in wesentlichen Teilen nachgebildet werden kann [Nachtigall, 2002].

Als letzte betrachtete, eine die Produktentwicklung unterstützende Methode, soll die sogenannte *Synektik*²⁵ genannt werden. Bei der Synektik gilt es, durch das Finden von Analogien die zu lösenden Herausforderungen durch bestehende Lösungsansätze zu lösen [Gordon, 1961]. Synektik kann in Teams angewandt werden und u.a. auf Ansätze der o.g. Bionik zurückgreifen.

3.4 Roboterprogrammierung

Es wurden Untersuchungen der designten Werkzeuge an unterschiedlichen Robotern durchgeführt, die mit unterschiedlichen Robotersteuerungen ausgestattet wurden. Der KR 4²⁶ und der KR 10²⁷ wurden jeweils mit einer KR C5 micro ausgerüstet, der KR 30²⁸ wurde durch eine KR C4, der Vorgängerversion, gesteuert (nähere Informationen zum Aufbau siehe Kapitel 6.3.3). Beide Steuerungen nutzten KUKA.SystemSoftware 8.6. Die Programmierung aller Roboter erfolgte mittels KUKA smartPADs, mit deren 6D-Mäusen die Roboter intuitiv und präzise gesteuert werden können.

²⁵ Abgeleitet von griech.: synechein (dt.: zusammenhängen, etwas miteinander in Verbindung bringen)

²⁶ Präzise: KUKA AGILUS KR 4 R600

²⁷ Präzise: KUKA AGILUS KR 10 R1100

²⁸ Präzise: KUKA IONTEC KR 30 R2100

4. Industrieumfrage

Im folgenden Kapitel soll die von Hansen und Seelig [2021] durchgeführte Onlineumfrage dargestellt und ausgewertet werden²⁹. Dazu werden zunächst die aufgestellten Thesen vorgestellt. Darüber hinaus werden alle für die vorliegende Dissertation relevanten Fragen dargestellt und jeweils zunächst quantitativ ausgewertet. Danach erfolgt eine ausführlichere Auswertung mit entsprechenden Korrelationen, sodass die Thesen bewertet werden können. Es ist zu beachten, dass der Begriff *recyclinggerechte Konstruktion* in der Umfrage im weiteren Sinne betrachtet wurde, entsprechend kann Recycling wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben unterschiedliche Ausprägungsarten von der Wiederverwendung bis zum stofflichen Recycling annehmen. Ebenso zeigt sich im Verlauf der Umfrage, dass die Begriffe *recyclinggerechte Konstruktion* und *demontagegerechte Konstruktion* im Teilnehmendenfeld quasi synonym verstanden werden, daher sollen diese im Rahmen der Umfrage ebenfalls synonym gebraucht werden.

4.1 Thesen

Vor der Konzipierung des Fragenkatalogs wurden im Vorfeld eine Reihe von Thesen aufgestellt, die im Teilnehmendenfeld geprüft werden sollten. Dabei sollen die Thesen in der Diskussion aufgegriffen werden und den Praxisbezug des Demontagealgorithmus sowie des Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly unterstützen.

Die Thesen sind wie folgt formuliert:

1. Recyclinggerechte Konstruktion wird noch nicht in der Mehrheit der Unternehmen deutscher Schlüsselindustrien betrieben.
2. Es fehlen die Werkzeuge und das Wissen, um Produkte ressourceneffizienter zu gestalten.
3. Es gibt eine Diskrepanz zwischen dem grünen Image von Unternehmen und deren tatsächlichen Produkten hinsichtlich Recycling / Wiederverwendung.
4. Automatisierte Demontagesysteme erfordern besondere recyclinggerechte Konstruktion / Design-for-Recycling Ansätze.

Verschiedene Fragen sollen dabei zur Beantwortung der Fragen dienen; die Zuordnung der Fragen zu den jeweiligen Thesen ist in der folgenden Tabelle 3 dargestellt. Weiterhin wurden die Fragen im Fragebogen in vier wesentliche Blöcke aufgeteilt:

²⁹ Die gesamte Umfrage wurde von Hansen und Seelig [2021] durchgeführt. Im Folgenden soll daher aus Gründen der Lesbarkeit darauf verzichtet werden, jede Frage entsprechend durch ein Zitat kenntlich zu machen.

- *Allgemeine Fragen:* Einordnung der Antworten in beruflichen Kontext der Teilnehmenden
- *Spezifische Fragen:* Inhaltliches Hintergrundwissen der Teilnehmenden
- *Materialien & Recycling:* Schwerpunkt bei stofflichem Recycling
- *Konstruktion & Demontage:* Schwerpunkt bei DfR / DfD

Der Block *Allgemeine Fragen* sowie Auszüge der Blöcke *Spezifische Fragen* sowie *Materialien & Design* wurden zunächst in Kapitel 2.6 erläutert, um die Thematik zu eröffnen sowie den industrieseitigen Bedarf an den Themen der vorliegenden Dissertation darzustellen. Im folgenden Kapitel 4 werden relevante Fragen aus den Blöcken *Materialien & Design* und vor allem *Konstruktion & Demontage* analysiert werden. Dabei sollen Korrelationen hergestellt sowie die Beantwortung der Thesen erfolgen.

Tabelle 3: Zuweisung der Fragen unterschiedlicher Frageblöcke zu aufgestellten Thesen

Fragenblock: These:	Allgemein	Materialien & Recycling	Konstruktion & Demontage
1. Recyclinggerechte Konstruktion wird noch nicht in der Mehrheit der Unternehmen deutscher Schlüsselindustrien betrieben.	11	/	26, 28, 30
2. Es fehlen die Werkzeuge und das Wissen, um Produkte ressourceneffizienter zu gestalten.	/	23, 25	27, 29, 32, 34
3. Es gibt eine Diskrepanz zwischen dem grünen Image von Unternehmen und deren tatsächlichen Produkten hinsichtlich Recycling / Wiederverwendung.	5, 6, 7	15, 18	35
4. Automatisierte Demontagesysteme erfordern besondere recyclinggerechte Konstruktion / Design-for-Recycling Ansätze.	/	/	31, 32, 33, 34

4.2 Ergebnisse und deskriptive Analyse der speziellen Fragen

Zunächst soll die Frage betrachtet werden, wie sehr recyclinggerechte Konstruktion im Produktentstehungsprozess langfristige ökonomische Ziele des Unternehmens beeinflussen kann (Frage 11, Schieberegler).

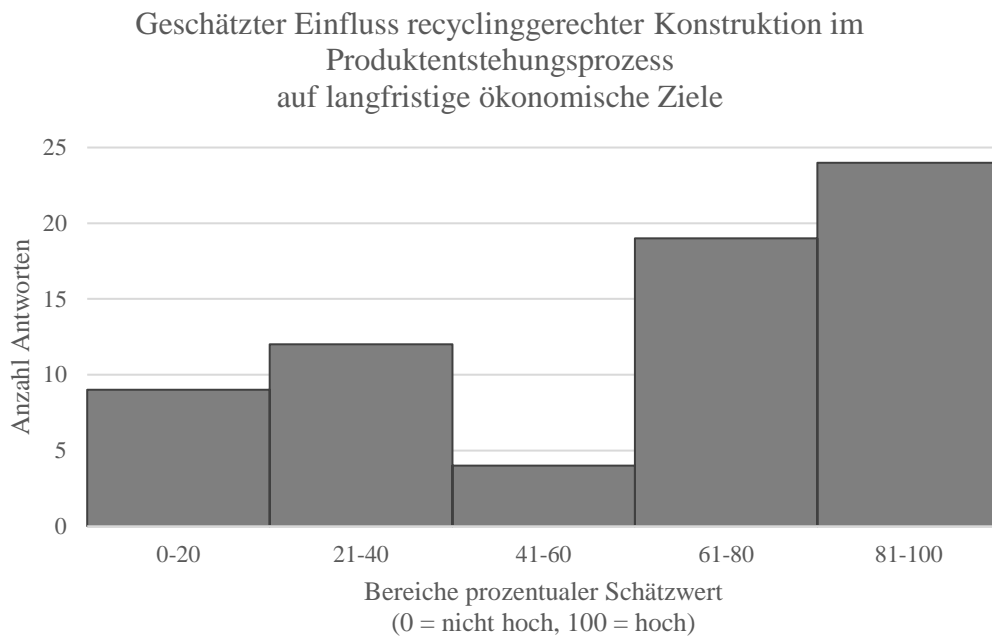


Abbildung 20: Geschätzter Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele

Dabei zeigt sich eine zwiespaltene Meinung im Teilnehmendenfeld ($n = 68$). Der Mittelwert liegt bei circa 63,68, die Standardabweichung bei 30,11. Tendenziell ist der Einfluss recyclinggerechter Konstruktion auf langfristige ökonomische Ziele eher höher eingeschätzt. Es zeigt sich, dass die Teilnehmenden, die recyclinggerechter Konstruktion in Ihrem Unternehmen eine hohe Wichtigkeit zuweisen, deren Einfluss auf langfristige ökonomische Ziele im Durchschnitt sehr hoch mit 90,2 einschätzen. Darüber hinaus wurden die Antworten der Fragen 11 und 15 miteinander punktbiserial korreliert – wie schätzen Unternehmen, die gebrauchte Produkte wieder aufbereiten, den Einfluss recyclinggerechter Konstruktion auf langfristige ökonomische Ziele ein? Dabei stellt sich heraus, dass lediglich eine schwach positive Korrelation von 0,06 herrscht. Die Unternehmen, die gebrauchte Produkte wieder aufbereiten, schätzen den langfristigen Einfluss auf ökonomische Ziele marginal über dem Durchschnitt (+2 %) mit 65,02 ein.

Die nächste Frage 23 dient der Eruiierung des Abhängigkeitsverhältnisses von Unternehmen zu Ihren Zulieferern und Auftraggebern: „Wie hoch ist Ihre Abhängigkeit von Zulieferern und / oder Auftraggebern, sodass Produktmodifikationen schwerer umgesetzt werden können?“ (n = 64, Schieberegler).

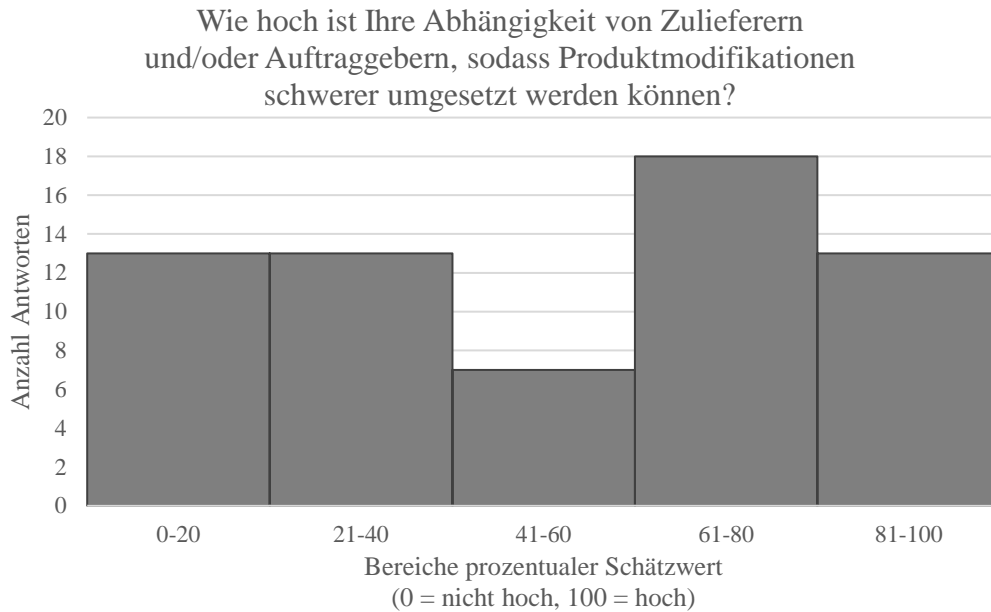


Abbildung 21: Höhe der Abhängigkeit der Teilnehmenden von Zulieferern und Auftraggebern, sodass Produktmodifikationen schwerer umgesetzt werden können

Bei einem Mittelwert von 51,7 und einer Standardabweichung von 31,01 lässt sich keine eindeutige Tendenz zeigen. Weiterhin wurde die Korrelation nach Bravais-Pearson zwischen den Fragen 11 und 23 gemessen – wie schätzen Unternehmen, die eher stärker von Zulieferern und Auftraggebern abhängig sind und daher Produktmodifikationen schwerer umsetzen können, den Einfluss von recyclinggerechter Konstruktion auf langfristige ökonomische Ziele ein? Es stellt sich heraus, dass die Antworten mit dem Faktor -0,16 schwach negativ korrelieren. Die Vermutung entsteht, dass die Unternehmen, die stärker in Abhängigkeitsverhältnissen gebunden sind, einen geringeren Einfluss recyclinggerechter Konstruktion sehen – es besteht die Möglichkeit, dass die Zulieferer und Auftraggeber einen entsprechend höheren Einfluss durch recyclinggerechte Konstruktion auf langfristige ökonomische Ziele haben.

Gefragt wurde zudem, ob den Teilnehmenden die Vorgehensweisen und Herausforderungen beim Recycling der Produkte des Unternehmens bekannt sind (Frage 25, n = 87, Einfachauswahl). Dabei hat sich herausgestellt, dass der Mehrheit diese bekannt sind (circa 67 %). Daraufhin wurden die Fragen 15 und 25 korreliert – sind den Unternehmen, die gebrauchte Produkte wiederaufbereiten, die Vorgehensweisen und Herausforderungen beim Recycling ihrer Produkte bekannt? Es stellt sich heraus, dass der Phi-Koeffizient circa 0,01 beträgt, entsprechend lässt sich kein Zusammenhang zeigen. Daher lässt sich die Ver-

mutung aufstellen, dass einige Unternehmen noch nicht vollständig mit der Wiederaufbereitung Ihrer Produkte vertraut sind, obwohl sie in diesem Bereich tätig sind. Darüber hinaus wurde die Korrelation zwischen den Fragen 25 und 11 ausgerechnet – gibt es einen Zusammenhang zwischen der Bekanntheit von Vorgehensweisen und Herausforderungen beim Recycling der Produkte von Unternehmen und dem geschätzten Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele? Dabei ergibt sich eine punktbiseriale Korrelation von 0,41, es gibt entsprechend einen vergleichsweise starken, positiven Zusammenhang. Dies bedeutet, dass die Unternehmen, die recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess eine hohe Auswirkung unterstellen, auch konsequent die Vorgehensweisen und Herausforderungen des Recyclings kennen. Im Hinblick auf die fehlende Korrelation zwischen den Antworten der Fragen 15 und 25 (0,01) sowie den Fragen 11 und 15 (0,06) ergibt sich ein nicht kohärentes Antwortbild.

Ergänzend wurde gefragt, in welcher Form bei den befragten Unternehmen im Konstruktionsprozess Rücksicht auf das Recycling am EoL genommen wird (Frage 26, n = 79, Mehrfachauswahl).

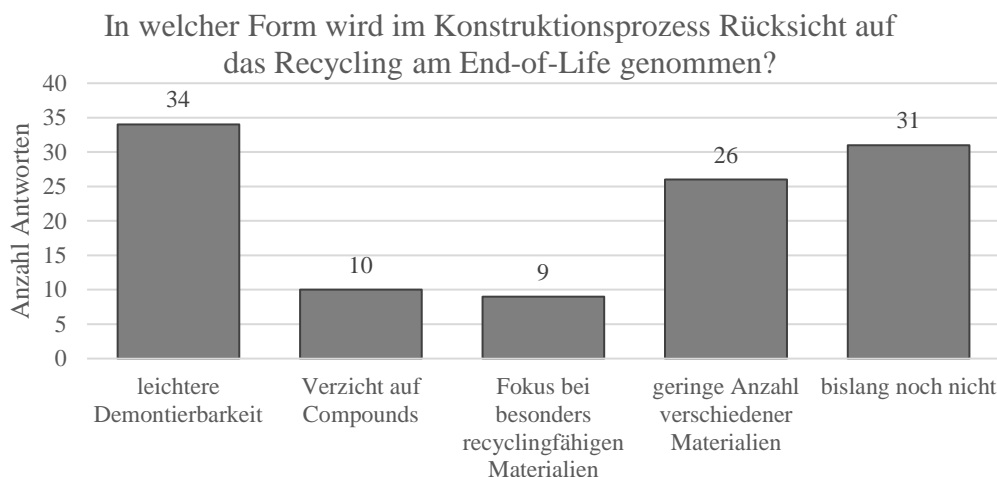


Abbildung 22: Rücksichtsmaßnahmen im Konstruktionsprozess für leichteres Recycling am EoL

Es stellt sich heraus, dass insbesondere *leichtere Demontierbarkeit* als eine Möglichkeit genannt wird, Recycling am EoL zu berücksichtigen (34 Nennungen, ~43 %). Einige Unternehmen nehmen bislang keine Rücksicht auf das Recycling am EoL (31 Nennungen, ~39 %), andere versuchen, eine geringere Anzahl unterschiedlicher Materialien zu verwenden (26 Nennungen, ~33 %). Die Unternehmen, die *leichtere Demontierbarkeit* als Möglichkeit nennen, bereiten leicht überdurchschnittlich häufiger ihre Produkte wieder auf (circa 76 % im Vergleich zu durchschnittlich 71 %, in Bezug auf Frage 15).

In der folgenden offenen Frage wurde nach den besonderen Herausforderungen der Rücksichtnahme im Konstruktionsprozess auf Recycling am EoL gefragt (Frage 27, n = 35, Freitext). Zur Auswertung wurde der deduktiv-induktive Hybridansatz gewählt, nachdem

insbesondere *technische Herausforderungen* (15 Nennungen) sowie *Abhängigkeit von Zulieferern / Kunden* (7 Nennungen) genannt wurden. Es stellt sich die Vermutung, ob automatisierte Demontage eine Möglichkeit sein kann, den technischen Herausforderungen zu begegnen. Von den 15 Teilnehmenden, die technische Herausforderungen als besondere Herausforderungen angeben, nennen zehn (~67 %) *leichtere Demontierbarkeit* als Möglichkeit, Recycling am EoL zu berücksichtigen. Daraus lässt sich vermuten, dass insbesondere leichtere Demontierbarkeit noch mit technischen Herausforderungen verbunden ist.

Weiterhin wurde gefragt, vor welchem Hintergrund die Unternehmen der Teilnehmenden Ansätze der recyclinggerechten Konstruktion in der Produktentwicklung verfolgen (Frage 28, n = 71, Mehrfachauswahl).



Abbildung 23: Hintergründe für recyclinggerechte Konstruktion in der Produktentwicklung

Dabei zeigt sich, dass *Gesetzgebung* (38 Nennungen, ~54 %), *ökonomische Ziele* (36 Nennungen, ~51 %) sowie *ökologisches Bewusstsein* (32 Nennungen, ~45 %) und ferner *Konkurrenzfähigkeit* (28 Nennungen, ~39 %) die häufigsten Hintergründe sind. Die *Erschließung von Fördermöglichkeiten* spielt nur eine untergeordnete Rolle (4 Nennungen, ~6 %). Die Teilnehmenden, in deren Unternehmen recyclinggerechte Konstruktion eine intrinsisch motivierte Rolle einnimmt, nennen zu circa 78 % *ökologisches Bewusstsein* als Hintergrund dafür. Auffällig dabei ist, dass von diesen Unternehmen circa 86 % unter 250 Mitarbeitende beschäftigen und damit im Verhältnis zur Grundgesamtheit des Teilnehmendenfeldes unterdurchschnittlich kleine Unternehmen sind. Im Gegensatz nennen die Teilnehmenden, in deren Unternehmen recyclinggerechte Konstruktion eine extrinsisch motivierte Rolle einnimmt, primär *Gesetzgebung* (~71 %) als Hintergrund. Dabei beschäftigen diese

Unternehmen zu 60 % mehr als 250 Mitarbeitende, sind also im Verhältnis zur Grundgesamtheit des Teilnehmendenfeldes überdurchschnittlich groß³⁰.

Die Teilnehmenden wurden als nächstes gebeten, den erforderlichen Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion einzuschätzen (Frage 29, n = 55, Schieberegler).

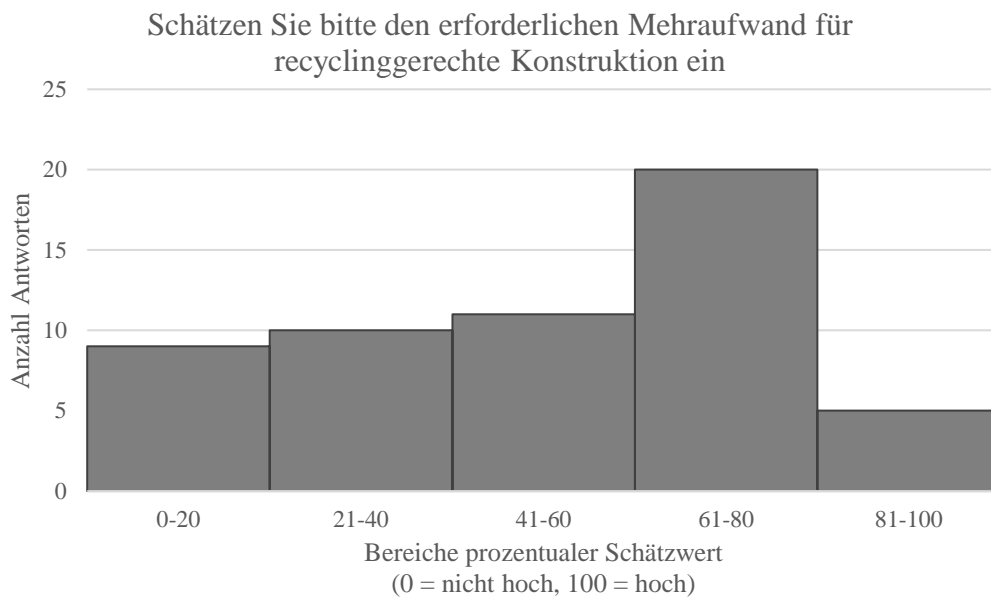


Abbildung 24: Geschätzter erforderlich Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion

Der erforderliche Mehraufwand wird durchschnittlich mit 53,53 beziffert bei einer Standardabweichung von 26,09; entsprechend herrscht im Teilnehmendenfeld eine gemischte Meinung. Daher wurden die Fragen 11 und 29 miteinander korreliert – in welchem Zusammenhang stehen der geschätzte erforderliche Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion und dessen Einfluss auf langfristige ökonomische Ziele? Die Antworten korrelieren nach Bravais-Pearson mit dem Faktor $-0,35$, entsprechend liegt eine recht starke negative Korrelation vor. Das bedeutet, dass Teilnehmende, die den erforderlichen Aufwand für recyclinggerechte Konstruktion eher niedrig einschätzen, eher einen hohen Einfluss dieser auf langfristige ökonomische Ziele sehen. Daraufhin wurden die Fragen 15 und 29 korreliert – was ist der Zusammenhang zwischen dem geschätzten erforderlichen Mehraufwand für recyclinggerechter Konstruktion und der Menge im Unternehmen wiederaufbereiteter Produkte? Die Antworten korrelieren punktbiserial schwach negativ mit dem Faktor $-0,23$, entsprechend lässt sich vermuten, dass die Unternehmen, die den erforderlichen Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion eher niedrig einschätzen, eher ihre Produkte wieder aufbereiten. Zuletzt wurden die Fragen 18 und 29 korreliert – wie hängen die geschätzte

³⁰ Es ist zu beachten, dass der Umfang der Teilnehmenden, der die o.g. Kriterien alle erfüllt, nicht mehr groß genug ist, um verlässlich auf die Grundgesamtheit zu schließen, es lassen sich lediglich Hinweise ableiten.

Kaufbereitschaft für Produkte / Ersatzteile und der erforderliche Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion zusammen? Die Antworten korrelieren dabei nach Bravais-Pearson mit dem Faktor $-0,16$ schwach negativ. Es stellt sich daher die Vermutung, dass gegebenenfalls ein Zusammenhang über den Preis der Produkte hergestellt werden kann. Unternehmen, die für recyclinggerechte Konstruktion eher einen geringen Mehraufwand sehen, können die entsprechend aufbereiteten Produkte gegebenenfalls günstiger für ihre Kunden anbieten, sodass diese eine tendenziell höhere Bereitschaft haben, diese zu kaufen.

Es wurde zudem gefragt, ob sich die Teilnehmenden vorstellen können, dass in ihrem Unternehmen in Zukunft recyclinggerechte Konstruktion eine stärkere Bedeutung erfährt (Frage 30, $n = 77$, Einfachauswahl). Die knappe Mehrheit der Teilnehmenden bejaht diese Frage ($\sim 55\%$). Daraufhin wurden die Antworten der Fragen 11 und 30 miteinander korreliert – wie ist der Zusammenhang zwischen dem Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele und der Schätzung, inwiefern recyclinggerechte Konstruktion in Zukunft im Unternehmen stärkere Bedeutung erfährt? Die Antworten korrelieren punktbiserial mit dem Faktor $0,08$, es besteht ein marginal positiver Zusammenhang. Das bedeutet, dass Unternehmen, die einen Einfluss in recyclinggerechter Konstruktion auf langfristige ökonomische Ziele sehen, sich tendenziell vorstellen können, recyclinggerechter Konstruktion in ihrem Unternehmen in Zukunft eine stärkere Bedeutung zukommen zu lassen; es kann ein ökonomisches Motiv vermutet werden. Daher wurden zusätzlich die Fragen 29 und 30 korreliert – wie ist der Zusammenhang zwischen dem geschätzten Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion und der in Zukunft geschätzten Bedeutung von recyclinggerechter Konstruktion im Unternehmen? Dabei zeigt sich eine tendenziell positive punktbiserial Korrelation mit dem Faktor $0,22$. Unternehmen sind also trotz tendenziell höherem Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion gewillt, in Zukunft stärker auf diese zu setzen. Erneut besteht die Vermutung, dass die Themen der vorliegenden Dissertation in der Industrie von Interesse sein können.

Nachdem einige Fragen zur recyclinggerechten Konstruktion gestellt wurden, wurde der Fokus in den folgenden Fragen mehr in Richtung Automatisierung und Demontage gerückt. Daher wurden die Teilnehmenden gebeten, die Aussage „*Das frühzeitige Einbeziehen recyclinggerechter Konstruktion führt zu einer leichteren Automatisierbarkeit der Demontage unserer Produkte*“ zu bewerten (Frage 31, $n = 62$, Schieberegler).

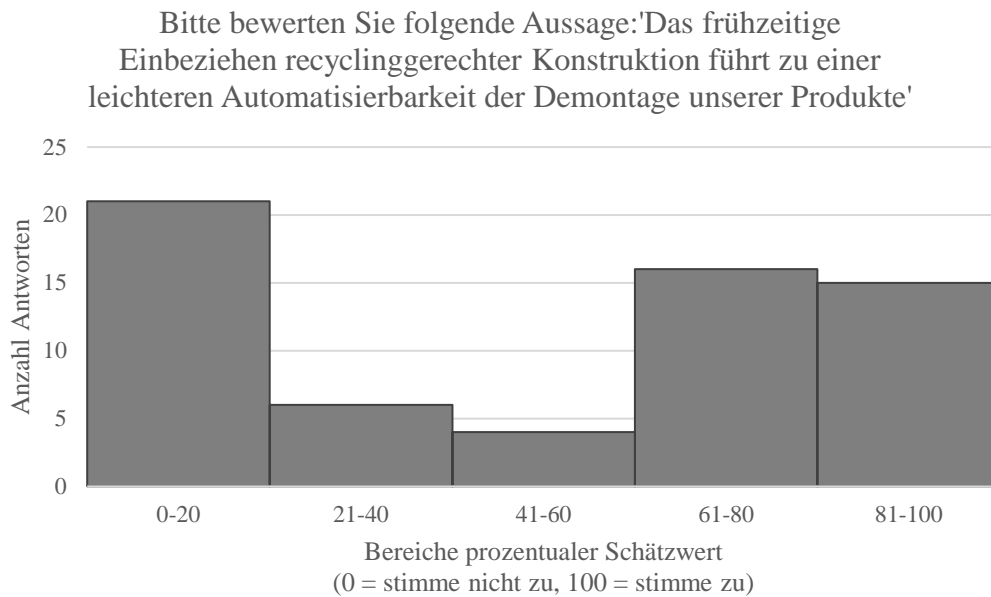


Abbildung 25: Einstellung der Teilnehmenden zum Zusammenhang von frühzeitiger recyclinggerechter Konstruktion und leichterer Automatisierung der Demontage ihrer Produkte

Wie in Abbildung 25 ersichtlich, scheinen zwei recht deutlich ausgeprägte Meinungen im Teilnehmendenfeld zu herrschen. Bei einem Mittelwert von 50,1 liegt die Standardabweichung entsprechend vergleichsweise hoch bei 37,2. Es wurden die Fragen 11 und 31 korreliert – wie hängen der Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele mit dem Einfluss frühzeitigen Einbeziehens recyclinggerechter Konstruktion für leichtere Automatisierung der Demontage von Produkten der Unternehmen zusammen? Die Antworten korrelieren nach Bravais-Pearson mit dem Faktor $-0,08$ schwach negativ. Entsprechend lässt sich vermuten, dass die Teilnehmenden, die einen Zusammenhang zwischen leichtere Automatisierung der Demontage ihrer Produkte und recyclinggerechter Konstruktion sehen, dieser tendenziell keinen Einfluss auf langfristige ökonomische Ziele zuschreiben. Weiterhin wurden die Antworten der Teilnehmenden besonders betrachtet, die vor allem durch *leichtere Demontierbarkeit* im Konstruktionsprozess Rücksicht auf das Recycling am EoL nehmen (Frage 26). Diese schätzen den Zusammenhang zwischen dem frühzeitigen Einbeziehen recyclinggerechter Konstruktion und leichterer Automatisierbarkeit der Demontage ihrer Produkte im Vergleich zur Grundgesamtheit marginal überdurchschnittlich hoch mit 51,2 (2,2 % Steigerung) ein, bei einer noch höheren Standardabweichung von circa 38,01. In der Folge entsteht die Vermutung, dass einige Unternehmen insbesondere auf Automatisierung der Demontage setzen würden, während andere diese vollständig ablehnen.

In der Folge wurde konkreter nach den Hindernissen der Steigerung der Demontierbarkeit von Produkten der teilnehmenden Unternehmen gefragt (Frage 32, $n = 76$, Mehrfachauswahl).

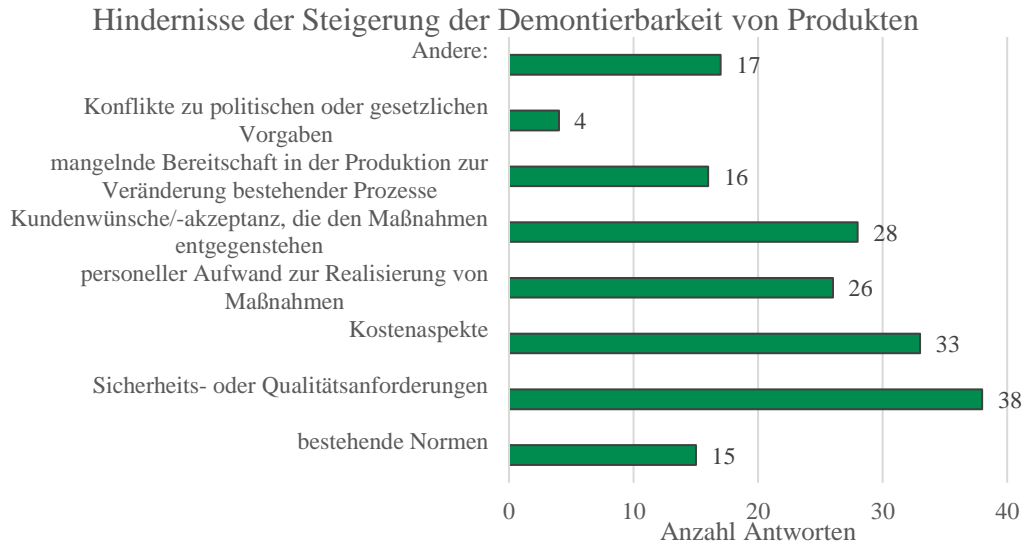


Abbildung 27: Hindernisse der Steigerung der Demontierbarkeit von Produkten

Dabei zeigt sich, dass die Hälfte der Teilnehmenden *Sicherheits- oder Qualitätsanforderungen* (38 Nennungen) als Hindernis sieht. Weitere häufig genannten Hindernisse der Steigerung der Demontierbarkeit von Produkten sind *Kostenaspekte* (33 Nennungen, 43 %), gefolgt von *Kundenwünsche/-akzeptanz, die den Maßnahmen entgegenstehen* (28 Nennungen, 37 %) sowie *personeller Aufwand zur Realisierung der Maßnahmen* (26 Nennungen, 34 %). Die Antworten der Teilnehmenden, die *Kostenaspekte* als Hindernisse der Steigerung der Demontierbarkeit nennen, wurden mit den Antworten von Frage 28 verglichen. Dabei zeigt sich, dass diese Teilnehmenden unterdurchschnittlich häufig Ansätze der recyclinggerechten Konstruktion in der Produktentwicklung vor dem Hintergrund *ökologischen Bewusstseins* verfolgen (~30 % vs. ~45 %). Unter der Bedingung, dass leichtere Demontierbarkeit und recyclinggerechte Konstruktion miteinander einhergehen, kann die Vermutung aufgestellt werden, dass Kostengründe und geringeres ökologisches Bewusstsein korrelieren.

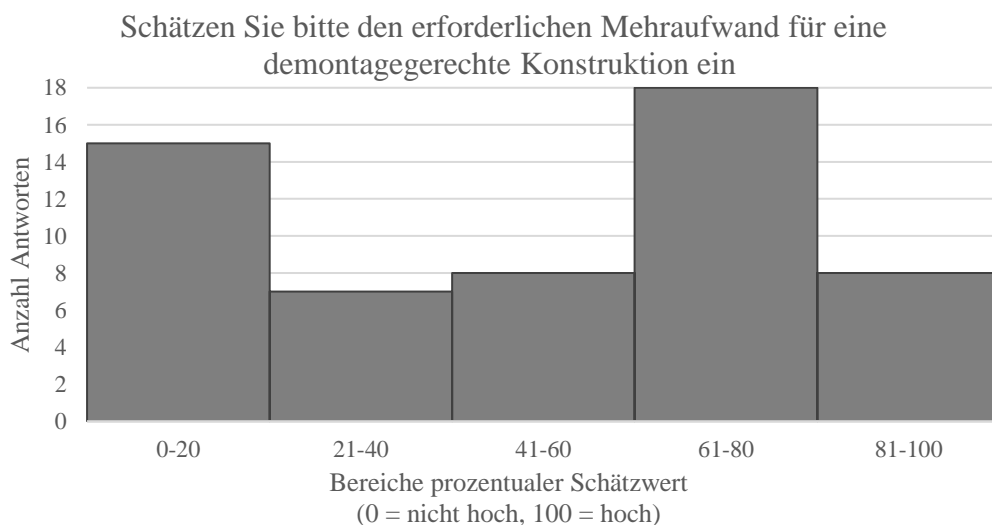


Abbildung 26: Geschätzter erforderlicher Mehraufwand für demontagegerechte Konstruktion

Weiterhin wurden die Teilnehmenden gebeten, den erforderlichen Mehraufwand für eine demontagegerechte Konstruktion abzuschätzen (Frage 33, $n = 56$, Schieberegler). Bei einem Mittelwert von 49,73 und einer Standardabweichung von 30,97 zeichnet sich erneut eine annähernd bimodale Verteilung der Antworten. In der Folge wurden die Fragen 11 und 33 korreliert – wie ist der Zusammenhang zwischen dem geschätzten Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele und dem geschätzten Mehraufwand für demontagegerechte Konstruktion? Es zeigt sich, dass die Antworten nach Bravais-Pearson mit dem Faktor $-0,27$ leicht negativ korrelieren. Es wird ein Zusammenhang vermutet, der über die Kosten erklärbar sein könnte: Je geringer der Mehraufwand, desto höher der Einfluss auf langfristige ökonomische Ziele, gegeben dem Fall, dass demontage- und recyclinggerechte Konstruktion miteinander einhergehen. Entsprechend gilt vermutlich für spätere Anwendungen von Demontagelösungen, dass diese möglichst kostengünstig umgesetzt werden sollten. Weiterhin wurden die Fragen 18 und 33 korreliert – wie ist der Zusammenhang zwischen der Bereitschaft der Kunden, wiederaufbereitete Produkte / Ersatzteile zu beziehen und dem geschätzten Mehraufwand für demontagegerechte Konstruktion? Die Antworten korrelieren erneut leicht negativ nach Bravais-Pearson mit dem Faktor $-0,16$. Je höher der Mehraufwand ist, desto geringer die Bezugsbereitschaft der Kunden – wieder lässt sich über die Kosten bzw. den Preis, wie schon bei der Korrelation der Fragen 18 und 29, die ebenfalls mit dem Faktor $-0,16$ korrelieren, argumentieren. Vermutlich verstehen die Teilnehmenden recyclinggerechte Konstruktion und demontagegerechte Konstruktion synonym. Um dies näher zu untersuchen, wurden die Fragen 29 und 33 ebenfalls miteinander korreliert – wie ist der Zusammenhang zwischen dem geschätzten Mehraufwand für recycling- und demontagegerechte Konstruktion? Die Vermutung bestätigt sich, die Antworten beider Fragen korrelieren nach Bravais-Pearson sehr stark mit dem Faktor $0,83$. Entsprechend sollen die Begriffe recyclinggerechte Konstruktion und demontagegerechte Konstruktion im Rahmen der Umfrage ebenfalls synonym verwendet werden. Zuletzt wurden die Fragen 31 und 33 miteinander korreliert – wie hängen der geschätzte Mehraufwand für demontagegerechte Konstruktion und die Auswirkungen frühzeitigen Einbeziehens recyclinggerechter Konstruktion auf leichtere Automatisierbarkeit der Demontage von Produkten zusammen? Die Antworten korrelieren nach Bravais-Pearson mit dem Faktor $0,29$ leicht positiv; entsprechend lässt sich vermuten, dass bei steigendem Mehraufwand für demontagegerechte Konstruktion die Automatisierbarkeit der Demontage erleichtert werden könnte.

Ergänzend wurden die Teilnehmenden gebeten, die Herausforderungen bei vollständiger Automatisierung der Demontage zu benennen (Frage 34, $n = 75$, Mehrfachauswahl).

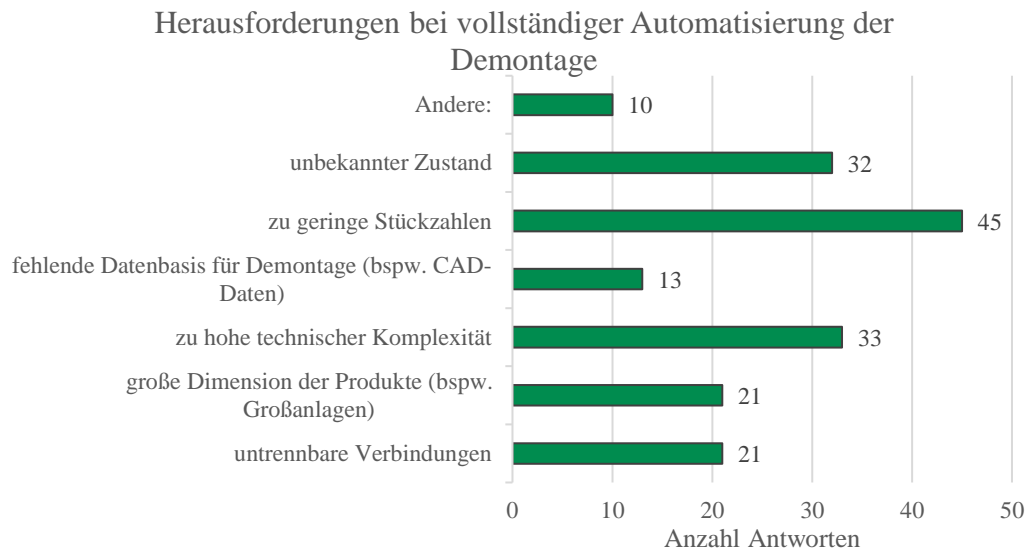


Abbildung 28: Herausforderungen bei vollständiger Automatisierung der Demontage

Als Hauptgrund mit 45 Nennungen (60 %) wird *zu geringe Stückzahlen* angegeben, was damit zusammenhängen kann, dass die Majorität der teilnehmenden Unternehmen aus dem Anlagenbau stammt; von den 45 Teilnehmenden, die *zu geringe Stückzahl* als Herausforderung nennen, geben 16 ebenfalls *große Dimension der Produkte* als Herausforderung an. Weitere besonders relevante Herausforderungen sind *zu hohe technische Komplexität* (33 Nennungen, 44 %) und *unbekannter Zustand* (32 Nennungen, 43 %). Von den Teilnehmenden, die *zu geringe Stückzahlen* als Herausforderung bei vollständiger Automatisierung der Demontage angeben, gibt knapp die Hälfte (47 %) ebenfalls an, aus Kostenaspekten die Demontierbarkeit der Produkte weiter zu steigern (siehe Frage 32). Entsprechend kann die Vermutung aufgestellt werden, dass automatisierte Demontage tendenziell eher bei Produkten mit hohen Stückzahlen, beispielsweise EAA, angewendet werden sollte.

Die darauffolgende Frage 35 sollte klären, inwiefern eine Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten der von den befragten Unternehmen hergestellten Produkte realisierbar ist ($n = 78$, Einfachauswahl). Dabei gibt die Mehrheit mit rund 83 % an, dass dies der Fall ist. Weiterhin wurden die Fragen 15 und 35 miteinander korreliert – wie ist der Zusammenhang zwischen den Unternehmen, die Ihre Produkte wieder aufbereiten und denen, die eine Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten der Produkte als realisierbar einschätzen? Die Antworten der Teilnehmenden weisen einen Phi-Korrelationskoeffizienten von circa 0,21 auf, entspricht liegt eine leicht positive Korrelation vor. 9 % der Teilnehmenden sagen, dass eine Realisierung der Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten nicht möglich ist, geben jedoch an, dass in Ihrem Unternehmen gebrauchte Produkte wiederaufbereitet werden. Die Frage, wie gut die Teilnehmenden die präzise Definition von *Wiederverwendung* und *Wiederaufbereitung* bei der Beantwortung der Fragen angewendet haben, bleibt offen. Ferner wurden die Fragen 18 und 35 korreliert – wie ist der Zusam-

menhang zwischen der Bereitschaft der Kunden der befragten Unternehmen, wiederaufbereite Produkte / Ersatzteile zu beziehen und der Realisierbarkeit der Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten der hergestellten Produkte? Dabei zeigt sich eine recht starke positive punktbiseriale Korrelation von 0,47, die der Vermutung entspricht. Zuletzt wurden die Fragen 33 und 35 korreliert – wie ist der Zusammenhang zwischen dem geschätzten Mehraufwand für demontagegerechte Konstruktion und der Realisierbarkeit der Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten der hergestellten Produkte? Die Antworten korrelieren punktbiserial recht stark negativ mit dem Faktor -0,36. Dementsprechend wird die Vermutung aufgestellt, dass je geringer der Mehraufwand für demontagegerechte Konstruktion ist, desto höher ist die Realisierbarkeit der Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten der hergestellten Produkte. Also kann vermutlich durch demontagegerechte Konstruktion tendenziell eher eine Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten von Produkten realisiert werden.

An Frage 35 wurde eine Anschlussfrage (Frage 36, n = 10, Freitext) gestellt, sodass die Teilnehmenden, die eine Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten für nicht realisierbar halten, Gründe dafür nennen konnten. Es zeigt sich, dass insbesondere die *lange Produktlebensdauer* und *Unwirtschaftlichkeit* als Gründe genannt werden.

Neben der Demontage sollte auch die Wiederverwendung betrachtet werden. Dazu wurde gefragt, welche Aspekte am wichtigsten sind, wenn ein Produkt in der Branche der Unternehmen wiederverwendet werden soll (Frage 38, n = 77, Mehrfachauswahl).

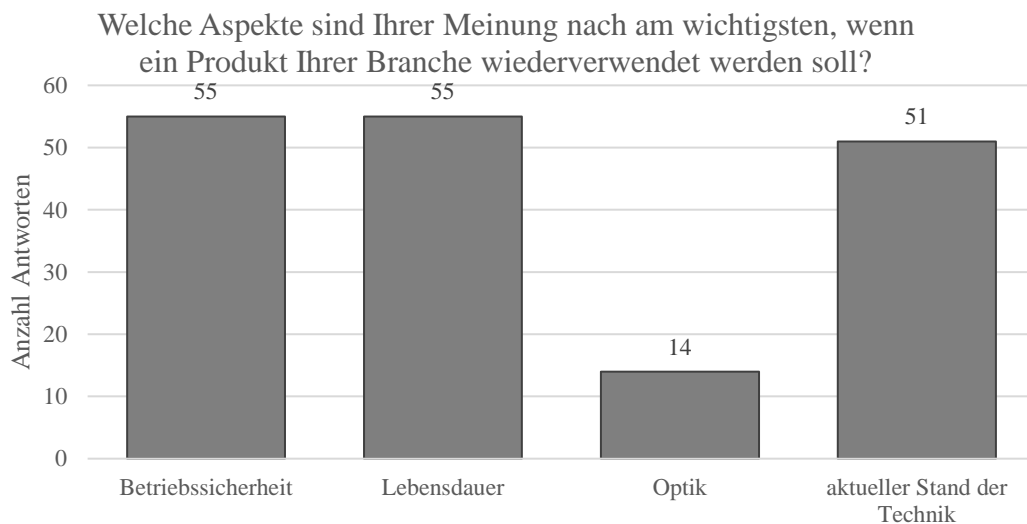


Abbildung 29: Wichtigste Aspekte für die Wiederverwendbarkeit von Produkten der jeweiligen Branchen

Es zeigt sich, dass vor allem die Aspekte *Betriebssicherheit* (55 Nennungen, 71 %) und *Lebensdauer* (55 Nennungen, 71 %) neben dem *aktuellen Stand der Technik* (51 Nennungen, 66 %) von besonderer Wichtigkeit sind.

Tendenziell weniger wichtig ist die *Optik* eines Produkts, wenn es um Wiederverwendung geht (14 Nennungen, 18 %). Entsprechend kann die Vermutung aufgestellt werden, dass bei einer automatisierten Demontage als vorbereitendem Schritt für eine Wiederverwendung von Komponenten, diese so gestaltet werden soll, dass primär Betriebssicherheit und Lebensdauer einer Komponente durch diese nicht gefährdet werden dürfen, wobei optische Mängel tendenziell eher in Kauf genommen werden können.

Zuletzt wurde noch eine Frage zur durchschnittlichen Lebensdauer der Produkte der befragten Unternehmen gestellt. Dazu wurden die Teilnehmenden gebeten, die durchschnittliche Lebensdauer ihrer Produkte einzuschätzen (Frage 39, n = 78, Einfachauswahl).

