

FAT-Schriftenreihe 376

Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität
Eine Studie zur Optimierung der Demontage



Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität

Eine Studie zur Optimierung der Demontage

Forschungsstelle

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum

Dipl.-Biol. Jan H. Seelig, M.Eng.

Dr. Oliver Wisser

Florian Hansen, M.Sc.

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobil-
technik e.V. (FAT) gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung & Hintergrund.....	6
1.1.	Elektromobilität & Kreislaufwirtschaft	6
1.2.	Vorarbeiten zur automatisierten Demontage	8
1.3.	Projektziel	10
2.	Re-X Optionen für Rotoren	11
3.	Analyse der Demontageprozesse	16
3.1.	Demontage des Ford Motors.....	16
3.1.1.	Übersicht über das Aggregat	16
3.1.2.	Dokumentation der Demontageschritte.....	16
3.2.	Demontage des VW ID.4 Motors.....	38
3.2.1.	Übersicht über das Aggregat	38
3.2.2.	Dokumentation der Demontageschritte.....	39
4.	Design-for-Re-X Ansätze	57
5.	Exceltool zur Berechnung optimaler Demontagetiefen	62
5.1.	Vorstellung des Exceltools	62
5.2.	Berechnungsmethoden	62
6.	Fazit & Ausblick.....	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl zugelassener Pkw mit ausschließlich elektrischem Antrieb (BEV) in Deutschland von 2012 bis 2023.....	7
Abbildung 2:	Im Rahmen von Demontageaktivitäten anzustrebende Re-X-Optionen	8
Abbildung 3:	Technik am CUTEC zur automatisierten Demontage	9
Abbildung 4:	Schematisch vereinfachter Querschnitt in Elektrofahrzeugen verbauter Rotoren permanenterregter Antriebsaggregate.....	11
Abbildung 5:	Das Ford E-Transit Antriebsaggregat im Anlieferzustand.....	16
Abbildung 6:	Leistungselektronik des E-Transit Antriebsaggregats	17
Abbildung 7:	Demontierter Deckel der Stromschienen bei der Verbindungsstelle von elektrischer Maschine und Leistungselektronik	17
Abbildung 8:	Untersicht der demontierten Leistungselektronik und Draufsicht auf Stromschienen, die aus der elektrischen Maschine ragen	18
Abbildung 9:	Angeraute und mit Resten der Dichtmasse versehene Dichtflächen sowie korrodierter Passstift.....	18
Abbildung 10:	Seitenansicht auf Getriebedeckel mit eingestecktem Schonstopfen, demontierte trilobulare Schrauben, Stehbolzen und Konterpunkte an Getriebedeckel.....	19
Abbildung 11:	Im Getriebedeckel fixiertes Hohlrad und Ansatz eines Hebelwerkzeugs an Konterpunkten.....	20
Abbildung 12:	Demontierter Getriebedeckel mit peripheren Bauteilen, eingepresstes Radialkugellager im Getriebedeckel	20
Abbildung 13:	Nahaufnahme der Enden des Sicherungsrings und demontiertes Hohlrad mit angeklebten Metallspangen	21
Abbildung 14:	Nahaufnahme von Differential und Planetengetriebe sowie inneres Radialkugellager	22
Abbildung 15:	Leicht abgehobener E-Maschinendeckel zur Demontage des Elektrosteckers.	22
Abbildung 16:	Nahaufnahme des stark verschmutzten Elektrosteckers im E-Maschinendeckel	23
Abbildung 17:	E-Maschinendeckel mit montierter langer Welle, lange Welle, Radialkugellager und Wellendichtring, die E-Maschinendeckel und lange Welle verbinden	24
Abbildung 18:	Sicht auf das Aggregat nach Entfernen des E-Maschinendeckels.....	24
Abbildung 19:	Baugruppe Rotor & Parkbremse, aus dem Stator gezogen	25
Abbildung 20:	Ölrohr, welches am Rotorschild befestigt ist, sowie 6-poliger Stecker des Drehzahlgebers und gelöster Stecker (10-polig) mit Entriegelungssicherung.....	25
Abbildung 21:	Halteblech des Kabelbaums und Parksperrenrad.....	26