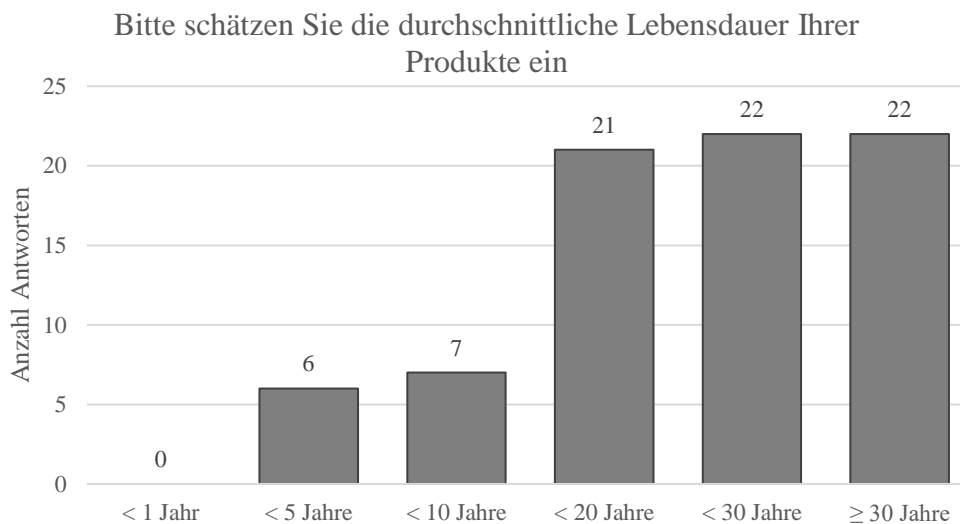


Abbildung 30: Geschätzte durchschnittliche Lebensdauer der Produkte der Unternehmen der Teilnehmenden

Es zeigt sich, dass ein Großteil der Teilnehmenden die Lebensdauer ihrer Produkte tendenziell hoch einschätzt, rund 83 % schätzen die Lebensdauer länger als zehn Jahre ein, rund 56 % sogar länger als 20 Jahre. Kurzweilige Produkte (Lebensdauer < 1 Jahr) bietet keines der teilnehmenden Unternehmen an.

Rückbezogen auf Kapitel 2.6 soll die offen gebliebene Frage, warum Unternehmen, deren Produkte noch eine signifikante Nachfrage aufweisen, ihre Produkte nicht aufbereiten, eingegangen werden (siehe Fragen 13, 15, 18). Die Antworten haben sich sowohl auf Produkte als auch Ersatzteile bezogen; hinsichtlich der sich nun herausstellenden, eher langen Lebensdauer der Produkte der Unternehmen kann vermutet werden, dass die hohe Nachfrage sich vor allem auf Ersatzteile bezieht, die dann wieder in die langlebigen Produkte eingesetzt werden, die wiederum selbst nicht wiederaufbereitet werden. Im Hinblick auf die Ergebnisse von Frage 36 zeigt sich, dass durch die hohe Lebensdauer der Produkte die Wiederverwendung dieser eher nicht realisierbar ist.

4.3 Auswertung der Thesen

Im folgenden Abschnitt sollen die in Kapitel 4.1 aufgestellten Thesen bearbeitet werden. Die Diskussion der Thesen, die damit verbundenen Erkenntnisse sowie die Schlüsselerkenntnisse und die Korrelationen aus Kapitel 4.2 sollen im Kapitel 7.1 abschließend diskutiert werden.

These 1: Recyclinggerechte Konstruktion wird noch nicht in der Mehrheit der Unternehmen deutscher Schlüsselindustrien betrieben.

Zunächst sollen die Ergebnisse aus Frage 26 herangezogen werden, nach denen knapp 40 % der befragten Unternehmen bislang noch keine Rücksicht im Konstruktionsprozess auf das Recycling am EoL nehmen. Einige Unternehmen geben Maßnahmen wie *leichtere Demontierbarkeit* oder *geringe Anzahl verschiedener Materialien* an. Laut Frage 28 weisen Unternehmen einige Gründe für die Verfolgung von Ansätzen recyclinggerechter Konstruktion vor; jeweils über die Hälfte der Unternehmen gibt *Gesetzgebung* oder *ökonomische Ziele* als Hintergründe an, einige nennen *ökologisches Bewusstsein* und *Konkurrenzfähigkeit*. Weiterhin soll Frage 30 betrachtet werden, nach der ebenfalls knapp die Hälfte der Teilnehmenden angibt, dass recyclinggerechte Konstruktion in Zukunft eine stärkere Bedeutung erfährt. Ebenso wird der Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele tendenziell eher hoch eingeschätzt (Frage 11). Insgesamt ergibt sich eine gemischte Meinung der Teilnehmenden, entsprechend kann die These nicht klar beantwortet werden. Es zeigt sich jedoch ein leichter positiver Trend für die Zukunft.

These 2: Es fehlen die Werkzeuge und das Wissen, um Produkte ressourceneffizienter zu gestalten.

Zur Beantwortung der zweiten These soll zunächst Frage 23 zurate gezogen werden. Die Abhängigkeit von Unternehmen zu ihren Zulieferern und Auftraggebern wird durchschnittlich hoch angegeben. Entsprechend sind die einige der teilnehmenden Unternehmen durchaus befähigt, Produkte eigenverantwortlich gestalten zu können. Weiterhin sind rund zwei Dritteln der befragten Unternehmen (Frage 25) die Vorgehensweisen und Herausforderungen beim Recycling ihrer Produkte bekannt, sodass fehlendes Wissen tendenziell eher kein Problem zur ressourceneffizienten Produktgestaltung ist. Auf der anderen Seite zeigen die Antworten von Frage 27, dass insbesondere *technische Herausforderungen* sowie *Abhängigkeit von Zulieferern / Kunden* besondere Herausforderungen für leichteres Recycling am EoL sind. Der erforderliche Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion als eine Möglichkeit, Produkte ressourceneffizienter zu gestalten, wird leicht überdurchschnittlich angegeben (Frage 29), ist jedoch nicht eindeutig. Als die relevantesten Hindernisse zur

Steigerung der Demontierbarkeit von Produkten werden *Sicherheits- oder Qualitätsanforderungen* sowie *Kostenaspekte* genannt. Sollte vollständige Automatisierung der Demontage als Möglichkeit dienen, Produkte ressourceneffizienter zu gestalten, sind vor allem zu *geringen Stückzahlen* eine Herausforderung (Frage 34). Insgesamt scheinen die Herausforderungen zur ressourceneffizienten Gestaltung von Produkten im Teilnehmendenfeld durchaus bekannt zu sein, jedoch scheinen diese durch Abhängigkeitsverhältnisse, besondere Anforderungen und Kostenaspekte gebremst zu werden. Dennoch soll die zweite These aus den aufgeführten Gründen tendenziell widerlegt werden.

These 3: Es gibt eine Diskrepanz zwischen dem grünen Image von Unternehmen und deren tatsächlichen Produkten hinsichtlich Recycling / Wiederverwendung.

Die dritte These soll beantwortet werden, indem zunächst das „grüne Image“ der Unternehmen geprüft wird. Laut Frage 5 schätzen die Teilnehmenden ihr Unternehmen tendenziell als umweltbewusst ein. Auch nutzen jeweils über die Hälfte der Unternehmen jeweils ein Umweltmanagementsystem und / oder ein Energiemanagementsystem. Darüber hinaus weisen die Teilnehmenden Ressourceneffizienz hinsichtlich Energie und Material jeweils eine deutlich überdurchschnittliche Bedeutung zu. Insgesamt weisen die teilnehmenden Unternehmen nach ihrer Selbsteinschätzung tendenziell also ein „grünes Image“ auf.

Tatsächlich gibt auch die Mehrheit der Teilnehmenden an, dass gebrauchte Produkte in ihrem Unternehmen wieder aufbereitet werden (Frage 15). Die Bezugsbereitschaft der Kunden der Unternehmen, wiederaufbereitete Produkte und Ersatzteile zu kaufen, ist nicht eindeutig, es scheint zwei Gruppen zu geben (Frage 18). Abschließend werden die Antworten von Frage 35 betrachtet, dabei zeigt sich, dass eine eindeutige Mehrheit der Unternehmen angibt, dass eine Wiederverwendung ihrer Produkte realisierbar ist. Insgesamt zeigt sich die Tendenz, dass die Unternehmen sich als eher nachhaltig einschätzen und tendenziell auch ressourceneffiziente Produkte anbieten, entsprechend soll die dritte These ebenfalls eher nicht bestätigt werden³¹.

³¹ Um die These abschließend zu widerlegen, benötigt es zusätzliche externe Studien zu den Produkten der Unternehmen, da nicht anhand einer durchgeführten Umfrage mit ausschließlich eigenen Aussagen zu den Produkten auf die tatsächliche Diskrepanz zwischen Image und Produkten geschlossen werden kann.

These 4: Automatisierte Demontagesysteme erfordern besondere recyclinggerechte Konstruktion / Design-for-Recycling Ansätze.

Zur Beantwortung der vierten These werden Fragen aus dem letzten Fragenblock *Konstruktion & Demontage* betrachtet. Der Aussage „Das frühzeitige Einbeziehen recyclinggerechter Konstruktion führt zu einer leichteren Automatisierbarkeit der Demontage unserer Produkte“ stimmen die Teilnehmenden durchschnittlich stark zu, dabei stimmen einige stark dafür, andere stark dagegen (Frage 31). Weiterhin sehen die Teilnehmenden verschiedene Hindernisse für die Steigerung der Demontierbarkeit von Produkten (Frage 32), sodass die Vermutung besteht, dass insbesondere die automatisierte Demontage mit noch mehr Hindernissen verbunden ist. Weiterhin wurde der erforderliche Mehraufwand für demontagerechte Konstruktion eingeschätzt, dabei zeigt sich eine durchschnittliche Meinung. Zuletzt wurde auch konkreter nach den Herausforderungen bei vollständiger Automatisierung der Demontage gefragt, erneut geben die Teilnehmenden viele Antworten. Insbesondere zu *geringen Stückzahlen* sind neben *zu hoher technischer Komplexität* und *unbekanntem Zustand* besondere Herausforderungen. Die Herausforderung *untrennbare Verbindungen*, als klassischer Ansatzpunkt für recyclinggerechte Konstruktion, wird von 28 % der Teilnehmenden genannt. Insgesamt zeigt sich, dass zur vierten These nicht klar Stellung bezogen werden kann. Einerseits kann recyclinggerechte Konstruktion zu leichter realisierbaren automatisierten Demontagesystemen führen und viele Herausforderungen sind bekannt, auf der anderen Seite spielt ein Aspekt der recyclinggerechten Konstruktion bei den Herausforderungen der automatisierten Demontage eher eine untergeordnete Rolle. Zählt die Reduktion *zu hoher technischer Komplexität* ebenfalls zur recyclinggerechten Konstruktion, kann These 4 tendenziell eher bestätigt werden.

5. Demontagetiefe

5.1 Umsetzung des Algorithmus zur Ermittlung optimaler Demontagetiefen in einem Programm

Der in Kapitel 2.5 beschriebene Demontagealgorithmus wird in einem Programm, geschrieben in Python, umgesetzt, dabei werden die Bibliotheken *math*, *os*, *re*, *subprocess*, *sys*, *time*, *xml.dom.minidom*, *numpy*, *pylightxl* und *PyQt6* eingebunden. Das Programm setzt sich im Wesentlichen aus drei Klassen zusammen, wobei die Klassen *Matrix* und *Graph* in der Klasse *Barbarossa* zusammengeführt werden. Die wichtigsten Funktionalitäten werden folgend kurz umrissen [Westhof, 2021]³².

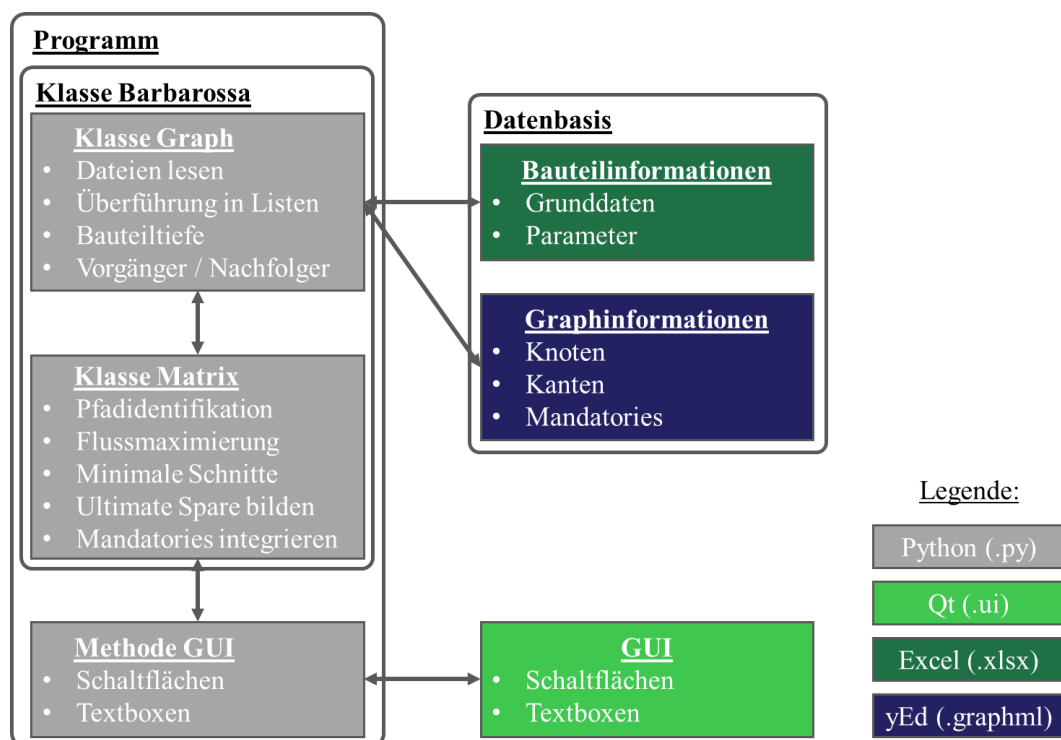


Abbildung 31: Architektur und Datenflüsse zwischen Code, Datenbasis und GUI im Programm zur Ermittlung optimaler Demontagetiefen

In der Klasse *Matrix* werden verschiedene sogenannte Methoden definiert, die wiederum unterschiedliche Aufgaben übernehmen. Es geht darum, Pfade zu identifizieren, maximale Flüsse über diese Pfade zu finden, daraus die minimalen Schnitte zu bilden und einen Ultimate Spare abzuleiten. In der Methode *bfs*³³ wird die Breitensuche umgesetzt, in der Methode *dfs*³⁴ wird die Tiefensuche umgesetzt. Beide dienen dazu, im Graphen alle Pfade zu

³² In Rahmen der Masterarbeit von Westhof [2021], betreut von Hansen, wurde eine Programmabasis geschaffen, auf der folgend weitergearbeitet wurde.

³³ Engl. breadth-first search

³⁴ Engl. depth-first search

finden, auf denen der Fluss erhöht werden kann. In der Methode *minimum_cut* werden auf Basis des Minimum Cut Algorithmus minimale Schnitte bestimmt. Dabei werden wiederum die Methoden *bfs* und *dfs* aufgerufen [GeeksforGeeks, 2023]. Die Methode *node_search* dient dazu, den US zu bilden. Die Suche basiert wiederum auf den minimalen Schnitten. Die letzte wesentliche Methode ist *get_parents*, in der die Summe aller Vorgängerknoten eines Knoten gefunden werden, sodass diese als Vorgänger verpflichtend zu demontierender Bauteilgruppen in den US aufgenommen werden können.

Die Klasse *Graph* umfasst ebenfalls eine Reihe unterschiedlicher Methoden; hierbei geht es darum, den Graphen aus der *.xlsx* und der *.graphml* Datei in das Programm aufzunehmen. Dazu werden zunächst über die Methode *get_filename* die jeweiligen Dateinamen geschrieben und über die Methoden *read_graphml* und *read_excel* die jeweiligen Dateien ausgelesen. Danach werden alle Knoten und alle Kanten in Listen von Listen ($\hat{=}$ Matrizen) aufgenommen und mit Ihren jeweiligen Werten versehen, sodass das Programm mit den Daten arbeiten kann. In der Methode *process_component_depths* werden die jeweiligen Tiefen der Bauteile im Demontagegraph durch eine rekursive Suche bestimmt. Die Methode *process_predecessors_successors* dient der Ermittlung der direkten Vorgänger und Nachfolger eines Knotens.

In der Klasse *Barbarossa* werden die Klassen *Matrix* und *Graph* miteinander verbunden. Darüber hinaus beinhaltet das Programm die Methode *gui*, in der die Funktionen aller Schaltflächen und Textboxen des GUI hinterlegt sind.

Neben dem Python-Code gibt es einige andere Dateien, die für das Programm genutzt werden, die Wesentlichen davon sollen kurz erläutert werden. Zum einen dient eine Excel-Datei als Datenbasis, gleichzeitig können in dieser jedoch auch die im folgenden Kapitel 5.3.1 beschriebenen Parameter variiert werden, um eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Zum anderen werden die logischen Zusammenhänge des Demontagegraphen (Knoten, Edges, Mandatories) in einer *.graphml*-Datei festgehalten. In dieser kann der Demontagegraph verändert und Knoten für eine verpflichtende Demontage ausgewählt werden. Die letzte wesentliche Datei ist eine *.ui*-Datei, in der die Darstellung des GUI gespeichert ist, dazu wird das Anwendungsframework Qt genutzt.

Durch die Option, Mandatory-Knoten im Demontagegraphen einzubinden, darf der Algorithmus nicht wie ursprünglich angedacht, durch den gesamten Demontagegraphen laufen. Mandatory-Knoten dürfen nicht, wie ursprünglich angenommen, mit der Summe ihrer Vorgänger im US aufgenommen werden, da durch die Pflichtdemontage eines Knoten die Demontage weiterer, darauffolgender (positiver) Knoten unter Umständen nicht berücksichtigt würde. Daher werden zunächst die Mandatory-Knoten zusammen mit der Summe aller ihrer Vorgänger aus dem Demontagegraphen „geschnitten“ und dem US separat zugeführt.

In der Folge haben die ursprünglichen Folgeknoten im Demontagegraph keine Vorgänger und können, bei Bauteilwert ≥ 0 , demontiert werden. Nachdem dieser Schritt vollzogen ist, wird der Demontagealgorithmus wie ursprünglich auf den Rest des Demontagegraphen angewendet.

5.2 GUI

Zur Bedienung des Demontagealgorithmus und zum Auslesen der Ergebnisse wurde ein *Graphic User Interface* programmiert. Vom GUI aus können der Demontagegraph (.graphml) und der zugehörige Datensatz (.xlsx) geladen werden. Weiterhin kann vom GUI aus die Berechnung optimaler Demontagetiefen gestartet werden, die im Hintergrund in Python läuft. Weiterhin kann ausgehend vom GUI eine eingefärbte Version des Demontagegraphen in yEd geöffnet werden (Beispiel siehe Abbildung 33), wobei die Knoten rot (nicht demontierte Bauteilgruppen) und grün (demontierte Bauteilgruppen) gefärbt werden. Weiterhin wird der Demontagegewinn in Eurocent, die Anzahl sowie eine Liste der demontierten Bauteilgruppen ausgegeben.

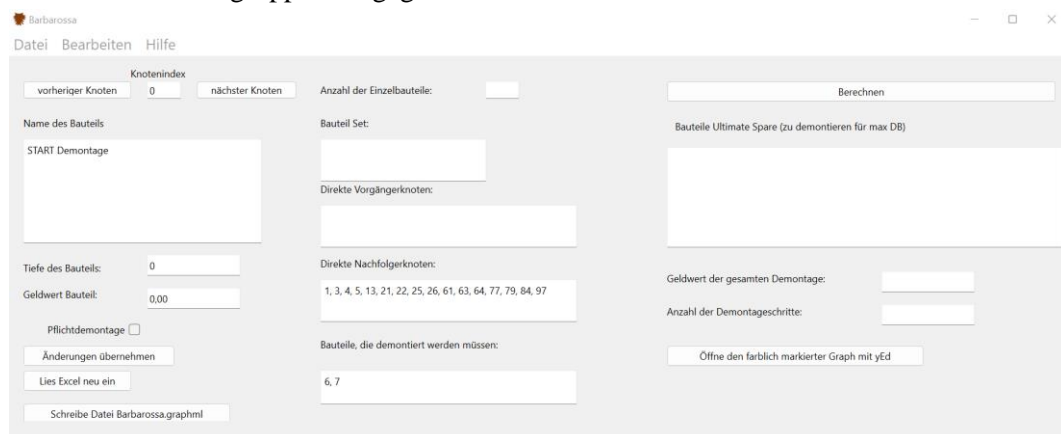


Abbildung 32: GUI zur Darstellung optimaler Demontagetiefen

Zusätzlich können im GUI alle im Demontagegraph enthaltenen Knoten durchgegangen, und Informationen wie die Tiefe der Bauteilgruppe, der Nettowert der Bauteilgruppe, die Option auf Pflichtdemontage sowie Vorgänger und Nachfolger angezeigt werden. Darüber hinaus besteht im GUI die Möglichkeit, Änderungen an den Nettowerten der Bauteilgruppen vorzunehmen sowie die Option auf Pflichtdemontage zu ändern. Änderungen können direkt vom GUI aus in eine aktualisierte Berechnung und in eine aktualisierte Variante des eingefärbten Demontagegraphs übernommen und neu berechnet werden. Für den Fall, dass zu viele Änderungen vorgenommen wurden, können die Werte des Basisszenarios wiederhergestellt werden.

5.3 Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Demontagetiefen

Im Folgenden soll eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, bei der unterschiedliche Parameter im beschriebenen Modell untersucht werden. Diese Parameter sind der Wert des

zu demontierenden Aggregats, die Demontagezeit, der Zustandsfaktor, die Investitionen für das Demontagemodul sowie der Re-X Faktor. Für die Sensitivitätsanalyse wurde aufgrund der mangelnden Datenlage eine Reihe von Annahmen getroffen, die folgend erläutert werden.

Für den monetären Wert des EAA wurde auf eine Schätzung auf Basis einer Studie zu Wertschöpfungspotenzialen von Elektromotoren in Baden-Württemberg³⁵ [Stanek et al., 2021] sowie einer Studie über die Profitabilität von Antriebsstränge zurückgegriffen [Neuhausen et al., 2020]. Daraus resultiert ein geschätzter Wert von circa 780,00 € für das EAA³⁶. Der Wert der Knoten im Demontagegraph setzt sich aus der Anzahl der Bauteile und dem jeweiligen Wertanteil am Gesamtaggregate sowie den Demontagekosten, errechnet aus der geschätzten jeweiligen Demontagedauer und den Kosten für die Nutzung des Demontagemoduls zusammen. Diese sollen unter anderem in der Sensitivitätsanalyse untersucht werden. Weiterhin wird ein *Re-X-Faktor* eingerechnet, der eine Aussage über die Art der Re-X-Routen geben soll. So sollen Gehäuseteile beispielsweise nach Prüfung und Reinigung einem ReUse zugeführt werden, daher wird ein Re-X-Faktor von 0,9 angesetzt, Schrauben hingegen sollen stofflichem Recycling zugeführt werden, was sich in einem Re-X-Faktor von 0,05 zeigt. Der Re-X-Faktor ist insbesondere im Hinblick auf den Demontagezeitpunkt relevant, da insbesondere bei sehr langlebigen Produkten (siehe Kapitel 4.2) der Zeitwert von Bauteilgruppen stark variieren kann. Neben dem Re-X-Faktor wird ein Zustandsfaktor eingerechnet, der die Wertminderung von Bauteilen durch die Laufleistung eines Aggregats ausdrücken soll. Weiterhin wird zunächst keine Parallelisierung von Demontageschritten angenommen, da keine belastbare Einschätzung getroffen werden kann, welche Demontageschritte parallel durchgeführt werden können. Die Elimination von zirkulären Beziehungen im Demontagegraph wird gemäß Kapitel 2.5.1 durchgeführt. Die beiden Bauteilgruppen *Getriebeöl (N7)* und *Kühlmittel (N6)* werden als verpflichtend zu demontierende Bauteile deklariert, da diese als Schadstoffe gelten und entsprechend entsorgt werden müssen.

³⁵ Auch das betrachtete EAA wurde in Baden-Württemberg gefertigt

³⁶ Aus der Studie von Stanek et al. [2021] gehen ebenfalls die Wertanteile einiger relevanter Komponenten wie dem Rotor oder Stator hervor.

5.3.1 Basisszenario

Für das möglichst realitätsnahe Basisszenario werden die in folgender Tabelle zusammengefassten Werte angenommen, die auf Schätzungen basieren, die im Projekt DeMoBat bei der Demontage des EAA gewonnen wurden. In den folgenden Variationen wird immer lediglich ein Wert bzw. ein Faktor geändert. Die Demontagedauern sind geschätzte Werte und unterliegen in der Realität bauteilgruppenspezifischen Schwankungen. Zunächst werden parallele Demontageprozesse ausgeschlossen, da sonst Demontagezeiten nicht länger gelten könnten³⁷. Da nicht für jede Bauteilgruppe ein verlässlicher Wert geschätzt werden kann, werden diese vereinheitlicht.

Tabelle 4: Angenommene Werte für zugrunde gelegte Kriterien der Demontagetiefe

Kriterium	Wert
Wert EAA	780,00 €
Zustandsfaktor Aggregat	0,25
Zustandsfaktor Elektronik	0,5
Re-X-Faktor	bauteilgruppenindividuell
Gesamtinvestition Demontagemodul	900.000,00 €
Demontagedauer ³⁸ allgemeiner Schritt	14
Dauer Schraubvorgang	19
Dauer Werkzeugwechsel	11
Dauer Handling allgemein	16
Instandhaltung [Anteilig an Anschaffungskosten]	10 %
Nutzungsdauer (nach AfA-Tabellen des BMF ³⁹)	6 a
Arbeitstage im Jahr	250
Dauer Arbeitstag	14 h
Leistungsbedarf Demontagemodul [kW]	5
Strompreis	30 ct/kWh

³⁷ Da ein Roboter über einer Lineareinheit zwischen den Bereichen Demontage Leistungselektronik und Demontage elektrische Maschine & Getriebe hin- und her wechseln muss, können keine verlässlichen „echt“ parallelen Demontageprozesse geschätzt werden

³⁸ Die Demontage setzt sich aus einzelnen Demontagesequenzen zusammen, die in der Regel jeweils von derselben Homeposition aus starten (Home -> Position Bauteil -> Home)

³⁹ AfA-Tabellen (Absetzung für Abnutzung) beschreiben die nach dem Bundesministerium für Finanzen (BMF) vorgeschriebenen Abschreibedauern allgemein verwendbare Anlagegüter

Für das Basisszenario werden 53 von 97 Bauteilgruppen⁴⁰ demontiert, was einer *Demontagequote* von knapp 56 % entspricht; es kann ein *Demontagegewinn* von circa 58,93 € pro demontiertem Aggregat erwirtschaftet werden.

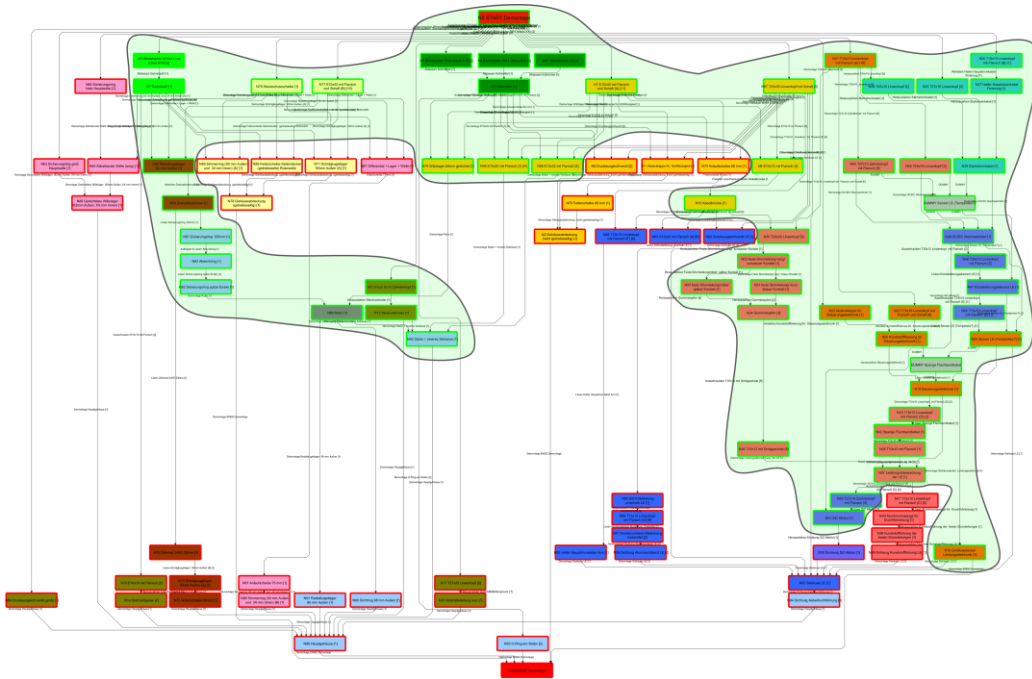


Abbildung 33: Ultimate Spare bzw. bei optimaler Demontagetiefe inbegriffene Bauteilgruppen im Basisszenario (in grüner Blase eingeschlossen)

Es zeigt sich, dass besonders werthaltige Bauteilgruppen wie Rotor, Stator und Teile der Leistungselektronik demontiert werden. Ebenfalls werthaltige Bauteilgruppen wie Gehäuseteile werden tendenziell nicht demontiert, da hier viele kleine, nicht besonders werthaltige Bauteilgruppen, die noch in den Gehäuseteilen verbaut sind (bspw. Anlaufscheiben, Federscheiben, Druckventile), zuerst demontiert werden müssen.

Im Folgenden sollen unterschiedliche Parameter variiert werden, dazu wird zunächst der Wert des zu demontierenden Aggregats („EAA-Wert“) betrachtet.

5.3.2 Variation des Werts des elektrischen Antriebsaggregats

Der EAA-Wert wird zwischen den minimalen und maximalen Schätzungen aus Stanek et al., [2021] und Neuhausen et al., [2020] variiert. In der folgenden Abbildung 35 werden die Demontagequote und der Demontagegewinn abgebildet:

⁴⁰ Im GUI werden 57 Bauteilgruppen angezeigt, u. U. müssen jedoch die Dummy-Knoten für Start und Ende sowie zwei Dummy-Knoten für Schleifen abgezogen werden

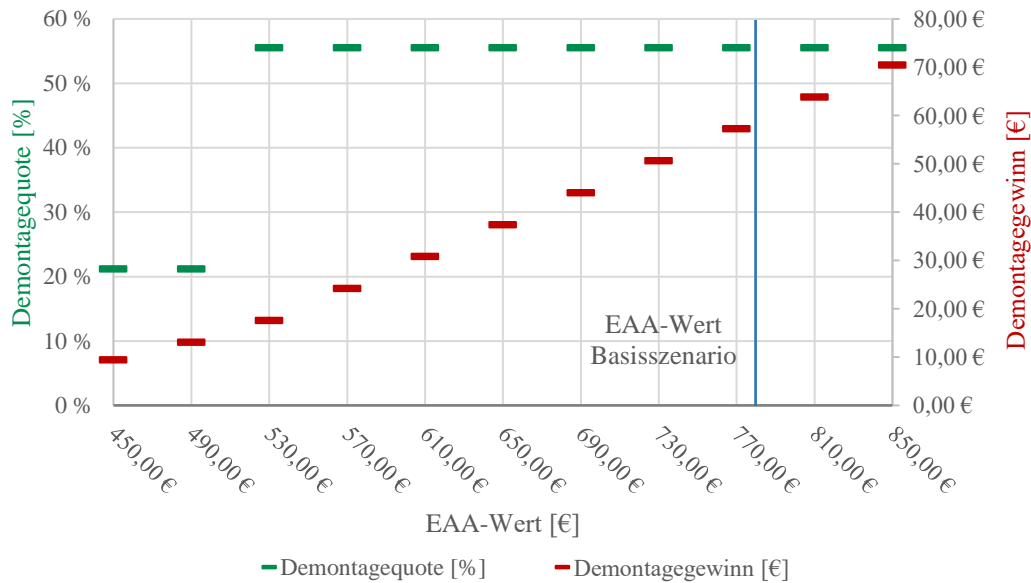


Abbildung 35: Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche EAA-Werte

Es zeigt sich, dass mit steigendem EAA-Wert sowohl der Demontagegewinn als auch die Demontagequote steigen. Dabei fällt auf, dass der EAA-Wert aus dem Basisszenario bis auf 530,00 € sinken könnte, bevor die Demontagequote signifikant sinkt. Weiterhin zeigt sich ein abgestufter Verlauf für die Demontagequote, dies ist damit zu begründen, dass, sobald tiefliegende, besonders werthaltige Komponenten wirtschaftlich erreicht werden können, die Menge der Vorgängerbauteilgruppen automatisch mitdemontiert werden muss.

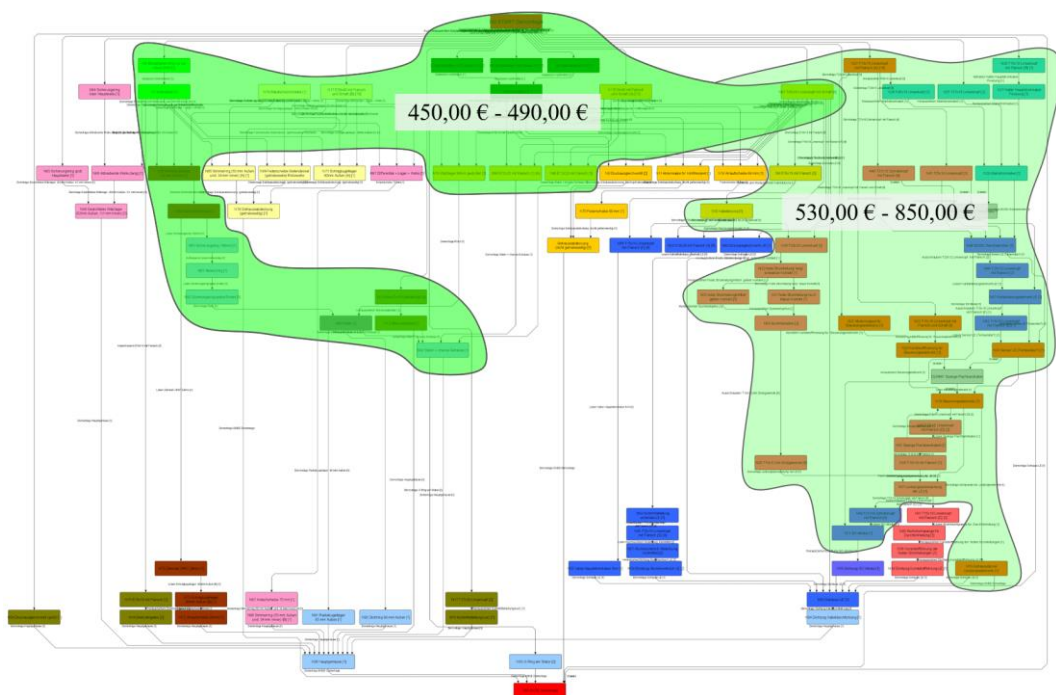


Abbildung 34: Ultimate Spares von unterschiedlichen EAA-Werten

Für niedrige EAA-Werte zeigt sich ceteris paribus eine vergleichsweise niedrige Demontagequote von 21 %. Diese niedrige Demontagequote wirft die Frage auf, inwieweit elekt-

rische Antriebsaggregate aus günstigen (kleinen) Elektrofahrzeugen wirtschaftlich demon-
tiert werden können. In Abbildung 34 werden die USs verschiedener EAA-Wertintervalle
über dem Demontagegraphen abgebildet. Im rechten Bereich des Demontagegraphen sind
vor allem Bauteilgruppen aus der Leistungselektronik enthalten, ab 530,00 € EAA-Wert
werden diese zu großen Teilen demontiert.

5.3.3 Variation Demontagezeit

Ein besonderer Faktor für die automatisierte Demontage ist die für die Demontage benö-
tigte Zeit. Um deren Relevanz näher zu untersuchen, werden die aus dem Basisszenario
vorgegebenen Zeiten für *allgemeine Demontageschritte*, *Schraubvorgänge*, *Werkzeug-
wechsel* und *allgemeines Handling* mit einem Faktor multipliziert, der in der folgenden
Abbildung 36 auf der Abszisse abgetragen ist und entsprechend zwischen 0,2 und 2,4 va-
riiert wird. Es werden erneut Demontagequote und Demontagegewinn dargestellt.

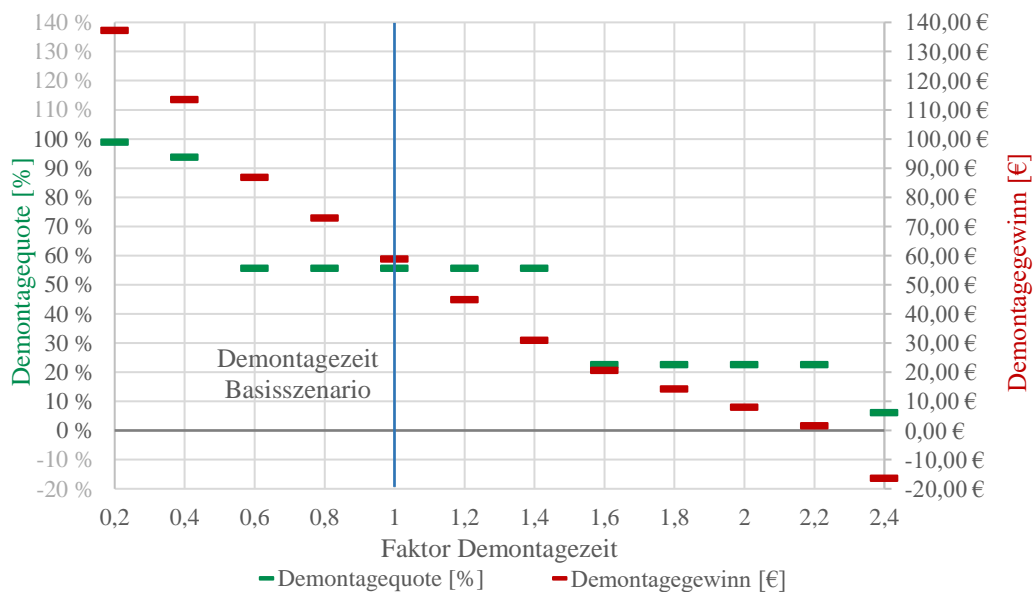


Abbildung 36: Demontagequote und -gewinn für unterschiedliche Demontagezeiten (Demontagequoten für < 0 % und > 100 % nicht zulässig, daher ausgegraut)

Der Faktor der Demontagezeit wird im Basisszenario mit eins angesetzt. Wie sich zeigt,
nehmen die Demontagequote und der Demontagegewinn mit zunehmender Demontagezeit
ab. Aus Abbildung 36 ist weiterhin zu entnehmen, dass bis hin zu einem negativem De-
montagegewinn demontiert wird. Dies ist damit zu begründen, dass sowohl Getriebeöl als
auch Kühlmittel verpflichtend demontiert werden (Mandatory-Bauteilgruppen).

Diese werden unabhängig ihrer Kosten mitsamt der Summe der jeweiligen Vorgänger demontiert und können so zu einem negativen Gewinn führen. Um eine signifikante Erhöhung der Demontagequote zu erzielen, muss die Demontagezeit um 60 % (0,4) reduziert werden. Der Demontagegewinn steigt konstant mit sinkender Demontagezeit.

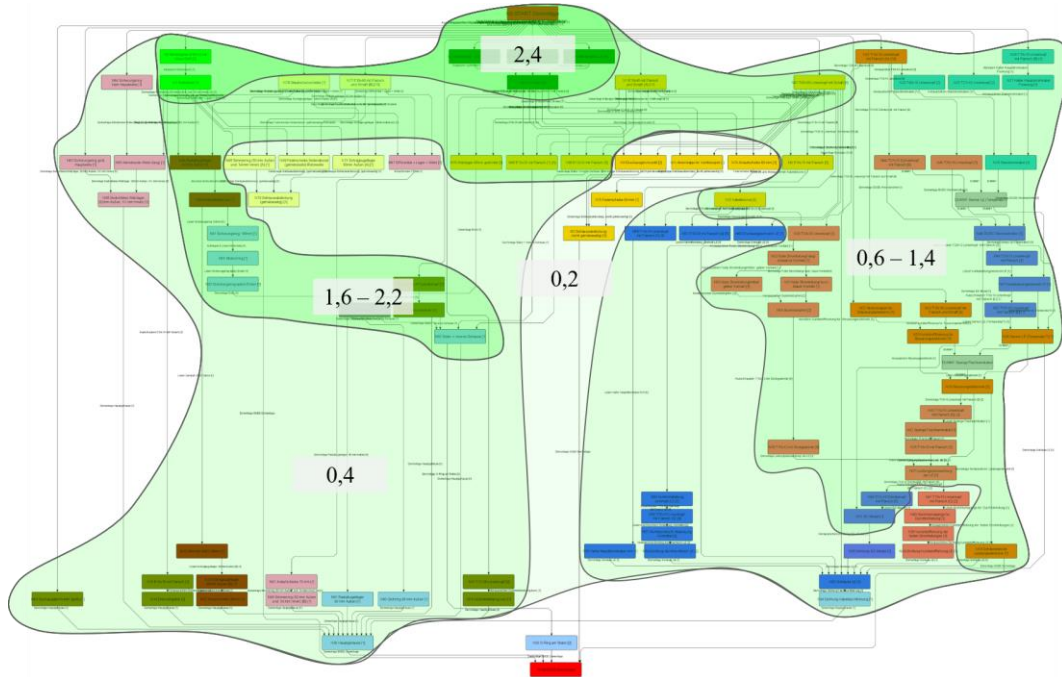


Abbildung 37: Ultimate Sparer von unterschiedlichen Demontagezeiten

Wie in Abbildung 37 ersichtlich, findet im Vergleich zur Variation des EAA-Werts eine feinere Abstufung der Demontagequoten statt. Bei einem sehr hohen Faktor der Demontagezeit (2,4) werden lediglich die Mandatory-Bauteilgruppen und deren Vorgänger demontiert. Verkürzt sich die Demontagezeit im Vergleich zum Basisszenario um 80 % (0,2), kann die Demontagequote von 56 % auf 99 % steigen. Insgesamt zeigt sich, dass eine Modifikation, die beispielsweise durch bessere Handlingstrategien (siehe Kapitel 6.3.3) erzielt werden kann, zunächst zu einer Erhöhung des Demontagegewinns und bei größerem Umfang auch zu einer Erhöhung der Demontagetiefe führen kann.

5.3.4 Variation Zustandsfaktor

Da die Demontage für Antriebsaggregate mit unterschiedlichen Zustandsfaktoren betrachtet wird, soll im Modell auch der Zustandsfaktor variiert werden. Die erste, höhere Zahl ist der Faktor, mit dem der Zustandwert elektronischer Bauteilgruppen multipliziert wird, die zweite Zahl steht für den Modifikationsfaktor der sonstigen Bauteilgruppen.

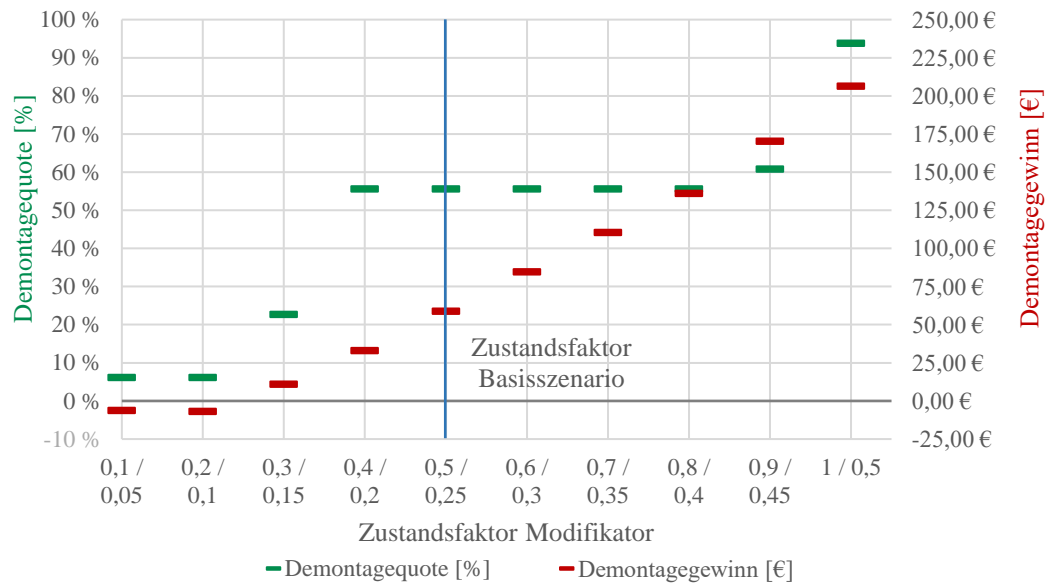


Abbildung 38: Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche Zustandsfaktoren (elektronische Bauteilgruppen / sonstige Bauteilgruppen) (Demontagequoten für < 0 % nicht zulässig, daher ausgegraut)

Der Zustandsfaktor soll maximal einen Wert von eins erreichen, da sich der Zustand von Bauteilgruppen über die Nutzung nicht verbessern kann. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Zustandsfaktor die Demontagequote steigt; der Demontagegewinn steigt ebenfalls tendenziell. Für das Zustandsfaktortupel 0,2 / 0,1 ergibt sich mit -6,75 € ein geringerer Gewinn als für das Zustandsfaktortupel 0,1 / 0,05 mit -6,21 €. Dies ist dadurch zu erklären, dass der negative Gewinn im Wesentlichen durch die Mandatory-Bauteilgruppen (mit negativem Bauteilgruppenwert) erzeugt wird – diese fallen durch den höheren Zustandsfaktor stärker ins Gewicht und senken so den Demontagegewinn noch weiter.

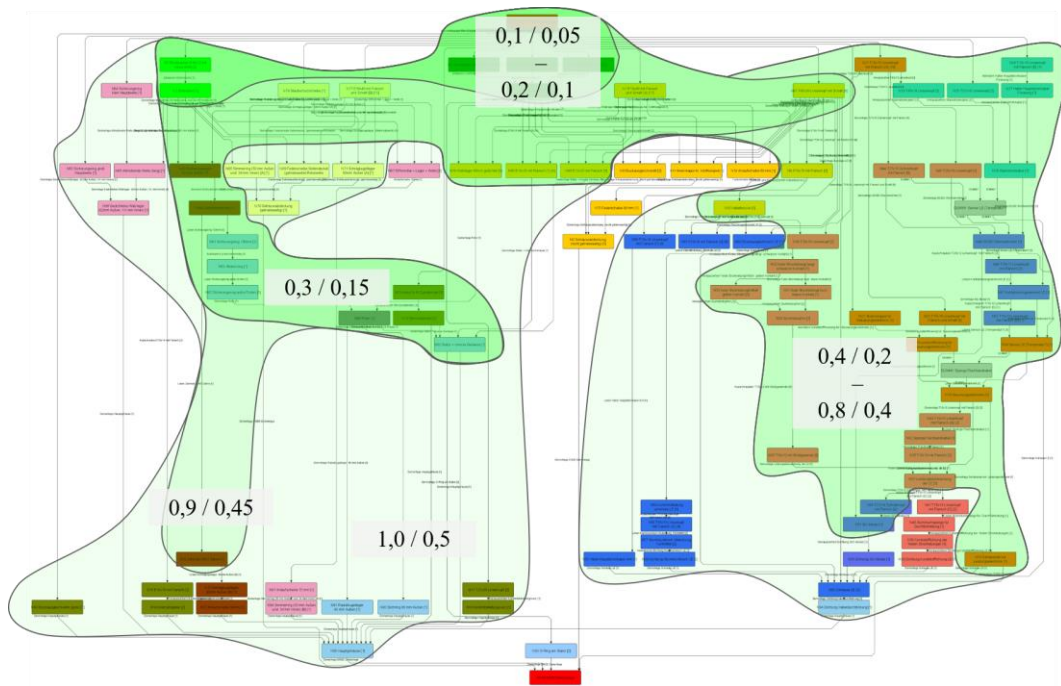


Abbildung 39: Ultimate Spares von unterschiedlichen Zustandswerten

Für die angenommenen Zustandsfaktoren liegt die maximale Demontagequote ceteris paribus bei maximal 94 %. Für sehr geringe Zustandsfaktoren kann die Demontagequote auf 7 % fallen. Würden keine Mandatory-Bauteilgruppen vorhanden sein, fiel die Demontagequote noch weiter.

5.3.5 Variation Wert des Demontagemoduls

Ein weiterer entscheidender Faktor für die Demontagetiefe sind die Kosten einer Technikersstunde, die maßgeblich von den Investitionen in das Demontagemodul beeinflusst werden.

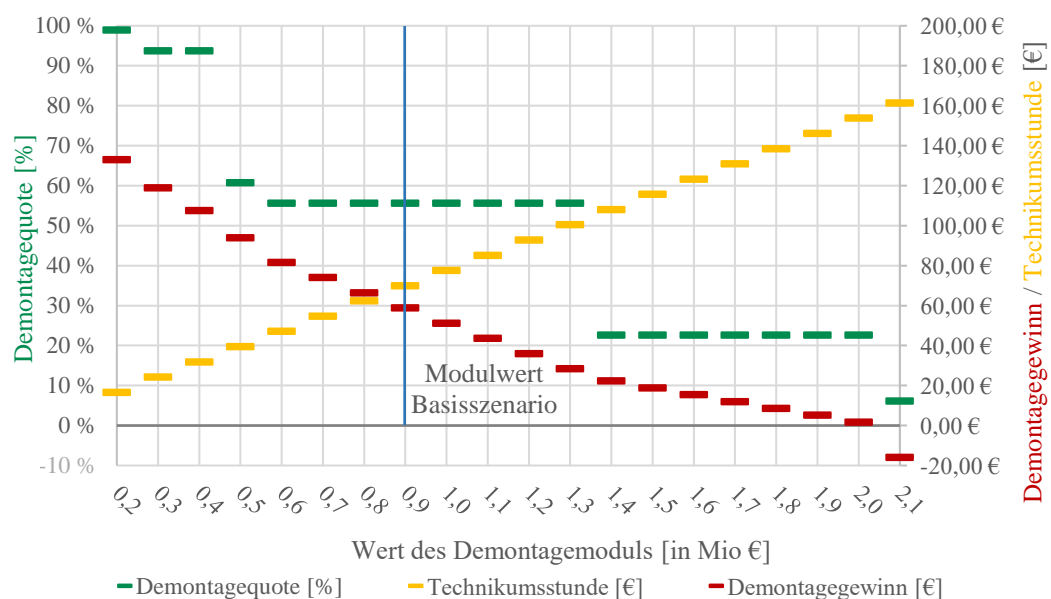


Abbildung 40: Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche Investitionen in das Demontagemodul (Demontagequoten für < 0 % nicht zulässig, daher ausgegraut)

Daher sollen die Investitionen für ein Demontagemodul zwischen 0,2 Mio. € und 2,1 Mio. € variiert und die entsprechenden Demontagequoten respektive Demontagegewinne untersucht werden. Wie in Abbildung 40 ersichtlich, steigen mit zunehmender Höhe der Investition in ein Demontagemodul die Kosten für eine Technikurstunde, während gleichzeitig Demontagequote und Demontagegewinn sinken. Es zeigt sich, dass die Investition in eine Demontagemodul circa halbiert werden müsste, um die Demontagequote signifikant zu erhöhen. Eine Verteuerung des Demontagemoduls um bis zu 50 % beeinträchtigt die Demontagequote nicht, während sich der Demontagegewinn pro Aggregat im Vergleich zum Basisszenario um knapp 52 % auf 28,54 € verringert.

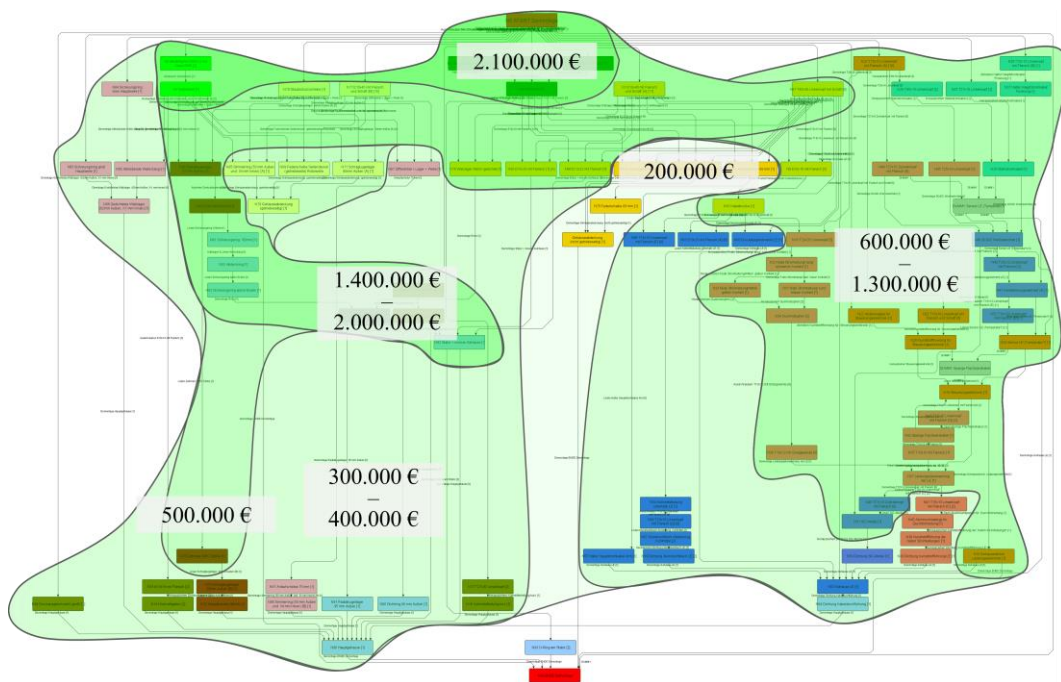


Abbildung 41: Ultimate Spares unterschiedlicher Investitionen in das Demontagemodul

Abbildung 41 zeigt, dass bei geringer Investition in das zugrundeliegende Demontagemodul eine nahezu vollständige Demontage erzielt werden kann (99 % Demontagequote). Weiterhin zeigt sich eine ähnliche Abstufung der US wie bei den vorherigen Parametervariationen.

5.3.6 Variation Re-X Faktor

Besonders relevant für die ökonomischen und ökologischen Erfolgsaussichten der Demontage sind die Arten der gewählten bzw. möglichen Recyclingstrategie (siehe Kapitel 2.2.2) jeder Bauteilgruppe. Bauteilgruppen, die sehr wahrscheinlich einem stofflichen Recycling zugeführt werden (bspw. Schrauben), werden mit einem geringen Re-X Faktor versehen. Bauteilgruppen, die einer geringen Abnutzung unterliegen und tendenziell einem ReUse zugeführt werden, werden mit hohen Re-X Faktoren belegt. Um nun zu untersuchen, inwiefern Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly Maßnahmen die Demontagequote

bzw. den Demontagegewinn beeinflussen, wurden lediglich die Re-X Faktoren von Bauteilgruppen mit einem Wertanteil $\geq 1\%$ variiert, indem diese mit einem zusätzlichen Faktor multipliziert werden (Re-X Faktor Modifikator, abgetragen auf der Abzisse, siehe folgende Abbildung 42). Bauteilgruppen mit einem Wertanteil $\geq 1\%$ sind besonders relevant, da deren Einfluss auf den Demontagegewinn entsprechend höher ist und Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly Maßnahmen tendenziell eher bei Bauteilen mit hohem Einfluss auf den Demontagegewinn getroffen werden sollten. Die Re-X Faktoren der Bauteilgruppen mit einem Wertanteil $< 1\%$ werden im Folgenden entsprechend nicht variiert. Im Vergleich zum Zustandsfaktor werden Re-X Faktoren > 1 berücksichtigt, da Fälle eintreten können, in denen der gegenwärtige Wert einer Bauteilgruppe höher sein kann als zum Herstellungszeitpunkt. Beispielhaft für solche Situationen sollen die Chipkrise mit den verbundenen Lieferengpässen und drastischen Preissteigerungen genannt werden. Insbesondere durch Lieferengpässe und daraus resultierende Fertigungsstillstände können so hohe Kosten entstehen, dass die Demontage von Bauteilgruppen ökonomisch rechtfertigt werden kann.

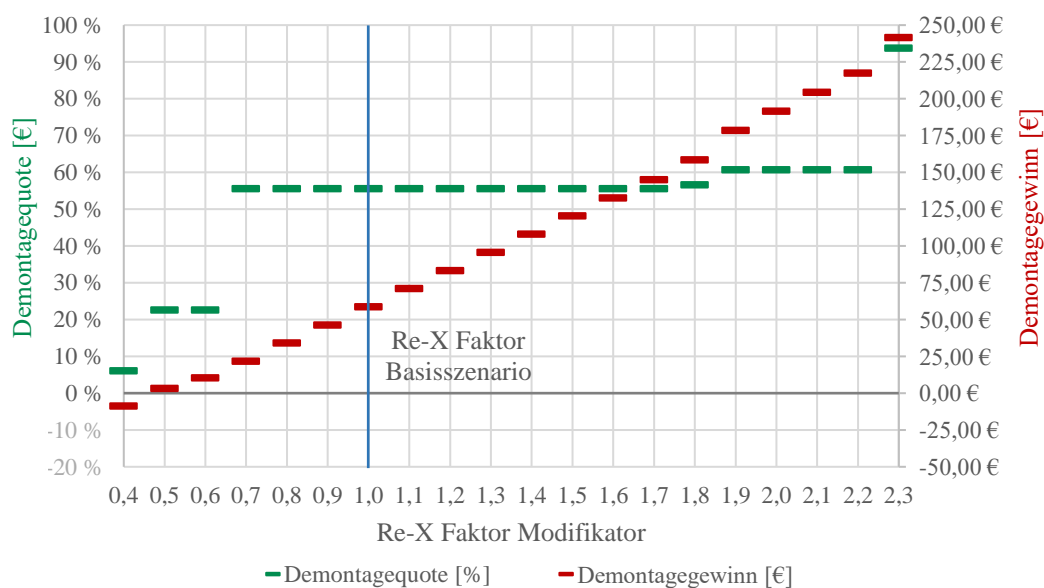


Abbildung 42: Demontagequote und Demontagegewinn für unterschiedliche Re-X Faktoren (Demontagequoten für < 0 nicht zulässig, daher ausgegraut)

Wie in Abbildung 42 dargestellt, steigt mit zunehmendem Re-X Faktor Modifikator sowohl die Demontagequote als auch der Demontagegewinn. Für Re-X Faktor Modifikatoren zwischen 0,7 und 2,2 liegt die Demontagequote zwischen 56 % und 61 % und unterliegt somit einer relativ geringen Schwankung. Gleichzeitig steigt der Demontagegewinn von 21,96 € um knapp 1000 % auf 217,63 €, was einer starken Steigerung, besonders im Hinblick auf die vergleichsweise konstante Demontagequote, darstellt.

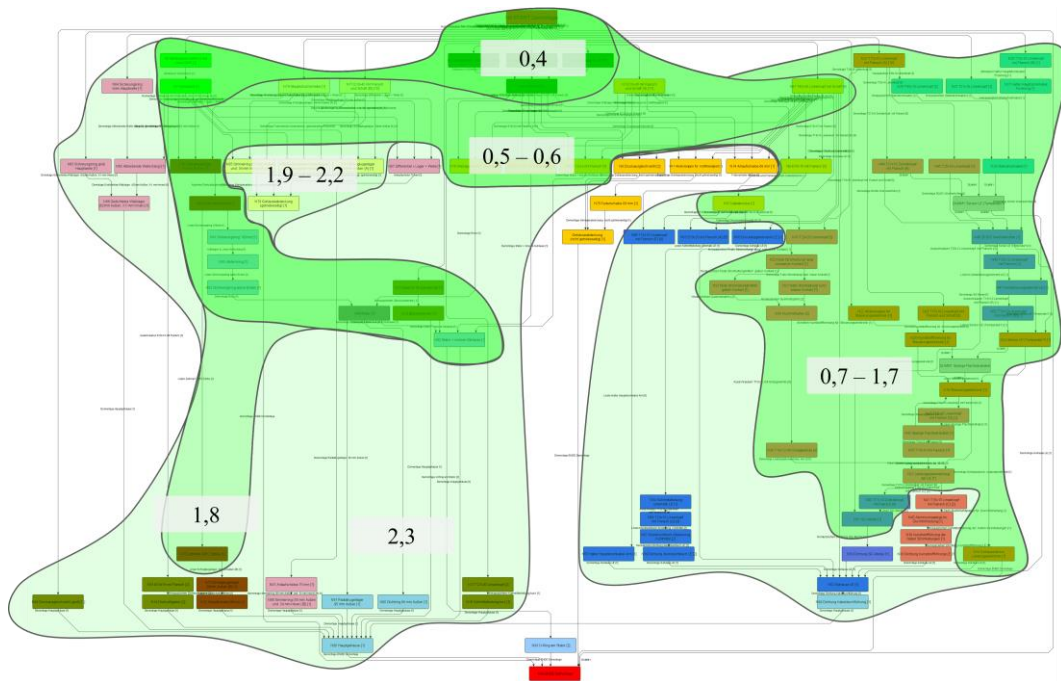


Abbildung 43: Ultimate Sparer unterschiedlicher Re-X Faktor Modifikatoren

Ausgehend von einem Re-X Faktor Modifikator von eins im Basisszenario kann der Re-X Faktor Modifikator um 120 % steigen, ohne eine wesentliche Steigerung der Demontagequote zu erzielen.

6. Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly

6.1 Bestimmung von Kriterien für Demontagefreundlichkeit

In Anlehnung an die Gestaltungsgrundregeln zur Erhöhung der Recyclingeignung der VDI-Richtlinie 2243 [siehe Kapitel 2.4] wurde eine Bewertungsmatrix erstellt, nach der die Recyclingeignung des EAA aus Sicht der automatisierten Demontage bewertet werden soll. Die Gestaltungsgrundregeln wurden entsprechend ihrer Relevanz für die automatisierte Demontage gewichtet. Da die Gestaltungsgrundregeln sich in Teilen doppeln und somit die Wertung verzerren würden, wurden drei Gestaltungsgrundregeln ausgeschlossen (A4, A5, C2). Um die Gewichtung zu erleichtern, wurden zunächst die Kategorien und danach die Gestaltungsgrundregeln gewichtet.

Tabelle 5: Gewichtungen der Gestaltungsgrundregeln aus VDI-Richtlinie 2243

Kategorie	Nummer	Meta-Gewichtung	Individual-gewichtung	End-gewichtung
Baustruktur	A1	25,00 %	35,00 %	8,75 %
	A2		15,00 %	3,75 %
	A3		35,00 %	8,75 %
	A4		0,00 %	0,00 %
	A5		0,00 %	0,00 %
	A6		15,00 %	3,75 %
Materialien und Oberflächen	B1	20,00 %	10,00 %	2,00 %
	B2		10,00 %	2,00 %
	B3		15,00 %	3,00 %
	B4		5,00 %	1,00 %
	B5		25,00 %	5,00 %
	B6		5,00 %	1,00 %
	B7		10,00 %	2,00 %
	B8		15,00 %	3,00 %
	B9		5,00 %	1,00 %
Demontage und Verbindungstechnik	C1	50,00 %	10,00 %	5,00 %
	C2		0,00 %	0,00 %
	C3		5,00 %	2,50 %
	C4		15,00 %	7,50 %
	C5		15,00 %	7,50 %
	C6		20,00 %	10,00 %
	C7		25,00 %	12,50 %
	C8		5,00 %	2,50 %
	C9		5,00 %	2,50 %
Betriebsstoffentnahme	D1	5,00 %	30,00 %	1,50 %
	D2		50,00 %	2,50 %
	D3		20,00 %	1,00 %

Fünf Mitarbeitende des CUTEC Forschungszentrums, die im Rahmen des Projektes De-MoBat die Demontage des EAAs begleitet haben, wurden gebeten, die Anwendung der Gestaltungsgrundregeln aus Sicht der automatisierten Demontage zu bewerten. Die Gewichtung der Gestaltungsgrundregeln war bei der Bewertung nicht bekannt. Gestaltungsgrundregeln konnten auf einer Skala von 1 (wurde nicht umgesetzt) bis 5 (wurde umgesetzt) bewertet werden⁴¹. Die Bewertung der Gestaltungsgrundregeln ist in der folgenden Abbildung 44 dargestellt:

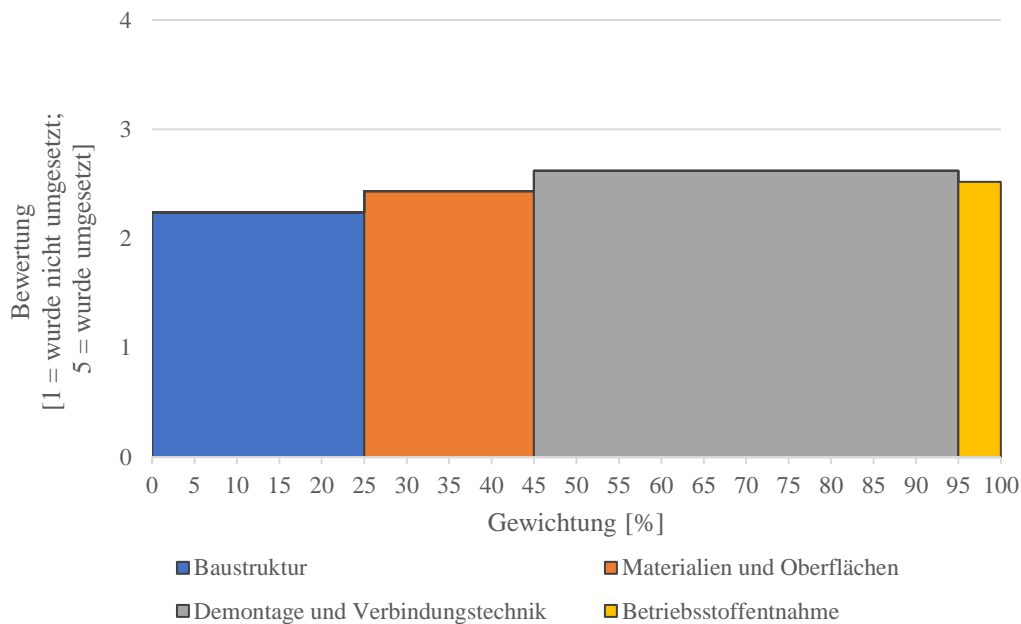


Abbildung 44: Bewertung der Anwendung der Gestaltungsgrundregeln angelehnt an die VDI-Richtlinie 2243 am Beispiel des EAA

Im Durchschnitt wird das EAA mit 2,48 Punkten und somit leicht unterdurchschnittlich bewertet. Entsprechend lässt sich vermuten, dass die vom VDI entworfenen Gestaltungsgrundregeln tendenziell weniger eingehalten wurden. Um den Einfluss der Gewichtung auf das Gesamtergebnis zu kontrollieren, wurde die Gewichtung testweise entfernt; der neue Gesamtdurchschnitt liegt mit 2,44 Punkten sehr nah am gewichteten Ergebnis. Somit lässt sich vermuten, dass durch die vorgenommene Gewichtung (siehe Tabelle 5) die Bedeutung der Gestaltungsgrundregeln nicht wesentlich verändert wurden.

Die Kategorie *Demontage und Verbindungstechnik* wurde mit 2,62 Punkten als am besten bewertet. Die Kategorien *Betriebsstoffentnahme* (2,52 Punkte) und *Materialien und Oberflächen* (2,43 Punkte) liegen im Durchschnitt, die Kategorie *Baustruktur* wurde mit 2,24 Punkten am schlechtesten bewertet.

⁴¹ Die Ergebnisse der Expertenbefragungen werden als begrenzt belastbar eingeschätzt, da lediglich fünf Demontageexperten befragt werden konnten

6.2 Ermittlung verbesserungsbedürftiger Bauteile am EAA

6.2.1 Empirisch ermittelte Fehler

Seit der Aufnahme des EAA in das Produktportfolio des Herstellers wurden sowohl Fehler am End-of-Line als auch Feldfehler aufgenommen. Diese Fehler wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nach einem deduktiv-induktiven Hybridansatz geclustert und, sofern möglich, in Ursache und Symptome eingeordnet; Mehrfachnennungen wurden ausgeschlossen. Die Fehleranalyse soll zur Erfassung verbesserungsbedürftiger Bauteile beisteuern.

End-of-Line-Fehler (0 km)

Die Erfassung der End-of-Line-Fehler passiert im Wesentlichen durch standardmäßig durchgeführte End-of-Line-Prüfungen. Daher werden tendenziell eher Ursachen als Symptome erkannt. Es zeigt sich, dass mit 34 von 103 erfassten Fehlern (~33 %) mechanische Defekte die häufigste Ursache für *nicht in Ordnung* (niO) Aggregate sind.

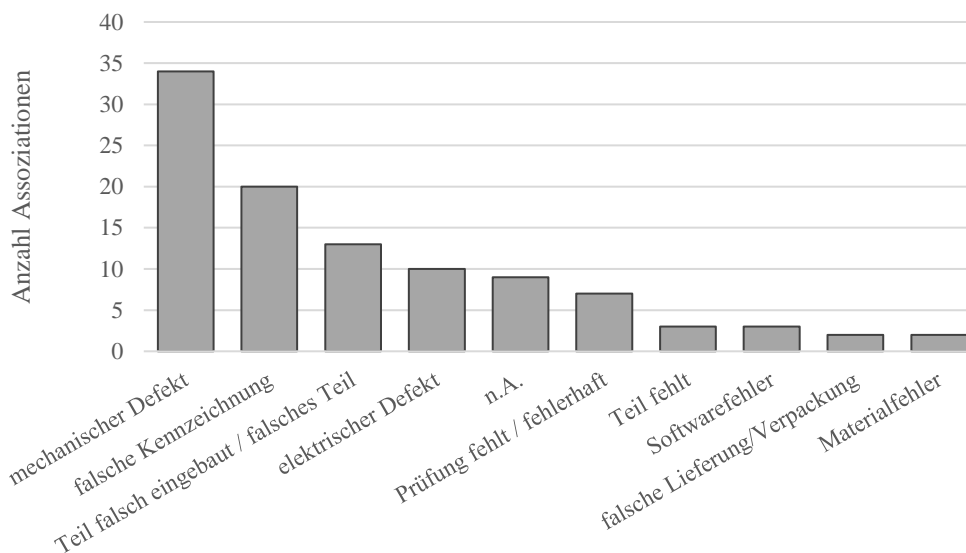


Abbildung 45: Ursachen für niO-Status bei End-of-Line EAA

Die häufigsten mechanischen Defekte lassen sich auf unterschiedliche abgebrochene Elemente von Bauteilen zurückführen; es kann daher keine eindeutige Gruppe von verbesserungswürdigen Bauteilen gebildet werden.

Bei den Symptomen sind auftretende Geräusche (i.d.R. ermittelt auf End-of-Line Prüfständen) mit 10 von 31 Nennungen (~32 %) der häufigste Grund für niO Aggregate.

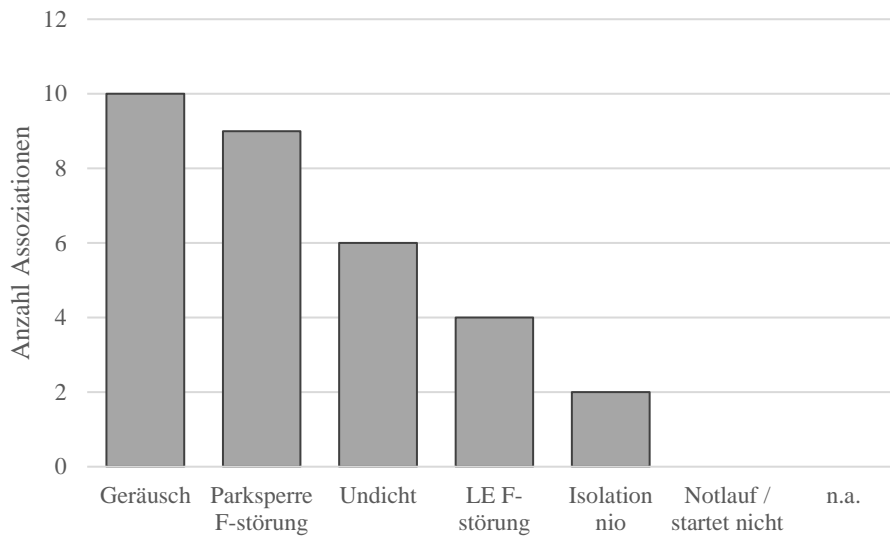


Abbildung 46: Symptome bei niO-Status von End-of-Line EAA

Die festgestellten Geräusche sind häufig auf abgebrochene Teile oder Rückstände aus dem Montageprozess zurückzuführen, entsprechend lassen sich anhand der Geräusche keine konkreten verbesserungsbedürftigen Bauteile identifizieren. Das zweithäufigste Symptom, *Funktionsstörung bei der Parksperre*, weist zwar auf konkrete Bauteile hin, jedoch weist das vorliegende EAA keine Parksperre auf. Undichtigkeiten als nächsthäufigster Grund werden in Teilen bei *Dichtung* in Kapitel 6.3.2 behandelt.

Feldfehler (beliebige km)

Die Erfassung der Feldfehler wurde an ausgebaut und zurückgesendeten Aggregaten bei verschiedenen Zweigstellen des Herstellers aufgenommen. Neben den Ursachen, die nicht identifiziert werden konnten (not applicable, n.A.), stellen mit 32 von 124 Nennungen falsch eingebaute und daraus resultierende Mangel die häufigste Fehlerursache dar (~26 %). Die nächsthäufigsten Ursachen sind elektrische Defekte (~18 %) und mechanische Defekte (~13 %).

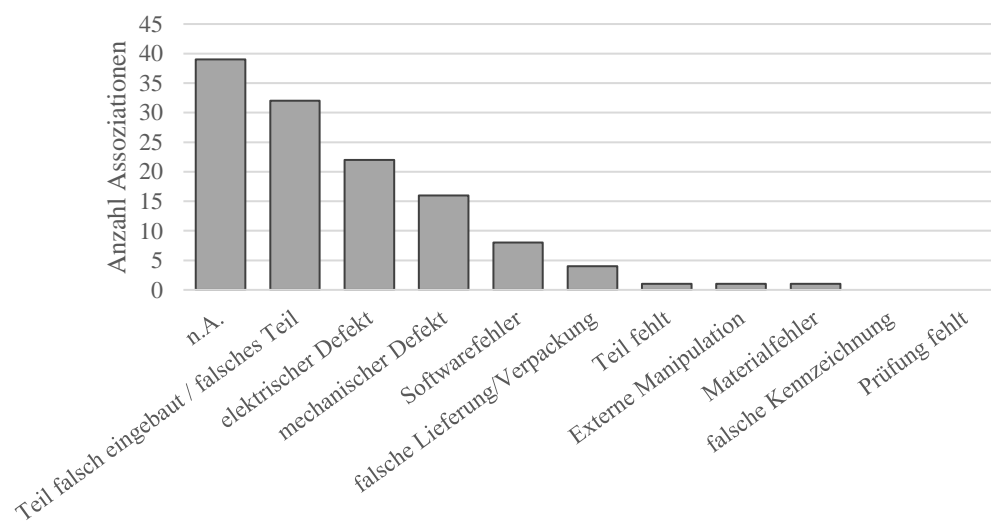


Abbildung 47: Ursachen für niO-Status beim EAA im Feld

Mit 53 von 124 Nennungen waren Funktionsstörungen bei der Leistungselektronik die häufigsten Symptome für den niO-Status bei Aggregaten im Feld (~43 %).

Im ursprünglichen Datensatz korrelieren einige der aufgezeigten Symptome, aufgrund der Einfachnennung wurde lediglich das wesentliche Symptom genannt. Beispielsweise sind einige der Funktionsstörungen der Leistungselektronik auf Undichtigkeiten zurückzuführen – die Leistungselektronik ist aufgrund falsch angebrachter oder defekter Dichtungsringe häufig mit Kühlmittel kontaminiert worden, was zu Kurzschlüssen und schwerwiegenden Defekten in der Leistungselektronik geführt hat. An dieser Stelle ist der Dichtungsring unterhalb des IGBT-Moduls im Inneren der Leistungselektronik vermutlich der Grund, da es sich um den einzigen Dichtungsring innerhalb der Leistungselektronik handelt. Eine Optimierung dieser Dichtung kann durch unterschiedliche Faktoren erzielt werden, die nicht im Rahmen der vorliegenden Dissertation behandelt werden sollen. Jedoch gilt es, die Bauteile, die vor der Demontage des Dichtungsringes demontiert werden müssen, leichter zugänglich zu gestalten, sodass zumindest aus Sicht des Demonteurs eine symptomatische Fehlerbehandlung ermöglicht werden kann.

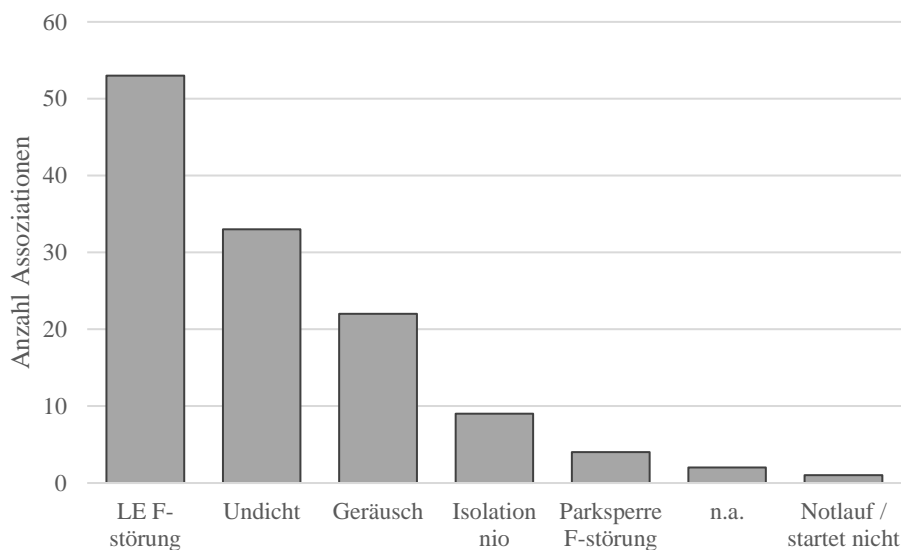


Abbildung 48: Symptome für niO-Status beim EAA im Feld

Insbesondere nach der Betrachtung der Feldfehler ist festzuhalten, dass die Vorbeugung von Undichtigkeiten und Geräuschen vergleichsweise hohes Potenzial für Bauteilverbesserung bietet. Um Undichtigkeiten vorzubeugen, lässt sich vermuten, dass die Wiederverwendung von Dichtungen eher ausgeschlossen werden kann, da viele Fehler bei der Montage von Dichtungen passieren. Hinsichtlich der Vorbeugung von Geräuschen sollte auch die Wiederverwendung von Getriebeteilen sorgfältig geprüft werden, da mechanische Defekte am Getriebe eine häufige Ursache für Geräuschentwicklung sind.

Weiterhin treten vergleichsweise viele Fehler in der Leistungselektronik auf, daher kann es sinnvoll sein, diese möglichst schnell vom Rest des EAA abzutrennen, sodass diese ausgetauscht werden kann (siehe auch Kapitel 6.1).

6.2.2 Manuelle Demontageversuche

Als eine der ersten Maßnahmen zum Erkenntnisgewinn wurden manuelle Demontageversuche am EAA durchgeführt. Da einige Möglichkeiten automatisierter Demontageprozesse manuellen Demontageschritten sehr ähnlich sind, lassen sich anhand besonders herausfordernder Demontageschritte auf Erkenntnisse für verbesserungswürdige Bauteile schließen. Dabei soll insbesondere an die Kriterien der Demontagefreundlichkeit referenziert werden.

Elektrische Maschine und Getriebe

Um die Demontage des EAA zu beschleunigen, kann das frühzeitige Auftrennen der Leistungselektronik von Rest des EAA sinnvoll sein, da unter Umständen eine Parallelisierung im Demontagemodul erreicht werden kann. Zur Demontage der Leistungselektronik müssen als wesentliche Bauteile allerdings zunächst die Betriebsmittel entfernt, ein Gehäusedeckel demontiert sowie mehrere Kabel von den Kupferstromschienen getrennt werden.

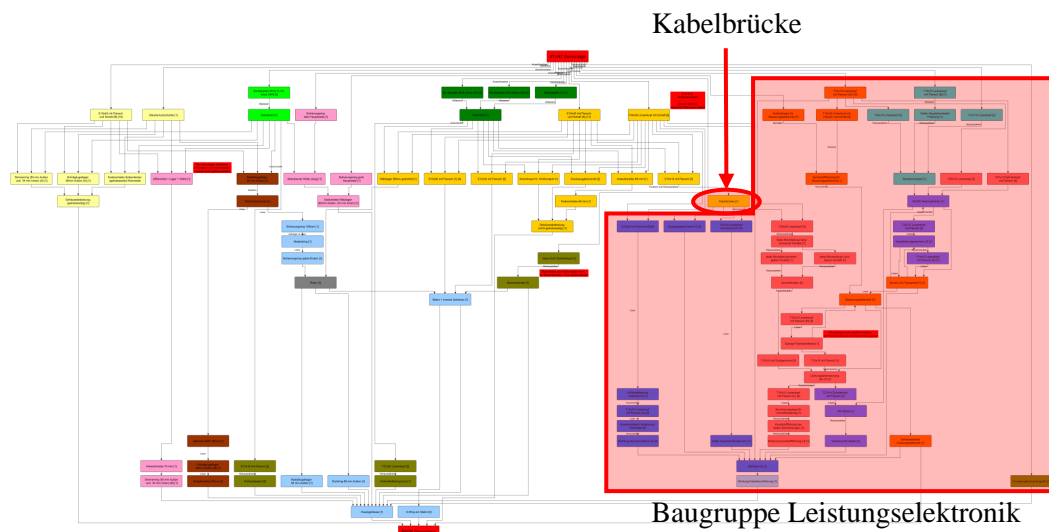


Abbildung 49: Bauteile der Leistungselektronik im Demontagegraph

Wie in Abbildung 49 gezeigt, ist die Kabelbrücke ein Schlüsselbauteil für die Demontage der Leistungselektronik. Anstelle einer geschraubten elektrischen Verbindung, wie auf der Kabelbrücke vorgesehen, kann eine Steckverbindung sinnvoll sein, sodass beide Baugruppen mit weniger Demontageschritten früher im Demontageprozess voneinander getrennt werden können.

Die Starkstromkabel, die u.a. am Gehäuse der Leistungselektronik fixiert sind, stellen aufgrund einer vergleichsweise unzugänglichen Schraubverbindung eine Herausforderung für die Demontage dar.



Abbildung 50: Verdeckte Schraube zur Fixierung der Starkstromkabel am EAA

Die untere rechte Schraube ist circa 170 mm tief im Gehäuse versenkt, wodurch vor allem bei einem robotergeführten Schrauber besondere Präzision erforderlich ist (siehe Abbildung 50).

Eine besondere Herausforderung der manuellen Demontage stellt die zerstörungsfreie Demontage der beiden Gehäusedeckel dar. Durch die Flüssigdichtung sind die Gehäusedeckel mit dem Hauptgehäuse verklebt (siehe Abbildung 51). Darüber hinaus können die Gehäusedeckel aufgrund mangelnder Konterpunkte nicht gezielt abgespreizt oder abgehebelt werden, weswegen eine zerstörungsfreie Demontage schwierig ist. Eine Möglichkeit zur leichteren Demontage der Deckel soll in Kapitel 6.3.2 gezeigt werden.

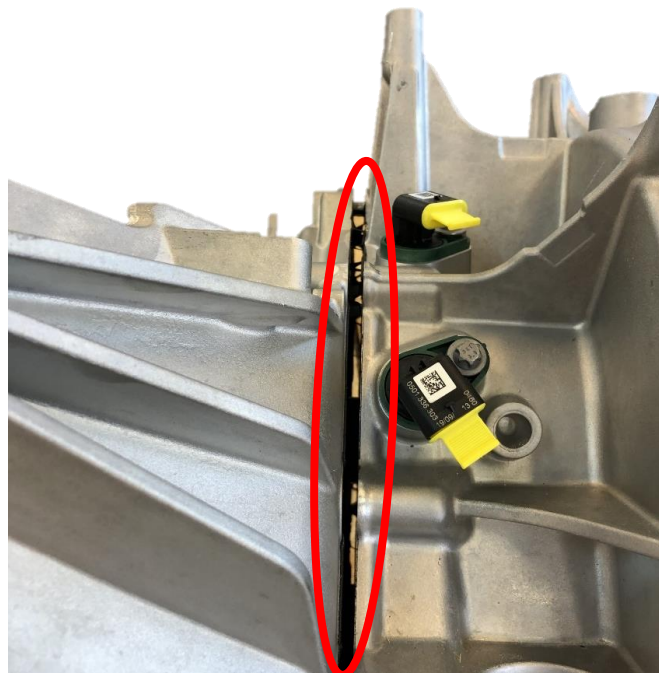
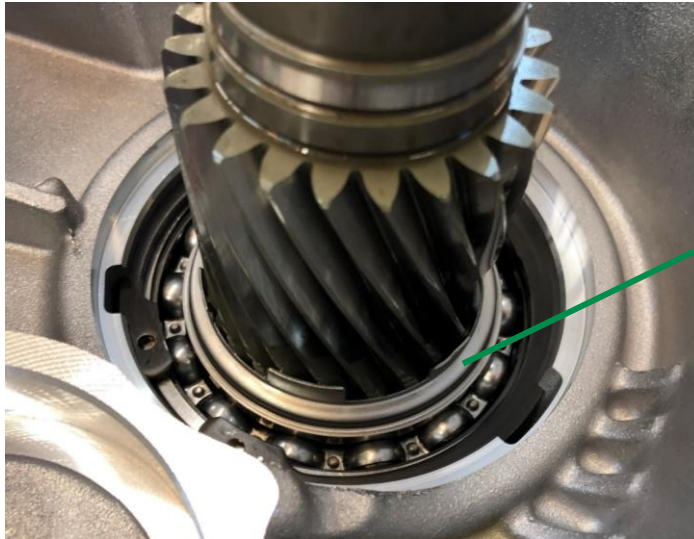


Abbildung 51: Dichtung zwischen dem triebeseitigen Gehäusedeckel und dem Hauptgehäuse des EAA

Einige rotierende Bauteile im EAA werden durch unterschiedliche Arten von Sicherungsringen gegen ungewünschte Bewegungen gesichert. Unter anderem wird der Rotor durch einen Sicherungsring gesichert, der keine Ösen für ein entsprechendes Handling vorsieht, sondern lediglich zwei angeschrägte Seiten bzw. spitze Enden aufweist.



Abdeckung
Sicherungsring mit
spitzen Enden

Abbildung 52: Abdeckung für den Sicherungsring mit spitzen Enden, der getriebeseitig die Rotorwelle sichert

Der in Abbildung 52 gezeigte Sicherungsring fixiert den Rotor so, dass dieser nicht in die getriebeabgewandte Seite des EAA bewegt und somit nicht demontiert werden kann. Der Sicherungsring ist durch eine Abdeckung, die auf das auf der Rotorwelle befindliche Zahnrad aufgesteckt ist, abgedeckt. Die Demontage der Abdeckung ist aufgrund des geringen Bauraums schwer zu demontieren. Unter der Prämisse der zerstörungsfreien Demontage sollte der darunter befindliche *Sicherungsring mit spitzen Enden* mit einem speziell angefertigten Werkzeug demontiert werden, da ansonsten eine Beschädigung des Zahnrads auf der Rotorwelle wahrscheinlich ist. Auch die Demontage des *Sicherungsring mit spitzen Enden* ist aufgrund des sehr geringen Bauraums herausfordernd und erfordert ein filigranes und gleichzeitig stabiles Werkzeug.

Rotor und Stator

Die manuelle Demontage des Rotors sowie des Stators hat sich als schwierig gezeigt. Dies liegt vor allem im hohen Gewicht beider Bauteile begründet, wodurch das Handling eingeschränkt ist. Zudem ist der Stator in ein im Hauptgehäuse fixierten Kugellager eingepresst, sodass dieser nur mit Spezialwerkzeug demontiert werden kann. Bei einer automatisierten Demontagelösung können die aufzubringenden Kräfte leichter realisiert werden.

Im Projekt DeMoBat (siehe Kapitel 2.3.3) wird dabei auf eine Kombination aus einem Druckluft-Kolbenvibrator und einem Druckluftzylinder gesetzt, sodass sowohl Rotor als auch Stator ausgetrieben und angehoben werden können.

Lager und Lagerschalen

Demontage von Lagern ist unter Zuhilfenahme zweiarmer oder dreiarmer Abzieher, je nachdem wie die Platzverhältnisse sind und wie ein Bauteil demontiert werden soll, möglich. Bei der Verwendung dreiarmer Abzieher ist tendenziell eher eine zerstörungsfreie Demontage durchführbar, da die aufgebrachten Kräfte über drei Punkte gleichmäßiger in das Bauteil eingeleitet werden können. Dies ist besonders relevant bei vergleichsweise filigranen Bauteilen wie dem Geberrad. Ebenso können beim Abziehen von Lagern auch umliegende Bauteile beschädigt werden, als Beispiel soll an dieser Stelle die Weichmetallblombe dienen, die das Ende der Hohlwelle des Rotors versiegelt. Beim Abziehen des Radialkugellager ($\varnothing 62$ mm) wird diese vom Abzieher in die Hohlwelle gedrückt, insofern kein geeignetes Zwischenstück genutzt wird.

Weiterhin sind bei einigen Lagern die Lagerschalen und die Wälzkörper nicht fest miteinander verbunden, was dazu führen kann, dass die Lagerschalen bei der Demontage in Ihren Lagersitzen verbleiben. Die Lagerschalen weisen aufgrund der X-Anordnung der Lager keine Hinterschnitte auf und verbleiben in den passgenauen, ölgetränkten Lagersitzen. Zur automatisierten Demontage benötigt es sehr präzises Werkzeug und im Fall der manuellen Demontage viel Feingefühl, da die Lagerschalen keinesfalls verkanten und somit in einen undefinierten Zustand fallen sollten.

Leistungselektronik

In der Leistungselektronik sind bei der manuellen Demontage einige Herausforderungen aufgetreten: Es werden unterschiedliche Schraubentypen verwendet (T10, T15, T25, T27, T45), sodass eine entsprechende Anzahl an Schraubwerkzeugen vorgehalten werden muss. Weiterhin sind einige Schrauben so tief in der Leistungselektronik versenkt, dass diese nur durch Stürzen der gesamten Leistungselektronik erreicht werden können. Darüber hinaus gibt es in der Leistungselektronik Bauteile, die ineinander verschachtelt sind (Temperatursensor, Spange Flachbandkabel, Wandler, Kontaktierungselement), wodurch der Demontageaufwand stark ansteigt. Weiterhin sind zwei Bauteile (Temperatursensor, Steuerungselektronik, respektive das daraus ragende Flachbandkabel, IGBT-Modul) mit Steckverbindungen verbunden – diese sind in der manuellen Demontage unproblematisch, können jedoch eine Herausforderung für ein automatisiertes Werkzeug darstellen.

6.2.3 Baustruktur

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, hat sich gezeigt, dass bei der Baustruktur des EAA die vom VDI beschriebenen Gestaltungsgrundregeln tendenziell eher nicht einhalten wurden. Daher empfiehlt es sich, die Baustruktur des EAA näher zu untersuchen. Eine Möglichkeit ist die Analyse der direkten und indirekten Nachfolger relevanter Knoten (Bauteile) im Demon-

tagegraph. Je mehr Nachfolger ein Bauteil hat, desto mehr andere Bauteile werden (indirekt) blockiert und stellen eine Verschlechterung der Baustruktur dar. Da Bauteile, die besonders früh im Demontageprozess demontiert werden müssen, naturgemäß viele Nachfolger haben, soll die Zählung der indirekten Nachfolger nur bis zu den Kindeskindern erfolgen.

Eine Übersicht über die Knoten mit den meisten Nachfolgern wird in der folgenden Tabelle 6 gegeben: Dabei werden zunächst alle Knoten mit größer gleich vier direkten Nachfolgern gezeigt. Weiterhin werden alle Knoten gezählt, bei denen die Summe der direkten und indirekten Nachfolger größer gleich sieben sind. Bei der Zählung der indirekten Nachfolger werden Knoten nicht doppelt gezählt.

Tabelle 6: Übersicht über Bauteile mit den meisten direkten und indirekten Nachfolgern

Anzahl direkter Nachfolger		Anzahl indirekter Nachfolger	
START	16	START	44
T45x36 Linsenkopf mit Schaft	11	T45x36 Linsenkopf mit Schaft	19
Kühlmittel	8	Kühlmittel	14
E10x40 mit Flansch und Schaft {A}	7	E10x40 mit Flansch und Schaft {A}	12
Getriebeöl	7	Getriebeöl	12
E10x40 mit Flansch und Schaft {B}	5	Temperatursensor LE	11
Staubschuttscheibe	5	Blindstopfen LE	9
T15x10 Linsenkopf mit Flansch {A}	5	Blindstopfen M10	9
Kabelbrücke	4	Blindstopfen M14	9
Temperatursensor LE	4	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {A}	9
		Blindstopfen M16x12 mit Innensechskant SW8	8
		E10x40 mit Flansch und Schaft {B}	8
		Kabelbrücke	8
		Staubschuttscheibe	8
		Steuerungselektronik	8
		DC / DC Konverter	7

START

Der Knoten *START* ist ein Dummy-Knoten, der den Anfang des Demontagegraphen darstellt. Da der Knoten *START* sowohl direkt als auch indirekt die meisten Nachfolger aufweist, wird deutlich, wie wichtig das initiale Handling des EAA ist. Da im Demontageprozess die initiale Handlungsschnittstelle während eines Großteils des Demontageprozesses genutzt wird, bietet eine Optimierung dieser einen großen Mehrwert für die Demontage. Weiterhin fängt jeder Demontageprozess über den Knoten *START* an, daher würde eine potenzielle Verbesserung des Handlings bei jeder Demontage des EAA von Vorteil sein.

Betriebsmedien

Die Betriebsmedien *Getriebeöl* und *Kühlmittel* haben jeweils eine große Anzahl an direkten und indirekten Nachfolgern, daher sollte deren Demontage möglichst leicht sein. Die Optimierung der Demontage der Betriebsmedien kann jedoch nur über die betriebsmedienführenden Bauteile durchgeführt werden, indem Ablassöffnungen vorgesehen und Totvolumina eliminiert werden. Eine Ablassmöglichkeit beim *Getriebeöl* ist im EAA bereits so vorhanden, dass diese an der tiefsten Stelle des Gehäuses eingebracht ist und damit ein fast vollständiges Ablassen des *Getriebeöls* ermöglicht. Lediglich ein Totvolumen im Hauptgehäuse stellt eine besondere Herausforderung für das Ausbringen des *Getriebeöls* dar. Für das *Kühlmittel* sind ebenfalls Öffnungen vorgesehen, an denen dieses abgelassen werden kann. Die komplexe Leitung des *Kühlmittels* durch das EAA kann hinsichtlich der Demontagefähigkeit nicht weiter optimiert werden, ohne die Funktionalität wesentlich einzuschränken.

Schrauben

Ein Großteil der in Tabelle 6 gelisteten Bauteile sind Schrauben, wobei einige Schrauben eine wesentliche Anzahl an Nachfolgern haben. Da Blindstopfen Schrauben sehr ähnlich sind, werden diese mit Schrauben zusammengefasst. Wie schon im Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* von Zeller et al. [2021] gezeigt, stellt das Lösen von Schraubverbindungen eine Herausforderung für die automatisierte Demontage dar. Daher soll die automatisierte Demontage neben der quantitativen Analyse eines neuen Demontageschraubers ebenfalls mit einer alternativen Lösung getestet werden.

Bauteile in der Leistungselektronik

Das Bauteil *Temperatursensor LE* weist einige direkte und indirekte Nachfolger auf. Bei dem *Temperatursensor LE* liegt im Demontagegraph darüber hinaus eine zyklische Beziehung vor. Entsprechend muss dieses in zwei getrennten Demontageprozessen jeweils angefasst werden, um final demontiert zu werden, was mit einem vergleichsweise hohen Aufwand verbunden ist. Insbesondere filigrane Bauteile wie ein Temperatursensor stellen

keine wesentliche Komponente einer Leistungselektronik dar und können daher tendenziell eher unabhängig von den relevanten Komponenten verbaut werden.

In der Leistungselektronik sind über den *Temperatursensor LE* hinaus weitere Bauteile mit einer hohen Anzahl an direkten und indirekten Nachfolgern verbaut, wie zum Beispiel die *Steuerungselektronik* oder der *DC / DC Konverter*. Die hohe Anzahl kommt vor allem durch gegenseitiges Überlappen der Bauteile zustande, wie bereits beschrieben.

Direkte Vorgänger und Nachfolger

Wird die Baustruktur weiterführend allgemeiner betrachtet und ebenfalls Bauteilgruppenvorgänger untersucht, rücken weitere Bauteilgruppen in den Fokus, wie auch graphisch gezeigt werden kann: Jede Bauteilgruppe erhält eine Kennzahl C , wobei C dem Verhältnis der Anzahl an Verbindungen einer jeweiligen Bauteilgruppe zur Anzahl der Verbindungen der Bauteilgruppe mit der höchsten Anzahl an Verbindungen entspricht.

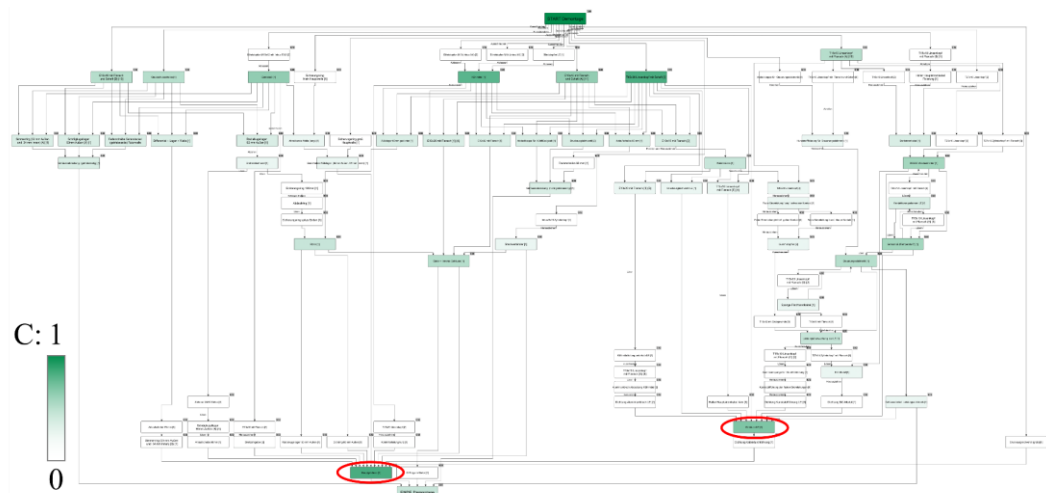


Abbildung 53: Darstellung der relativen Anzahl an Verbindungen zu jeweiligen Vorgängern und Nachfolgern jeder Bauteilgruppe im Demontagegraph des EAA

Die beiden rot markierten Bauteilgruppen sind die Bauteilgruppen *Hauptgehäuse* ($C = 0,75$) und *Gehäuse LE* ($C = 0,56$), die jeweils vergleichsweise viele direkte Vorgänger aufweisen. Diese Bauteilgruppen fungieren als Trägerplattformen, die tendenziell erst spät im Demontageprozess demontiert werden können – wodurch sich die „tiefe“ Positionierung im Demontagegraph erklärt. Es wird vermutet, dass durch die tiefe Positionierung die Demontagequote der betreffenden Bauteile eher geringer ausfällt.

6.3 Ausarbeitung demontageoptimierter Bauteile und Werkzeuge

Im folgenden Kapitel sollen die Experimente an prototypisch veränderten Bauteilen, die zu einem Dummy-EAA zusammengesetzt werden können, beschrieben und erläutert werden. Weiterhin werden Werkzeuge vorgestellt, die für die Demontage originaler und modifizierter Bauteile ausgelegt werden. Das Dummy-EAA und die korrespondierenden Werkzeuge wurden designt, iterativ verbessert und häufig mittels 3D-Druck gebaut.

6.3.1 Auswahl von Bauteilen für prototypische Modifikationen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen ausgewählte Bauteile prototypisch modifiziert werden, sodass diese besser für die automatisierte Demontage geeignet sind. Folgende Bauteile wurden ausgewählt:

Hauptgehäuse

Ein wesentlicher Teil der Bauteile des EAA sind (in-)direkt im Hauptgehäuse montiert. Daher spielt das Handling des Hauptgehäuses bei der Demontage eine besondere Rolle – für verschiedene Demontageschritte muss das Hauptgehäuse mitsamt eingebauten Komponenten verschiedene Demontagestationen durchlaufen und wird dabei mehrmals von verschiedenen Robotern gegriffen und unter Belastung gehalten. Um das Handling zu erleichtern, soll eine standardisierte Schnellkupplung als Schnittstelle dienen.

Gehäusedeckel

Das Hauptgehäuse des EAA wird von zwei Seiten mit Gehäusedeckeln verschlossen, die an das Hauptgehäuse angeflanscht sind und mit einer Flüssigdichtmasse verklebt, beziehungsweise gedichtet werden (Gehäusedeckel getriebeseitig, Gehäusedeckel nicht getriebeseitig). Zusätzlich liegt jeweils eine einfache Stiftung vor, sodass die Gehäusedeckel eine definierte Position einnehmen. Im Hinblick auf Tabelle 2 sind die Verbindungsarten für sich gesehen als *geeignet* (Schraubverbindung) beziehungsweise als *weniger geeignet* (Klebeverbindung) anzusehen, wenn zerstörungsfreies Lösen angestrebt ist. Bei einer gleichzeitigen Verwendung beider Verbindungsarten ist die Eignung für zerstörungsfreies Lösen tendenziell als noch *weniger geeignet* anzusehen. Um der Problematik des Lösens der Gehäusedeckel zu begegnen, sollen am Hauptgehäuse und den Gehäusedeckeln Ansatzpunkte geschaffen werden, an denen die Deckel zerstörungsfrei abgestemmt werden können.

Dichtung zwischen Gehäusedeckeln und Hauptgehäuse

Die zwischen den Gehäuseteilen eingesetzte Flüssigdichtmasse löst sich bei der Demontage nicht direkt von den Klebeflächen ab. Beim Abheben der Deckel verbleibt die hauptsächlich⁴² ausgehärtete Klebmasse sowohl am Hauptgehäuse als auch an den Gehäusedeckeln.



Abbildung 54: Nach Demontage des Gehäusedeckels zurückbleibende Dichtmasse auf aufgerauten Stirnflächen des Hauptgehäuses

Der daraus resultierende unbestimmte Zustand stellt eine Problematik für nachfolgende Demontageschritte dar. Weiterhin wurden die Klebeflächen herstellerseitig definiert aufgeraut, sodass auch nach der Entfernung des Großteils der Dichtmasse die Klebeflächen nicht vollständig gereinigt sind.

Schraubverbindungen

Schraubverbindungen sind laut Tabelle 2 beim zerstörungsfreien Lösen als *geeignet* anzusehen, jedoch müssen für eine vollständige Demontage des EAA 135 Schraubverbindungen gelöst werden. Es liegen zwölf unterschiedliche Schraubenkopfformen als Außensechsrund⁴³, Innensechsrund⁴⁴ und Innensechskant⁴⁵ vor. Ein Großteil der Schrauben ist aus (unterschiedlichen) Stählen gefertigt, allerdings werden in der Leistungselektronik

⁴² Bei der Demontage mehrerer EAA wurde vereinzelt flüssige Dichtmasse gefunden (circa zwei Jahre nach der Produktion), die in die Gewindegänge der Flanschschrauben eingedrungen ist. Die verbleibende, nicht ausgehärtete Dichtmasse senkt die Tragfähigkeit der betroffenen Schraubverbindungen und erhöht gleichzeitig das Risiko einer Kontamination weiterer Bauteile im Demontageprozess.

⁴³ Ugs. Außentorx

⁴⁴ Ugs. Innensechsrund

⁴⁵ Ugs. Inbus

auch Schrauben aus Aluminium verwendet, deren Abtransport nach erfolgter Demontage erheblich erschwert ist. Die 135 Schraubverbindungen werden auf 32 Demontageschritte aufgeteilt – dabei weisen 22 Demontageschritte jeweils weniger als fünf Schrauben auf. Die hohe Anzahl von Demontageschritten mit geringen Schraubenanzahlen erhöht die relative Dauer jeder Umrüstzeit auf einen neuen Schraubentyp. Eine Bauteilmodifikation von herkömmlichen Schraubverbindungen per se ist nicht praktikabel, da es sich um eine weitreichend erforschte und etablierte Technologie handelt. Weiterhin sind Schraubverbindungen laut Beitz [1996] ein geeignetes Verbindungsprinzip (siehe Kapitel 2.4.3). Daher werden Modifikationen am Demontageschrauber vorgenommen.

6.3.2 Prototypische Bauteilmodifikationen und Werkzeuge

Zunächst soll eine Übersicht über das für die vorliegende Arbeit modifizierte Dummy-EAA gegeben werden, anhand dessen unter anderem praktische Experimente durchgeführt wurden.

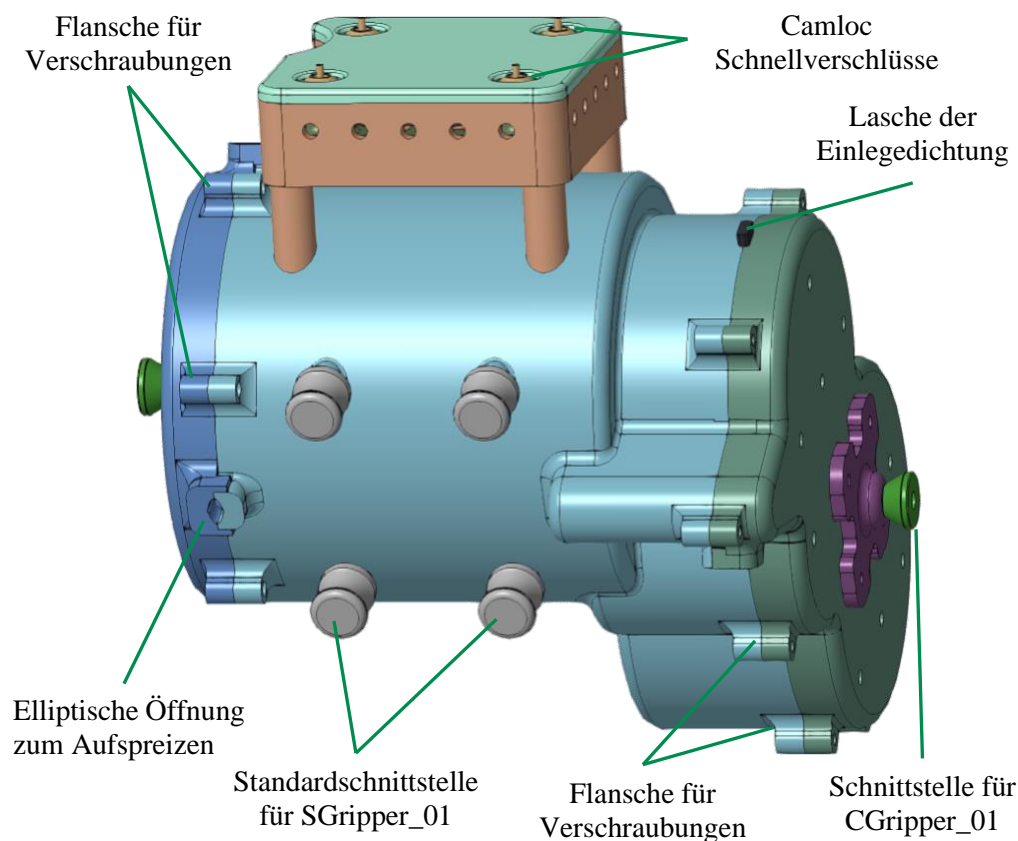


Abbildung 55: CAD-Modell des Dummy-EAA

Modifiziert wurden im Wesentlichen die Standardschnittstellen zum Handling, die elliptischen Öffnungen zum Aufspreizen der Deckel, Camloc Schnellverschlüsse als Schraubalternative, Einlegedichtungen mit Demontelaschen sowie Schnittstellen zum Abziehen der Gehäusedeckel. Die modifizierten Features werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Hauptgehäuse (Dummy) und SGripper_01

Für die standardisierte Handlingschnittstelle wurden am Hauptgehäuse des Dummy-EAA vier bereits vorhandene Hohlzylinder identifiziert, die alle parallel zueinander ausgerichtet sind. Als Modifikation wurden diese stirnseitig aufgeweitet und mit einer abgerundeten Hinterschneidung versehen (diaboloförmig). Mit einem entsprechenden Handlingwerkzeug (SGripper_01) soll diese Schnittstelle gegriffen werden. Die Geometrie der Schnittstelle erinnert an Hebelarmkupplungen aus dem Bereich der Klemmfassungen zur Übertragung von Fluiden nach DIN EN 14420-7 [DIN Deutsches Institut für Normung, 2022 (2)], jedoch wird bei der vorliegenden Kupplung auf Kraftschluss verzichtet und stattdessen Formschluss durch Arretierung verwendet.

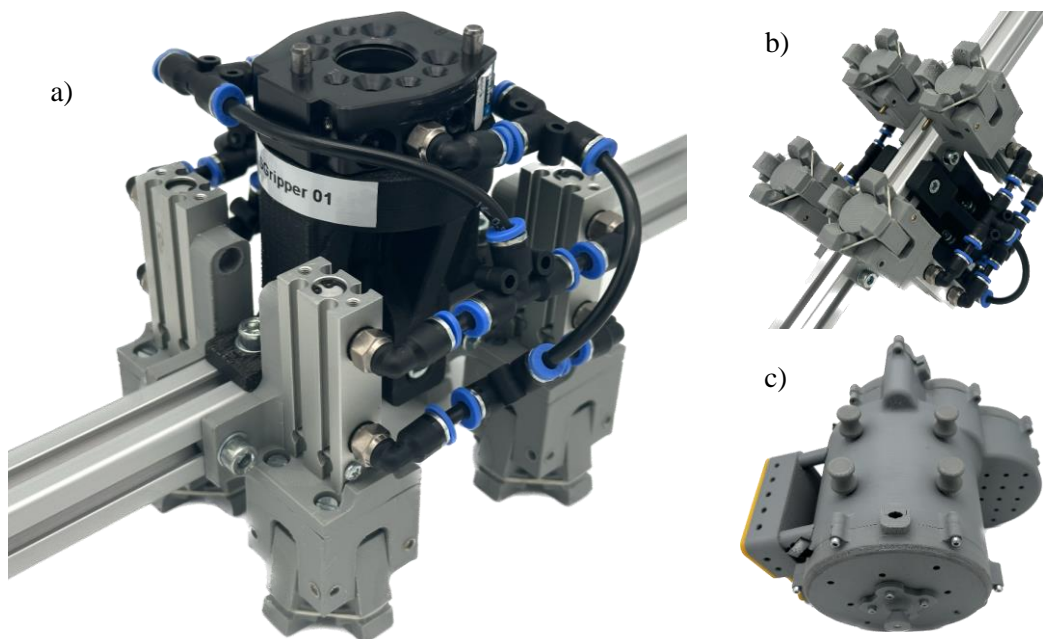


Abbildung 56: Handlingwerkzeug SGripper_01 zum formschlüssigen Halten des Dummy-EAA (a+b), Dummy-EAA mit vier Haltenocken als standardisierte Schnittstellen (c)

Das Handlingwerkzeug dockt formschlüssig an der Schnittstelle an. Je nach Material der Oberfläche der Finger des Handlingwerkzeug kann eine Beschädigung des Hauptgehäuses vermieden werden. Das Handlingwerkzeug wird pneumatisch betrieben, wobei ein Aktuator einen zylindrischen Riegel zur (Ver-)Sperrung der Finger antreibt. Druckluft wird dabei lediglich für die Ver- und Entriegelungsvorgänge gebraucht, entsprechend ist das Handlingwerkzeug drucklos einsetzbar. Durch die beschriebene Selbstsperrung kann die Methodik auf eine Adapterstück angewendet werden, das für die Dauer der gesamten Demontage am Dummy-EAA verbleibt und wiederum als Handlingschnittstelle für die Demotageroboter dienen kann.

Um die Belastbarkeit des SGripper_01 zu prüfen, wurde die Greifeinheit des SGripper_01 einer statischen Simulation bei anwendungsnahen Bedingungen unterzogen. Da der größte

Roboter 10 kg heben kann, wurde eine Zugkraft von 100 N in z-Richtung $\vec{F} = (0,0,1)$ angenommen, die an der diaboloförmigen Standardschnittstelle wirkt und innerhalb einer Sekunde anliegt. Alle Bauteile bestehen dabei aus Polylactid (PLA) (Elastizitätsmodul = 1,879 GPa), die Achsen, an denen die Finger aufgehängt sind, bestehen aus Stahl (Elastizitätsmodul = 200 GPa). Beim Meshing wurde eine Elementgröße von 0,001 m gewählt. Zwischen der diaboloförmigen Standardschnittstelle und den Greiferfingern herrscht ein Reibungskoeffizient von $\mu = 0,5$. Die tragenden Bauteile, die Greifeinheiten im gesamten SGripper_01 halten und miteinander verbinden, werden nicht mitsimuliert, jedoch sind diese im Raum fixiert und können so die zu simulierende Kraft aufnehmen. In der folgenden Abbildung 57 werden Verformungen zur besseren Darstellung zehnfach verstärkt dargestellt, die Spannungen im Bauteil sind farblich und der Skalierung entsprechend abgestuft.

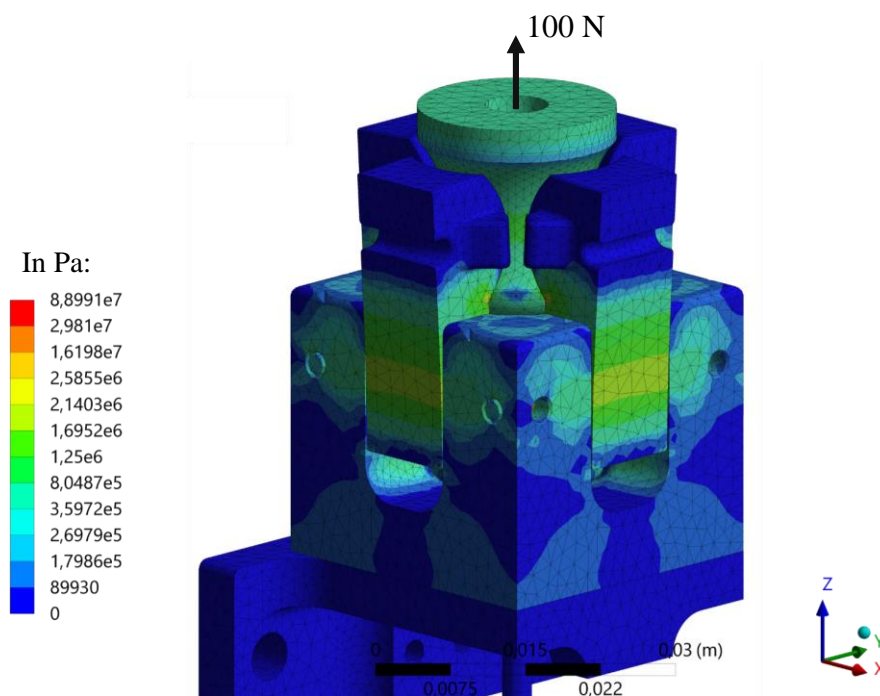


Abbildung 57: Simulation des SGripper_01 aus PLA mit 100 N Zugbelastung in axialer Richtung an der Standardschnittstelle

Es zeigt sich, dass die Greifeinheit einer axialen Zugbelastung von 100 N standhält. Dabei tritt eine erhöhte Belastung von bis zu circa 2,2 MPa im Bereich der Durchgangsbohrungen an den Greiferfingern auf.

Weiterhin wurden eine Quer- und eine Schrägbelastung und gleichen Bedingungen bei 100 N simuliert. Bei der Querbelastung ist die Zugkraft in $\vec{F} = (1,0,0)$, bei der Schrägkraft in $\vec{F} = (1, -1,1)$ gerichtet.

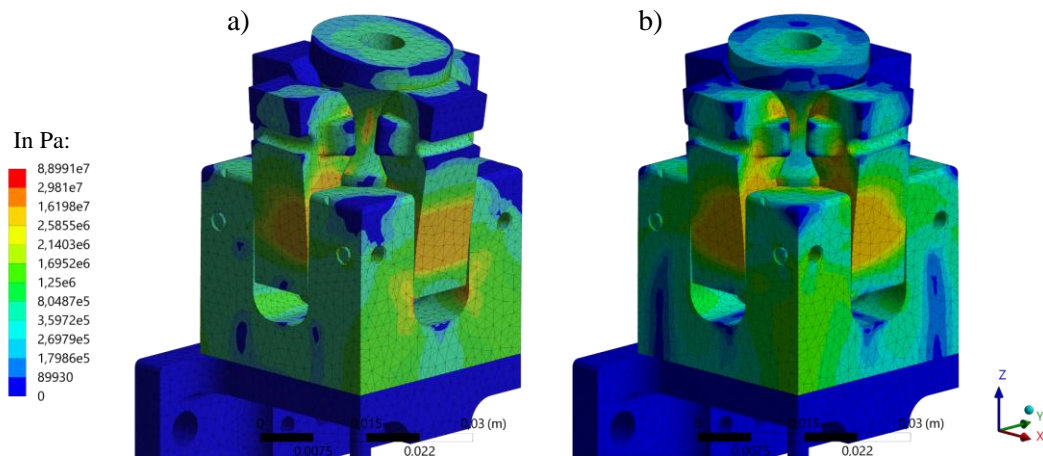


Abbildung 58: Simulation des SGripper_01 aus PLA mit 100 N Zugbelastung quer (a) und schräg (b)

Es zeigt sich, dass der SGripper_01 in beiden Fällen der Belastung standhalten kann. Im Fall der Querbelastung (a) treten wie im Fall der Zugbelastung vergleichsweise hohe Belastungen im Bereich der Durchgangsbohrungen an den Greiferfingern auf (~5,6 MPa), wobei der in Zugrichtung liegende Finger circa 50 % stärker belastet wird. Im Fall der Schrägbelastung werden insbesondere die vorne liegenden Finger belastet (~4,6 MPa).

Eine Erhöhung der Tragfähigkeit des SGripper_01 kann durch Verstärkung der Greiferfinger erzielt werden. Da die Innenseiten dieser Funktionsflächen sind, kann hier nur mit erhöhtem Aufwand eine Verbesserung der Belastbarkeit erzielt werden. Daher wurde in einer nächsten Iteration zunächst zusätzliches Material an den Rückseiten der Greiferfinger vorgesehen und danach simuliert. Die Randbedingungen wurden dabei konstant gehalten. In der folgenden Abbildung 59 sind die Spannungen in der verbesserten Greifeinheit farblich dargestellt:

Bei der erneuten Simulation zeigt sich, dass die Belastung an den kritischen Stellen der Greiferfinger im Vergleich um knapp 60 % auf circa 8,9 MPa gesunken ist (linke Seite). Am rechts im Bild befindlichen Finger sinkt die Spannung sogar um circa 75 % auf 5,3 MPa.

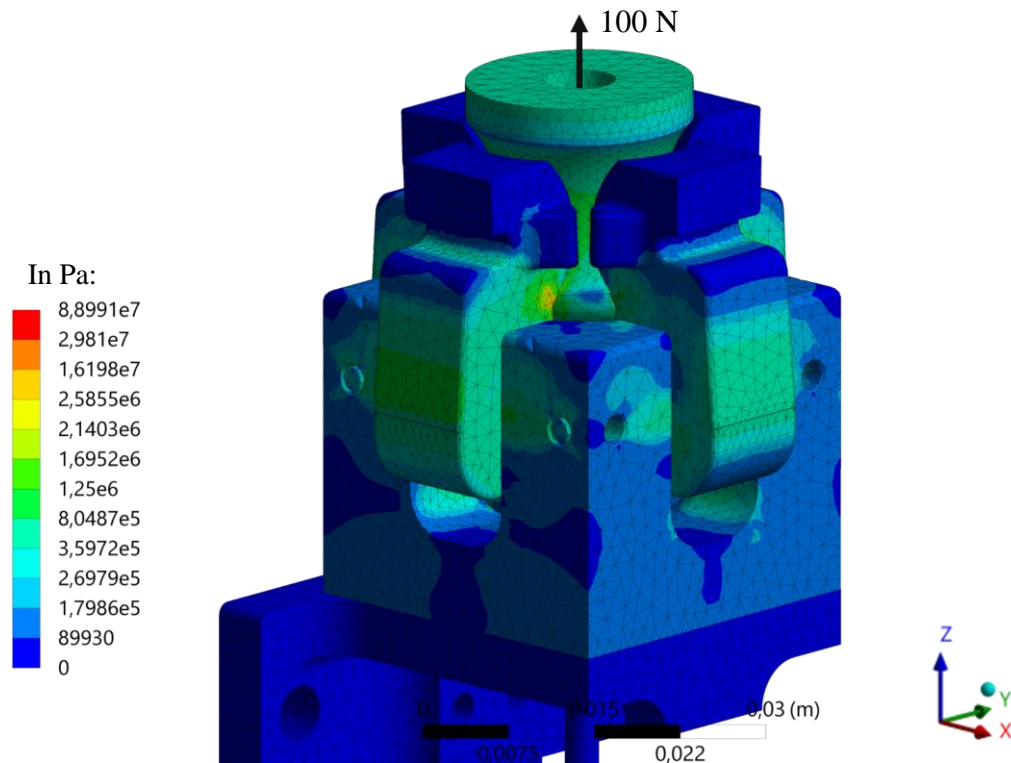


Abbildung 59: Simulation der verbesserten Greifeinheit des SGripper_01 aus PLA bei einer axialen Zugbelastung von 100 N

Ebenso wurde unter gleichen Bedingungen die Querkraft und die Schrägkraft am verbesserten SGripper_01 simuliert:

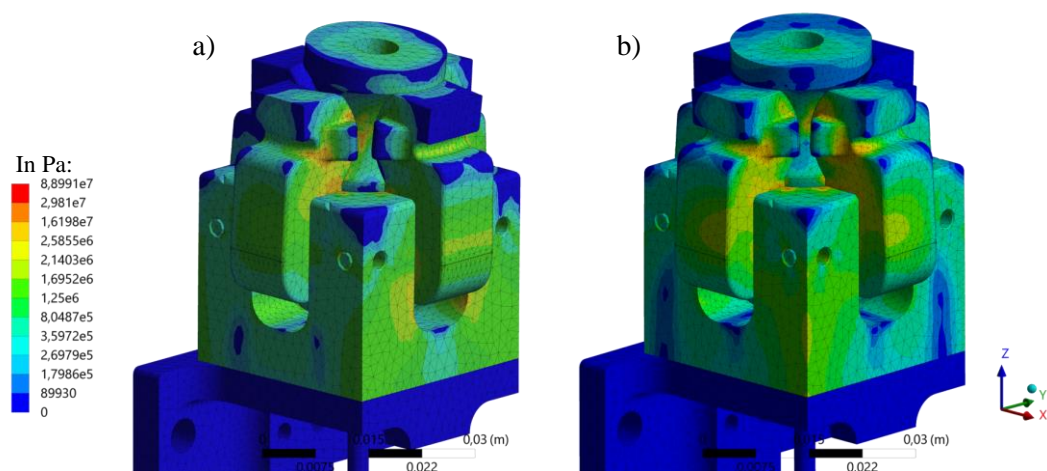


Abbildung 60: Simulation der verbesserten Greifeinheit des SGripper_01 mit 100 N Zugbelastung quer (a) und schräg (b)

Die Simulation zeigt, dass der verbesserte SGripper_01 sowohl der Quer- als auch der Schrägbelastung standhalten kann.

Im Fall der Querbelastung (a) treten erhöhte Spannungen an den beiden nicht in Krafrichtung liegenden Fingern auf ($\sim 3,3$ MPa); der in Zugrichtung liegende Finger ist im Bereich der Durchgangsbohrungen im Vergleich zum nicht verbesserten Finger mit 1,5 MPa circa 75 % weniger belastet. Im Fall der Schrägbelastung sind vor allem die vorne liegenden Finger belastet, dabei tritt eine Kompression in der Nut zur Führung des Spanngummis auf. Die Belastung ist hier im Vergleich zur nicht verbesserten Variante des SGripper_01 mit circa 3,3 MPa etwa 28 % geringer. Insgesamt zeigt sich, dass der verbesserte SGripper_01 allen simulierten Belastungen standhalten kann und im Vergleich zur ursprünglichen Version dabei geringeren auftretenden Spannungen unterworfen wird. Der SGripper_01 wurde folglich den simulierten Ergebnissen entsprechend modifiziert und gebaut:

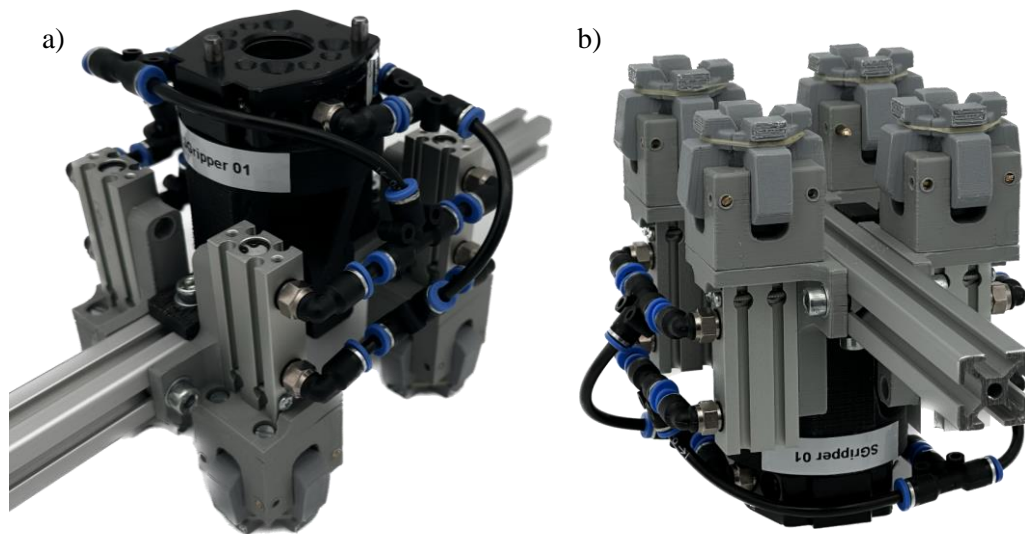


Abbildung 61: SGripper_01 mit verbesserten Fingern (a) und im Close-Up (b)

Um einen Hinweis zu bekommen, ob der SGripper_01 auch in einer industriellen Umgebung eingesetzt werden könnte, wurden weitere Simulationen durchgeführt, bei denen alle Bauteile (bis auf die Stahlachsen) aus Aluminium (Elastizitätsmodul = 71 GPa) bestehen und die axiale Zugbelastung mit 1 kN respektive 2 kN angenommen wird. Der Reibungsbeiwert von Aluminium auf Aluminium wird mit $\mu = 1,2$ angenommen.

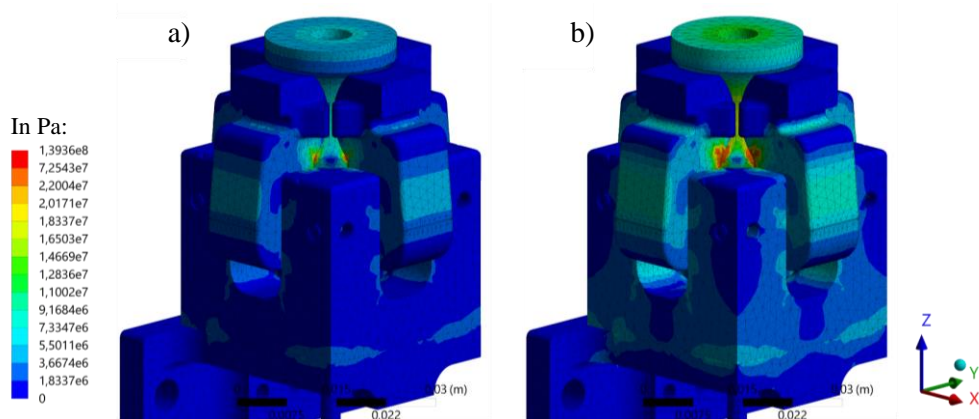


Abbildung 62: Simulation des aus Aluminium gefertigten, verbesserten SGripper_01 mit 1000 N a) und 2000 N b) axialer Zugbelastung.

Es zeigt sich, dass der SGripper_01 aus Aluminium den erhöhten Belastungen von 1 kN und 2 kN standhalten kann. Im Vergleich zu dem aus PLA gefertigten SGripper_01 treten nun besonders hohe Belastungen im Bereich der Kante der Funktionsfläche auf (circa 140 MPa bei 2 kN Belastung). Die ursprünglich hochbelasteten Bereiche am Rücken der Greiferfinger im Bereich der Bohrungen werden bei 1 kN Belastung mit circa 4,50 MPa und bei 2 kN Belastung mit circa 10 MPa belastet.

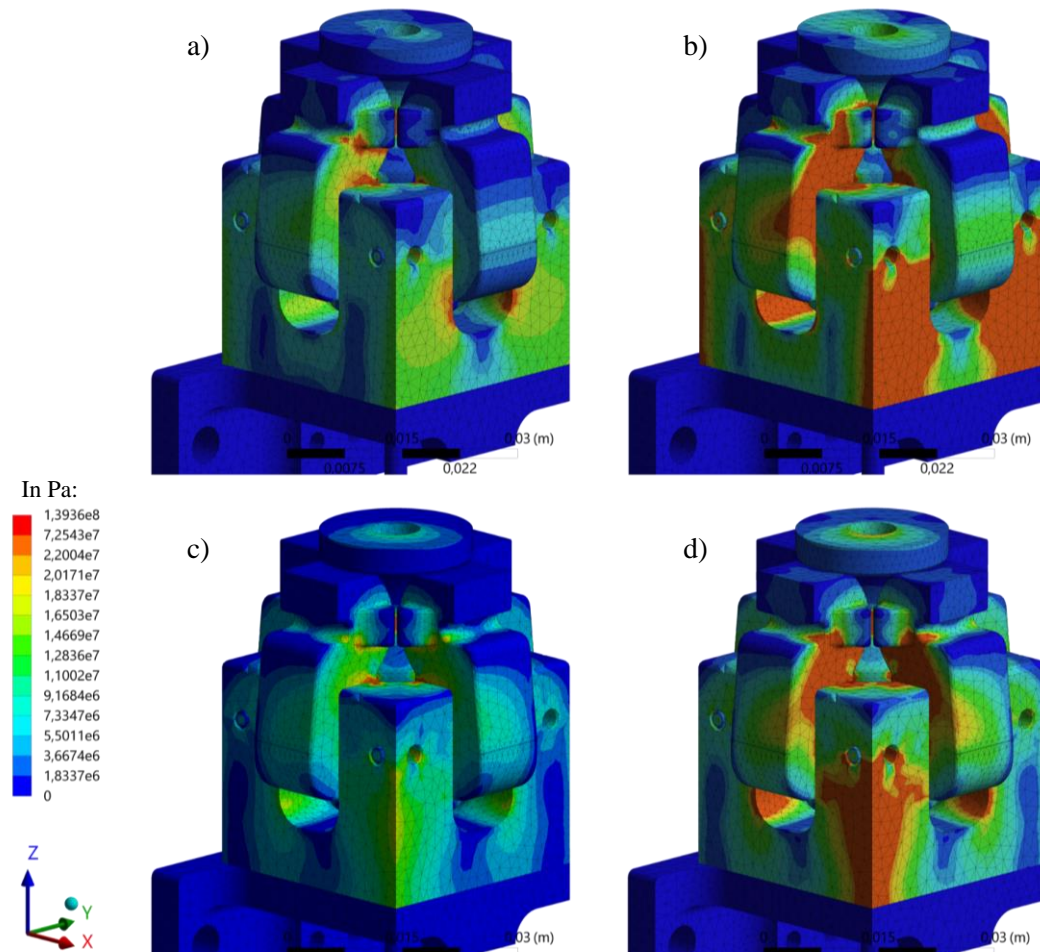


Abbildung 63: Simulation des aus Aluminium gefertigten, verbesserten SGripper_01 mit 1 kN Querbelastung (a), 2 kN Querbelastung (b) sowie 1 kN Schrägbelastung (c) und 2 kN Schrägbelastung (d)

Die Simulationen zeigen, dass der verbesserte SGripper_01 auch vergleichsweise hohen Belastungen standhalten kann. Bei 1 kN Querbelastung treten, wie auch schon in Abbildung 60 angedeutet, besonders hohe Spannungen an den nicht in Zugrichtung liegenden Fingern auf (a) (circa 23,5 MPa). Diese werden vermutlich bis an den Fingerhalter gebogen und kollidieren dort mit diesem. Ebenso tritt oberhalb des Kollisionspunktes im Bereich der Umlaufnut eine besonders hohe Spannung auf (circa 30,6 MPa). Eine weitere erhöhte Belastung tritt im Fingerhalter an den Füßen des in Zugrichtung liegenden Fingers auf (circa 29 MPa). Wird die Querbelastung auf 2 kN erhöht (b), nimmt die Belastung des SGripper_01 zu; am o.g. Kollisionspunkt tritt nunmehr eine etwa 66 % höhere Spannung von circa 39,1 MPa auf, die Belastung an der Umlaufnut steigt unwesentlich (circa 16 %)

auf etwa 35,6 MPa. Die Spannungen am Fingerhalter nehmen ebenfalls nur unwesentlich um etwa 8 % auf circa 31,4 MPa zu.

Bei der 1 kN Schrägbelastung (c) treten in der Nähe der Umlaufnut Spannung bis circa 20 MPa auf, weiterhin gibt es Spannungsspitzen auf der zugewandten Kante des Fingerhalters von circa 17 MPa. Sobald die Schrägbelastung auf 2 kN erhöht wird, vergrößert sich der besonders belastete Bereich von unterhalb der Umlaufnut bis zum Kollisionspunkt der Finger mit dem Fingerhalter, dabei treten Spannungen bis circa 26 MPa auf (30 % Erhöhung im Vergleich). Der Kollisionspunkt ist mit circa 35 MPa belastet, die abgewandten Innenseite des Fingerhalters (circa 30 MPa) sowie die zugewandte Kante sind ebenfalls stärker belastet (circa 30 MPa; 76 % Erhöhung im Vergleich). Insgesamt zeigt sich, dass der SGripper_01 vor allem für die axiale Zugbelastung ausgelegt ist. Je mehr sich die Richtung der Zugkraft neigt, desto höher fällt die Belastung aus. Entsprechend gilt es, den SGripper_01 weiter für Querkräfte auszulegen oder in einer späteren Anwendung, geneigte Situation mit angedocktem EAA zu vermeiden. Weiterhin sind Belastungsspitzen an den Innenseiten der Finger aufgetreten, sodass in einer späteren Anwendung, auch um eine höhere Reibfestigkeit und Standdauer zu erzielen, die Innenflächen gehärtet werden können. Vor dem Hintergrund, dass in einer späteren Anwendung jeweils vier Greifeinheiten an einem SGripper_01 vorgesehen sind, lässt sich vermuten, dass dieser in einer industriellen Anwendung eingesetzt werden kann.

Gehäusedeckel (Dummy) und SGripper_02

Wie in Kapitel 6.1 gezeigt, kann durch die Verwendung von Demontagestandardwerkzeug die Demontagefreundlichkeit stark gesteigert werden. Um möglichst geringe Veränderungen an den Gehäusedeckeln vorzunehmen, werden prototypisch am Hauptgehäuse und den Gehäusedeckeln Schalen vorgesehen, in die ein elliptischer Zylinder eingeführt werden kann. Durch eine 90 °-Rotation des elliptischen Zylinders um seine z-Achse werden beide Schalen voneinander gedrückt, was in einer Anhebung des Gehäusedeckels resultiert. Die Erweiterung der Gehäuseteile um die beschriebenen Schalen kann unter geringem Materialeinsatz erfolgen, das Demontagewerkzeug (SGripper_02) soll durch seine Wechselspitzen eine hohe Standzeit erreichen. Das Konzept der Wechselspitzen ist angelehnt an Spreizsysteme zur Demontage von Radnaben [Hazet, 2023].

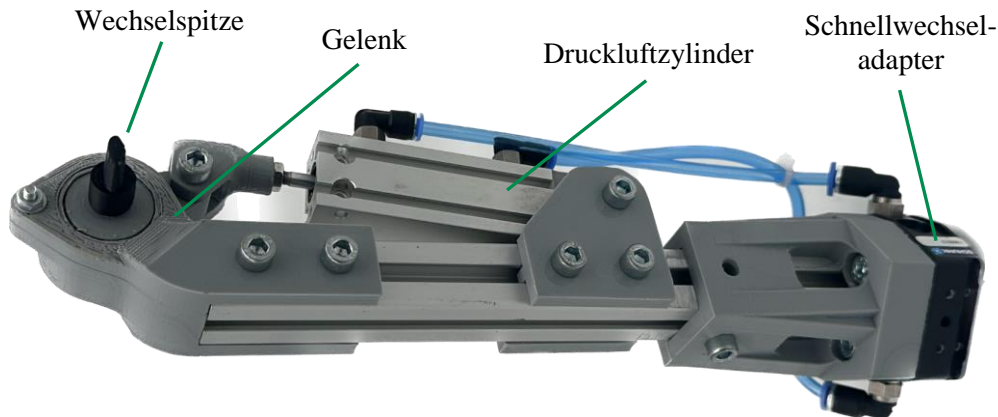


Abbildung 64: Mit ovalen Wechselspitzen ausgestattetes Demontagewerkzeug zum Aufhebeln von Gehäusedeckeln (SGripper_02)

Weiterhin ist das Demontagewerkzeug so konzipiert, dass die beiden Anschlagpunkte des Zylinders eine präzise 90° -Drehung der Wechselspitze bewirken. Durch die Übersetzung der Lateralbewegung des Druckluftzylinders in eine rotatorische Bewegung am Gelenk weist der Momentenverlauf der Wechselspitze annähernd eine Sinusform auf. Dadurch, dass die Wechselspitze unterschiedlich in ihrer Aufnahme eingesetzt werden kann, kann sichergestellt werden, dass quasi unabhängig vom Ansetzwinkel des Werkzeugs das maximale Moment beim initialen Aufhebeln der Gehäusedeckel abgerufen werden kann.

Um die mechanische Belastbarkeit des SGripper_02 zu prüfen, wurden in Ansys statische Simulationen unter möglichst realitätsnahen Bedingungen durchgeführt. Dazu wurden allgemein eine Reihe von Annahmen getroffen: Ein Meshgröße von 0,01 m wurde gewählt, die Reibungsfaktoren wurden zwischen PLA und PLA mit $\mu = 0,5$, zwischen Aluminium und PLA mit $\mu = 0,33$, zwischen Aluminium und Aluminium mit $\mu = 0,21$ und zwischen Aluminium und Stahl mit $\mu = 0,19$ angenommen. Der Elastizitätsmodul für PLA wurde mit 1,879 GPa, für Aluminium mit 71 GPa und für Stahl mit 200 GPa angenommen. Die Bewegungen in der Simulation werden echt skaliert dargestellt. Das Aluminiumprofil sowie eine Gehäusehälfte werden im Raum fixiert.

Zunächst wurde der SGripper_02 überprüft, in dem alle wesentlichen Teile wie der elliptische Zapfen, der Hebel mit der Sechskantaufnahme als auch die beiden Gehäuseteile aus PLA angenommen wurden. Die Gehäuseteile werden mit $F_H = 100 \text{ N}$ zusammengedrückt und der Zylinder weist die Zugkraft $F_Z = 200 \text{ N}$ auf.

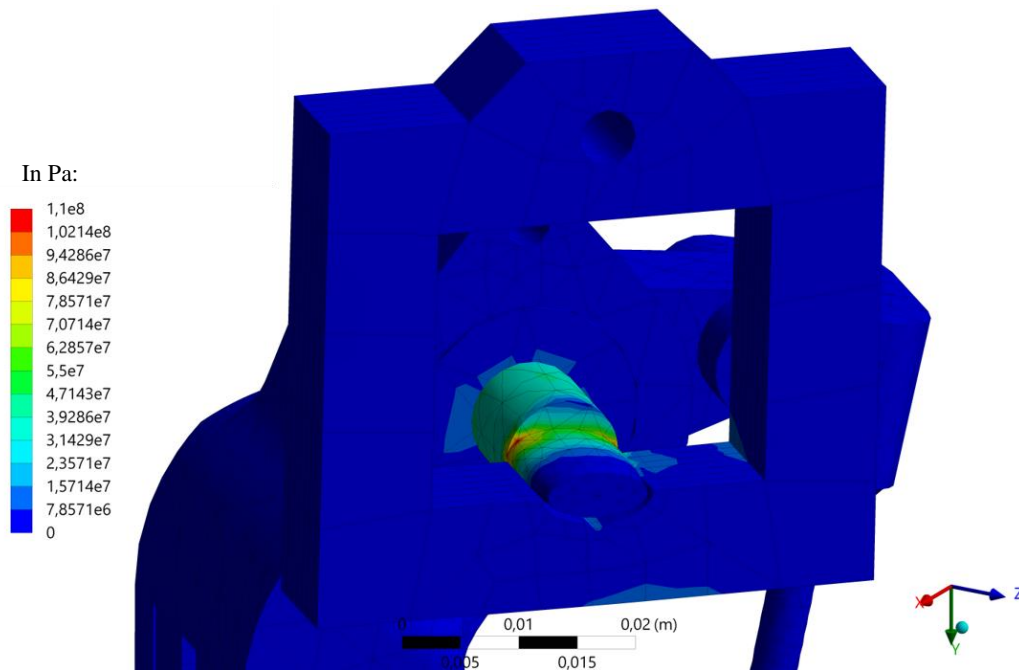


Abbildung 66: Simulation des SGripper_02 aus PLA bei einer Haltekraft von 100 N und einer Zugkraft von 200 N

Es zeigt sich, dass insbesondere im Bereich des Übergangs vom zylindrischen zum elliptischen Teil des Zapfens eine erhöhte Belastung von 108 MPa auftritt. Der Sicherheitsfaktor⁴⁶ beträgt an dieser Stelle circa 0,26, entsprechend tritt in der Simulation ein Versagensfall ein.

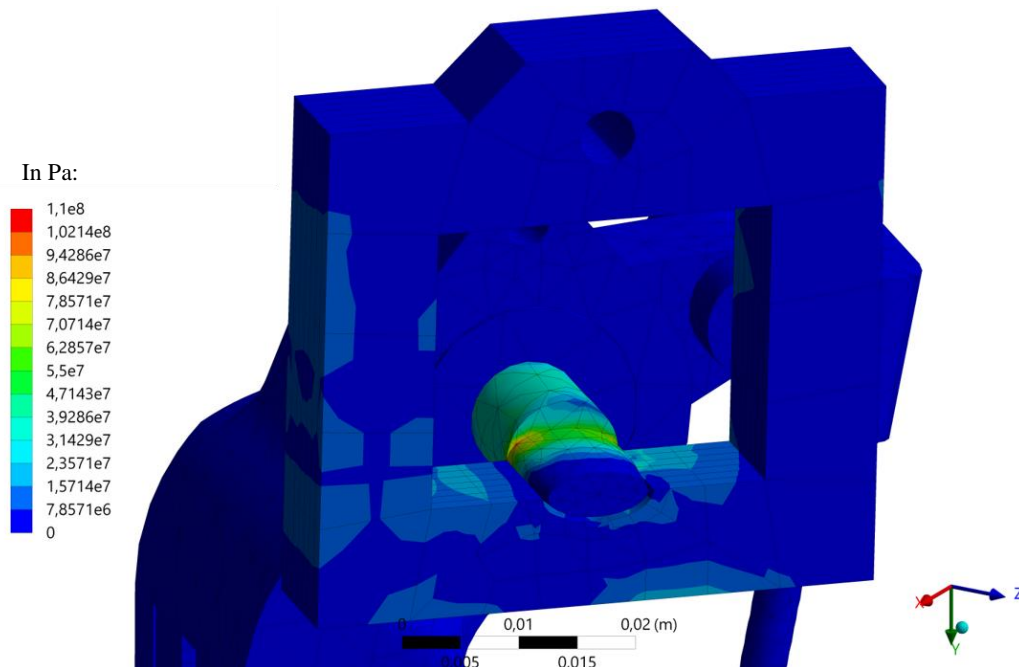


Abbildung 65: Simulation des SGripper_02 aus Aluminium und Stahl bei einer Haltekraft von 100 N und einer Zugkraft von 200 N

⁴⁶ Der Sicherheitsfaktor errechnet sich lokal aus dem Verhältnis zwischen auftretender Spannung und maximaler Belastbarkeit. Sicherheitsfaktoren < 1 stellen den Versagensfall dar.

Als erste Bauteilverbesserung wurde simuliert, wie sich der SGripper_02 verhält, wenn die vorher aus PLA bestehenden Bauteile aus Stahl sind, während beide Gehäusehälften nunmehr aus Aluminium gefertigt sind. Die auftretenden Kräfte wurden konstant gehalten. Dabei zeigt sich, dass die auftretenden Spannungen im vorher kritischen Bereich auf circa 100 MPa sinken, da das Material des Zapfens jedoch aus Stahl gewählt wurde, beträgt der Sicherheitsfaktor nun 4,59 – entsprechend hält das Werkzeug der Belastung stand.

Werden nun deutlich höhere Kräfte veranschlagt, beispielsweise $F_H = 500\text{ N}$ und $F_Z = 1000\text{ N}$, und werden die Materialien konstant gehalten, tritt erneut der Versagensfall ein.

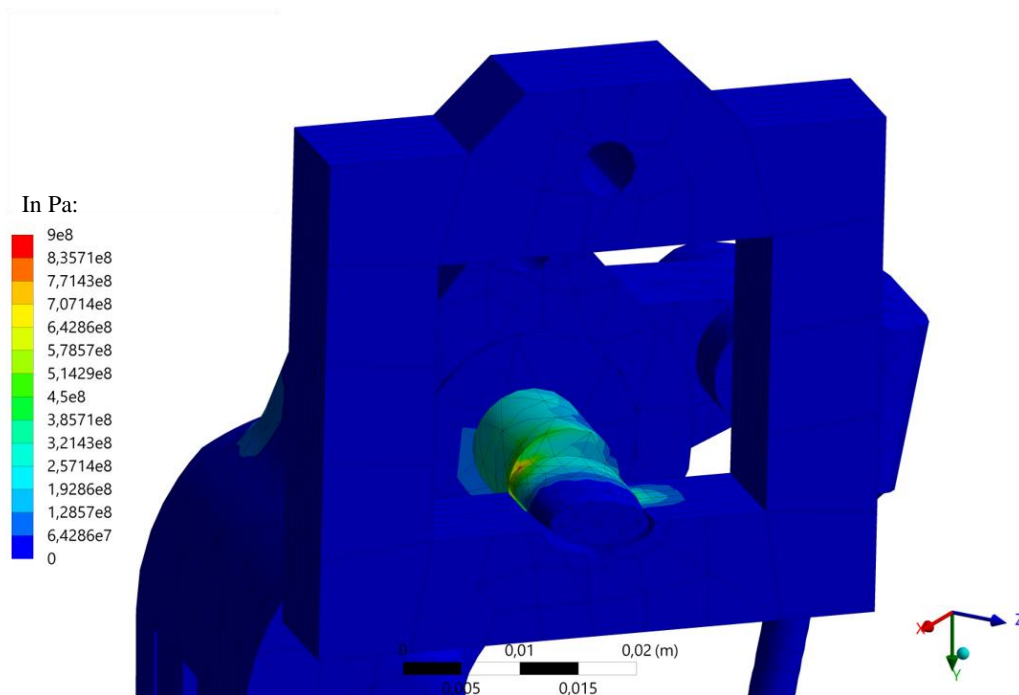


Abbildung 67: Simulation des SGripper_02 aus Aluminium und Stahl bei einer Haltekraft von 500 N und einer Zugkraft von 1000 N

Durch die Verfünfachung der Kräfte steigt die maximal auftretende Spannung am Übergang zwischen zylindrischem und elliptischem Teil des Zapfens auf circa 811 MPa an. Der Sicherheitsfaktor beträgt nunmehr circa 0,57. Es wurde eine weitere Simulation durchgeführt, bei der das Design des Zapfens unter sonst konstanten Bedingungen verändert wurde. Dazu wurde das Verhältnis von Länge zu Breite im Querschnitt von 1:2 auf 3:4 verringert, sodass der elliptische Teil stabiler ist und einen geringeren Hub der Gehäusehälften auslöst. Weiterhin wurde die angelegte Fase halbiert, sodass sich die aktive Höhe des elliptischen Teils erhöht.

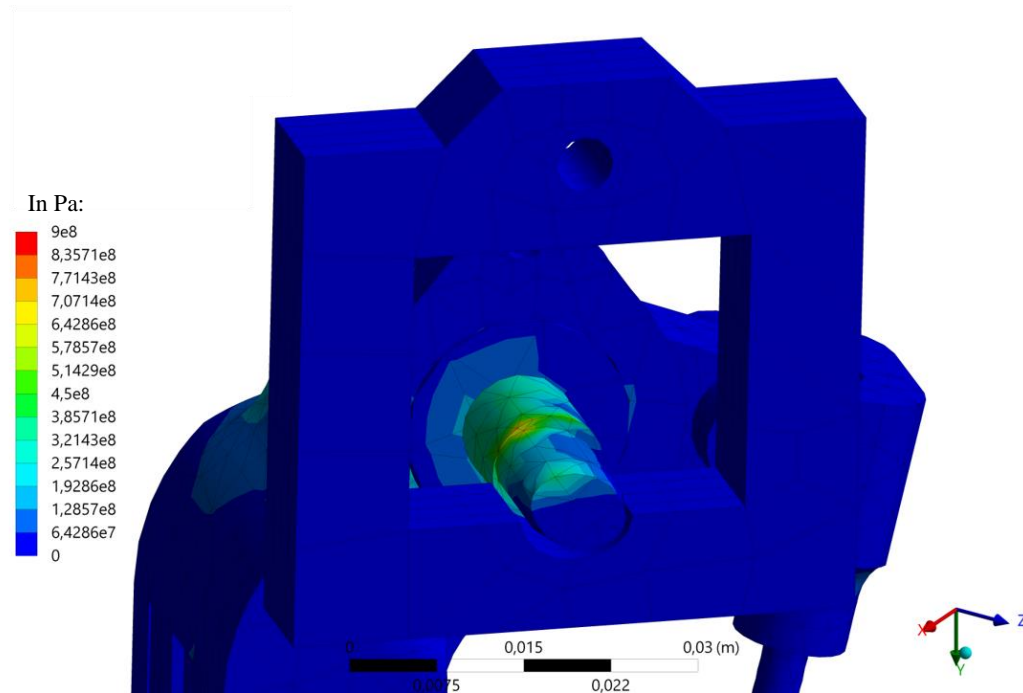


Abbildung 68: Simulation des verbesserten SGripper_02 aus Aluminium und Stahl bei einer Haltekraft von 500 N und einer Zugkraft von 1000 N

Es zeigt sich eine maximale Belastung von circa 748 MPa, die erneut am Übergang des Zapfens auftritt (Verringerung der maximal auftretenden Spannung im Vergleich zu vorherigem Design um knapp acht Prozent). Dennoch tritt ein Versagensfall auf, der Sicherheitsfaktor beträgt nunmehr circa 0,62 (Erhöhung um knapp neun Prozent). Weiterhin zeigt sich, dass erhöhte Spannungen von circa 382 MPa auf der Rückseite des SGripper_02 auftreten, die sogar zum Versagensfall führen können (Sicherheitsfaktor = 0,81). Die Spannungen auf der Rückseite treten dadurch auf, dass sich durch die Rotation des Zapfens dieser gegen die fixierte Gehäusehälfte drückt und dadurch sich und den Rest des SGripper_02 einer Biegebelastung aussetzt. Durch eine federnde Lagerung des SGripper_02 in y-Richtung könnten beide Belastungen reduziert werden.

Dichtung zwischen Gehäusedeckeln und Hauptgehäuse (Dummy)

Die klebenden Eigenschaften der verwendeten Flüssigdichtmasse im ausgehärteten Zustand verhindern eine vollständige Demontage dieser (siehe Abbildung 51). In Anlehnung an UV-härtende, oberflächentrockene Flüssigdichtungen wird für eine vereinfachte Demonstration eine Runddichtung aus einem Kautschuk-Elastomer verwendet. Die Dichtung wird in der dafür vorgesehene Einlegenut positioniert und mitsamt dem Gehäusedeckel auf dem Hauptgehäuse verschraubt. Nach Mörl und Gelbe sind Runddichtungen in Nuten für Temperaturbereiche zwischen -50 °C und $+200\text{ °C}$ und unter anderem zur Dichtung gegen Öle bei mittleren Drücken geeignet. Weiterhin ist eine Wiederverwendung möglich [Mörl

und Gelbe, 2019]. Für eine leichtere Demontage ist eine Lasche vorgesehen, an der der Demontageroboter angreifen und die Dichtung vollständig aus der Nut ziehen kann.



Abbildung 69: a) Gehäusedeckel mit eingelegerter Dichtung, b) große und kleine Dichtung für beide Dummydeckel mit Laschen zur vereinfachten Demontage

Nach Kluge [2017] können alternativ auch Flüssigdichtungen, die durch hochenergetisches UV-Licht schnell härtbar sind und oberflächentrockene Eigenschaften aufweisen, demon­tiert werden, ohne das Trägerbauteil zu beschädigen – und stellen damit eine mögliche Alternative zu den vorliegenden Dichtungen dar.



Abbildung 70: Parallelgreifer zur Entfernung der Einlegedichtungen am Dummy-EAA

Für die Demontage der Einlegedichtungen wurde ein vergleichsweise universeller Parallelgreifer konstruiert, der an den Innenseiten mit Metalleinlagen versehen ist. Die Basis des Greifers stellt ein PGN+P80-1 der Firma Schunk SE & Co. KG dar.

Schraubverbindungen und Weiterentwicklung eines Demontageschraubers

Bereits im Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* von Zeller et al. [2021] wurde festgestellt, dass aufgrund fehlender am Markt verfügbarer Schraubwerkzeuge, die für die robotergestützte Demontage geeignet wären, eine alternative Lösung geschaffen muss. Aus diesem Grund wurde eine Weiterentwicklung des prototypischen Demontageschraubers, der im Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* konstruiert wurde, realisiert. Dazu wurde die gefederte Spindel am Läufer verlängert und zusätzlich mittels einer in einem zusätzlichen

Gehäuse befestigten Messingbuchse gelagert. Die im Vergleich gesteigerte Präzision soll zuverlässigere Schraubprozesse längerer Schrauben ermöglichen. Ergänzend wurde ein Bitusswechselsystem konstruiert, das im Vergleich zu einem vollständigen Bahnhof für Schraubwerkzeuge deutlich günstiger und platzsparender ist.

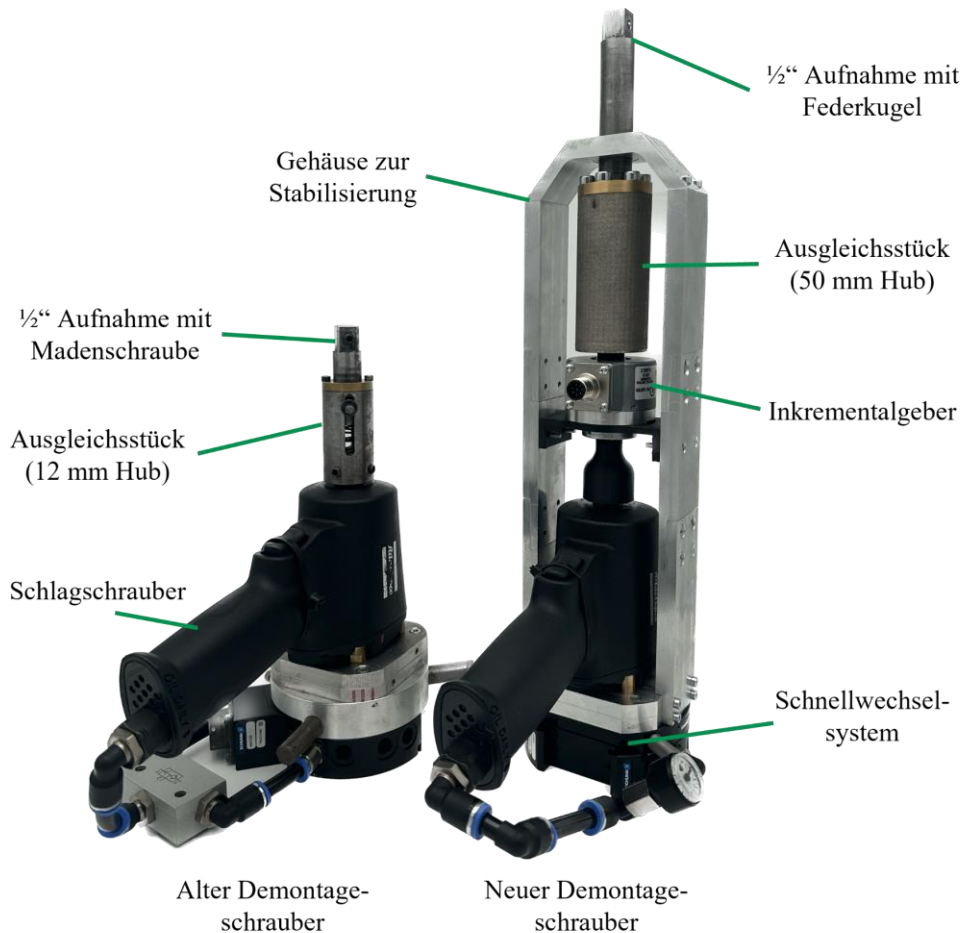


Abbildung 71: Aufbau des alten und neuen Demontageschraubers im Vergleich

Wie in Abbildung 71 gezeigt, wurde das ursprüngliche Design des *alten Demontageschraubers* stark verändert. Dazu wurde das Ausgleichsstück nunmehr aus 1.4404 Edelstahl mittels eines Metalldruckers gedruckt und der Stift zur Drehmomentübertragung durch eine robustere, innenliegende Sechskantführung ersetzt. Weiterhin wurde der Hub von 12 mm auf 50 mm erhöht, sodass auch große und besonders tief eingeschraubte Schrauben demontiert werden können. Es wurde weiterhin ein Gehäuse zur Stabilisierung konstruiert, das die Exzentrizität im Betrieb verringern soll. Ein Inkrementalgeber soll dazu dienen, die Winkelposition des Schraubers zu erkennen und mithilfe des RobotVision Systems den neuen Demontageschrauber direkt in den vorgesehenen Schraubenkopf zu führen. Die zuvor im alten Demontageschrauber durch die Madenschraube fixierten Bitnüsse können beim neuen Demontageschrauber gewechselt werden, da nun eine gefederte Kugel in der 1/2“-Aufnahme vorgesehen ist.

Nicht verändert wurden der Schlagschrauber als Antrieb und das Schnellwechselsystem zur Aufnahme am Roboter. Da gelöste Schrauben durch Bitnüsse mit Haltefunktion gehalten werden, müssen diese nach jedem Ausschraubvorgang von der Bitnuss gelöst / gezogen werden. Dazu wurden in Anlehnung an den Schraubenabstreifer aus dem Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* von Zeller et al. [2021] iterativ weitere Varianten entwickelt.

Der neue Schraubenabstreifer MK IV ist vergleichsweise kompakt gebaut und weist einen senkrechten Fallschacht für Schrauben auf. Darüber hinaus sind die beiden Abstreiferklappen nunmehr aus einem Material (PLA) gedruckt und miteinander durch zwei Zahnradsegmente verbunden, die ein synchronisiertes Schwungverhalten erzwingen und somit häufig auftretendes Verklemmen von Schrauben zwischen den Abstreiferklappen vermeiden.

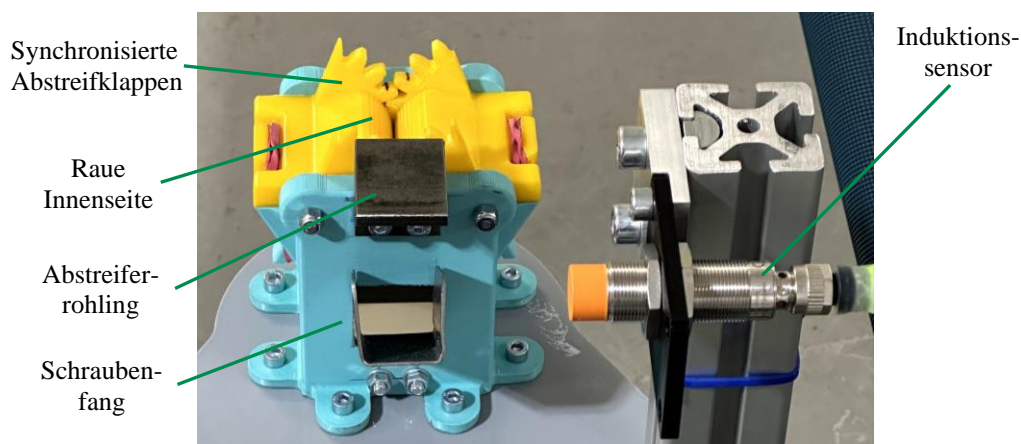


Abbildung 72: Schraubenabstreifer MK IV (links) und Induktionssensor zur Erfolgskontrolle des Abstreifvorgangs

Im Schraubenabstreifer MK IV wird ein selbstverstärkender Mechanismus verwendet, der auch sehr fest klemmende Schrauben von den Bitnüssen ziehen soll. Die Spanngummis dienen der initialen Kontaktierung der beiden Abstreifklappen mit der abzustreifenden Schraube; sobald die rauhen Innenseiten auf dem Schraubengewinde greifen, wirkt der selbstverstärkende Mechanismus. Der Abstreifvorgang an den synchronisierten Klappen ist insbesondere bei Schrauben erforderlich, die von der Bitnuss umschlossen werden und somit nicht an einem Vorsprung abgestreift werden können.

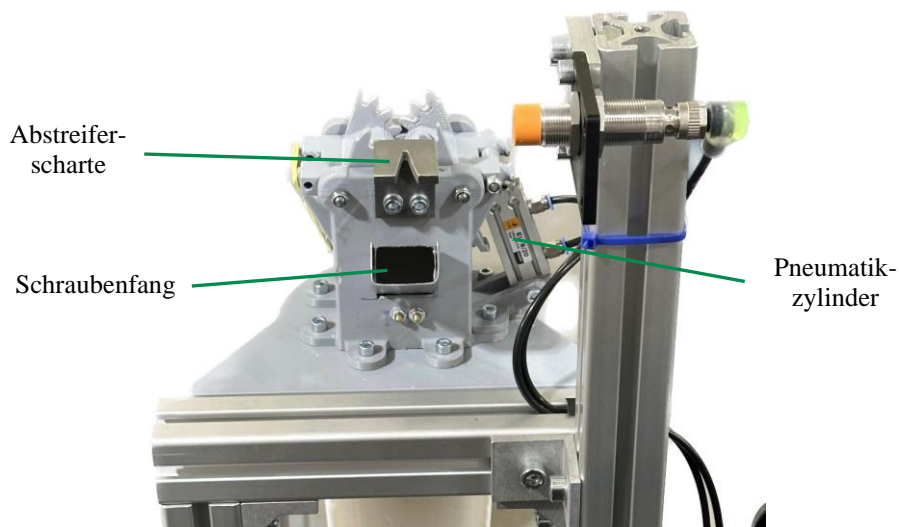


Abbildung 74: Schraubenabstreifer MK V mit Pneumatikzylinder und ausgefräster Abstreifscharte

Andere Schraubenköpfe, die beispielsweise mit Innensechsrundbitnüssen demontiert werden, können über die metallischen Abstreifscharte gelöst werden, die dann in den Schraubenfang fallen. Beim Schraubenabstreifern MK V wurde zudem ein Pneumatikzylinder vorgesehen, der die synchronisierten Abstreiferklappen nach jedem erfolgten Abstreifvorgang kurz öffnet, um die darin befindliche Schraube zu lösen. Dies ist besonders relevant für den Fall, dass eine kleine Schraube nach einer Großen demontiert wird und die kleine Schraube nicht in der Lage ist, die große Schraube durch die Abstreifklappen durchzudrücken. In jedem Fall wird die Bitnuss an einem Induktionssensor vorbeigeführt, sodass eine Erfolgskontrolle des Abstreifvorgangs durchgeführt werden kann.



Abbildung 73: Mit Umlaufnut versehene Bitnüsse im Bitnusswechselsystem (v.l.n.r.: T45 Langbit, T40, T30, T25, T20, Sonderanfertigung E10)

Da im vorliegenden EAA zwölf unterschiedliche Schraubenkopfformen vorliegen, müssen entsprechend viele Bitnüsse in Werkzeugbahnhöfen vorgehalten werden. Im Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* von Zeller et al. [2021] wurde noch für jeden Schraubentyp ein Demontageschrauber vorgesehen, sodass vergleichsweise hohe Kosten und ein hoher Platzbedarf im Werkzeugbahnhof entstanden sind.

Durch den Einsatz des Bitnusswechselsystem kann der Platzbedarf deutlich reduziert und die Investitionskosten des (nun aufwendigeren und teureren Demontageschraubers) verringert werden. Konkret wird am Demontageschrauber eine ½“ Vierkantaufnahme mit Federkugel vorgesehen, die zur Fixierung der Bitnüsse dient. In die Bitnüsse wurde eine Umlaufnut eingebracht, sodass diese im Wechselsystem aufgenommen werden können. Damit die Bitnüsse stets wiederholgenau im Wechselsystem positioniert werden können, ist in jeder Aufnahme ein federnder Stift vorgesehen, der bei Rotation der Bitnuss in diese einrastet.

Abzieheinrichtung an Gehäusedeckeln

Die automatisierte Demontage der Gehäusedeckel stellt aufgrund ihrer weitestgehend konvexen, quasi hinterschnittfreien Morphologie eine besondere Herausforderung dar, da somit die formschlüssige und damit vermutlich zerstörungsfreie Demontage stark erschwert wird. Eine Demontage mittels Kraftschluss kann aufgrund der hohen Klebewirkung der Dichtmasse sowohl eine Verformung des gesamten Deckels als auch lokale Deformationen hervorrufen, was bei den vergleichsweise kostenintensiven Gehäuseteilen zu vermeiden ist. Entsprechend kann eine standardisierte Schnittstelle vorgesehen werden, an der Gehäusedeckel mit geeignetem Krafteintrag und dafür vorgesehen Werkzeugen abgezogen werden können.



Abbildung 75: Zentrischgreifer („CGripper_01“) MK I

Ein geeignetes Werkzeug kann ein Zentrischgreifer (CGripper_01) sein, dessen Finger nach Innen geneigte Geometrien aufweisen, wodurch im Greifvorgang die o.g. standardisierte Schnittstelle samt Gehäusedeckel bereits in Teilen abgezogen werden kann. Der Vorteil an dieser Stelle ist, dass der Roboter mit eingeschalteten Bremsen stehen bleiben kann, während der eigentliche Abziehvorgang durch das Werkzeug durchgeführt wird. Somit können insgesamt höhere Zugkräfte aufgebracht werden, als wenn der Roboter direkt am Gehäusedeckel ziehen würde.

Um die Tragfähigkeit des CGripper_01 zu analysieren, wurde dieser in Ansys statisch simuliert und eine realitätsnahe Belastungssituation untersucht. Dazu wurde zunächst PLA (Elastizitätsmodul: 1,879 GPa) als Werkstoff für die Finger gewählt. Die Finger werden jeweils mit 580 N zusammengedrückt. An der kegelförmigen Standardschnittstelle wurde mit 100 N (maximale Tragkraft des größten Roboters auf der Testbench) in Richtung $\vec{F} = (0,0,1)$ gezogen. Die Finger wurden standardgemäß mit M4 Schrauben und 3902 N im Zentrischgreifer fixiert. Für eine effizientere Berechnung wurden für unterschiedliche Bauteile verschiedene Meshgrößen gewählt. Für die Finger und die Standardschnittstelle wurde mit 0,001 m Elementgröße eine im Vergleich zum Zentrischgreifer (Elementgröße 0,01 m) feinere Auflösung gewählt. Folgende Kontaktbedingungen wurden angenommen: Die Finger können reibungsfrei im Greifer bewegt werden, jedoch herrscht zwischen den Fingern und der Standardschnittstelle Reibung ($\mu = 0,5$). Weiterhin sind die Finger fest mit den beweglichen Backen im Zentrischgreifer verbunden. Die folgende Abbildung 76 zeigt die Spannungsverteilung im CGripper_01, Verformungen wurden zum besseren Verständnis um Faktor zehn verstärkt:

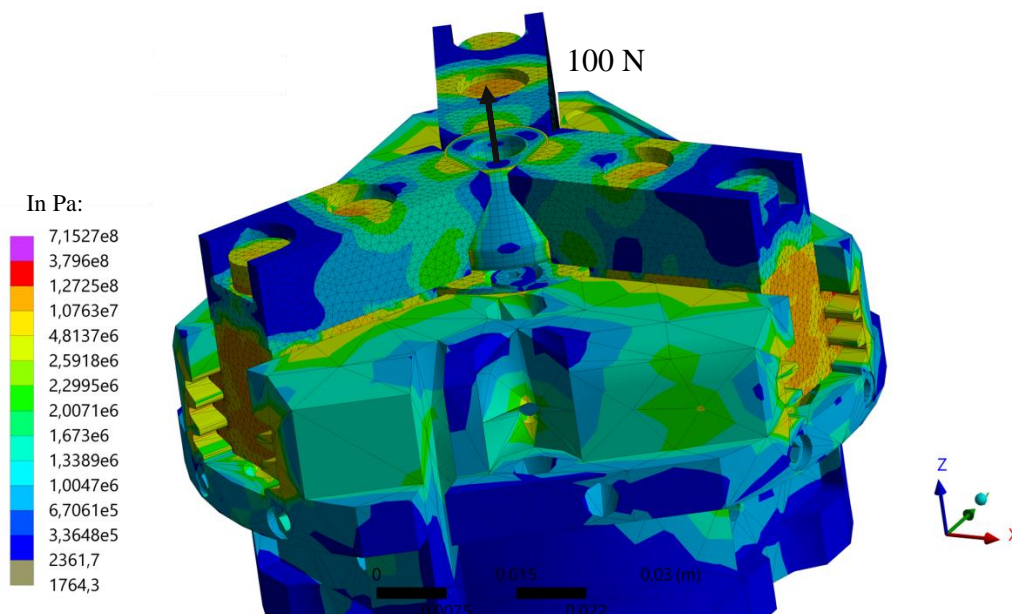


Abbildung 76: Simulation des CGripper_01 mit Fingern aus PLA bei einer Zugbelastung von 100 N

Es zeigt sich, dass an den Rändern der mittig im Finger befindlichen Senkung erhöhte Spannungen (bis zu 3 MPa) im Belastungsfall auftreten. Zusätzlich weisen die Finger eine erhöhte Belastung oberhalb der nach Innen geneigten Funktionsflächen auf (bis zu 3,2 MPa). Beide Bereiche wurden in einer verbesserten Version des Fingers mit mehr Material versehen, um die Belastungsspitzen auszugleichen:

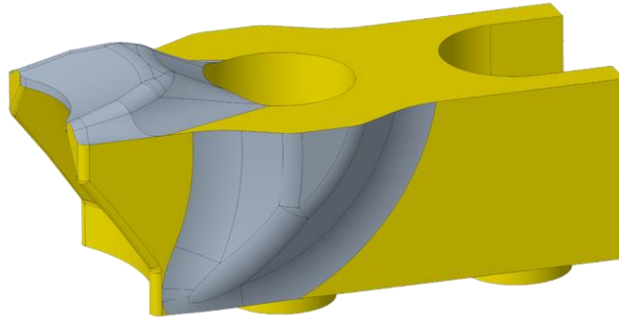


Abbildung 77: Verbesserte Finger des CGripper_01 mit aufgebautem Material (grau) an den stärker belasteten Bereichen

Mit dem verbesserten Fingern wurde erneut eine Simulation durchgeführt, um die Verbesserung zu bestätigen, dabei sind alle Rahmenbedingungen konstant gehalten worden:

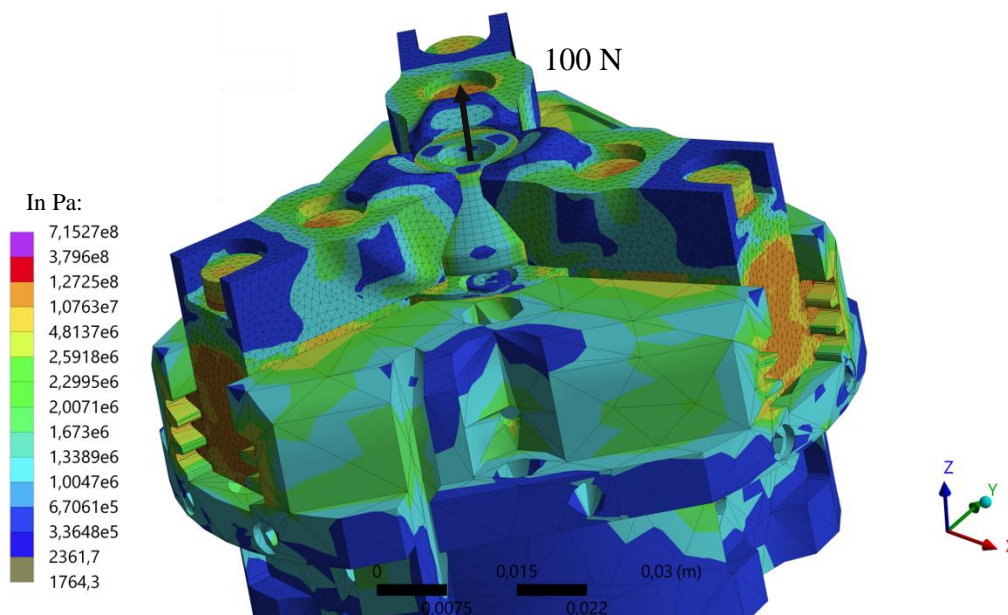


Abbildung 78: Simulation des verbesserten CGripper_01 mit Fingern aus PLA und einer Zugbelastung von 100 N

Es zeigt sich, dass sich die maximal auftretenden Spannungen im Bereich der Senkungen um circa 13 % auf 3,4 MPa erhöht haben, jedoch der betroffene Bereich verkleinert werden konnte. Oberhalb der Funktionsflächen konnte die Spannung um circa 62 % auf 1,2 MPa reduziert werden. Es wird daher vermutet, dass der verbesserte CGripper_01 eine höhere Last als sein Vorgänger aufnehmen kann.

Um einen Hinweis auf die Einsatzfähigkeit des CGripper_01 in einer industriellen Umgebung zu erlangen, wurden weitere Simulationen durchgeführt, bei denen die verbesserten Finger aus Aluminium (Elastizitätsmodul = 71 GPa) bestehen und die axiale Zugbelastung mit 2 kN angenommen wird. Der Reibungsbeiwert von Aluminium auf Aluminium wird mit $\mu = 1,2$ angenommen.

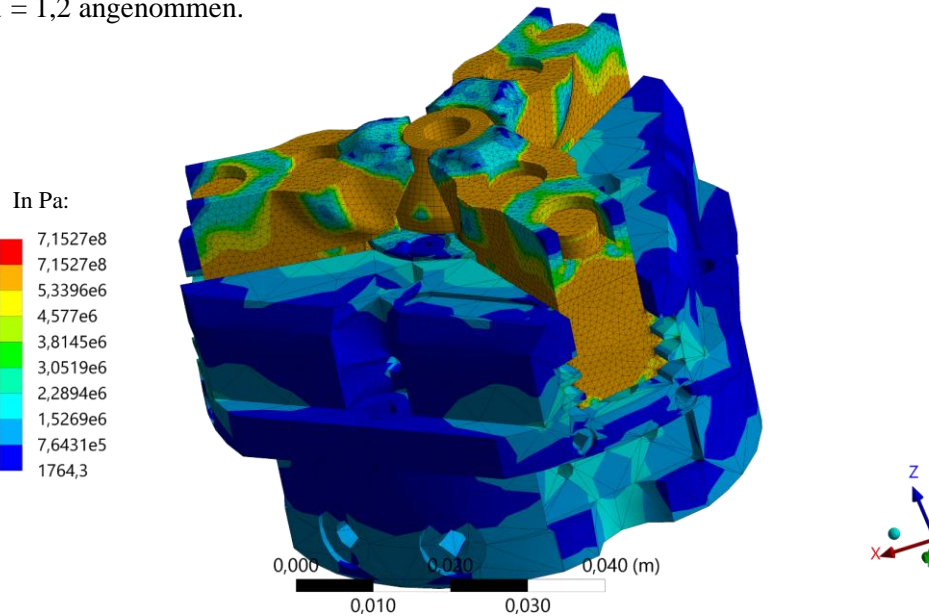


Abbildung 79: Simulation des verbesserten CGripper_01 mit Fingern aus Aluminium und einer axialen Zugbelastung von 2000 N

Es zeigt sich, dass der CGripper_01 der Belastung standhalten kann. Die höher belasteten Bereiche sind wie auch beim CGripper_01 rund um die vordere Bohrung im bereits verstärkten Bereich angesiedelt. Es tritt eine maximale Spannung in diesen Bereichen von bis zu 13 MPa auf. Abhängig davon, ob der CGripper_01 verwendet wird, um einen Gehäusedeckel von seiner Dichtung zu ziehen oder lediglich einen bereits aufgehebelten Gehäusedeckel anzuheben, ist der CGripper_01 vermutlich auch für eine spätere industrielle Nutzung geeignet. Soll mittels des CGrippers_01 ein Gehäusedeckel abgezogen werden, müssen unter Umständen die Innenseiten gehärtet und der CGripper_01 am Gehäuse gekontert werden, sodass die aufkommenden Kräfte nicht in den Roboterarm geführt werden. Sollten höhere Kräfte benötigt werden, könnten die Flanken der Finger und der standardisierten Schnittstelle entsprechend abgeflacht sowie der Hub der Greiferfinger erhöht werden.

Vierteldrehverschluss / Camloc Schnellverschluss

Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, ist laut Beitz 96 / Tabelle 2 der Vierteldrehverschluss eine besonders geeignetes Verbindungsprinzip. Sogenannte *Camloc Schnellverschlüsse* machen sich das Vierteldrehverschluss-Verbindungsprinzip zu nutzen.



Abbildung 80: Verwendeter Camloc Schnellverschluss Modell 99F des Herstellers Benloc Fastener Technik GmbH & Co. KG (links: Haltenocke, rechts: Verschlusszapfen)

Zur Evaluierung der Demontierbarkeit durch Roboter wurden vier Camloc Schnellverschlüsse in die Leistungselektronik des Dummy-EAA eingebaut, sodass diese den Deckel mit jeweils 480 N (Betriebsbelastung) fixieren. Konkret wird das Modell 99F des Herstellers Benloc Fastener Technik GmbH & Co. KG verwendet [Benloc, 2022].

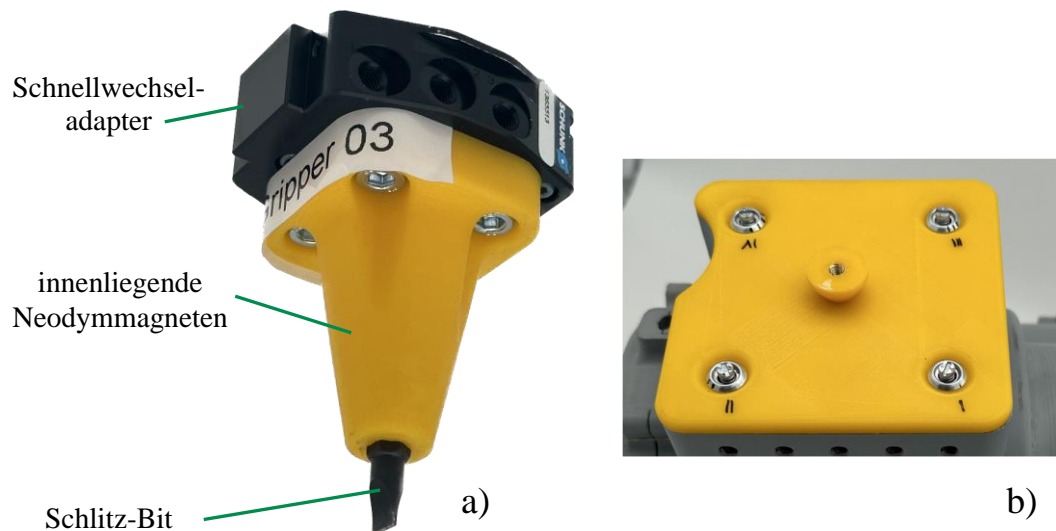


Abbildung 81: Demontagewerkzeug für Camloc Schnellverschlüsse mit Schlitzkopf (a) und montierte Camloc Schnellverschlüsse im Dummy-EAA (b)

Zur automatisierten Demontage wurde ein Werkzeug designet („SGripper_03“), bei dem eine Sechskantaufnahme für herkömmliche Bits auf ein SWA-007 Schnellwechseladapter der Schunk SE & Co. KG gesetzt wird, wobei Neodymmagneten hinter der Bitaufnahme sitzen, sodass eingesetzte Bits magnetisiert werden und diese die ferromagnetischen Camloc Schnellverschlüsse nach erfolgter Demontage abtransportieren und abstreifen können.

6.3.3 Experimente an Bauteilmodifikationen und Werkzeugen

Zur Validierung der Bauteilmodifikationen und der entsprechenden Werkzeuge wurden realitätsnahe Versuche in einer skalierten Testumgebung durchgeführt. Dazu sollen die im Rahmen der vorliegenden Dissertation konstruierten Werkzeuge und Bauteilmodifikationen auf ihre prinzipielle Funktionalität sowie ihre Belastbarkeit, ihre Wiederholgenauigkeit sowie ihre Zuverlässigkeit getestet werden. Zu diesem Zweck wurde die sogenannte *Testbench* gebaut, an der Experimente an einem modifizierten, herunterskalierten Dummy-EAA durchgeführt wurden.

Setup

Für die meisten der durchzuführenden Experimente wurde eine gemeinsame Testumgebung gebaut. Dazu wurden ein KUKA AGILUS KR 10 R1100 (maximale Nutzlast 10 kg bei einem maximalen Arbeitsradius von 1100 mm) (KR 10) sowie ein KUKA AGILUS KR 4 R600 (maximale Nutzlast 4 kg bei einem maximalen Arbeitsradius von 600 mm) (KR 4) auf einer Werkbank angebracht. Bei beiden Robotern handelt es sich um sechsachsige Roboter. Beide Roboter wurden mit Kollisions- und Überlastsensoren der Firma Schunk SE & Co. KG ausgestattet, die jeweils am Flansch des Roboters angebracht wurden und bei Auslösung den entsprechenden Roboter stoppen sowie eine begrenzte Ausweichbewegung des Werkzeugs erlauben.

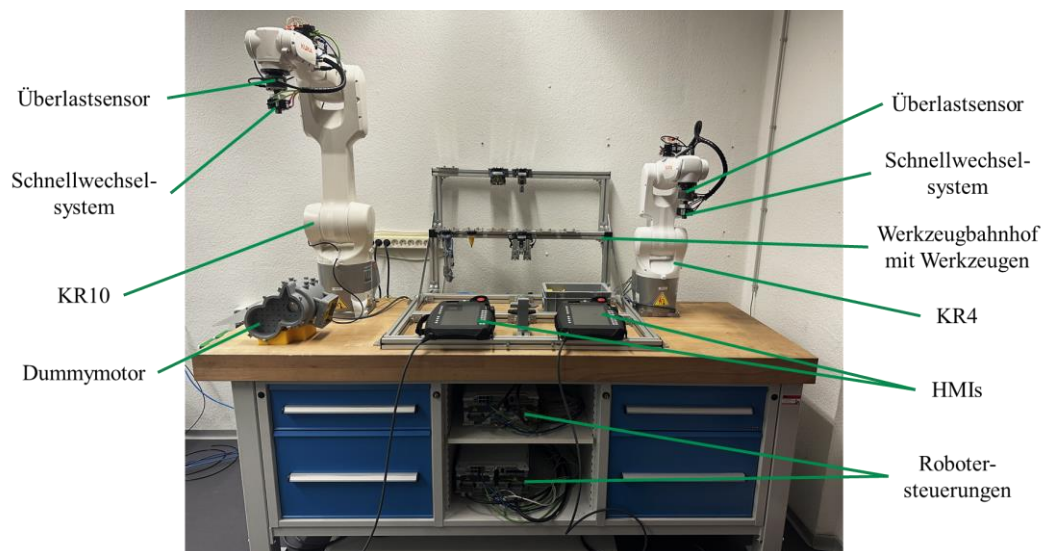


Abbildung 82: Testbench zu Demontage des Dummy-EAA mit ausgerüsteten KR 10 und KR 4 sowie ausgestattetem Werkzeugbahnhof

Um eine maximal hohe Flexibilität in den zu testenden Demontageprozessen zu gewährleisten, wurden Werkzeugwechselsysteme vom Typ SWS-007 der Firma Schunk SE & Co. KG hinter den Überlastsensoren angebracht. Die Werkzeugwechselsysteme erlauben schnelle, vollautomatisierte Werkzeugwechsel und ermöglichen darüber hinaus, dass beide Roboter auf dieselben Werkzeuge zurückgreifen können (siehe Abbildung 82). Weiterhin

sind beide Roboter mit Busklemmen der Firma Beckhoff ausgestattet, über die die Roboter mit Sensoren und Aktuatoren (bspw. Ventilinseln zur Steuerung der pneumatischen Greiftechnik) interagieren können. Um kollaborierendes Arbeiten beider Roboter zu ermöglichen, sind diese ebenfalls über die Busklemmen miteinander verbunden und schaffen somit ein dezentral gesteuertes System. Einige Aufgaben erfordern den Einsatz beider Roboter und damit verbunden deren gegenseitige Steuerung.

Testen des Demontageschraubers

Da wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, Schraubverbindungen eine der wesentlichen Füge-techniken im EAA darstellen, wurde die Verlässlichkeit des weiterentwickelten Demontageschraubers untersucht und quantifiziert. Neben den Versuchen der im Rahmen der vorliegenden Dissertation gebauten Testumgebung wurden die Versuche mit dem Demontageschrauber im Demontagetechnikum aus dem Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* von Zeller et al. [2021] durchgeführt. Hierzu wurde ein KUKA KR 30⁴⁷ verwendet, der mit dem Werkzeugwechselsystem SWS-021 der Firma Schunk SE & Co. KG ausgestattet wurde. Der KR 30 wurde für die Ausschraubversuche genutzt, da die auftretenden Belastungen beim Lösen der Schraubverbindung die zulässigen Belastungen der Roboter der Testumgebung übersteigen würden. Konkret wurde ein Schraubversuchsstand konzipiert, auf dem verschiedene Ausschraubszenarien getestet wurden.

⁴⁷ Präzise: KUKA IONTEC KR 30 R2100

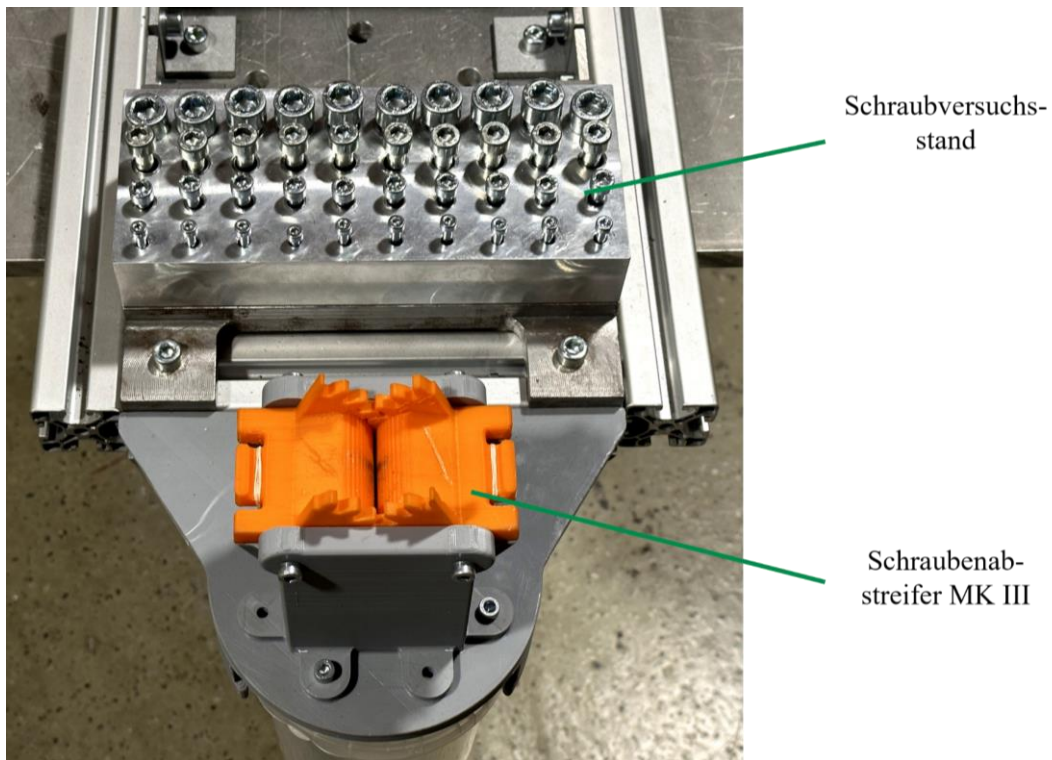


Abbildung 83: Mit bereits gelösten Schrauben bestückter Schraubversuchsstand mit Schraubenabstreifer MK III

Es wurden die gängigen Gewindetypen M4, M6, M8 und M12 jeweils 10-mal in eine Stahlplatte eingebracht. Um die Mindestklemmlänge der Schraubverbindungen einzuhalten, sodass die jeweils erforderliche Montagevorspannkraft erzielt werden kann, wurde eine Zwischenplatte aus Aluminium mit einer Dicke von 35 mm auf die mit Gewinden bestückte Stahlplatte gelegt, die durch die Schrauben fixiert wurde [DIN Deutsches Institut für Normung, 2015].

Der Demontageschrauber kann im gezeigten Aufbau jeweils Sets von zehn Schrauben nacheinander demontieren. Jedes Schraubensetup wurde mit jedem Schrauber jeweils 20-mal getestet. Die gemessene Exzentrizität als auch die Erfolgsquote wird in der folgenden Tabelle 7 dargestellt:

Tabelle 7: Exzentrizität und Erfolgsquote des alten und des neuen Demontageschraubers im Vergleich

Schraubentyp und Anzugsmoment	Exzentrizität [mm]		Erfolgsquote	
	Alter Schrauber	Neuer Schrauber	Alter Schrauber	Neuer Schrauber
M12x45, Festigkeit 8.8, Anzugsmoment 60/86 Nm ⁴⁸ , Innensechskant 10	±2	±2	100 %	100 %
M8x50, Festigkeit 8.8, Anzugsmoment 24,93 Nm, Innensechskant 6	±1,75	±1,5	100 %	100 %
M6x45, Festigkeit 8.8, Anzugsmoment 10,3 Nm, Innensechskant 5	±2	±1,5	100 %	100 %
M4x45, Festigkeit 8.8, Anzugsmoment 2,97 Nm, Innensechskant 3	±3,1	±2	5 %	15 %
M4x45, Festigkeit 8.8, Anzugsmoment 2,97 Nm, Innensechsrund T15	/	±4,5	/	100 %

Sowohl der alte als auch der neue Demontageschrauber weisen für die M6, M8 und M12 Schrauben eine hohe Erfolgsquote von 100 % auf⁴⁹. Weiterhin zeigt sich, dass die gemessene Exzentrizität der Bitnüsse beim neuen Demontageschrauber tendenziell niedriger ist. Eine Ausnahme bildet das Innensechsrund T15 Bit, dieses wurde jedoch mit mehreren Adapterstücken aufgenommen und kann somit nicht direkt verglichen werden. Auch für die Aufnahme der Innensechskant 3 Bitnuss musste ein Adapterstück verwendet werden. Auffällig ist, dass sich die Bits bzw. Bitnüsse trotz hoher Exzentrizität fast immer auf dem Schraubenkopf zentrieren konnten. Beispielsweise weist das Setup mit dem Innensechsrund T15 eine Exzentrizität von ±4,5 mm auf; bei einem Schraubkopfdurchmesser von 7 mm für die entsprechende M4 Schraube lässt sich kein Erfolg vermuten, jedoch konnte sich das Innensechsrund T15 Bit in 100 % der Fälle auf dem Schraubenkopf zentrieren und diese demontieren.

⁴⁸ Der verwendete Schlagschrauber weist laut Datenblatt ein maximales Lösemoment von 350 Nm auf, jedoch limitiert der Schlauchquerschnitt im verwendeten Setup trotz maximal möglichen Leitungsdruks (6,3 bar) das reale Lösemoment auf 60 Nm.

⁴⁹ Jedes Schraubsetup wurde 20-mal getestet

Um die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Ausschraubprozesses zu erhöhen, hat sich gezeigt, dass ein langsames Drehen des Bits bzw. der Bitnuss beim Herausziehen der Schraube zu empfehlen ist. Für eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Schraubversuche wurde eine konstante Ausschraubstrategie gewählt: Zunächst wird der Schrauber langsam angedreht und die Bitnuss danach auf den Schraubenkopf geführt. Dabei rastet die Bitnuss im Schraubenkopf ein und stoppt oder bleibt auf dem Schraubenkopf stehen und stoppt dennoch. Nach einer kurzen Pause wird der Schrauber kurz gepulst, sodass die Bitnuss erneut dreht, falls sie auf dem Schraubenkopf auflag. Der Puls ist so kurz gewählt, dass eine bereits eingerastete Bitnuss die Schraube nicht löst. Danach wird der Schrauber unter Volllast betrieben, um die Schraube zu lösen.

Bei den Schraubversuchen hat sich gezeigt, dass insbesondere große Schrauben durch ihre Masse bei vergleichsweise exzentrischen Setups ebenfalls stark exzentrisch schwingen und sich potenziell lösen können. Entsprechend ist bei der Demontage langer oder schwerer Schrauben ein Demontageschrauber mit geringer Exzentrizität zu bevorzugen.

Eine Herausforderung für die Demontage stellen die verwendeten M4 Schrauben dar: Der alte Demontageschrauber konnte eine Erfolgsquote von lediglich 5 % aufweisen, wohingegen der neue Demontageschrauber eine Erfolgsquote von 15 % aufweisen kann. Beide Erfolgsquoten schließen einen Einsatz der gewählten Setups in vollautomatisierten Demontageprozessen zunächst aus. Als Lösungsansatz wurde ein Innensechsrund T15 Bit anstelle einer Innensechskant 3 Bitnuss gewählt. Dadurch konnte die Erfolgsquote wie bei den anderen Schraubentypen auch auf 100 % gesteigert werden. Auffällig ist, dass trotz mangelnder Haltefunktion des Innensechsrundbits 80 % der Schrauben dennoch gehalten wurden. Vor allem bei den gewählten M4 Schrauben hat sich gezeigt, dass eine mehrfache Verwendung der M4 Schrauben nicht möglich ist, da der Schraubenkopf im Ausschraubprozess stark beschädigt wird.

Handlingtool für das Hauptgehäuse / SGripper_01

Um die tatsächliche Belastungsfähigkeit des SGripper_01 zu prüfen, wurde jeweils eine Aufnahme in die Einzelgreifer gesteckt und unterschiedlich belastet. Bei einer Zugbelastung von $F_z = 200 \text{ N}$ wurde der Versuch beendet, um den SGripper_01 nicht zu zerstören. Da die Greiferfinger in der xy-Ebene gespiegelt sind, lässt sich vermuten, dass jeder Einzelgreifer auch eine Druckbelastung von $F_z = -200 \text{ N}$ aufnehmen kann. Um die x-Achse der Aufnahme⁵⁰ konnte ein Drehmoment von $M_x = 1,5 \text{ Nm}$ aufgenommen werden, bevor

⁵⁰ Alle Achsen laufen durch den geometrischen Schwerpunkt der Aufnahme und sind parallel zum globalen Koordinatensystem angeordnet

der Versuch beendet wurde. 45° versetzt um die z-Achse konnte ein Drehmoment $M_{xy} \geq 1,8 \text{ Nm}$ aufgenommen werden, bevor der Versuch beendet wurde.

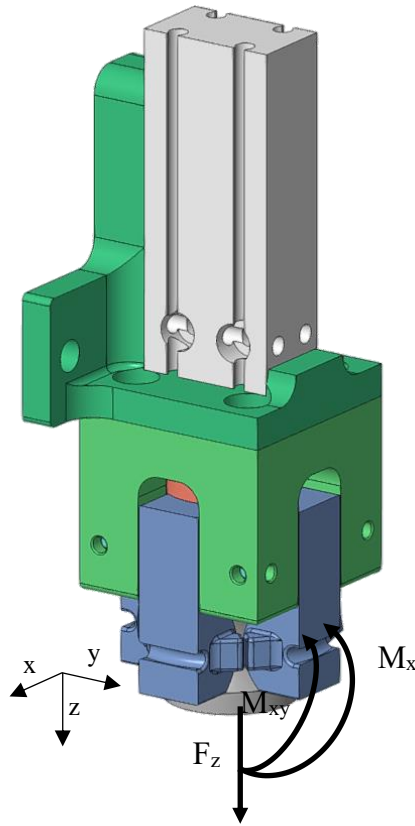


Abbildung 84: Geprüfte Belastungen am SGripper01

Je nach Lage des SGripper_01 im Raum tritt eine Mischbelastung auf, da immer vier Einzelgreifer am SGripper_01 simultan zugreifen. Dadurch kann zugleich die eher schwache Belastbarkeit auf Drehmoment ausgeglichen werden. In Summe kann der SGripper_01 herunterskaliert und weitestgehend aus PLA gefertigt bereits 80 kg Last vertikal anheben, was die maximale Tragkraft des KR10 vielfach übersteigt. Würde der SGripper_01 aus Stahl gebaut und seine Größe verdoppelt werden, stiege seine Belastbarkeit stark an. Sei das maximal aufnehmbare Biegemoment S_b an den Fingern kritisch, würde dieses wie folgt hochskalieren ($I_y \triangleq$ Flächenträgheitsmoment):

$$S_b = E \cdot I_y$$

$$I_y = \frac{bh^3}{12}$$

Wobei $E_{PLA} = 1,879 \text{ GPa}$ und $E_{Stahl} = 210 \text{ GPa}$, $b_{neu} = 2 b_{alt}$ und $h_{neu} = 2 h_{alt}$

$$\frac{S_{b,neu}}{S_{b,alt}} = \frac{E_{Stahl}}{E_{PLA}} \cdot \frac{b_{neu} \cdot h_{neu}^3}{b_{alt} \cdot h_{alt}^3}$$

Das maximal aufnehmbare Biegemoment an den Fingern würde entsprechend circa um Faktor 1.788 höher ausfallen. Falls die Zugbelastung σ_m am Finger kritisch sei, würde diese wie folgt erhöht:

$$\sigma_m = \frac{F_z}{A}$$

Wobei $\sigma_{m,PLA} = 26,8 \text{ MPa}$ und $\sigma_{m,Stahl} = 310 \text{ MPa}$ (konservativ) sowie $A_{neu} = 4 A_{alt}$

$$\frac{F_{z,neu}}{F_{z,alt}} = \frac{\sigma_{m,Stahl}}{\sigma_{m,PLA}} \cdot \frac{A_{neu}}{A_{alt}}$$

Entsprechend kann die Zugfestigkeit beim oben beschriebenen Upscaling circa um Faktor 46 erhöht werden. Es wird daher vermutet, dass ein doppelt vergrößerter und aus Stahl gefertigter SGripper_01 einen realen EAA handhaben kann.

Hauptgehäuse und SGripper_02

Zur quantitativen Evaluierung des SGripper_02 wurde eine Einrichtung gebaut, in der die Hebelkraft des SGripper_02 getestet wird.



Abbildung 85: Testeinrichtung für SGripper_02

Dazu wurde die äußere Schalung mit unterschiedlichen Kräften an die innere Schalung gedrückt und für jeden Versuch jeweils fünfmal aufgespreizt. Die Spreizversuche wurden ausschließlich mit Funktionsteilen aus PLA durchgeführt. Die Ergebnisse des Spreizversuche werden in der folgenden Tabelle qualitativ beschrieben.

Tabelle 8: Übersicht über Ergebnisse des Spreizversuchs in der Testeinrichtung

Anpresskraft	2,4 bar am Zylinder	3,6 bar am Zylinder	4,8 bar am Zylinder	6,0 bar am Zylinder
15 N	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein
30 N	Öffnet sehr schnell, bleibt bei circa 85 ° stehen	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein
45 N	Öffnet moderat schnell, bleibt bei circa 80 ° stehen, Öffnungswirkung ist gegeben	Öffnet moderat schnell, rastet wie vorgesehen ein	Öffnet moderat schnell, rastet wie vorgesehen ein	Öffnet sehr schnell, rastet problemlos wie vorgesehen ein
60 N	Öffnet sehr langsam, nach einigen Sekunden steht der Öffner bei circa 45 °	Öffnet deutlich langsamer, rastet auf einer Seite nach wenigen Sekunden ein, Hebelwirkung knapp gegeben	Öffnet merklich langsamer, rastet auf einer Seite nach ein paar Sekunden ein, Hebelwirkung noch gegeben	Öffnet langsamer, aber rastet nach kurzer Zeit ein wie vorgesehen
75 N	Öffnet nur wenige Grad, keine Öffnungswirkung gegeben	Öffnet sehr langsam bis 70 °, Spitze wird exzentrisch, Werkzeug verschränkt sich	Öffnet ziemlich langsam bis 80 °, wird exzentrisch, Hebelwirkung knapp gegeben	Öffnet langsam bis 80 °, wird exzentrisch, Hebelwirkung gerade so noch gegeben
90 N	/	Federt schnell auf 15 °, keine Hebelwirkung gegeben	Öffnet sehr langsam, Bruch der Spitze bei circa 20 °	Öffnet sehr langsam, Spitze stagniert bei circa 20 °, keine Hebelwirkung

Bei hohen Anpressdrücken (ab 75 N) hat sich gezeigt, dass lediglich eine elastische Verformung am gesamten Werkzeug auftritt, dabei ist keine Hebelwirkung gegeben. Weiterhin ist in einem Versuch die Spitze gebrochen, daher sollte diese aus einem festeren Werkstoff gefertigt werden. Gegebenenfalls kann durch den parallelen Einsatz mehrerer Spreizer die gewünschte Hebelwirkung erzielt werden. Auch kann eine Hochskalierung des Druckluftzylinders zu einer höheren Hebelwirkung führen.

7. Diskussion

Im folgenden Kapitel werden alle erarbeiteten Ergebnisse zunächst themenspezifisch diskutiert. Weiterhin werden die Ergebnisse vor dem Hintergrund der Übertragung dieser in die Praxis gemeinsam diskutiert.

7.1 Industrieumfrage

Zunächst werden die Ergebnisse und wichtigsten Erkenntnisse der Industrieumfrage⁵¹ diskutiert werden. Durch die Bearbeitung der vier aufgestellten Thesen sollte ein Eindruck gewonnen werden, inwiefern die Produkte deutscher Schlüsselindustrien geeignet für die automatisierte Demontage sein können, die jeweiligen Unternehmen recyclinggerechte Konstruktion anwenden oder die Möglichkeiten haben, Produkte ressourceneffizient zu gestalten. Weiterhin sollte herausgefunden werden, wie die Diskrepanz zwischen dem grünen Image von Unternehmen sowie deren tatsächlichen Produkten ist, als auch die Frage geklärt werden, ob automatisierte Demontagesysteme besondere Ansätze der recyclinggerechten Konstruktion bzw. DfR / DfD erfordern.

Es hat sich gezeigt, dass keine klare Aussage getroffen werden kann, wie sehr recyclinggerechte Konstruktion in deutschen Schlüsselindustrien betrieben wird. Dies liegt vor allem daran, dass die Antworten der Fragen, die zur Beantwortung der These gedient haben, keine eindeutigen Schlüsse erlauben. Dennoch zeigt sich für die Zukunft ein eher positiver Trend, Unternehmen möchten recyclinggerechte Konstruktion zukünftig tendenziell häufiger verwenden; recyclinggerechte Konstruktion wird als eher wichtig eingeschätzt. Insbesondere Unternehmen, die weniger stark durch Abhängigkeitsverhältnisse von Zulieferern und Kunden gebunden sind, können freier entscheiden. Neben deutschen Schlüsselindustrien gibt es jedoch gute Beispiele für andere deutsche Industrien, bei denen recyclinggerechte Konstruktion trotz vergleichsweise hohen Abhängigkeitsverhältnissen umgesetzt wurde: Dazu soll die Verpackungsindustrie in Deutschland betrachtet werden – 2020 wurden die Recyclingquoten erstmals outputorientiert berechnet, dabei ergeben sich für Verpackungen aus Pappe und Papier eine Recyclingquote von 84,2 %, für Metalle 83,4 % sowie für Glas 79,7 % [Eurostat, 2023]. Am Beispiel Altpapier kann sogar gezeigt werden, dass bis zu 79 % Sekundärmaterial in die Primärproduktion eingespeist werden [Verband

⁵¹ Für die Umfrage konnten 167 Teilnehmende gewonnen werden, von denen 79 die Umfrage vollständig bearbeitet haben. Somit konnten alle Fragen ausgewertet werden, bei der Betrachtung von Korrelationen, Gemeinsamkeiten und Schnittmengen hat sich die Anzahl der passenden Teilnehmenden so weit reduziert, dass die hier gewonnen Erkenntnisse eine eingeschränkte Aussagekraft auf die Grundgesamtheit der Teilnehmenden zulassen. Aufgrund der Größe der deutschen Schlüsselindustrien im Vergleich zur Anzahl der Teilnehmenden der Industrieumfrage sind die erarbeiteten Aussagen nicht repräsentativ für die Gesamtheit deutscher Schlüsselindustrien, sollen aber als Tendenzen dieser verstanden werden.

Deutscher Papierfabriken, 2021]. Insbesondere im Verpackungsbereich gibt es viele kurzlebige Produkte, es fallen offensichtliche Abfallströme an – entsprechende Effizienzsteigerungen können durch recyclinggerecht konstruierte Produkte erzielt werden. Es stellt sich die Frage, ob der enge gesetzliche Rahmen durch KrWG und Verpackungsgesetz dafür sorgt, dass so hohe Recyclingquoten erzielt werden können, oder ob allein die technoökonomische Machbarkeit als Treiber agiert. Stellt der gesetzliche Rahmen den wesentlichen Treiber dar, könnte dieser auch auf die Produkte deutscher Schlüsselindustrien angewendet werden.

Weiterhin sind Unternehmen, die den Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion eher niedrig einschätzen, stärker davon überzeugt, dass diese Auswirkungen auf langfristige ökonomische Ziele haben kann. Einige Unternehmen sind sogar trotz höherem Aufwand für recyclinggerechte Konstruktion gewillt, in Zukunft stärker auf diese zu setzen. Andererseits sehen die Unternehmen, die ihre Produkte bereits aufbereiten, eher keinen Einfluss von recyclinggerechter Konstruktion auf langfristige ökonomische Ziele. Diese Unternehmen haben ihre Aufbereitungsprozesse schon so weit optimiert, dass langfristige ökonomische Ziele nicht weiter beeinflusst werden.

Zudem hat sich gezeigt, dass die befragten Unternehmen durchaus in der Lage sind, ihre Produkte ressourceneffizienter zu gestalten; dabei stellen sich vor allem technische Herausforderungen als größtes Hindernis heraus. Es entsteht die Frage, ob automatisierte Demontage eine Möglichkeit sein kann, technischen Herausforderungen zu begegnen. In der Literatur gibt es bereits umfassende Werke zum Design ressourceneffizienter Produkte [Zussman et al., 1994; Beitz, 1996; Seliger, 2019], die VDI-Norm 2243 [VDI, 2002] sowie bereits abgeschlossene Forschungsprojekte [Basdere, 2001; Europäische Kommission, 2023; Bast et al., 2014], auch in Kombination mit automatisierter Demontage [Zeller et al., 2021], um einige Beispiele zu nennen. Daher ist es aus akademischer Sicht heraus unwahrscheinlich, dass Unternehmen nicht das benötigte Wissen bzw. die nötigen Werkzeuge haben, Ihre Produkte entsprechend zu designen. Weitere Herausforderungen, neben den technischen Aspekten, können insbesondere zu geringe Stückzahlen der Produkte sein, zu starke Abhängigkeitsverhältnisse sowie Kostenaspekte; insbesondere an den Kostenaspekten können mögliche Lösungsansätze anknüpfen. Es stellt sich weiterhin heraus, dass die Unternehmen, die recyclinggerechter Konstruktion einen hohen Einfluss auf langfristige ökonomische Ziele unterstellen, konsequent die Herausforderungen kennen.

Ob es eine Diskrepanz zwischen dem grünen Image von Unternehmen und deren tatsächlichen Produkten hinsichtlich Recycling / Wiederverwendung gibt, kann ohne Zuhilfenahme externen Studien über die Produkte nicht abschließend bewertet werden. Die Problematik wird ebenfalls in einer Studie der Europäischen Kommission beleuchtet, nach der

über die Hälfte der Umweltaussagen in der EU als vage, irreführend oder unfundiert eingestuft werden [Europäische Kommission, 2022]. Werden allein die Antworten der Teilnehmenden betrachtet, scheint es eher keine Diskrepanz zu geben. Gilt leichtere Demontierbarkeit als ein Teilaspekt der recyclinggerechten Konstruktion, kann ein Zusammenhang zwischen Kosten und ökologischem Bewusstsein hergestellt werden: Die Unternehmen, die vor allem Kostengründe als Herausforderung für ressourceneffizientere Produkte angeben, weisen ein tendenziell geringeres ökologisches Bewusstsein auf. Es stellt sich die Frage, mit welchen Kosten (oder Erträgen) ein erhöhtes ökologisches Bewusstsein in Unternehmen verbunden ist. Innovative Geschäftsmodelle könnten dazu dienen, ökologisches Bewusstsein im Unternehmen zu unterstützen und gleichzeitig wettbewerbsfähig zu bleiben [Trapp und Kanbach, 2021].

Außerdem zeigt sich, dass automatisierte Demontagesysteme tendenziell eher besondere recyclinggerechte Konstruktion oder DfR- / DfD-Ansätze erfordern. Dabei weisen einige für die Bearbeitung der These relevante Fragen eher bimodale Antwortverteilungen auf – einige Unternehmen setzen besonders auf Automatisierung, andere lehnen diese vollständig ab. Die erhobenen Daten decken sich weitestgehend mit einer PwC-Studie zu Robotern im deutschen Maschinenbau, nach der 53 % der in Deutschland im Maschinenbau tätigen Unternehmen Robotertechnologien einsetzen. Insbesondere Unternehmen der Automobilindustrie (sowohl in Deutschland als auch in internationalen Industrienationen wie Japan oder den USA) setzen insbesondere auf Roboter, daher ist die Nutzung von automatisierter Demontage auf EAA naheliegend [Schmidt et al., 2016]. In der gängigen Literatur zum Thema Automatisierung (im Anlagenbau) ist die Meinung hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung ebenso recht eindeutig: Manuelle repetitive Tätigkeiten werden in naher Zukunft durch Roboter ersetzt, manuelle kreative Tätigkeiten durch künstliche Intelligenzen [Kehayov et al., 2022; Javaid et al., 2022; Uhlmann et al., 2022; Duggal et al., 2021]. Wieder zeigt sich, dass insbesondere die Anlagenbauer mit ihren besonders langlebigen und komplexen Produkten mit geringen Stückzahlen die automatisierte Demontage dennoch tendenziell kritisch sehen. Insgesamt sind jeweils automatisierte Demontage und recyclinggerechte Konstruktion im Teilnehmendenfeld eher mit vielen Herausforderungen verbunden, die jedoch als bekannt eingestuft werden. Soll nun recyclinggerechte Konstruktion bzw. konkreter DfR- / DfD mit automatisierter Demontage verbunden werden, werden die zu bearbeitenden Herausforderungen noch komplexer. Dabei wird vermutet, dass je geringer der Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion ist, desto höher ist die Realisierbarkeit der Wiederverwendung von Produkten. Entsprechend sind die Kosten von beson-

derer Relevanz. Ebenso zeigt die VDI-Norm 2243, dass sich die sogenannte Kreislaufeignung bzw. wirtschaftliche Wiederverwendbarkeit erhöht, wenn die Recyclingkosten⁵² niedrig sind [VDI, 2002].

Weiterhin hat sich gezeigt, dass Produkte, die mittels automatisierter Demontage für eine Wiederverwendung oder Weiterverwendung vorbereitet werden, insbesondere hinsichtlich Betriebssicherheit und Lebensdauer nicht beeinträchtigt werden dürfen. Im Vergleich weniger relevant bei dieser Betrachtung scheinen optische Mängel zu sein. Die in einem vom Umweltbundesamt (UBA) herausgegebenen Papier beschriebenen Kriterien zur Vorbereitung zur Wiederverwendung von Produkten decken sich weitestgehend mit denen der Industrieumfrage, wenn auch sich das UBA eher auf Business-to-Consumer (B2C) Produkte bezieht⁵³. Allein die Vermeidung optische Mängel scheint im Vergleich bei B2C Produkten eher wichtiger zu sein. Laut UBA sollen Altprodukte möglichst rechtzeitig aus dem Abfallstrom herausgetrennt werden, sodass prozessbedingte Beschädigungen jeder Art und in der Folge lagerbedingte Beschädigungen reduziert werden können. Auch bei der Betrachtung der Lebensdauer von Produkten sind sich UBA sowie die Teilnehmenden der Umfrage einig, laut UBA sollte die Lebensdauer von Produkten möglichst verlängert werden, nach den Unternehmen sollte die Lebensdauer nicht verkürzt werden. Der Herausforderung, dass besonders alte Produkte nicht mehr nachgefragt werden würden (laut Industrieumfrage) möchte das UBA durch Maßnahmen zur Nachfrageerhöhung begegnen [Krause et al., 2020].

7.2 Demontagealgorithmus

Im folgenden Kapitel sollen die Erkenntnisse diskutiert werden, die bei der Erarbeitung des Algorithmus zur Demontagetiefe gewonnen wurden, sowie Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Demontagetiefen.

Dass eine vollständige Demontage nicht zwangsläufig ein ökonomisches Optimum darstellt, ist hinlänglich bekannt. Autoverwerter bauen seit jeher nur die wertvollsten Bauteile aus Fahrzeugen aus, die Reste werden in der Regel einer stofflichen Verwertung zugeführt. Um nun eine optimale Demontagetiefe für automatisierte Demontageprozesse zu finden, wurde ein Demontagealgorithmus auf das vorliegende EAA angewendet.

⁵² In der VDI-Norm 2243 umfassen die Recyclingkosten für ein Altteil die Kosten für Demontage, Aufarbeitung und Logistik

⁵³ Im Vergleich zur Industrieumfrage, bei der davon ausgegangen wird, dass die befragten Unternehmen eher Business-to-Business (B2B) Produkte anbieten

Wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben, gibt es in der Literatur neben dem gewählten Ansatz der Verwendung des FFA auf ein modifiziertes UPP weitere Algorithmen, die zur Optimierung von Demontagetiefen angewendet werden können. Diese unterscheiden sich in Komplexitätsklassen und damit verbunden unterschiedlichen Laufzeiten sowie der Ergebnisqualität. Algorithmen wie beispielsweise der Push-Relabel-Algorithmus nach Goldberg und Tarjan [1988] weisen teilweise schnelle Laufzeiten auf, jedoch dauert die Berechnung einer optimalen Demontagetiefe bei der Bauteilstruktur des vorliegenden EAA nur Sekundenbruchteile, weswegen die Laufzeit im vorliegenden Fall als eher unkritisch bewertet wird. Andere Algorithmen wie der genetische Algorithmus, den Baazouzi et al. [2021] verwendet haben, können globale Optima finden, ohne dass dies jedoch garantiert wird [Mishra et al., 2017; Schröter, 2020]. Durch die Verwendung des FFA wird bei der vorliegenden Herausforderung immer ein globales Optimum gefunden⁵⁴, während die Laufzeit unkritisch ist [Ford und Fulkerson, 1956].

Zunächst wurde der Demontagealgorithmus auf ein Basisszenario angewendet, wobei unter anderem der Wert des EAA, unterschiedliche Zustands- und Re-X Faktoren, investitionsbezogene Werte sowie realitätsnahe Demontagedauern betrachtet wurden. Nach den Ergebnissen des Basisszenarios sollte gut die Hälfte des EAA demontiert werden, wobei ein Demontagewinn von knapp 60 € pro EAA realisiert werden kann. Auffällig ist, dass der US nach unten gerichtet gerade die besonders werthaltigen Bauteile einschließt. Abhängig davon, ob aus ökologischen Gründen eine möglichst hohe Demontagequote erzielt werden soll, sodass die demontierten Bauteile sortenrein den jeweiligen Stoffströmen für einem stofflichen Recycling zugeführt werden können, sollten die besonders werthaltigen Bauteile eher „tief“ in der Baugruppe angeordnet werden. Aus ökonomischer Sicht sollte der Pfad zu den werthaltigen Bauteilen hingegen eher kurz sein, entsprechend sollten diese Bauteile eher „hoch“ im Demontagegraph angeordnet bzw. leicht zugänglich sein – es lässt sich also ein Zielkonflikt zwischen ökonomischer und ökologischer Demontage vermuten. Wird die Produktarchitektur eher „breit“ gefasst, werden also unterschiedliche Bauteile nebeneinander angeordnet, können sowohl ökologische als auch ökonomische Bestreben bedient werden. Bei dieser Betrachtung der Produktarchitektur wird lediglich die (physische) Produktstruktur betrachtet, die Betrachtung der Funktionsstruktur ist ebenfalls ein wesentlicher Bestandteil im Produktentwicklungsprozess und sollte ebenso berücksichtigt werden [Feldhusen et al., 2013; Inkermann et al., 2019].

⁵⁴ Unter Berücksichtigung von Mandatory-Bauteilen, die auch zu nicht-optimalen Lösungen führen können

Weiterhin bestätigt sich die Vermutung, dass Gehäuseteile, die als Trägerplattform für viele andere Bauteile dienen und entsprechend erst sehr spät im Demontageprozess berücksichtigt werden können, trotz eines vergleichsweise hohen Bauteilwerts tendenziell weniger häufig demontiert werden. Wird die Produktarchitektur wie beschrieben „breiter“ gefasst, wird sich die Problematik tendenziell verstärken, da noch mehr Bauteile auf diesen Trägerplattformen befestigt werden würden (siehe Kapitel 6.2.3.).

Ferner wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, dabei wurden der EAA-Wert, Demontagezeiten, Zustandsfaktoren, Investitionshöhe des Demontagemoduls sowie Re-X Faktoren variiert. Dabei zeigt sich zunächst, dass der EAA-Wert bis zu einem Wert von gut 500 € sinken kann, bevor die Demontagequote erheblich sinkt. Der Demontagegewinn nimmt dabei quasi-linear ab. Es entsteht die Vermutung, dass je kleiner und weniger werthaltig ein EAA ist, desto geringer ist die Eignung für die automatisierte Demontage. Davon sind vor allem EAA aus Mild- und Plug-In-Hybridfahrzeugen betroffen. Bei dieser Betrachtung muss, wie in der Industrieumfrage schon hervorgegangen, jedoch die Menge der zu demontierenden Produkte, in diesem Fall EAA, betrachtet werden: Durch Skaleneffekte könnten die Kosten der automatisierten Demontage so weit reduziert werden, dass perspektivisch auch kleinere und weniger werthaltige EAA wirtschaftlich demontiert werden können. Insbesondere wenn Hersteller auf modulare Fahrzeugkonzepte setzen (Beispiel: Volkswagen AG mit dem markenübergreifenden *Modularen Querbaukasten* (MQB) und dem auf Elektrofahrzeuge adaptierten *Modularen E-Antriebsbaukasten* (MEB) sowie der weiterentwickelten *Scalable Systems Platform* (SSP)) können entsprechend hohe Stückzahlen von baugleichen EAA erzielt werden [Volkswagen, 2022].

Ein besonders relevanter Faktor für ökonomisch tragfähige Demontage ist die Demontagezeit [Hu et al.; 2002]. Dabei weisen unterschiedlich schwierige Demontageprozesse entsprechend unterschiedliche Demontagezeiten auf. Bei der Variation der Demontagezeit zeigt sich, dass ab einer Reduktion der Demontagezeit um 60 % die Demontagequote erheblich auf 94 % steigt. Der Demontagegewinn steigt mit einer Reduktion der Demontagezeit und sinkt mit einer Erhöhung dieser. Einen direkten Einfluss auf die Demontagezeit haben die Rüstzeiten der Roboter, sowie die Art der verwendeten Werkzeuge und die Demontageschwierigkeit der zu demontierenden Bauteile. Vor dem Hintergrund so komplexer Produkte ist es daher von besonderer Bedeutung, Werkzeuge so generisch wie möglich auszulegen, sodass tendenziell weniger Werkzeuge gebraucht werden und damit die Anzahl der benötigten Werkzeugwechsel verringert werden kann [Griemert, 2017]. Die Anzahl an Werkzeugwechseln kann ebenfalls durch die Einbindung mehrerer Roboter verringert werden, was allerdings u.a. in einer höheren initialen Investition, höheren Energiekosten und einem höheren Platzbedarf resultiert. Wesentliche Verkürzungen der Demontage-

zeit können auch, durch mehrere Roboter ermöglicht, mit parallel durchgeführten Tätigkeiten erzielt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Programmierung der Demontageprozesse durch die zusätzlich zu beachtenden Wechselwirkungen zwischen den Robotern hinsichtlich Kollaboration und Sicherheit deutlich erschwert wird [Regele und Levi, 2005].

Weiterhin wurden die Zustandsfaktoren im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variiert. Verringern sich die Zustandsfaktoren um 40 %, sinkt die Demontagequote von 56 % auf 23 %. Sinken die Zustandsfaktoren noch weiter, kann der Demontagegewinn aufgrund der Mandatory-Bauteile sogar negativ werden. Eine besondere Herausforderung ist es, den tatsächlichen Zustand eines Produktes zu bestimmen, insbesondere wenn zusätzlich Rückschlüsse auf die Zustände der Einzelbauteile gezogen werden sollen [Huber, 2001]. Entsprechend wurden die Zustandsfaktoren in der Sensitivitätsanalyse eher konservativ eingeschätzt.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Demontagetiefe ist der Wert des Demontagemoduls und die damit verbundenen Investitionskosten. Prinzipiell gilt, dass die Investitionskosten mit der Höhe des Automatisierungsgrads ansteigen. Die Investitionen eines vollständig automatisierten Demontagemoduls umfassen daher die Kosten für (mehrere) Roboter, Kamera- und Sensortechnik sowie umfassendere Steuerungscomputer sowie Software. Im Basisszenario wurden Investitionskosten von 900.000 € angenommen; entsprechend kostet eine Technikurstunde circa 70,07 €, Demontagequote und Demontagegewinn bleiben wie o.g. konstant bei 56 % respektive knapp 60 €. Zum Vergleich: Eine Roboterstunde wird in der Literatur zwischen 3,00 – 5,50 € (bzw. 6,00 \$) taxiert [Thier, 2016; Schmidt, 2016; Subauftrag, 2023; Börse Online, 2019]. Die im Basisszenario beschriebene Technikurstunde umfasst vier Roboter und zwei Positionierer sowie die gesamte Peripherie, während lediglich ein Zweischichtbetrieb angenommen und eine Nutzungsdauer nach AfA industrieeüblich mit sechs Jahren zugrunde gelegt wird – und ist damit als realitätsnah einzuschätzen. Es zeigt sich, dass das Demontagetechnikum zwischen 600.000 € und 1,3 Mio. € kosten dürfte, ohne dass sich die Demontagequote ändert. Entsprechend ist der unmittelbare Einfluss der Investitionskosten auf die Demontagetiefe laut Demontagealgorithmus als eher gering zu bewerten. Hinsichtlich der Industrieumfrage, nach der Kosten durchaus als eine der größeren Herausforderungen beschrieben werden, stellt sich die Frage, welchen Einfluss Kosten tatsächlich haben. Da im Demontagealgorithmus ausschließlich monetäre Werte⁵⁵ in die Optimierung einfließen und alle in der Sensitivitätsanalyse variierten Werte ebendiese beeinflussen, und zugleich die anderen Variationen einen teils starken Einfluss auf die Demontagequote und den Demontagegewinn haben, spie-

⁵⁵ Mit Ausnahme weniger Mandatory-Bauteile, die vor der eigentlichen Optimierung in den US aufgenommen werden

len Kosten auch im Demontagealgorithmus eine entsprechende Rolle. Lediglich die Investitionskosten für das Demontagemodul scheinen einen im Vergleich etwas geringeren Einfluss zu haben.

Zuletzt wurde im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der Re-X Faktor verändert. Dabei zeigt sich, dass der Re-X Faktor um 30 % gesenkt und bis zu 70 % erhöht werden kann, ohne dass sich die Demontagequote verändert. Im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren steigt der Demontagegewinn mit steigendem Re-X Faktor eher stark an. Es lässt sich schließen, dass die Modifikation von werthaltigen Bauteilgruppen, sodass eine bessere Recyclingstrategie gewählt werden kann, kaum Einfluss auf die Demontagetiefe nimmt, jedoch entscheidend zu einer Erhöhung des Demontagegewinns beitragen kann. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Erkenntnissen von Soh et al. [2015], nach denen Design-for-Disassembly Methoden im Wesentlichen nur auf Komponenten angewendet werden sollen, die auf einem Demontepfad liegen. Entsprechend ist es, wie in Kapitel 5.3.6 beschrieben, sinnvoll, den Fokus auf besonders werthaltige Komponenten mit einem Wertanteil $\geq 1\%$, zu legen, da diese zudem häufiger demontiert werden.

Neben den spezifischen Erkenntnissen aus der Sensitivitätsanalyse sind auch generelle Erkenntnisse abgeleitet worden: Bei allen unterschiedlichen betrachteten Szenarien weist vor allem die Demontagequote immer wieder dieselben Werte auf, graphisch abgetragen entsteht immer wieder ein gestufter Verlauf. Dieses Phänomen ist auf sogenannte *Leuchtturmbauteilgruppen* zurückzuführen – die Demontage schließt immer wieder besonders werthaltige Bauteile ein und stoppt nach diesen recht häufig. Leuchtturmbauteilgruppen sind vor allem *Stator + inneres Gehäuse*, *SiC-Modul*, *Gehäusedeckel Leistungselektronik*, *Zahnrad 24/67 Zähne*, *Hauptgehäuse* sowie unter Umständen Mandatory-Bauteile, wenn diese nicht ohnehin im US liegen. In der Folge sind die Bauteile, die direkt an die im US befindlichen Bauteile grenzen, Bottlenecks für eine höhere Demontagequote. Ist das Ziel, die Demontagequote zu erhöhen, sollten zunächst die Bottlenecks eliminiert werden, indem diese Bauteile durch geeignete DfR- / DfD-Maßnahmen optimiert werden. Die Elimination der Bottlenecks steht im Widerspruch zu der von Soh et al. [2015] genannten Aussage, nach der auf dem Demontepfad liegende Bauteile eher optimiert werden sollen. Der Widerspruch ist durch die unterschiedlichen Zielstellungen zu begründen – ökonomisch nach Soh et al. [2015] und ökologisch nach den Erkenntnissen aus dem Demontagealgorithmus. Erneut zeigt sich, dass ökonomische und ökologische Absichten in einem Zielkonflikt stehen können.

Bei der Nutzung des Demontagealgorithmus haben sich allgemeingültige leichte Schwächen des Modells gezeigt. So korreliert strukturbedingt die Demontagequote nicht zwangs-

läufig mit dem Demontagegewinn, wenn unterschiedliche Faktoren variiert werden – teilweise haben sich für geringere Demontagequoten höhere Demontagegewinne gezeigt, wenn unterschiedliche Szenarien miteinander verglichen werden.

Eine weitere Schwäche offenbart sich bei der Variation des Zustandsfaktors für negative Bauteilgruppenwerte insbesondere im Bereich sehr geringer Demontagequoten: Durch das umgekehrte Vorzeichen dieser werden bei einer Verringerung des Zustandsfaktors auch deren negativer Einfluss auf den Demontagegewinn geringer, was dem ursprünglichen Zweck des Zustandsfaktors widerspricht. Der gleiche Effekt gilt ebenso für den Re-X-Faktor, dieser wurde jedoch im vorliegenden Fall für die beiden Bauteilgruppen *Getriebeöl* und *Kühlmittel* nicht variiert – sinkt der Re-X-Faktor, steigt die Re-X-Eignung der negativen Bauteile.

Eine weitere leichte Schwäche zeigt sich beim Einbinden von Mandatory-Bauteilgruppen: Der Demontagealgorithmus ist so ausgelegt, dass negative Demontagegewinne vermieden werden, indem nicht demontiert wird (0 % Demontagequote). Mandatory-Bauteilgruppen können die ökonomische Optimierung jedoch aushebeln, da diese vor dem eigentlichen Start des Algorithmus mitsamt der Summe ihrer Vorgänger im US aufgenommen werden. Startet der Algorithmus in der Folge mit einem negativen Gewinn und kann diesen durch weitere Demontageschritte nicht verringern, bricht dieser direkt ab – es resultieren negative Demontagegewinne. Das Ergebnis ist an dieser Stelle gültig, muss aber vor dem Hintergrund der Einbindung von Mandatory-Bauteilgruppen korrekt interpretiert werden – negative Gewinne sind nur durch Mandatory-Bauteilgruppen möglich und können somit das Gesamtbild verzerren.

Weiterhin fällt auf, dass die Demontagequote häufig bei 99 % stagniert. Dies ist ebenfalls auf die Struktur des Demontagegraphen zurückzuführen – die Bauteilgruppe *O-Ring am Stator* folgt direkt auf die Bauteilgruppe *Stator + inneres Gehäuse* (Leuchtturmbauteilgruppen), wobei *O-Ring am Stator* in der Regel einen negativen Wert aufweist. Da der Demontagegraph hinter dieser Bauteilgruppe endet und daher in der Folge keine positiven Werte in den Demontepfad aufgenommen werden können, bricht der Demontagealgorithmus vorher ab. Zwei Lösungsansätze können verfolgt werden: Der Dummy-Knoten *ENDE* könnte mit einem positiven Wert versehen werden, der als Demontageprämie für vollständige Demontage interpretiert werden könnte. Somit würden allerdings alle Ergebnisse verzerrt werden, falls diese Prämie nicht real ausgezahlt werden würde. Alternativ kann die Struktur des Demontagegraphen so verändert werden, dass bei der Demontage von Subbauteilgruppen die geringwertigen Bauteilgruppen höher im Demontagegraph angeordnet würden. An dieser Stelle zeigt sich eine Schwäche der Darstellung des Demontagegraphen – werden zwei oder mehrere Bauteilgruppen gleichzeitig demontiert, ist nicht

klar, welche Subbauteilgruppe zuerst demontiert wird – die Darstellung im Demontagegraph ist willkürlich. Durch die o.g. Regel kann das Problem behoben werden, jedoch würde die Demontagequote künstlich erhöht und der Demontagegewinn verringert werden. Eine große Herausforderung ist zudem das Schaffen einer belastbaren Datenbasis. Für die vorliegende Sensitivitätsanalyse wurden möglichst realitätsnahe, literaturgestützte Datensätze hinsichtlich der Werte von EAA angenommen. Nichtsdestotrotz gibt es große Werteschwankungen zwischen unterschiedlichen EAA die, angefangen in Mild-Hybrid-Fahrzeugen bis hin zu Elektrofahrzeugen der Premiumklasse, verwendet werden. Zusätzlich sollte berücksichtigt werden, dass momentan (in den ersten Jahren der Elektromobilität) die Entwicklungskosten der neuen Fahrzeuggenerationen vergleichsweise hoch sind und diese auf zunächst vergleichsweise geringe Stückzahlen an EAA aufgeschlagen werden. Der eigentliche Wert der EAA ist vermutlich geringer und wird in Zukunft durch Skaleneffekte tendenziell sinken. Hinzu kommt, dass am Markt viele unterschiedliche Arten von elektrischen Maschinen (ASM, PSM, RM, ...) in EAA verbaut werden, deren Werte am EoL stark differieren und von Zustand und Re-X Optionen abhängen: Bei PSM rührt der Wert im Wesentlichen durch die verbauten Materialien (seltene Erden wie Neodym im Rotor) her, bei ASM entsteht der Wert hingegen wesentlich durch die hohen Produktionskosten [Stanek et al., 2021]. Wird stofflich recycelt, sind PSM daher vermutlich werthaltiger als ASM. Da die jeweiligen Re-X- und Zustandsfaktoren stark variieren können, wurden diese geschätzt und in der Folge variiert, sodass die dadurch im System entstehenden Unsicherheiten möglichst reduziert werden.

Für eine spätere Anwendung wird vermutet, dass Unternehmen die Werte der im EAA verbauten Bauteile tagesaktuell kennen und aufgrund größerer Erfahrung hinsichtlich der Qualität der EoL-EAA auch Zustandsfaktoren besser schätzen können.

7.3 Design-for-Recycling / Design-for-Disassembly

Nach den Erkenntnissen aus der Sensitivitätsanalyse, der Anwendung des Demontagealgorithmus sowie der Industrieumfrage wurden Design-for-Recycling-Ansätze erarbeitet. Zunächst werden die Herangehensweise und die dabei gewonnen Erkenntnisse diskutiert. Weiterhin werden die daraufhin modifizierten Dummy-Bauteile sowie die entsprechend konstruierten Demontagewerkzeuge in den Kontext der automatisierten Demontage gesetzt. Zudem werden die Ergebnisse computergestützter Simulationen und quantitativer Analysen der Bauteile und Werkzeuge sowie die gebaute Testbench diskutiert.

Zunächst zeigt die Literaturrecherche, dass Gestaltungsgrundregeln schon vor der Jahrtausendwende geschaffen wurden [Zussman et al., 1994; Beitz, 1996] und die Analyse von Bauteilverbindung auch hinsichtlich ihrer Demontierbarkeit bereits untersucht wurde [VDI, 2002]. Auch wurde teilautomatisierte Demontage schon früh am Beispiel von

Waschmaschinen im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereichs 281: *Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen* erprobt [Sehlinger, 2007; DFG, 2023]. Im Gegensatz dazu wurden die in der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Ansätze zum DfR / DfD vor dem Hintergrund der Vollautomatisierung entwickelt und beziehen sich auf EAA aus modernen Elektrofahrzeugen.

Zur Identifikation verbesserungswürdiger Bauteile wurden die Gestaltungsgrundregeln der VDI-Richtlinie 2243 [VDI, 2002] zunächst vor dem Hintergrund der automatisierten Demontage gewichtet und bewertet. Dabei zeigt sich, dass das zugrundeliegende EAA mit 2,48 (von maximal erreichbaren 5) Punkten von Experten der automatisierten Demontage am CUTEC Forschungszentrum bewertet wird. Hinsichtlich *Demontage und Verbindungstechnik* wurde das EAA mit 2,62 leicht überdurchschnittlich bewertet. In der Kategorie *Baustruktur* wurde hingegen eine Bewertung von 2,24 erzielt.

Um eine möglichst praxisnahe Einschätzung verbesserungswürdiger Bauteile zu treffen, wurden empirisch ermittelte Fehler vom Hersteller analysiert. Die aufgetretenen Fehler wurden dazu geclustert und jeweils nach End-of-Line-Fehlern und Feldfehlern sowie Ursachen und Symptomen unterschieden. Am End-of-Line stellen *mechanische Defekte* eine wesentliche Fehlerursache dar. Diese *mechanischen Defekte* sind hauptsächlich auf abgebrochene Bauteile zurückzuführen, dabei lässt sich jedoch keine klare, verbesserungswürdige Bauteilgruppe ableiten. Die am End-of-Line festgestellten Defekte wurden wesentlich durch Geräusche und Fehlermeldungen hinsichtlich Funktionsstörungen in der Parksperre identifiziert.

Die im Feld am häufigsten identifizierbare Fehlerursache sind falsch eingebaute Teile sowie elektrische Defekte. Diese äußern sich symptomatisch wesentlich durch Funktionsstörungen der Leistungselektronik als auch Undichtigkeiten. Aus demontageseitiger Sicht scheint es zielführend zu sein, insbesondere im Hinblick auf die vergleichsweise schwächer bewertete Baustruktur, die Zugänglichkeit zu Dichtungen zu erleichtern. Gleichzeitig sollte nach erfolgter Demontage von der Wiederverwendung von Dichtungen abgesehen und diese eher einer (stofflichen) Verwertung zugeführt werden. Aufgrund der relativ hohen Anzahl an Funktionsstörungen in der Leistungselektronik scheint es sinnvoll zu sein, diese möglichst einfach vom Rest des EAA trennbar zu gestalten. Dies schlägt sich ebenfalls in der Baustruktur wieder und wurde ebenfalls bei den manuellen Demontageversuchen ermittelt. Bei den manuellen Demontageversuchen hat sich gezeigt, dass vor der Demontage der Leistungselektronik zunächst die Betriebsmittel, ein Gehäusedeckel, mehrere Kabel und eine entsprechende Anzahl an Schrauben demontiert werden müssen (siehe Kapitel 6.2.2). Alternativ könnte eine kleine Zugangsklappe vorgesehen werden, die Zugang zur Verschraubung der Leistungselektronik mit den Kupferstromschienen ermöglicht, sodass alle, teilweise sehr aufwendig zu demontierende, oben genannte Bauteile nicht länger

vorher demontiert werden müssen. Wenn diese Zugangsklappe mit Aluminiumschrauben fixiert würde, kann sogar, wenn nötig, ein stoffliches Recycling des Gehäusedeckels ohne zusätzliche Demontageschritte erfolgen. Eine andere Möglichkeit ist die elektrische Kontaktierung von Leistungselektronik und elektrischer Maschine durch eine leicht trennbare Steckverbindung. Auch könnten der Rotor und das auf die Welle aufgefäste Zahnrad in zwei Teile aufgetrennt werden und mittels einer Vielzahn-Steckverbindung miteinander verbunden werden. So ließe sich der Rotor demontieren, ohne das Getriebe öffnen zu müssen. Dabei ist eine Kosten-Nutzen Analyse wichtig, inwiefern die Mehrkosten für solche Steckverbindungen eine erhöhte modulare Bauweise des EAA rechtfertigen können.

Bei der Durchführung der manuellen Demontageversuche hat sich weiterhin gezeigt, dass die Demontage immer wieder durch schwer zugängliche Schrauben erschwert wurde. Diese stellen insbesondere für den robotergeführte Demontageschrauber eine Herausforderung dar, da durch die benötigten Verlängerungen die ohnehin bereits hohen Anforderungen an die präzise Führung und geringes Ausschwingverhalten während des Schraubens noch deutlich ansteigen. Außerdem werden viele unterschiedliche Schraubenköpfe verwendet, was eine deutlich höhere Anzahl an Werkzeugwechseln im Demontageprozess und eine entsprechende Anzahl an Bitnüssen erfordert. Als Beispiel für eine Verbesserung der Demontierbarkeit soll die Vereinheitlichung der vorkommenden T25 und T27 Schraubenköpfe vorgeschlagen werden, wobei der Schraubkopfdurchmesser lediglich um rund einen halben Millimeter erhöht werden müsste, während das Gewinde unverändert bleiben könnte [Wuppertools, 2006].

Bei der manuellen Demontage der Gehäusedeckel sind zwei wesentliche Herausforderungen aufgetreten, zum einen das Entfernen und Auftrennen der stark klebenden Flüssigdichtung und zum anderen die mangelnde Verfügbarkeit von Konterpunkten, um die Gehäusedeckel abzustemmen, ohne diese zu beschädigen. Manuell konnte der Gehäusedeckel nicht zerstörungsfrei demontiert werden. Daher wird vorgeschlagen und im Rahmen der Bauteilmodifikationen versucht, die Flüssigdichtung durch eine Einlegedichtung zu ersetzen und entsprechende Konterpunkte an den Gehäuseteilen vorzusehen und mit einem korrespondierenden Werkzeug zu demontieren.

Eine weitere besondere Herausforderung in der automatisierten Demontage ist die Demontage von Sicherungsringen, die aufgrund hoher erforderlicher Präzision bei gleichzeitig hohem Krafteintrag in sehr begrenzten Bauräumen unter Verwendung von RobotVision automatisiert demontiert werden müssten. Die Problematik ist in der Literatur ebenfalls bekannt [Jungbluth et al., 2016]. Es wird vermutet, dass, wenn Sicherungsringe automatisiert demontiert werden könnten, die Standzeit der hochspezialisierten Werkzeuge als eher gering einzuschätzen ist, da diese filigran konstruiert werden müssen, jedoch den hohen

Spannkräften einiger Sicherungsringe standhalten sollten. Für eine automatisierte Demontage von Sicherungsringen empfiehlt es sich insgesamt, diese mit hinreichend großen (De-)Montageösen zu versehen und die Verwendung in sehr begrenzt zugänglichen Volumina eher zu vermeiden.

Im vorliegenden EAA werden eine Reihe unterschiedlicher Wälzlager verwendet, wobei einige auf Wellen aufgespresst sind. Diese lassen sich manuell mit speziellen Abziehwerkzeugen lösen und können potenziell auch automatisiert demontiert werden. Es wurde auf in Gehäuseteile eingepresste Lager verzichtet, was sowohl für die manuelle als auch die automatisierte Demontage vorteilhaft ist. Die Lagerschalen einiger Schrägrollenlagern verbleiben bei der Demontage zunächst lose in den Gehäuseteilen, diese können mit magnetischen Werkzeugen aus den Gehäusen gezogen werden. Der vorliegende Einbau der Lager(schalen) ist insgesamt für die automatisierte Demontage als geeignet einzustufen.

Zuletzt finden sich zur elektrischen Kontaktierung kleine Stecker im vorliegenden EAA. Diese stellen für die manuelle Demontage keine besondere Herausforderung dar, sind jedoch robotergestützt schwierig zu demontieren. Benötigt würden komplexe Werkzeuge, die auf kleinem Bauraum mehrere Bewegungen nacheinander mit definierten Kräften am Stecker durchführen müssten, um die Verriegelungsmechanismen zu lösen. Alternativ könnten Stecker genutzt werden, die kraftschlüssig verbunden sind.

Wie sich in der Expertenbefragung am CUTEC Forschungszentrum gezeigt hat, ist die Baustruktur des vorliegenden Aggregats als leicht unterdurchschnittlich zu bewerten. Daher wurde die Baustruktur zusätzlich quantitativ untersucht. Dabei zeigt sich vor allem, dass das initiale Handling des EAA besonders wichtig ist, da dieser Schritt unabhängig von der aggregatsspezifischen Demontagetiefe durchgeführt wird und zudem die initiale Handlingschnittstelle bei vielen im Demontageprozess vorkommenden Handlungsschritten genutzt wird. Dementsprechend wurde für die prototypischen Bauteilmodifikationen eine Handlingschnittstelle designt, analysiert und erprobt. Weiterhin zeigt sich anhand der Analyse der Baustruktur, dass Schraubverbindungen häufig die Demontage vieler weiterer Bauteile blockieren. Daher wurden das automatisierte Lösen von Schraubverbindungen mittels Demontageschrauber und alternativ mittels Vierteldrehverschluss erprobt und analysiert. Ebenso zeigt sich bei der Analyse der Vorgänger und Nachfolger, dass Hauptgehäuseteile häufig als Trägerplattformen dienen und daher trotz vergleichsweise hoher Werte eine eher geringe Demontagequote aufweisen.

Nachdem die Bauteile der Klassen Hauptgehäuse, Gehäusedeckel, Dichtungen und Schrauben als besonders kritisch festgestellt wurden, wurde eine Testbench gebaut, um diese Bauteile zu untersuchen und eine entsprechende Demontagesequenz des Dummy-EAA zu programmieren.

Das Hauptgehäuse wurde so modifiziert, dass eine Handlingschnittstelle geschaffen wurden, an die der Greifer SGripper_01 formschlüssig und zerstörungsfrei andocken und ohne Anbindung an das Druckluft- oder Stromnetz die Verbindung halten kann. Alternativ könnte auch eine elektrisch angetriebene Arretierung verwendet werden, die auch mit einer drahtlosen Steuerung und im Batteriebetrieb verknüpft werden kann. Da die Ansteuerung aller Greifer der Testbench pneumatisch erfolgt, wäre die Verwendung elektrischer Steuerungssysteme mit einem erhöhten Mehraufwand und entsprechenden Kosten verbunden. Das angestrebte Design der pneumatischen Verriegelung zielt auf eine kostengünstige Lösung ab (wie in den vorangegangenen Unterkapiteln 7.1 und 7.2 beschrieben), sodass diese eher Anwendung in der Praxis finden kann.

In den durchgeführten statischen Belastungssimulationen konnte das Design des SGripper_01 iterativ verbessert werden, während die Schnittstelle am Hauptgehäuse nicht verändert wurde. Bei unterschiedlichen Belastungen hat sich gezeigt, dass vor allem die Finger des SGripper_01 stark belastet wurden, woraufhin diese verstärkt wurden. Die Handlingschnittstelle hat in den Simulationen keine Schwachstelle dargestellt. Der SGripper_01 wurde ebenfalls physisch auf der Testbench belastet und kann dem Dummy-EAA mit den vorgesehenen Handlingschnittstellen standhalten. Es konnte sowohl digital mittels Belastungssimulation als auch per Überschlagsrechnung gezeigt werden, dass ein auf das reale EAA skaliertes SGripper_01 aus Aluminium den anfallenden Belastungen vermutlich standhalten und als geeignetes Werkzeug eingesetzt werden kann. Allgemein gilt jedoch, dass die Aussagekraft von Simulationen durch getroffene Annahmen und Vereinfachungen durch begrenzte Datenverfügbarkeit beschränkt ist. Zur Überprüfung können 1:1 skalierte Tests und Dauerversuche die Standzeiten und Zuverlässigkeit des SGripper_01 bestätigen.

Weiterhin wurden die Gehäusedeckel so modifiziert, dass Angriffspunkte zum Aufhebeln dieser geschaffen wurden. Dazu wurde werkzeugseitig ein elliptischer Zylinder in entsprechend an Gehäusedeckel und Hauptgehäuse zweigeteilte Schalen eingeführt und um 90° gedreht, sodass diese aufgehebelt werden konnten. Nach den Simulationen hat sich gezeigt, dass niedrige Hebelkräfte mit einem Zapfen aus Stahl problemlos aufgewendet werden können, bei höheren Belastungen der SGripper_02 jedoch eher einen Versagensfall erfährt. Im Gegensatz dazu hat sich in praktischen Versuchen an der Testeinrichtung und am Dummy-EAA gezeigt, dass der SGripper_02 Gehäusedeckel vom Hauptgehäuse abhebeln kann. Es wurden unterschiedliche Öffnungskräfte mit unterschiedlichen Luftdrücken im Zylinder untersucht, bis der SGripper_02 an seine Belastungsgrenze gekommen ist. Alternative Lösungsansätze können erzielt werden, wenn die Exzentrizität des Zapfens des SGripper_02 variiert wird. Wird diese reduziert, kann der SGripper_02 höhere Öffnungskräfte aufbringen, jedoch verringert sich die Öffnungsweite. Bei manuellen Demontagerversuchen hat sich gezeigt, dass eine kritische Öffnungsweite überschritten werden muss,

um die Dichtmasse aufzureißen und die Elastizität des Gehäusedeckels zu überwinden. Ebenso kann die Verwendung eines gewindegetriebenen Spreizers untersucht werden. Unter Umständen könnten höhere Öffnungskräfte und ein vergleichsweise gleichmäßigeres Öffnen erzielt werden, jedoch würden ein Motor mit entsprechender Steuerung sowie Endanschlagssensoren benötigt, um diesen zu steuern, die wiederum mit höheren Kosten verbunden wären.

Für die Erprobung der modifizierten Dichtungen wurden in den Gehäusedeckeln des Dummy-EAA Einlegenuten vorgesehen und Runddichtungen jeweils mit einer Lasche versehen, die zur vereinfachten Demontage dienen soll. Es konnte gezeigt werden, dass die Demontage der Elastomer-Runddichtungen problemlos mittels eines vergleichsweise einfachen, universell einsetzbaren Parallelgreifers durchgeführt werden kann. Wird eine Mehrzahl der zu demontierenden Bauteile mit entsprechenden, für die Demontage vorgesehenen, Ansatzpunkten ausgestattet, kann die Anzahl und Komplexität der, für eine vollständige Demontage erforderlichen, Werkzeuge stark reduziert werden. Die eigentliche Dichtigkeit konnte als wichtiges Kriterium nicht überprüft werden, da keine speziell an die Geometrie angepassten und mit der Demontagelasche versehenen Dichtungen angefertigt werden konnten. Laut gängiger Literatur [Mörl und Gelbe, 2019] sind Runddichtungen, wie sie getestet wurden, für das vorliegende Dichtigkeitsproblem geeignet. Auch können Runddichtungen laut Mörl und Gelbe [2019] wiederverwendet werden, wovon jedoch aufgrund den relativ häufig auftretenden Dichtigkeitsprobleme abgeraten werden soll (siehe Kapitel 6.2.1). Wird eine Wiederverwendung dennoch angestrebt, kann die automatisierte Demontage unverändert durchgeführt werden, da der vorgesehene Greifer lediglich die Demontagelasche berührt und nicht mit den eigentlichen Dichtflächen in Kontakt kommt, so dass diese entsprechend nicht im Demontageprozess zerstört werden.

Aufgrund der hohen Anzahl an Schraubverbindungen im EAA ist die Demontage dieser von besonderer Relevanz. Für einen quantitativen Vergleich hinsichtlich der Erfolgsquote und der Exzentrizität wurde ein Schraubversuchsstand gebaut und entsprechende Experimente durchgeführt. Getestet wurden der Demontageschrauber aus dem Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* von Zeller et al. [2021] und eine verbesserte Version, die versteift wurde und einen höheren Schraubhub sowie eine Winkelüberwachung erlaubt. Für kleinere Schraubköpfe weist der weiterentwickelte Demontageschrauber eine höhere Erfolgsquote auf. Die Exzentrizität im Betrieb konnte durch die neu einbrachten Versteifungen deutlich reduziert werden, was perspektivisch auch die Demontage von Schrauben mit noch kleineren Kopfgeometrien erlaubt. Durch die Verwendung eines Innensechsrund Bits konnte die Erfolgsquote bei M4 Innensechskantschrauben deutlich gesteigert werden. Bei den Experimenten hat sich gezeigt, dass Innensechskant Schraubköpfe bei häufiger Anwendung von automatisierten Schraubprozessen aufgrund des langsamen Anlaufverhaltens

verbunden mit dem Einschnappen der Bitnuss in den Schraubenkopf vergleichsweise schnell verschleifen. Daher soll die Empfehlung ausgesprochen werden, tendenziell eher Innensechsrund bzw. Außensechsrund Schraubenköpfe zu verwenden, was im vorliegenden EAA bereits weitestgehend der Fall ist. Zum eigentlichen Schraubprozess periphere Prozesse wurden ebenfalls bedacht – dazu wurde ein Bitnusswechselsystem entwickelt, in dem Bitnüsse in definierten Positionen gelagert werden können. Im Vergleich zu der Ausschraublösung im Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* von Zeller et al. [2021] kann der Platzbedarf für Schraubwerkzeuge so deutlich reduziert werden, während Werkzeugwechsel nicht verzögert werden. Ein Nachteil des Bitnusswechselsystems ist die $\frac{1}{2}$ “ Vierkantaufnahme am Demontageschrauber, die für reibungslose Bitnusswechsel ein recht hohes Lagerspiel aufweisen muss. Dadurch verschlechtert sich jedoch das exzentrische Schwingverhalten von besonders langen Bitnüssen, wie sie zur Demontage einiger Schrauben im EAA benötigt werden so weit, dass diese nicht länger demontiert werden können. Entsprechend wird vorgeschlagen, so weit wie möglich einen standardisierten Demontageschrauber zu verwenden, der mittels eines Bitnusswechselsystems verschiedene Schrauben lösen kann und ergänzend für spezielle Schraubprozesse entsprechend angepasste Demontageschrauber zu nutzen.

Das Abführen demontierter Schrauben erfolgt mittels magnetischer Bitnüsse oder solcher, die eine kraftschlüssige Haltefunktion aufweisen. Diese Art der Schraubenabfuhr wird aus unterschiedlichen Gründen gegenüber dem Absaugen von Schrauben präferiert: Wird die Schraube mittels Bitnuss abgeführt, vereint diese die Funktionen Schrauben und Halten. Weiterhin kann ein Sauger insbesondere tief liegende Schrauben tendenziell schlechter absaugen, zudem besteht das Risiko, ungewollt benachbarte Komponenten anzusaugen. Der Nachteil der Schraubenabfuhr mittels Kraft- oder Magnetschluss ist das Erfordernis eines weiteren Ablöseprozesses: Nach erfolgter Demontage und Abfuhr einer Schraube muss diese von der Bitnuss gelöst werden. Dazu wurde ein Abstreifsystem entwickelt, das sowohl Schrauben von Bitnüssen, die in den Schraubenkopf eindringen, als auch von Bitnüssen, die den Schraubenkopf umschließen, abziehen kann. Das Abstreifsystem wurde in mehreren Iterationen immer weiter verbessert und funktioniert mit einem Sensor zur Erfolgskontrolle und unter Verwendung eines selbstverstärkenden Mechanismus.

Alternativ zum Ausschrauben können Schraubverbindungen durch robotergeführte Fräs- oder Bohrwerkzeuge aufgetrennt werden. Es wird vermutet, dass durch spanendes Abtragen von Schrauben die Demontagezeit verringert werden kann. Jedoch wird aufgrund der auftretenden Späne und dem damit verbundenen Risiko, teildemontierte Produkte zu kontaminieren, von der Zerspanung von Schrauben abgesehen. Zusätzlich verbleiben nach der Zerspanung einer Schraube Teile dieser im Gewinde zurück, sodass bei häufig nicht gleichen Materialpaarungen eine Verunreinigung der resultierenden Stoffströme verursacht

wird. Weiterhin können Gehäuseteile, in denen Schraubenteile verbleiben, nicht wiederverwendet werden, ohne diese in nachgeschalteten Prozessen aufwendig wiederaufzubereiten.

In der Demontagesequenz des Dummy-EAA wurde mit der Verwendung von Vierteldrehverschlüssen eine zusätzliche Möglichkeit einer Bauteilverbindung erprobt, die nach Beitz [1996] eine besonders hohe Recyclingeignung aufweist. Vierteldrehverschlüsse können wiederverwendet werden und sind vermutlich schneller zu demontieren, da lediglich eine Vierteldrehung zum Lösen benötigt wird. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass Vierteldrehverschlüsse durch Roboter automatisiert demontiert werden können. Allerdings sind Vierteldrehverschlüsse und deren Aufnahmen in der Fertigung beziehungsweise der Anschaffung teurer als vergleichsweise dimensionierte Schraubverbindungen. Daher empfiehlt es sich, Vierteldrehverschlüsse nur für Bauteilverbindungen zu nutzen, die besonders häufig demontiert werden müssen, beispielsweise Wartungsklappen.

Als eine weitere, realitätsnahe Alternative soll die Verwendung von trilobularen Schrauben [DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2021] vorgeschlagen werden, die beim vorliegenden EAA vor allem in Hinblick auf die Gehäuseteile aus Aluminium Vorteile aufweisen würden: Nach Bossard [2016] kann eine Kostensenkung in der Produktion um 30 % erzielt werden, vor allem indem Gewinde nicht länger geschnitten werden müssen, sondern durch trilobulare Schrauben im Einschraubprozess direkt geformt werden. Geformte Gewinde weisen höhere Festigkeiten als geschnittene Gewinde gleichen Maßes auf und sind daher tendenziell eher für eine Wiederverwendung geeignet. Zudem kann im Falle einer Wiederverwendung von Gehäuseteilen auch eine reguläre Schraube verwendet werden.

Unabhängig vom Typ der Verschraubung gilt, dass Schraubprozesse vergleichsweise zeitintensiv und durch die meist große Anzahl an zu demontierenden Schrauben für ein Bauteil tendenziell viel Zeit in Anspruch nehmen. Daher wird empfohlen, wenn möglich, Schraubverbindungen zu reduzieren, indem beispielsweise Bauteile einseitig formschlüssig eingehakt und auf der Gegenseite mittels Schraubverbindungen befestigt werden.

Zur Überprüfung aller konstruierten Werkzeuge und des Dummy-EAA wurde eine modulare Testbench gebaut, auf der alle, mit Ausnahme des Demontageschraubers, konstruierten Werkzeuge den Dummy-EAA in einer Demontagesequenz zerlegen können. Dabei agieren beide Roboter vollautomatisch und kommunizieren miteinander. Die Demontage konnte erfolgreich durchgeführt werden. Durch den modularen Aufbau und die konsequente Verwendung von Aluminiumprofilen konnten iterativ Werkzeuge und weitere Testanbauten immer wieder umgebaut werden.

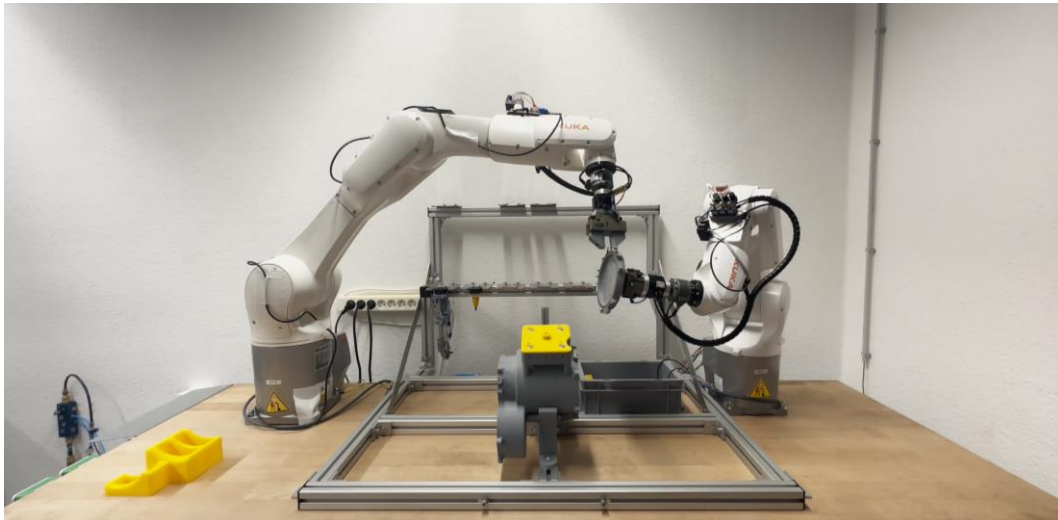


Abbildung 86: Beide Demontageroboter der Testbench während der gemeinsamen Demontage einer Dichtung. Links im Bild der KR 10 mit einem universellen Parallelgreifer, rechts im Bild der KR 4 mit dem CGripper_01

Beim Programmieren der Demontagesequenz konnten ebenfalls Nachteile identifiziert werden: Dadurch, dass alle Werkzeugbahnhöfe mittels zwei Aluminiumprofilen mechanisch verbunden sind, werden diese im Falle einer Kollision vollständig dejustiert. Eine Neujustage kann durch das Einführen von virtuellen Basen programmierseitig vereinfacht werden, jedoch können die exakten ursprünglichen Positionen und Subprogramme tendenziell nicht wiederverwendet werden. Eine Einzelaufhängung aller Werkzeugbahnhöfe kann bei häufigem Auftreten von Kollisionen empfehlenswert sein.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Demontagesequenz beschleunigt werden kann, wenn die Home-Positionen beider Roboter näher am Demontagebereich lokalisiert sind. Da das Risiko von ungewollte Roboter-Roboter-Kollisionen dadurch steigt, wurde im ursprünglichen Design der Testbench neben dem Abstand beider Roboter zueinander ebenfalls die Home-Positionen so gewählt, dass jeder Roboter frei agieren kann, während sich der jeweils andere in seiner Home-Position befindet. Zudem hat sich gezeigt, dass der vergleichsweise kleine Arbeitsradius des KR 4 für die Testbench etwas zu klein ist. Daher musste beispielsweise der KR 10 den KR 4 mit den Demontagewerkzeugen bestücken, da dieser nicht allein den Werkzeugbahnhof bedienen kann. Auch kann die Implementierung des RobotVision-Systems sinnvoll sein, da so Merkmale am Dummy-EAA präziser und reaktiv (beispielsweise bei der Erkennung von Schraubenköpfen bzw. Vierteldrehverschlüssen) erkannt werden können.

8. Fazit

Ziel der vorliegenden Dissertation war, Werkzeuge und Methoden zur Erhöhung der Ressourceneffizienz von EAA entwickeln, um so einen Beitrag zur Verbesserung der Circular Economy im Elektromobilitätssektor zu erzielen. Dazu wurde ein interdisziplinärer Ansatz gewählt, der sowohl Elemente einer Industrieumfrage, die Entwicklung eines Demontagealgorithmus als auch die Konstruktion von Bauteilen und Werkzeugen nach DfR- / und DfD-Ansätzen sowie den Aufbau von Testständen umfasst. Die Industrieumfrage wurde durchgeführt, um realitätsnahe Einschätzungen und Meinungen zur automatisierten Demontage und der recyclinggerechten Konstruktion zu erhalten, sodass die in der vorliegenden Dissertation erzielten Erkenntnisse, daraufhin entwickelt werden konnten. Idealerweise können die gewonnen Erkenntnisse zeitnah in eine industrielle Anwendung überführt werden.

Auf Basis der durchgeführten Industrieumfrage konnte herausgefunden werden, dass recyclinggerechte Konstruktion für automatisierte Demontage als eher komplex eingeschätzt wird und ein Trend für die Zukunft sein kann, jedoch nicht auf alle Produktarten anwendbar ist. Der Fokus soll auf Produkten mit mittellangen Lebensdauern, einem vergleichsweise hohen Wert und hohen Stückzahlen liegen – entsprechend sind EAA geeignete Produkte, um die automatisierte Demontage zu erproben. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass recyclinggerechte Konstruktion nur teilweise in deutschen Industrieunternehmen angewendet wird, sich jedoch eine leicht positive Tendenz hin zu einer vermehrten Anwendung abzeichnet. Das Wissen und die Werkzeuge zur ressourceneffizienteren Gestaltung von Produkten sind tendenziell bereits in den Unternehmen vorhanden. Weiterhin scheint es eher keine Diskrepanz zwischen dem grünen Image von Unternehmen und deren tatsächlichen Produkten hinsichtlich Recycling / Wiederverwendung zu geben, jedoch wurden dazu keine externen Prüfungen der Produkte der Firmen durchgeführt. Ferner hat sich gezeigt, dass automatisierte Demontagesysteme tendenziell besondere Ansätze der recyclinggerechten Konstruktion beziehungsweise des DfR / DfD erfordern. Zuletzt ist eine wesentliche Erkenntnis der Industrieumfrage, dass die bedeutende Herausforderung der automatisierten Demontage darin liegt, diese ökonomisch tragfähig zu gestalten. Als vornehmliche Werkzeuge hierfür wurden in der Folge der Demontagealgorithmus sowie das Bauteil- und Werkzeugdesign untersucht.

Die Maximierung des Nutzens der Demontage hängt an einer Reihe unterschiedlicher Faktoren. Da sich der Demontagegewinn jedes individuellen Aggregats mit jedem weiteren demontierten Bauteil unterscheiden kann, ist die Demontagequote ein entscheidender Faktor für den wirtschaftlichen Betrieb eines Demontagemoduls. Zur Ermittlung optimaler Demontagequoten und -tiefen wurde ein Algorithmus entwickelt, in einer graphischen Nut-

zeroberfläche eingebunden und eine Datenbasis geschaffen, auf die der Algorithmus zugreifen kann. Durch die Modifikationen von Faktoren, die Werte in der Datenbasis variieren, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Weiterhin wurden die baustrukturbedingten Präzedenzbeziehungen des vorliegenden EAA graphisch dargestellt. In dieser Darstellung kann zudem die jeweils ermittelte optimale Demontagetiefe visualisiert werden. Bei der Anwendung des Demontagealgorithmus hat sich allgemein gezeigt, dass tendenziell ein Zielkonflikt zwischen ökologischen und ökonomischen Aspekten herrscht – dieser liegt begründet in der Anordnung werthaltiger Bauteilgruppen in der Baustruktur. Weiterhin hat sich gezeigt, dass Bauteilgruppen, die als Trägerplattform für (viele) andere Bauteilgruppen dienen, trotz hohen Wertes tendenziell weniger häufig demontiert werden. Andererseits konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass einige Bauteilgruppen als Leuchtturmbauteilgruppen fungieren, die häufig in die Demontagesequenz einbezogen werden beziehungsweise im US enthalten sind. Nach Leuchtturmbauteilgruppen stoppt die Demontage häufig. Eine allgemeine Schwäche der Darstellung des Demontagegraphs ist, dass innerhalb kleiner demontierbarer Baugruppen, die jeweiligen Bauteilgruppen in willkürlicher Reihenfolge im Demontagegraph erscheinen können – dies kann eine leichte Verzerrung der optimalen Demontagetiefe zur Folge haben. Zudem herrscht die allgemeingültige Herausforderung, belastbare Daten für die Datenbasis gewinnen zu können. Bei der Durchführung der Sensitivitätsanalyse hat sich gezeigt, dass kleinere und weniger werthaltige EAA tendenziell weniger geeignet sind für die automatisierte Demontage. Weiterhin ist die Demontagezeit ein besonders kritischer Faktor, daher sollten beispielsweise Werkzeuge so generisch wie möglich ausgelegt sein, um Werkzeugwechsel zu reduzieren. Laut der Sensitivitätsanalyse ist der Einfluss durch Investmentkosten im Vergleich eher geringer einzuschätzen, was indirekt im Widerspruch zu den Erkenntnissen der Industrieumfrage steht, nach der Kosten besonders relevant sind. Im Gegensatz dazu hat der untersuchte Re-X Faktor einen vergleichsweise hohen Einfluss auf die Demontagequote und den Demontagegewinn. Daher sollte die Demontageeignung der Bauteilgruppen erhöht werden, sodass diese einfacher in die Circular Economy zurückgeführt werden können. Dies kann durch die Anwendung von DfR- / DfD-Ansätzen erfolgen.

Zur Anwendung von DfR- / DfD-Ansätzen wurden zunächst literaturgängige Ansätze betrachtet und das vorliegende EAA danach bewertet. Weiterhin wurden zur Ermittlung verbesserungswürdiger Bauteilgruppen empirisch ermittelte Fehler vom Hersteller, manuelle Demontageversuche sowie eine Analyse der Baustruktur als auch die Erkenntnisse aus Industrieumfrage und Demontagealgorithmus zu Rate gezogen. Dabei haben sich die Bauteilklassen Hauptgehäuse, Gehäusedeckel, Dichtungen und Schrauben als besonders kritisch herausgestellt, diese wurden entsprechend für prototypische Demontageoptimierungen ausgewählt und entsprechend modifiziert. Ergänzend wurden Demontagewerkzeuge

entwickelt, die auf die modifizierten Bauteilgruppen abgestimmt wurden. Diese Werkzeuge wurden in mehreren Iterationen am Computer und in Demontageversuchen simuliert und getestet, sodass entsprechende Verbesserungen vorgenommen werden konnten. Mit den neu entwickelten Werkzeugen und den für die Demontage optimierten Dummy-Bauteilen konnten Wirkprinzipien von Bauteilverbindung vor dem Hintergrund der automatisierten Demontage auf einem eigens entwickelten Prüfstand eruiert und erfolgreich getestet werden. Ein Dummy-EAA aus modifizierten Bauteilgruppen konnte mit den konstruierten Demotagewerkzeugen vollständig durch zwei Roboter auf dem Prüfstand (Testbench) demontiert werden.

Es hat sich gezeigt, dass der SGripper_01 als Greifer und als Adapterplatte fungieren kann, die pneumatische Verriegelung löst sich dabei nicht im Demontageprozess von den vorgesehenen Handlingschnittstellen und kann vergleichsweise hohe Kräfte aufnehmen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass der SGripper_02 unter Umständen als Deckelaufspreizer funktionieren kann. Zudem konnte bestätigt werden, dass Einlegedichtungen automatisiert zerstörungsfrei und rückstandslos demontiert werden können, wenn auch von einer Wiederverwendung dieser abgeraten werden soll. Hinsichtlich der Demontage von Schrauben hat sich gezeigt, dass automatisierte Ausschraubprozesse eine komplexe Herausforderung darstellen, die ein Zusammenspiel von Demontageschrauber, Robotersteuerung (ggf. mit RobotVision), Nusswechselsystem und Abstreifer erfordert, um reibungslos zu funktionieren. Es konnte dargestellt werden, dass mit einem weiterentwickelten Demontageschrauber die Präzision von Ausschraubprozessen und damit auch die Erfolgsquote erhöht werden konnte. Alternativ zu regulären Schrauben können trilobulare Schrauben neben einer Kostensenkung in der Montage auch zu einer besseren Wiederverwendbarkeit von Gehäuseteilen führen. Auf der Testbench wurde zudem die Verwendung von Vierteldrehverschlüssen untersucht, die vergleichsweise schnell demontiert werden können, jedoch eher teuer sind. Insgesamt gilt, dass Schraubprozesse per se vergleichsweise zeitintensiv sind und aufgrund der hohen Anzahl an Schraubverbindungen im vorliegenden EAA einen hohen Anteil der Demontagedauer benötigen. Daher wird empfohlen, wenn möglich, die Anzahl an Schraubverbindungen zu reduzieren. Ferner sollte die Anzahl unterschiedlicher Schraubenköpfe verringert werden, um die Anzahl von Werkzeugwechseln so weit wie möglich herabzusetzen.

Allgemein konnte darüber hinaus die Erkenntnis gewonnen werden, dass eine Trennung der wesentlichen Baugruppen so früh und unkompliziert wie möglich im Demontageprozess angesiedelt werden sollte. Dadurch kann eher eine Parallelisierung des Demontageprozesses und somit eine potenzielle Verkürzung der Demontagedauer erzielt werden. Weiterhin sollten an zusammenhängenden Gehäuseteilen Konterpunkte vorgesehen werden,

sodass diese zerstörungsfrei voneinander getrennt werden können. Insbesondere an Bauteilgruppen, die als Plattform für viele weitere Bauteilgruppen fungieren, sollten zudem Handlingschnittstellen vorgesehen werden, da diese meistens initial benötigt werden und darüber hinaus auch im weiteren Verlauf des Demontageprozesses immer wieder zum Einsatz kommen.

Zusammenfassend konnten in der vorliegenden Dissertation durch den Demontagealgorithmus ein Werkzeug geschaffen werden, das realitätsnah in die Anwendung überführt werden und in einer Optimierung der Demontagetiefe resultieren kann. Die eruierten Bauteilmodifikationen mit den entsprechenden Demontagewerkzeugen können in zukünftigen Generationen von EAA implementiert werden. Diese können eher im Kreis geführt werden und sind folglich besser für die Circular Economy geeignet.

9. Ausblick

Die vorliegende Dissertation bietet viele Anknüpfungspunkte für zukünftige Arbeiten, in denen einzelne Disziplinen wie der Demontagealgorithmus oder das Design einzelner Bauteile oder Werkzeuge vertieft bearbeitet werden können. Jedoch gilt auch allgemein, die gewonnenen Erkenntnisse näher in die industrielle Praxis zu bringen.

Hinsichtlich des Demontagealgorithmus können optionale Verbesserungen vorgenommen werden. Beispielsweise kann die Möglichkeit geboten werden, auch deutlich größere und komplexere Produkte als EAA zu untersuchen, beispielsweise ganze Kraft-/ Elektrofahrzeuge. Zum besseren Verständnis und auch zur effizienteren Berechnung könnte es sinnvoll sein, eine Zerlegung dieser in disjunkte Teilmengen durchzuführen, also das gesamte Produkt virtuell in wesentliche Baugruppen zerlegen und diese dann jeweils einzeln im Demontagealgorithmus zu untersuchen. Nachdem dies erfolgt ist, können alle Baugruppen zusammen auf einer makroskopischen Ebene erneut mit dem Demontagealgorithmus untersucht werden. Eine Gruppierung von Bauteilgruppen könnte auch nach funktionaler Zusammengehörigkeit erfolgen – es ist möglich, dass eine intakte Funktionsbaugruppe einen höheren Wert hat als die Summe ihrer Einzelteile. Sollte im Vorhinein klar sein, dass ein stoffliches Recycling für bestimmte Bauteilgruppen vorgesehen ist, kann auch eine Gruppierung nach stofflicher Zusammengehörigkeit erfolgen. In beiden Fällen kann potenziell auf Demontageschritte verzichtet werden. Die besondere Herausforderung bei der Gruppierung ist, dass diese entsprechend festgelegt werden müssen – bei funktionalen Baugruppen muss zudem der Zustand zunächst geprüft werden. Wird eine Gruppierung automatisiert geprüft, müssten für n Bauteile 2^{n-2} Gruppen untersucht werden, was insbesondere bei größeren Produkten zu längeren Laufzeiten führen kann.

Da die Ermittlung belastbarer Daten eine Herausforderung dargestellt hat, könnten Unternehmen, die den Demontagealgorithmus nutzen möchten, eine Schnittstelle zu einem Enterprise Resource Planning System vorsehen. So könnten tagesaktuelle Daten der Bauteilwerte abgerufen werden, sodass die Demontagetiefe entsprechend angepasst werden und auf kurzfristige Preisschwankungen eingegangen werden kann.

Der Demontagealgorithmus kann zudem um weitere Kenngrößen erweitert werden: Wird die Demontagezeit einer Bauteilgruppe integriert, kann auch die individuelle Gesamtdauer der Demontage eines EAA berechnet werden. In der Folge kann ein relativer Demontagegewinn kalkuliert werden und entsprechend EAA mit hohen relativen Demontagegewinnen priorisiert demontiert werden. Die Kalkulation der Demontagedauer kann sehr komplex werden, sobald keine sequenzielle Demontage vorliegt und, wie im Projekt DeMoBat verfolgt, eine Zerlegung in wesentliche Baugruppen sowie eine teilweise parallele Bearbeitung

durch einen Roboter erfolgt. Wird nun die Gruppierung einzelner Bauteilgruppen zur zeitlichen Bewertung hinzugezogen, wird die Herausforderung noch komplexer. Neben der Dimension Zeit kann auch die Dimension Ökologie implementiert werden: Beispielsweise könnte das Global Warming Potential oder der CO₂-Fußabdruck jeder Bauteilgruppe ermittelt werden und diese entweder direkt als Hauptkriterium oder indirekt in die Berechnung optimaler Demontagetiefe einbezogen werden. Gerade der CO₂-Fußabdruck könnte durch CO₂-Zertifikate tagesaktuell in eine monetäre Kenngröße übersetzt und entsprechend im Demontagealgorithmus integriert werden. Somit könnte eine enorme Komplexitätssteigerung durch eine zusätzliche Dimension, nach der optimiert werden kann, vermieden werden, ohne diese jedoch zu vernachlässigen. Zusätzlich kann bei vollständiger Demontage von wesentlichen Baugruppen oder des gesamten EAA eine Prämie vorgesehen werden, sodass die Herausforderung der strukturbedingten, fast vollständigen Demontage, umgangen werden könnte. Für eine präzisere Berechnung optimaler Demontagetiefen können zudem die Erfolgsquote von Demontageprozessen sowie mögliche Recyclingoptionen jeweils mit Wahrscheinlichkeiten versehen werden, ähnlich zum Ansatz von Espinoza et al. [2013]. Jeweilige Erfolgswahrscheinlichkeiten und auftretende Fehler könnten zudem von einer künstlichen Intelligenz analysiert und als Empfehlungen in den Demontagealgorithmus zurückgespiegelt werden.

Hinsichtlich der Bauteil- und Werkzeugkonstruktion können ergänzende Arbeiten in der Simulation durchgeführt werden. So könnten Wechselbelastungen untersucht werden, die insbesondere durch die Trajektorien der Roboter bedingt sind. Auch können weitere Materialien untersucht werden, die unter Umständen geeigneter sind. Neben der virtuellen Analyse sollten auch empirische Untersuchungen zur Standfestigkeit der Werkzeuge und Bauteile durchgeführt werden, da insbesondere Standzeiten und Zuverlässigkeit wichtige Kriterien für die industrielle Umsetzung sind. Bezüglich der Zuverlässigkeit von Werkzeugen kann die konsequente Einbindung von RobotVision Systemen die Schraub- und Greifpräzision situativ weiter erhöhen. Weiterhin sollten Standards geschaffen werden, nach denen beispielsweise das Handling von EAA durchgeführt werden kann oder die die Nutzung von DfR-/ DfD-Gestaltungsgrundregeln fixieren. Hinsichtlich der Verbesserung von Bauteilen können diese auch nach dem Poka Yoke Prinzip⁵⁶ gestaltet werden, wodurch der falsche Einbau von Bauteilen, wie in der empirischen Fehlerermittlung herausgefunden, minimiert werden kann.

⁵⁶ (dt.: „Vermeidung unbeabsichtigter Fehler“) Japanisches Prinzip, nach dem durch geschicktes Design eines Prozesses, Bauteils o.ä. die Vermeidung häufig vorkommender Fehler vermieden wird.

Allgemein gilt, dass zur erfolgreichen Überführung der gewonnenen Erkenntnisse in die industrielle Anwendung das Aufstellen eines Geschäftsmodells sinnvoll wäre [Colledani et al., 2014]. Möglich ist hier der Ansatz ähnlich zu dem von Seelig et al. [2022], nach dem durch Car-Sharing die Motivation, haltbare und demontierbare (vorbereitend für Re-X) Produkte zu schaffen, bei den vermietenden Unternehmen angesiedelt wird. Die dann am EoL von Komponenten erforderliche Demontage soll in Demontagemodulen erfolgen. Gleichzeitig können die unterschiedlichen Fahrzeuge der Flotte des Herstellers mit standardisierten Bauteilgruppen ausgestattet werden, sodass der Demontageprozess erleichtert und Re-X Optionen günstiger umgesetzt werden können. Weiterhin kann durch das beschriebene Car-Sharing die effektive Nutzungszeit eines Fahrzeugs erhöht und somit alterungsbedingte Schäden eher vermieden werden.

Die automatisierte Demontage kann ebenfalls auch auf weitere, den o.g. Kriterien entsprechende Produkte angewendet werden, beispielsweise auf Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen wie ebenfalls im Projekt DeMoBat bearbeitet [Baazouzi und Halt, 2023]. Auch kann die Anwendung auf Brennstoffzellen oder Elektrolyseure aus modernen Lastkraftwagen sinnvoll sein, da diese ebenfalls die Kriterien erfüllen – ähnlich zum Verbundvorhaben Stack2P [Weintraut und Hemmerle, 2023].

Ein Beispiel aus gängiger Industriepraxis sollen die Demontageroboter Daisy, Dave und Taz sein, die bei der Apple Inc. iPhones für ein stoffliches Recycling mittels zerstörender Demontage vorbereiten [Apple, 2023; Mansholt, 2022]. Jedoch bietet sich an dieser Stelle ökologisches Verbesserungspotenzial, wenn Bauteile zerstörungsfrei und für eine Wiederverwendung geborgen werden würden. Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt, dass Apple teilweise über mehrere Jahre hinweg dieselben Computerchips in unterschiedlichen (Neu-)Geräten verbaut, eine Wiederverwendung könnte entsprechend sinnvoll sein.

Weiterhin kann es auch sinnvoll sein, den Automatisierungsgrad zu variieren und teilautomatisierte oder manuelle Demontageschritte zu berücksichtigen, die ökonomisch und ökologisch günstiger umgesetzt werden können. Auch können durch das Einbinden kollaborierender Roboter effizientere Prozesse geschaffen werden. Als Beispiel hierfür soll das Projekt ZirkulEA genannt werden, in dem der Fokus von der Vollautomatisierung, die mit vielen Herausforderungen konfrontiert ist, etwas näher Richtung manueller Tätigkeiten gerückt wird [ZirkulEA, 2023].

Allgemein kann geschlossen werden, dass die (teil-)automatisierte Demontage, wenn die wirtschaftliche Umsetzung gegeben ist, auf einige industriell hergestellte Produkte angewendet werden kann. Durch die eruierten Werkzeuge und Methoden kann die automatisierte Demontage noch nachhaltiger werden und so einen Teil zur Umsetzung der Circular Economy beitragen.

10. Literaturverzeichnis

- AgiProbot (2023): Projektbeschreibung AgiProbot: Agiles Produktionssystem mittels mobiler, lernender Roboter mit Multisensorik bei ungewissen Produktspezifikationen. <https://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/AgiProbot/>. Abgerufen: 17.05.2023.
- AltfahrzeugV: Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen. Letzte Änderung durch Art. 1 V v. 18.11.2020 I 2451.
- Apple (2023): Recycelte Materialien sind die Bausteine für neue Geräte. <https://www.apple.com/de/environment/>. Abgerufen: 15.05.2023.
- Baazouzi, S.; Rist, F., P.; Weeber, M.; Birke, K., P. (2021): Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries. Batteries, Vol 7, No. 74. S. 1 – 24.
- Baazouzi, S.; Halt, L. (2023): Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren DeMoBat. <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DeMoBat.html>. Abgerufen: 15.05.2023.
- Bai, X.; Turczynski, G.; Baxter, N.; Place, D.; Sinclair-Ross, H.; Ready, S. (2017): Pseudoflow Method for Pit Optimization. Whitepaper, Dassault Systèmes.
- Balinski, M. L. (1970): On a Selection Problem. Management Science, Vol 17(3), S. 230 – 231.
- Basdere, B. (2001): Demontagefabrik rettet vor dem Schredder. Wissenschaftsdienst, Ausgabe Jg. 2, Nr. 1.
- Bast, U.; Blank, R.; Buchert, M.; Elwert, T.; Finsterwalder, F.; Hörnig, G.; Klier, T.; Langkau, S.; Marscheider-Weidemann, F.; Müller, J.-O.; Thürigen, C.; Treffer, F.; Walter, T. (2014): Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben. Abschlussbericht.
- Beitz, W. (1996): Recyclinggerechtes Gestalten. In: Recycling-Handbuch: Strategien – Technologie - Produkte. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Benloc (2022): ¼-Drehverschlüsse. BENLOC FASTENER TECHNIK GmbH & Co. KG. <https://www.fastener.de/images/pdf/schnellverschluesse/99F.pdf>, Abgerufen: 19.09.2022.
- Beringer, M. (2019): Für jede Anforderung die ideale E-Maschine. https://www.zf.com/mobile/de/stories_14081.html. Abgerufen: 30.11.2020.

- Binder, A. (2017): Elektrische Maschinen und Antriebe Grundlagen, Betriebsverhalten. 2. aktualisierte Auflage. Springer Vieweg.
- Blessing, L.; Klett, J. (2007): Connections. In: Sustainability in Manufacturing – Recovery of Resources in Product and Material Cycles. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Bosch Mobility Solutions (2020): Leistungselektronik Generation 3evo. Steuereinheit für elektrifizierte Antriebe. <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/antriebssysteme/elektroantrieb/leistungselektronik/> 1/10. Abgerufen: 17.11.2020.
- Bossard (2016): DIN7500 – Trilobulares Furchsystem. <https://provenproductivity.com/de/din7500-trilobulares-furchsystem/>. Abgerufen: 09.05.2023.
- Böcker, J. (2019): Leistungselektronik. Skript zur Vorlesung. Universität Paderborn, Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik.
- Börse Online (2019): Die Wachstumsbranche. <https://www.boerse-online.de/nachrichten/aktien/die-wachstumsbranche-20287600.html>. Abgerufen: 13.04.2023.
- Broughton, J. (2023): Disassembly. In: Harper, L.; Clifford, M.: Design and Manufacture of Structural Composites. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. S. 499 – 526.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022) (1): Maschinen- und Anlagenbau. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-maschinen-und-anlagenbau.html>. Abgerufen: 05.01.2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022) (2): Automobilindustrie. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html>. Abgerufen: 05.01.2022.
- Colledani, M.; Copani, G.; Tolio, T. (2014): De-Manufacturing Systems. Procedia CIRP Vol 17, S. 14 – 19.
- Czwajda, L.; Kosacka-Olejniak, M.; Kudelska, I.; Kostrzewski, M.; Sethanan, K.; Pitakaso, R. (2019): APPLICATION OF PREDICTION MARKETS PHENOMENON AS DECISION SUPPORT INSTRUMENT IN VEHICLE RECYCLING SECTOR. Scientific Journal of Logistics. Vol. 15(2), S. 265 – 278.
- de Haan, P.; Peters, A.; Semmling, E.; Marth, H.; Kahlenborn, W. (2015): Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik. Texte 31/2015. Umweltbundesamt.
- Delbrück, M. (1998): Asynchronmotor. In: Lexikon der Physik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

- DemoSens (2023): DemoSens – Digitalisation of automated disassembly and sensor-based mechanical treatment of lithium-ion batteries for high-quality recycling. <https://www.greenbatt-cluster.de/en/projects/demosens/>. Abgerufen: 17.05.2023.
- DFG (2023): SFB 281: Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen. <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/5476059?context=projekt&task=showDetail&id=5476059&>. Abgerufen: 04.05.2023.
- DGUV (2012): Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003): DIN 8591. Fertigungsverfahren Zerlegen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2014): DIN IEC 60050-351. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2015): DIN EN 14399-2. Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau – Teil 2: Eignung zum Vorspannen.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2016): DIN EN 10106. Kaltgewalztes nicht kornorientiertes Elektrobund und -blech im schlussgeglühten Zustand; Deutsche Fassung.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2021): DIN 7500-1. Gewindefurchende Schrauben für Metrisches ISO-Gewinde – Teil 1: Technische Lieferbedingungen für einsetzgehärtete und angelassene Schrauben.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2022) (1): DIN EN 10107. Kornorientiertes Elektrobund und -blech im schlussgeglühten Zustand; Deutsche Fassung.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2022) (2): DIN EN 14420-7. Schlaucharmaturen mit Klemmfassungen – Teil 7: Hebelarmkupplungen.
- Dispan, J. (2013): Elektromobilität: Schlüsselfaktor Qualifikation. Ergebnisse der ELAB-Studie zu Kompetenzerfordernissen und Qualifikationsbedarfen. Informationsdienst des IMU-Instituts, Heft 1/2013. IMU Institut, Stuttgart.
- Dispan, J. (2017): BRANCHENANALYSE KRAFTFAHRZEUG-GEWERBE Strukturwandel und Beschäftigungstrends in Autohäusern und Kfz-Werkstätten. 370. Band, edition Hans-Böckler-Stiftung. Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf.
- Duflou, J. R.; Seliger, G.; Kara, S.; Umeda, Y.; Ometto, A.; Willems, B. (2008): Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol 57, S. 583 – 600.

- Duggal, A., S.; Malik, P., K.; Gehlot, A.; Singh, R.; Gaba, G., S.; Masud, M.; Al-Amri, J., F. (2021): A sequential roadmap to Industry 6.0: Exploring future manufacturing trends. IET Communications, Vol 16, S. 521 – 531.
- Ellen MacArthur Foundation (2023) (1): What is a circular economy? <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>. Abgerufen: 17.05.2023.
- Ellen MacArthur Foundation (2023) (2): Design and the circular economy – Deep dive. <https://ellenmacarthurfoundation.org/design-and-the-circular-economy-deep-dive#article>. Abgerufen: 15.05.2023.
- EmoG: Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge. Letzte Änderung durch Art. 2 Abs. 34 G v. 20.12.2022 I 2752.
- Espinoza, D.; Lagos, G.; Moreno, E.; Vielma, J., P. (2013): RISK AVERSE APPROACHES IN OPEN-PIT PRODUCTION PLANNING UNDER ORE GRADE UNCERTAINTY: A ULTIMATE PIT STUDY.
- EU-Recycling (2022): Design for Recycling – Design for what? EU-Recycling Magazin 07/2022. <https://eu-recycling.com/Archive/36186>. Abgerufen: 15.05.2023.
- Europäische Kommission (2015): Das Paket zur Kreislaufwirtschaft: Fragen und Antworten. Brüssel.
- Europäische Kommission (2022): IMPACT ASSESSMENT REPORT. Accompanying the document: Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. Amending Directives 2005/29/EC and 2011/83/EU as regards empowering consumers for the green transition through better protection against unfair practices and better information.
- Europäische Kommission (2023): Das EU-geförderte Projekt Recycling 4.0 hebt Deutschland beim Recycling auf die nächste Stufe. https://germany.representation.ec.europa.eu/projects/das-eu-geförderte-projekt-recycling-40-hebt-deutschland-beim-recycling-auf-die-nachste-stufe_de. Abgerufen: 10.04.2023.
- Europäisches Parlament (2018): Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>. Abgerufen: 23.04.2020.

- Europäisches Parlament (2023): Circular economy: definition, importance and benefits. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>. Abgerufen: 17.05.2023.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2018): Richtlinie (EU) 2018/851 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN>. Abgerufen: 05.01.2022.
- Fanuc (2023): Die Industrieroboter der M-2000-Serie sind die stärksten Roboter auf dem Markt. Verfügbar mit langem und kurzem Arm. <https://www.fanuc.eu/de/de/roboter/roboterfilter-seite/m-2000-serie#:~:text=Die%20Industrieroboter%20der%20M%2D2000,Bewegen%20und%20Palettieren%20schwerer%20Teile>. Abgerufen: 17.05.2023.
- Faulbaum, F. (2019): Methodische Grundlagen der Umfrageforschung. Springer VS, Wiesbaden.
- Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Göpfert, J.; Tretow, G. (2013): Technische Systeme. S. 237 – 279. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage.
- Ford, L. R., Jr.; Fulkerson, D. R. (1956): Maximal Flow Through a Network. Canadian Journal of Mathematics, Vol 8, S. 399 – 404.
- GeeksforGeeks (2023): Find minimum s-t cut in a flow network. <https://www.geeksforgeeks.org/minimum-cut-in-a-directed-graph/> Abgerufen: 18.01.2023.
- Gericke, K.; Bender, B.; Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2021): Grundlagen methodischen Vorgehens in der Produktentwicklung, S. 26 – 56. In: Bender, B.; Gericke, K.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 9. Auflage.
- Goldberg, A., V.; Tarjan, R., E. (1988): A New Approach to the Maximum-Flow Problem. Journal of the Association for Computing Machinery, Vol 35, No. 4, S. 921 – 940.
- Gordon, W., J., J. (1961): Synectics: The Development of Creative Capacity.
- Griemert, S. (2017): Rüstzeiten – das ungehobene Potenzial. Wissenschaftliche Schriften des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften, Hochschule Koblenz, No. 23.

- Gründerplattform (2023): Circular Economy – Mit Kreislaufwirtschaft zum nachhaltigen Business. <https://gruenderplattform.de/green-economy/circular-economy#:~:text=Das%20deutsche%20Wort%20Kreislaufwirtschaft%20bezieht,Abfallfluss%2C%20sondern%20das%20gesamte%20Wirtschaftssystem.> Abgerufen: 17.05.2023.
- Gulde, D. (2021): Effiziente Schaltzentrale. Bosch erklärt Leistungselektronik. <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/leistungselektronik-erklaert-von-bosch/>. Abgerufen: 17.04.2023.
- Gupta, S., M.; McLean, C., R. (1996): Disassembly of products. *Computers & Industrial Engineering*, Vol 31(1 – 2), S. 225 – 228.
- Güngör, A.; Gupta, S (2001): Disassembly sequence plan generation using a branch-and-bound algorithm. *International Journal of Production Research*, Vol 39, Issue 3, S. 481 – 509.
- Hansen, F.; Seelig, J. H. (2021): Recyclinggerechte Konstruktion & Demontage - Wo stehen deutsche Schlüsselindustrien? https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00002489. Abgerufen: 08.11.2023.
- Hansen, F.; Schlage, M.; Seelig, J., H. (2023): Hemmnisse und Lösungen: Light-out-Disassembly - Ein Beitrag zur Entwicklung der Circular Economy am Industriestandort Deutschland. https://www.cutec.de/fileadmin/Cutec/documents/Ressourcentechnik/Whitepaper_Light_out_Disassembly_CUTEC.pdf. Abgerufen: 18.05.2023.
- Hazet (2023): Spreizer. <https://www.hazet.de/de/produkte/spezialwerkzeuge/radlager-radnabe/2197/spreizer>. Abgerufen: 08.05.2023.
- HEA (2020): Fachwissen – Herde und Backöfen. <https://www.hea.de/fachwissen/herde-backoefen/elektroherde-aufbau-und-funktion> Abgerufen: 17.11.2020.
- Hebisch, R.; Ott, G.; Müller, H.; Habel, A. (2011): Handlungsanleitung zur guten Arbeitspraxis „Tätigkeiten mit Gefahrenstoffen beim Recycling von Kraftfahrzeugen“. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz.
- Heinrich, B.; Linke, P.; Glöckler, M. (2020): Grundlagen Automatisierung – Erfassen - Steuern - Regeln. 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Hochbaum, D., S.; Chen, A. (2000): Performance Analysis and Best Implementations of Old and New Algorithms for the Open-Pit Mining Problem. *Operations Research*, Vol 48, No. 6, S. 894 – 914.

- Hu, D.; Hu, Y.; Li, C. (2002): Mechanical Product Disassembly Sequence and Path Planning Based on Knowledge and Geometric Reasoning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer Verlag, London. Vol 19, S. 688 – 696.
- Huber, A. (2001): Demontageplanung und -steuerung – Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen. Dissertation.
- Hui, W.; Dong, X.; Guanghong, D. (2008): A Genetic Algorithm for Product Disassembly Sequence Planning. *Neurocomputing*, Vol 71(13 – 15), S. 2720 – 2726.
- IFR (2019): Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots. <https://ifr.org/downloads/press2018/Executive%20Summary%20WR%202019%20Industrial%20Robots.pdf>. Abgerufen: 17.05.2023
- Inkermann, D.; Hanna, M.; Richter, T.; Wortmann, N.; Vietor, T.; Krause, D. (2019): Die Produktarchitektur als zentrales Konzept in der Produktentwicklung. *DfX-Symposium 2019*, S. 263 – 278.
- Jackowski, S. (2017): Studie „Kfz-Gewerbe 2020plus“. Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbes und BBE Automotive Unternehmensberatung.
- Javaid, M.; Haleem, A.; Singh, R., P.; Suman, R. (2022): artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study. *Journal of Industrial Integration and Management*, Vol 7, No. 1, S. 83 – 111.
- Jungbluth, J.; Gerke, W.; Plapper, P. (2016): Demontage von Elektroantrieben mit Assistenzrobotern zum wirtschaftlichen Recycling.
- Kampker, A. (2014): Elektromobilproduktion. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Kausch, P.; Bertau, M.; Gutzmer, J.; Matschullat, J. (2014): Strategische Rohstoffe – Risikoversorge. Springer Spektrum. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2019): Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2020. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>. Abgerufen: 25.03.2020.
- Kehayov, M.; Holder, L.; Koch, V. (2022): Application of artificial intelligence technology in the manufacturing process and purchasing and supply management. *Procedia Computer Science*, Vol 200, S.1209 – 1217.
- Klodt (2018): Mittelstand – Ausführliche Definition. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/mittelstand-40165/version-263557>. Abgerufen: 05.01.2022.

- Kluke, M. (2017): Effizienter Abdichten mit Klebstoffen. <https://kem.industrie.de/verbindungstechnik/effizienter-abdichten-mit-klebstoffen/>. Abgerufen: 10.05.2023.
- Korhonen, J.; Honkasalo, A.; Seppälä, J. (2018): Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, Vol 143, S. 37 – 46.
- Kral, U.; Kellner, K.; Brunner, P., H. (2013): Sustainable resource use requires "clean cycles" and safe "final sinks". *The Science of the Total Environment*. S. 461 – 462:819 – 822.
- Kral, U.; Morf, L. S.; Vyzinkarova, D.; Brunner, P., H. (2018): Cycles and sinks: two key elements of a circular economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol 21(11), S. 1 – 9.
- Krause, S.; Fabian, M.; Dicke, N.; Köhn, M.; Baumeister, H.-J.; Körber-Ziegegeist, G.; Oehme, I.; Bockhardt, I.; Frieß-Kossolobow, L.; Ebert, T. (2020): Verlängerung der Produktnutzungsdauer – Ansätze zur Abfallvermeidung und Ressourcenschonung durch Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- KrWG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Letzte Änderung durch Art. 5 G v. 2.3.2023 I Nr. 56.
- Küçükay, F. (2012): Das Getriebe hat auch in Elektrofahrzeugen Zukunft. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/antriebstechnik/das-getriebe-in-elektrofahrzeugen-zukunft/>. Abgerufen: 07.09.2020.
- Lawrenz, S.; Sharma, Priyanka, S.; Rausch, A. (2023): Recycling 4.0. <https://www.isse.tu-clausthal.de/forschung/laufende-projekte/recycling-40>. Abgerufen: 17.05.2023.
- Lindner, M.; Moritz, P.; Jung, J. (2019): Hairpin-Wicklungen für elektrische Fahrtriebe. 2. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik. Freiburger Forschungshefte; A 932. 1. Auflage, S. 140 – 154.
- Lerchs, H.; Grossmann, I. (1965): Optimum Design of Open-Pit Mines. *Transactions CIM*, Vol 68, S. 17 – 24.
- Manemann, S. (2017): Kurzschlussläufer/ Käfigläufer. <https://www.xploredna.net/mod/page/view.php?id=966>. Abgerufen: 23.09.2020.
- Mansholt, M. (2022): Von Premium zu Einzelteilen in 18 Sekunden: Apple-Roboter Daisy macht mit Ihrem iPhone kurzen Prozess. <https://www.stern.de/digital/smartphones/recycling--dieser-apple-roboter-zerlegt-ihr-iphone-in-18-sekunden-31825290.html>. Abgerufen: 15.05.2023.

- Martens, H.; Goldmann, D. (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Menger, K. (1927): Zur allgemeinen Kurventheorie. *Fundamenta Mathematicae*, Vol 10(1), S. 96 – 115.
- Mishra, S.; Sahoo, S.; Das, M. (2017): Genetic Algorithm: An Efficient Tool for Global Optimization. *Advances in Computational Sciences and Technology*, Vol 10, No. 8, S. 2201 – 2211.
- Moore, K., E.; Güngör, A.; Gupta, S., M. (2001): Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships. *European Journal of Operational Research*, Vol 135(2), S. 428 – 449.
- Mörl, L.; Gelbe, H. (2019): K7 Konstruktionselemente von Apparaten und Rohrleitungen. In: Grote, K.-H., Bender, B.; Göhlich, D. (2019): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 25. Auflage, Springer Vieweg.
- Nachtigall, W. (2002): *Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Nickel, W.; Fleischer, G. (1996): Einführung. In: *Recycling-Handbuch: Strategien – Technologie - Produkte*. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Neuhausen, J.; Andre, F.; Assmann, J.; Stürmer, C. (2020): Staying profitable in the new era of electrification – Powertrain study 2020. *Strategy&*.
- Nolte, M. (2019): Wie sich freie Werkstätten für die Elektromobilität rüsten können. Herth + Buss. <https://herthundbuss.com/branche-mehr/elektromobilitaet-werkstaetten/>. Abgerufen: 26.03.2020.
- Picard, J. C. (1976): Maximal Closure of a Graph and Applications to Combinatorial Problems. *Management Science*, Vol 22(11), S. 1268 – 1272.
- Radjou, N.; Prabhu, J. (2014): Frugal Innovation – How to do more with less. *The Economist*. http://naviradjou.com/wordpress/wp-content/uploads/2016/12/Frugal-Innovation_Intro-Chapter.pdf. Abgerufen: 26.04.2022.
- Randelhoff, M. (2020): Batterieelektrisch vs. Brennstoffzelle (H2) vs. Power-to-X im Straßenverkehr: Energieeffizienz, Wirkung auf das Energiesystem, Infrastruktur, Kosten und Ressourcen. *Zukunft Mobilität*. Abgerufen: 23.11.2020.
- RBTX (2023): Roboter. <https://rbtx.com/de-DE/components/robots>. Abgerufen: 17.05.2023.

- Regele, R.; Levi, P. (2005): Kooperative Multi-Roboter-Wegplanung durch heuristische Prioritätenanpassung. In: Levi, P.; Schanz, M.; Lafrenz, R.; Avrutin, V.: *Autonome Mobile Systeme*. 19. Fachgespräch, Stuttgart. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Rhys, J. M. W. (1970): A Selection Problem of Shared Fixed Costs and Network Flows. *Management Science*, Vol 17(3), S. 200 – 207.
- Rozenfeld, H. (2007): Reference Model for Managing Product Development. In: *Sustainability in Manufacturing – Recovery of Resources in Product and Material Cycles*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Ruhland, K. (2006): *Methoden und Werkzeuge zur recyclinggerechten Automobilentwicklung*. Dissertation, Universität Kaiserslautern.
- Schaltegger, S.; Hörisch, J.; Windolph, S. E.; Harms, D. (2012): *Corporate Sustainability Barometer 2012. Praxisstand und Fortschritt des Nachhaltigkeitsmanagements in den größten Unternehmen Deutschlands*. Center for Sustainability Management e.V.
- Schindler, V.; Müller, S. (2019): Q1 Kraftfahrzeugtechnik. In: Grote, K.-H., Bender, B.; Göhlich, D. (2019): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 25. Auflage, Springer Vieweg.
- Schmidt, F., R.; Wolf, T.; Nowak, G. (2016): *Roboter im deutschen Maschinenbau – Einsatzgebiete, Anforderungen und Auswirkungen*. PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.
- Schmidt, H. (2016): Deutschlands Zukunft in der Hand der Roboter. *Focus Magazin*, Nr. 2. https://www.focus.de/finanzen/news/wirtschaft-und-geld-deutschlands-zukunft-in-der-hand-der-roboter_id_5196107.html. Abgerufen: 13.04.2023.
- Schneider, B. (1999): *Recyclinginformationssysteme – Integration von Produktion und Recycling*. In: Gabler Edition Wissenschaft: *Informationsmanagement und Controlling*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schneider, R.; Öttl, M. (2016): Zuverlässigkeit von Leistungselektronik in elektrifizierten Antriebssträngen: Zufall oder vorhersagbar? *Forschungsforum der Österreichischen Fachhochschulen*.
- Schröter, B. (2020): *Genetische Algorithmen – Optimierung nach dem Ansatz der natürlichen Selektion*. <https://www.cologne-intelligence.de/blog/genetische-algorithmen#:~:text=Der%20Genetische%20Algorithmus%20kann%20schneller,Kombinationen%20vorher%20ausprobiert%20zu%20haben>. Abgerufen: 14.04.2023.

- Seliger, G. (2007): *Sustainability in Manufacturing – Recovery of Resources in Product and Material Cycles*. Springer Berlin, Heidelberg, New York.
- Seliger, G. (2019): *S6 Montage und Demontage*. In: Grote, K.-H., Bender, B.; Göhlich, D. (2019): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 25. Auflage, Springer Vieweg.
- Seelig, J. H.; Birkenfeld, S.; Keich, O.; Zeller, T. (2019): *Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft am Beispiel der automatisierten Demontage für Cascade Use Anwendungen und Recycling*. In: Thiel, S.; Holm, O.; Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D.; Friedrich, B.: *Recycling und Rohstoffe – Band 12*. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin.
- Seelig, J.; Birkenfeld, S.; Hansen, F.; Keich, O. (2022): *Innovative Geschäftsmodelle auf Basis der industriellen Demontage von Fahrzeugbaugruppen*. In: Gerth, S.; Heim, L. *Entrepreneurship der Zukunft*. Springer Gabler, Wiesbaden.
- Soh, S., L.; Ong, S., K.; Nee, A., Y., C. (2015): *Application of Design for Disassembly from Remanufacturing Perspective*. *Procedia CIRP*, Vol 26, S. 577 – 582.
- Spengler, T. (1994): *Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte: betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomisch effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten*. Band 67 von *Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis*. Erich Schmidt Verlag.
- Spichartz, P.; Sourkounis, C. (2013): *Measurement of Braking Energy Recuperation in Electric Vehicles*. 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, S. 1 – 9.
- Spiegel (2019): *Prognostizierte Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos und Plug-in-Hybriden weltweit in den Jahren 2020 bis 2030 (in Millionen)*. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/973273/umfrage/prognostizierte-anzahl-der-neuzulassungen-von-elektroautos-weltweit/>. Abgerufen: 25.03.2020.
- Spring, E. (2009): *Elektrische Maschinen – Eine Einführung*. 3. Auflage, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York.
- Stanek, R.; Flemming, J.; Kirchen, J.; Steiner, L.; Klein, A.; Knecht, T.; Rupp, M. (2021): *Wertschöpfungspotenziale von E-Motoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg*. Cluster Elektromobilität Süd-West c/o, e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Stuttgart.

- Statistisches Amt der Europäischen Union (Eurostat) (2023): Recycling rate of packaging waste by type of packaging. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm020/default/table?lang=de, Abgerufen: 11. April 2023
- Subauftrag (2023): Künstliche Intelligenz: Wenn der neue Arbeitskollege ein Roboter ist.... <https://www.subauftrag.com/kuenstliche-intelligenz-arbeitsplatz/>, Abgerufen: 13.04.2023.
- Thier, J. (2016): „Kuka bleibt ein deutsches Unternehmen“ – KUKA-CHEF REUTER IM INTERVIEW. Frankfurter Allgemeine, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/kuka-chef-reuter-im-interview-kuka-bleibt-ein-deutsches-unternehmen-14269838-p2.html>. Abgerufen: 13.04.2023.
- Torres, F.; Gil, P.; Puente, S., T.; Pomares, J.; Aracil, R. (2004): Automatic PC disassembly for component recovery. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 23, S. 39 – 46.
- Trapp, C., T., C.; Kanbach, D., K. (2021): Green entrepreneurship and business models: Deriving green technology business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, Vol 297, 126694.
- Uhlmann, E.; Kohl, H.; Krüger, J.; Lindow, K.; Rethmeier, M. (2022): MENSCH UND MASCHINE. *Futur 2/2022*, 24. Jahrgang.
- Umweltdatenbank (2021) (1): Das Umwelt-Lexikon – Wiederverwendung. quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K.. <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/49-lexikon-w/1079-wiederverwendung.html>. Abgerufen: 15.07.2021.
- Umweltdatenbank (2021) (2): Das Umwelt-Lexikon – Weiterverwendung. quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K.. <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/49-lexikon-w/2269-weiterverwendung.html>. Abgerufen: 15.07.2021.
- Umweltdatenbank (2021) (3): Das Umwelt-Lexikon – Wiederverwertung. quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K.. <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/49-lexikon-w/1080-wiederverwertung.html>. Abgerufen: 15.07.2021.
- Umweltdatenbank (2021) (4): Das Umwelt-Lexikon – Weiterverwertung. quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K.. <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/49-lexikon-w/2279-weiterverwertung.html>. Abgerufen: 15.07.2021.
- VDI (1993): *Getriebetechnische Grundlagen. Begriffsbestimmungen der Getriebe*. VDI 2127. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2002): *Recyclingorientierte Produktentwicklung*. VDI 2243. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

- Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (2021) Papier 2021 – Statistiken zum Leistungsbericht. https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/XX-LB/PAPIER2021-digital.pdf, Abgerufen: 11. April 2023.
- Vidyanandan, K., V., (2018): Overview of Electric and Hybrid Vehicles. Power Management Institute, NTPC Ltd., India.
- Voigt, K.-I. (2018): Automatisierung. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/automatisierung-27138/version-250801>. Abgerufen: 16.05.2023.
- Volkswagen (2022): Baukastenstrategie als Erfolgsformel: Der MQB feiert zehnjähriges Jubiläum. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/baukastenstrategie-als-erfolgsformel-der-mqb-feiert-zehnjaehriges-jubilaem-8030>. Abgerufen: 13.04.2023.
- Weintraut, D.; Hemmerle, A. (2023): Kreislaufwirtschaft Brennstoffzelle: ein Leben ist nicht genug. <https://www.iwu.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/PM-2023-IWU-Stack2P-Kreislaufwirtschaft-Brennstoffzellen.html>. Abgerufen: 15.05.2023.
- Westhof, F. (2021): Ermittlung optimaler Demontagetiefen für die automatisierte Demontage elektrischer Antriebsaggregate mit wechselnden Nachfrageprofilen. Masterarbeit, Betreuer: F. Hansen.
- Winterhagen, J. (2018): Einspritzpumpen für Elektronen. https://www.zf.com/mobile/de/stories_12480.html#. Abgerufen: 17.11.2020.
- Wintermann, J., H. (2015): Kleben ist das neue Schweißen. https://www.welt.de/print/die_welt/article148793221/Kleben-ist-das-neue-Schweissen.html. Abgerufen: 11.01.2021.
- Wuppertools (2006): Schraub-Lexikon – Daten und Fakten. https://www.wuppertools.de/pdf/wera/09_schraublexikon_de.pdf. Abgerufen: 04.05.2023.
- Wynn, D., C.; Eckert, C., M. (2017): Perspectives on iteration in design and development. Research in Engineering Design, Vol 28, S. 153 – 184.
- Zeller, T.; Birkenfeld, S.; Keich, O.; Nawothnig, B.; Seelig, J. H. (2016): Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung. Abschlussbericht.
- Zeller, T.; Seelig, J. H.; Birkenfeld, S.; Franke, H.; Hansen, F.; Keich, O.; Nawothnig, B.; Wisser, O. (2021): Nachhaltige Digitalisierung – Ultraeffizienz und Digitalisierung; Teilprojekt: Industrielle Demontagefabrik 4.0. Abschlussbericht.

- ZF Friedrichshafen (2020): Elektrischer Achsantrieb. ZF Friedrichshafen AG. https://www.zf.com/products/de/cars/products_29296.html. Abgerufen: 23.09.2020.
- ZirkulEA (2023): Projektbeschreibung ZirkulEA: Kreislauffähigkeit des Elektro-Antriebsstrangs durch intelligente Demontage und Nachverfolgung. <https://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/ZirkulEA/index.php?site=home>. Abgerufen: 17.05.2023.
- Zong, Z. (2023): Bessere Antworten durch Beseitigung reihenfolgebedingter Verfälschungen. SurveyMonkey. <https://www.surveymonkey.de/curiosity/bessere-antworten-durch-beseitigung-reihenfolgebedingter-verfaelschungen/>. Abgerufen: 15.05.2023.
- ZSW (2020): Weltweite Bestandsentwicklung von Elektroautos in den Jahren 2012 bis 2019. Statista GmbH. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168350/umfrage/bestandsentwicklung-von-elektrofahrzeugen/abc>. Abgerufen: 25.03.2020.
- Zussman, E.; Kriwet, A.; Seliger, G. (1994): Disassembly-Oriented Assessment Methodology to Support Design for Recycling. CIRP Annals, Vol 43(1), S. 9 – 14.
- Zwicky, F. (1989): Morphologische Forschung Wesen und Wandel materieller und geistiger struktureller Zusammenhänge. 2. Auflage.

11. Anhang

11.1 Anhang 1: Fragenkatalog der Industrieumfrage

Nach Hansen und Seelig [2021]:

Allgemeine Fragen:

Frage 1: In welcher Branche bewegt sich das Kerngeschäft Ihres Unternehmens?

Mögliche Antworten:

Agrartechnik	Kunststoff- und Gummitechnik
Anlagenbau	Maschinenbau
Antriebstechnik	Mess-, Prüf- und Regeltechnik
Armaturen, Pumpen, Verdichter	Metallbearbeitungsmaschinen
Baumaschinen und Baustoffanlagen	Metallurgie
Bergbaumaschinen	Motorenbau
Dienstleistungen	Nahrungsmittelmaschinen
Elektrik/Elektronik/Multimedia	Präzisionswerkzeuge
Elektrische Automation	Robotik und Automation
Energieerzeugung	Textil
Fahrwerkstechnik	Thermoprozesstechnik
Heizung, Klima, Lüftung	Verfahrenstechnik
Keramik- und Glasindustrie	Verpackungsmaschinen
Konstruktion/Design	Werkzeugmaschinen
Kraftfahrzeugbau	

Frage 2: Was produziert Ihr Unternehmen?

Mögliche Antworten:

- Bauteile
- Baugruppen
- Endprodukte
- Dienstleistungen
- Andere (Textfeld)

Frage 3: Wie viele Mitarbeiter beschäftigt Ihr Unternehmen?

Mögliche Antworten:

- 1–50
- 51–250
- 251–500
- 501–2000
- 2001–5000
- > 5000

Frage 4: In welchem Bereich Ihres Unternehmens arbeiten Sie?

Mögliche Antworten:

Geschäftsführung	Umwelt-/Energie-/Wertstoffmanagement
Vertrieb	Verwaltung
Qualitätsmanagement	Marketing
F&E	Andere (Textfeld)
Produktion	

Frage 5: Wie umweltbewusst schätzen Sie Ihr Unternehmen ein?

Antwort per Schieberegler (1–100)

Frage 6: Gibt es in Ihrem Unternehmen ein System für...

- Umweltmanagement?
- Nachhaltigkeitsmanagement?
- Ideenmanagement?
- Energiemanagement?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 7: Bitte beurteilen Sie die Bedeutung von Ressourceneffizienz in Ihrem Unternehmen hinsichtlich...

Antwort per Schieberegler (1–100)

Spezifische Fragen:

Frage 8: Kannten Sie den Begriff *recyclinggerechte Konstruktion* vor dieser Umfrage?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 9: Was verstehen Sie unter *recyclinggerechter Konstruktion*?

Freitextantwort

Frage 10: Welche Rolle spielt *recyclinggerechte Konstruktion* in Ihrem Unternehmen?

Freitextantwort

Frage 11: Bewerten Sie allgemein den Einfluss recyclinggerechter Konstruktion im Produktentstehungsprozess auf langfristige ökonomische Ziele

Antwort per Schieberegler (1–100)

Materialien und Recycling:

Frage 12: Welche Eigenschaften Ihrer Produkte unterliegen einem schnellen Wandel?

Freitextantwort

Frage 13: Besteht noch eine signifikante Nachfrage nach älteren Generationen Ihrer Produkte, sobald sie eine innovativere Produktserie auf den Markt bringen?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 14: Wäre die Vermarktung der reinen Leistung Ihrer Produkte/ Maschinen/ Anlagen anstatt des Verkaufs ein denkbare Geschäftsmodell?

Mögliche Antworten:

Wird bereits angeboten

Ist in Planung

Wird nicht geplant

Konkurrenz setzt es bereits um

Frage 15: Werden in Ihrem Unternehmen gebrauchte Produkte wieder aufbereitet?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 16: Warum werden gebrauchte Produkte nicht wieder aufbereitet?

Freitextantwort

Frage 17: Würden Sie sagen, dass eine Wiederaufbereitung Ihrer Produkte einen höheren Anteil manueller Arbeit erfordert/ erfordern würde, als die Neuproduktion?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 18: Wie schätzen Sie die Bereitschaft Ihrer Kunden ein, wiederaufbereitete Produkte/ Ersatzteile zu beziehen?

Antwort per Schieberegler (1–100)

Frage 19: Würden Sie sagen, dass die Vermarktung gebrauchter Produkte die Innovationskraft Ihres Unternehmens hemmen könnte?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 20: Wem ist die Materialzusammensetzung sämtlicher Komponenten Ihrer Produkte bekannt?

Mögliche Antworten:

Unseren Zulieferern

Unserem Unternehmen

Unseren Kunden

Frage 21: Wie stark schätzen Sie die Gefährdung der Verfügbarkeit von Ihnen verwendeter Rohstoffe in Zukunft ein?

Antwort per Schieberegler (1–100)

Frage 22: Trat in der Vergangenheit bereits eine Knappheit eines von Ihnen benötigten Rohstoffes auf, die Ihr Unternehmen beeinflusst hat?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 23: Wie hoch ist Ihre Abhängigkeit von Zulieferern und/ oder Auftraggebern, sodass Produktmodifikationen schwerer umgesetzt werden können?

Antwort per Schieberegler (1–100)

Frage 24: Seit wann werden in Ihrem Unternehmen Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz im Bereich Produktgestaltung/-design oder Konstruktion durchgeführt?

Mögliche Antworten:

- weniger als 1 Jahr
- weniger als 5 Jahre
- weniger als 10 Jahre
- weniger als 20 Jahre
- weniger als 30 Jahre
- 30 Jahre oder länger

Frage 25: Sind Ihnen die Vorgehensweisen und Herausforderungen beim Recycling Ihrer Produkte bekannt?

Mögliche Antworten:

- ja
- nein

Konstruktion und Demontage:

Frage 26: In welcher Form wird im Konstruktionsprozess Rücksicht auf das Recycling am End-of-Life genommen?

Mögliche Antworten:

- Leichtere Demontierbarkeit
- Verzicht auf Compounds
- Fokus bei besonders recyclingfähigen Materialien
- Geringe Anzahl verschiedener Materialien
- Bislang noch nicht
- Andere (Textfeld)

Frage 27: Was sind hierbei die besonderen Herausforderungen?

Freitextantwort

Frage 28: Vor welchem Hintergrund werden in Ihrem Unternehmen Ansätze der recyclinggerechten Konstruktion in der Produktentwicklung verfolgt?

Mögliche Antworten:

- Gesetzgebung
- Konkurrenzfähigkeit
- Erschließung von Fördermöglichkeiten
- Andere (Textfeld)

Frage 29: Schätzen Sie bitte den erforderlichen Mehraufwand für recyclinggerechte Konstruktion ein:

Antwort per Schieberegler (1–100)

Frage 30: Können Sie sich vorstellen, dass recyclinggerechte Konstruktion in Zukunft eine stärkere Bedeutung in Ihrem Unternehmen erfährt?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 31: Bitte bewerten Sie folgende Aussage: „Das frühzeitige Einbeziehen recyclinggerechter Konstruktion führt zu einer leichteren Automatisierbarkeit der Demontage unserer Produkte.“

Antwort per Schieberegler (1–100)

Frage 32: Was hindert Sie daran, die Demontierbarkeit Ihrer Produkte weiter zu steigern?

Mögliche Antworten:

Kundenwünsche/-akzeptanz, die den Maßnahmen entgegenstehen

Mangelnde Bereitschaft in der Produktion zur Veränderung bestehender Prozesse

Konflikte zu politischen oder gesetzlichen Vorgaben

Andere (Textfeld)

Frage 33: Schätzen Sie bitte den erforderlichen Mehraufwand für eine demontagerechte Konstruktion ein:

Antwort per Schieberegler (1–100)

Frage 34: Was wären Ihrer Meinung nach die größten Herausforderungen bei der Realisierung einer vollständig automatisierten Demontage Ihrer Produkte?

Mögliche Antworten:

Untrennbare Verbindungen

Große Dimension der Produkte (bspw. Großanlagen)

Zu hohe technische Komplexität

Fehlende Datenbasis für Demontage (bspw. CAD-Daten)

Zu geringe Stückzahlen

Unbekannter Zustand

Andere (Textfeld)

Frage 35: Ist eine Wiederverwendung von (Teil-)Komponenten Ihrer hergestellten Produkte realisierbar?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 36: Warum nicht?

Freitextantwort

Frage 37: Bieten Sie wiederaufbereitete Bauteile/ Maschinen/ Anlagen in Ihrem Portfolio an?

Mögliche Antworten:

ja

nein

Frage 38: Welche Aspekte sind Ihrer Meinung nach am wichtigsten, wenn ein Produkt Ihrer Branche wiederverwendet werden soll?

Mögliche Antworten:

Betriebssicherheit

Lebensdauer

Optik

Aktueller Stand der Technik

Andere (Textfeld)

Frage 39: Bitte schätzen Sie die durchschnittliche Lebensdauer Ihrer Produkte ein:

Mögliche Antworten:

weniger als 1 Jahr

weniger als 5 Jahre

weniger als 10 Jahre

weniger als 20 Jahre

weniger als 30 Jahre

30 Jahre oder länger

Frage 40: Wurde in Ihrem Unternehmen bereits externe Beratung in Anspruch genommen hinsichtlich den Themen Recyclinggerechte Konstruktion oder Ressourceneffizienz?

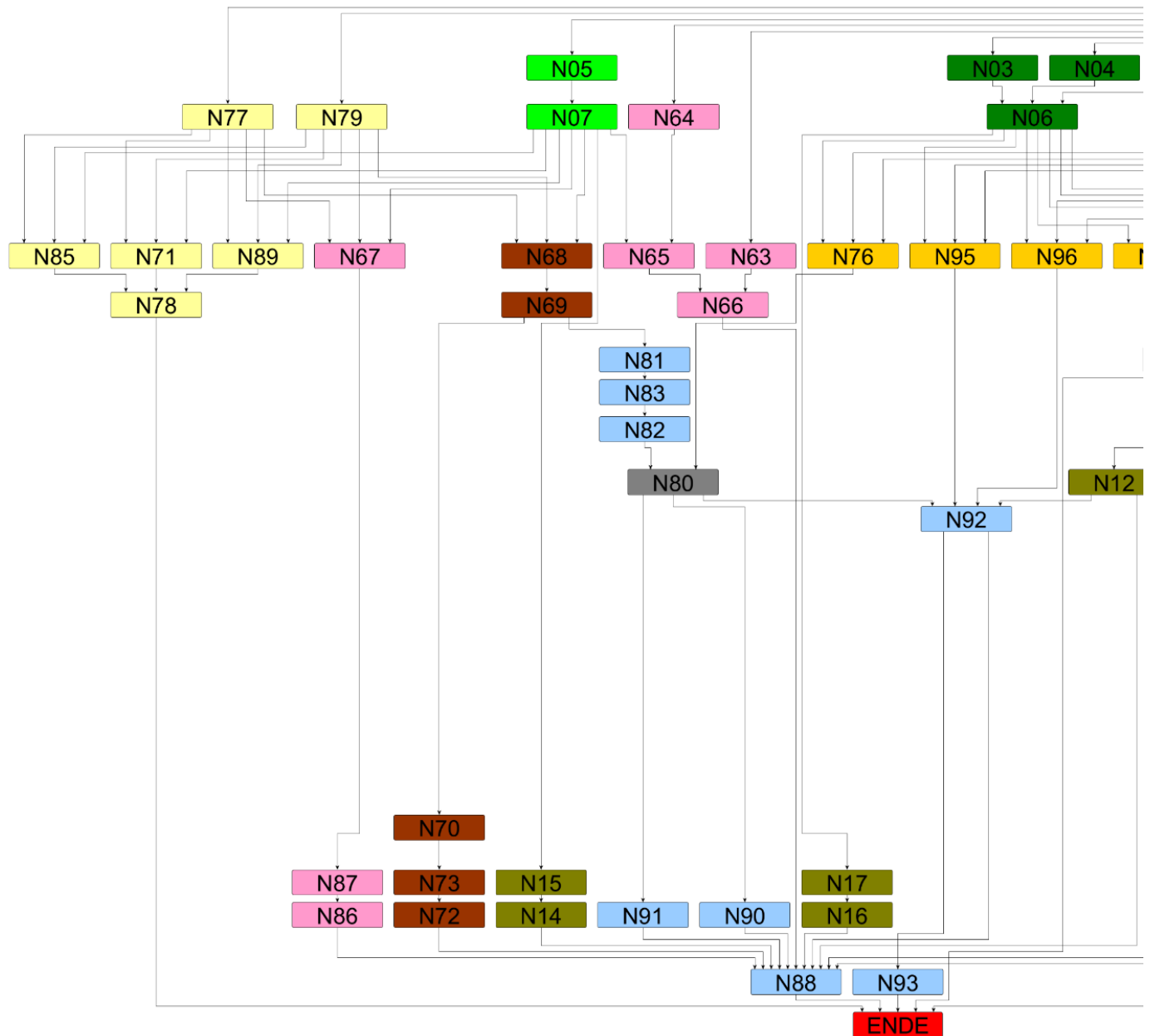
Mögliche Antworten:

ja

nein

11.2 Anhang 2: Demontagegraph des EAA mit Knotennummern

Die zu den Knotennummern korrespondierenden Bauteilgruppenbezeichnungen finden sich im folgenden Anhang 3.



11.3 Anhang 3: Zustands- und Re-X Faktoren im Basisszenario

Knotennummer	Bauteilgruppenbezeichnung	Re-X Faktor	Zustandsfaktor
	EAA	0,2928	0,2835
N01	E10x40 mit Flansch und Schaft {A}	0,05	0,25
N02	Gehäuseabdeckung (nicht getriebeseitig)	0,9	0,25
N03	Blindstopfen M10	0,05	0,25
N04	Blindstopfen M14	0,05	0,25
N05	Blindstopfen M16	0,05	0,25
N06	Kühlmittel	-1	0,25
N07	Getriebeöl	-2	0,25
N08	Druckausgleichventil	0,1	0,25
N09	E10x15 mit Flansch	0,05	0,25
N10	Kabelbrücke	0,9	0,5
N11	Abdeckkappe für Kühlflüssigkeit	0	0,25
N12	Steckverbinder	0,9	0,5
N13	Inbus 5x16 Zylinderkopf	0,05	0,25
N14	Drehzahlgeber	0,8	0,5
N15	E10x16 mit Flansch	0,05	0,25
N16	Kühlmittelleitung kurz	0,5	0,25
N17	T27x20 Linsenkopf	0,05	0,25
N18	Gehäusedeckel Leistungselektronik	0,9	0,25
N19	Steuerungselektronik	0,8	0,5
N20	Kunststofffixierung für Steuerungselektronik	0,5	0,25
N21	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {A}	0,05	0,25
N22	Abdeckkappe für Steuerungselektronik	1	0,25
N23	T15x16 Linsenkopf mit Flansch und Schaft	0,05	0,25
N24	Temperatursensor LE	0,8	0,5
N25	T27x18 Linsenkopf	0,05	0,25
N26	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {B}	0,05	0,25
N27	Halter Hauptstromkabel Fixierung	0,95	0,25
N28	T45x18 Linsenkopf	0,05	0,25
N29	Starkstromkabel	0,9	0,5
N30	T20x20 Linsenkopf	0,05	0,25
N31	feste Stromleitung / kurz / blauer Kontakt	0,9	0,5
N32	feste Stromleitung / lang / schwarzer Kontakt	0,9	0,5
N33	feste Stromleitung / mittel / gelber Kontakt	0,9	0,5
N34	Gummistopfen	1	0,25
N35	T10x10 mit Flansch	0,05	0,25

N36	T10x12 mit Grobgewinde	0,05	0,25
N37	Leistungsüberwachung der LE	0,8	0,5
N38	Dichtung Kunststoffführung LE	0	0,25
N39	Kunststoffführung der festen Stromleitungen	0,5	0,25
N40	Aluminiumspange für Durchführleitung	0,7	0,25
N41	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {C}	0,05	0,25
N42	Spange Flachbandkabel	0,2	0,25
N43	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {D}	0,05	0,25
N44	T27x10 Zylinderkopf mit Flansch	0,05	0,25
N45	T25x16 Linsenkopf	0,05	0,25
N46	DC / DC Konverter	0,7	0,5
N47	Kontaktierungselement LE	0,9	0,5
N48	T25x12 Linsenkopf mit Flansch	0,05	0,25
N49	T27x14 Zylinderkopf mit Flansch	0,05	0,25
N50	Dichtung SiC-Modul	0	0,25
N51	SiC-Modul	0,7	0,5
N52	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {E}	0,05	0,25
N53	E10x20 mit Flansch {B}	0,05	0,25
N54	Kühlmittelleitung unterhalb LE	0,5	0,25
N55	Halter Hauptstromkabel Arm	0,95	0,25
N56	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {F}	0,05	0,25
N57	Aluminiumblech Abdeckung Kühlmittel	0,95	0,25
N58	T15x10 Linsenkopf mit Flansch {G}	0,05	0,25
N59	Dichtung Aluminiumblech LE	0	0,25
N60	Druckausgleichventil LE	0,3	0,25
N61	Blindstopfen LE	0,05	0,25
N62	Gehäuse LE	0,9	0,25
N63	Sicherungsring groß Hauptwelle	0,1	0,25
N64	Sicherungsring klein Hauptwelle	0,1	0,25
N65	Abtreibende Welle (lang)	0,8	0,25
N66	Gedichtetes Wälzlager (62mm Außen)	0,2	0,25
N67	Differential + Lager + Welle	0,2	0,25
N68	Radialkugellager 62mm Außen	0,2	0,25
N69	Drehzahlzahnrad	0,9	0,25
N70	Zahnrad 24 / 67 Zähne	0,2	0,25
N71	Schräggugellager 90mm Außen {A}	0,2	0,25
N72	Anlaufscheibe 90mm	0,1	0,25
N73	Schräggugellager 90mm Außen {B}	0,2	0,25
N74	Anlaufscheibe 68mm	0,1	0,25

N75	Federscheibe 68mm	0,1	0,25
N76	Wälzlager 68mm gedichtet	0,2	0,25
N77	E10x40 mit Flansch und Schaft {B}	0,05	0,25
N78	Gehäuseabdeckung (getriebeseitig)	0,9	0,25
N79	Staubschutzscheibe	0,05	0,25
N80	Rotor	0,7	0,25
N81	Sicherungsring 100mm	0,1	0,25
N82	Sicherungsring spitze Enden	0,1	0,25
N83	Abdeckring	0,05	0,25
N84	Druckausgleichsventil (groß)	0,3	0,25
N85	Simmerring (50 mm Außen und 34 mm Innen) {A}	0,1	0,25
N86	Simmerring (50 mm Außen und 34 mm Innen) {B}	0,1	0,25
N87	Anlaufscheibe 75mm	0,1	0,25
N88	Hauptgehäuse	0,9	0,25
N89	Federscheibe Seitendeckel (getriebeSeite) Rotor- welle	0,1	0,25
N90	Dichtring 88 mm Außen	0,1	0,25
N91	Radialkugellager 95 mm Außen	0,2	0,25
N92	Stator + inneres Gehäuse	0,7	0,25
N93	O-Ring am Stator	0	0,25
N94	Dichtung Kabeldurchführung	0	0,25
N95	E10x20 mit Flansch {A}	0,05	0,25
N96	E12x32 mit Flansch	0,05	0,25
N97	T45x36 Linsenkopf mit Schaft	0,05	0,25

11.4 Anhang 4: Bewertung der Anwendung der Gestaltungsgrundregeln angelehnt an die VDI-Richtlinie 2243 am Beispiel des EAA

		Skala (1-5)					Ergebnis	Ergebnis ungewichtet		
		A	B	C	D	E				
Baustruktur		A1	3,00	2,00	2,00	2,00	3,00	0,21	0,10	
	1,00	A2	2,00	3,00	3,00	4,00	1,00	0,10	0,11	
		A3	2,00	1,00	1,00	2,00	2,00	0,14	0,07	
		A4	4,00	2,00	2,00	2,00	4,00	0,00	0,00	
		A5	1,00	2,00	1,00	2,00	4,00	0,00	0,00	Zwischenergebnis
		A6	5,00	4,00	1,00	3,00	2,00	0,11	0,13	2,24
		Materialien und Oberflächen								
		B1	-	1,00	-	1,00	2,00	0,03	0,06	
1,00	B2	4,00	-	-	-	3,00	0,07	0,15		
	B3	-	4,00	-	4,00	3,00	0,11	0,15		
	B4	-	-	-	-	1,00	0,01	0,04		
	B5	2,00	4,00	-	4,00	2,00	0,15	0,13		
	B6	-	4,00	-	5,00	-	0,05	0,19		
	B7	-	-	-	-	-				
	B8	3,00	-	-	-	2,00	0,08	0,10	Zwischenergebnis	
	B9	-	-	-	-	-			2,433333333	
	Demontage und Verbindungstechnik									
		C1	4,00	2,00	3,00	2,00	3,00	0,14	0,12	
1,00	C2	4,00	2,00	3,00	2,00	-	0,00	0,00		
	C3	-	3,00	3,00	3,00	3,00	0,08	0,13		
	C4	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	0,21	0,12		
	C5	4,00	-	3,00	-	1,00	0,20	0,11		
	C6	3,00	3,00	2,00	4,00	3,00	0,30	0,13		
	C7	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,25	0,08		
	C8	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,04	0,06	Zwischenergebnis	
	C9	3,00	4,00	-	5,00	-	0,10	0,17	2,62	
	Betriebsstoffentnahme									
		D1	3,00	2,00	1,00	2,00	4,00	0,04	0,10	
1,00	D2	4,00	1,00	2,00	2,00	3,00	0,06	0,10	Zwischenergebnis	
	D3	3,00	-	-	-	-	0,03	0,13	2,52	

11.5 Anhang 5: Logik der Demontagesequenz auf der Testbench