Abbildung 22: Halteelement der Parksperre mit gelösten Schrauben sowie Sicht auf teildemontierte Parksperre mit ausgefederter Sperrklinke	27
Abbildung 23: Aktuator der Parksperre, Halterung des Aktuators, eingehängte Schubstange im Aktuator, Haltebolzen der Sperrklinke	28
Abbildung 24: Sperrklinke am Parksperrenrad, zentrale Nutmutter zur Befestigung des Parksperrenrads, Demontage des Parksperrenrads an von der Kerbverzahnung der Rotorwelle.....	29
Abbildung 25: Demontage des getriebeseitigen Radialkugellagers vom Rotor mittels eines dreiarmligen Lagerabziehers.....	29
Abbildung 26: Vorbereitung für das Ausschlagen des Rotors aus dem Rotorschild und getrennter Rotorschild und Rotor	30
Abbildung 27: Demontage des auf die Rotorwelle aufgedrückten Radialkugellagers auf Seite der E-Maschine	30
Abbildung 28: Äußerer Teil des Drehzahlgebers	31
Abbildung 29: Abhebeln des inneren Teils des Drehzahlsensors und des davor aufgedrückten Spannrings	31
Abbildung 30: Stahlring aus der Umlaufnut an der Rotorwelle	32
Abbildung 31: Flachmutter der Rotorwelle während der Demontage mittels eines Winkelschleifers, demontierte und zerstörte Flachmutter nach erfolgter Demontage.....	33
Abbildung 32: Elektroblechpaket mitsamt eingeklebten Permanentmagneten.....	33
Abbildung 33: Stromschienen-Element zur Kontaktierung zwischen Stator und Leistungselektronik. Links: Rot umrandet: Die drei Sechskantschrauben der Kontaktierung zum Stator	34
Abbildung 34: Stator, Zustand nach Demontage des Stromschienen-Elements. Steckerverbindung zum Temperatursensor. Nahaufnahme der Steckerverbindung	35
Abbildung 35: Stirnseitige Verschraubung des Stators im Hauptgehäuse	35
Abbildung 36: Zugänglichkeit zum Stator zwecks Entnahme aus dem Hauptgehäuse. Getriebeseitige Ansicht.	36
Abbildung 37: Stator nach Entnahme aus dem Hauptgehäuse	36
Abbildung 38: Ölrohr im Hauptgehäuse. Einbaulage hinter dem Stator.....	37
Abbildung 39: Ölpumpe: Im eingebauten Zustand, Steckeranschluss, herausgezogen.....	37
Abbildung 40: Das ID.4 Antriebsaggregat im Anlieferungszustand	38
Abbildung 41: Markierungen an Gehäuseteilen des ID.4 Aggregats	39
Abbildung 42: Blindstopfen zum Ablassen des Getriebeöls am ID.4 Aggregat	39
Abbildung 43: Peripher zu demontierende Komponenten am ID.4 Aggregat: Motoraufhängung und Kabelhalterung.....	40

Abbildung 44: Peripher montierte, lackierte Kabelhalterung	40
Abbildung 45: Kühlmittelstutzen (gewinkelt).....	41
Abbildung 46: Kühlmittelstutzen am äußeren Hauptgehäuse (elektrofachseitig)	42
Abbildung 47: Elektrofachdeckel im demontierten Zustand.....	43
Abbildung 48: Elektrofach mit Sensoreinheit zur Messung der Drehzahl sowie der Temperatur der Statorwicklung	44
Abbildung 49: Position der fixierenden Schrauben der Elektronikeinheit	44
Abbildung 50: Steckverbinder für die Temperaturmessung sowie der Statorpin, auf den dieser aufgesteckt ist.....	44
Abbildung 51: Demontierte Sensoreinheit	45
Abbildung 52: Kontaktierungselement zwischen Stator und Leistungselektronik.....	45
Abbildung 53: Geberrad für den Drehzahlsensor. Montiert, demontiert, Druckscheibe, Sicherungsring.	46
Abbildung 54: Gleichlaufgelenkwelle. Steckverbindung mit Kerbverzahnung und Gelenkkörper	47
Abbildung 55: Geöffneter Getriebedeckel mit Differential und Ölwanne	48
Abbildung 56: Lagerabdeckungen sowie darunter liegende Enden der Zahnradwellen	48
Abbildung 57: Demontierte Getriebezahnräder: Abtreibendes Zahnrad des Rotors sowie Zwischenwelle.....	49
Abbildung 58: Getriebedeckel vor Demontage der hier verbauten Lager	50
Abbildung 59: Demontage des Differentials	51
Abbildung 60: Lager der Zwischenwelle im Hauptgehäuse	51
Abbildung 61: Distanzring auf der Motorwelle	52
Abbildung 62: Gehäusespannschrauben	53
Abbildung 63: Öffnen des Hauptgehäuses: Demontieren der Spannschrauben, Trennen der Gehäuseteile, Ziehen des Gehäuseteils der elektrischen Maschine	53
Abbildung 64: Haupt-Gehäuseteile: Getriebegehäuse, Gehäuseteil des Elektrofachs, zentrales Hauptgehäuse mit Stator.....	54
Abbildung 65: Demontage der stirnseitigen Aluminiumscheiben des Rotors mittels Hebel	54
Abbildung 66: Zerstörende Demontage der Rotorbleche sowie Detailaufnahme der Schränkung des Blechpakets.....	55
Abbildung 67: Verortung identifizierter Design-for-Re-X-Ansätze in den Wirkungsfeldern Morphologie, Prozess und Material	57

1. Einleitung & Hintergrund

Wie können ökonomische und ökologische Interessen miteinander in Einklang gebracht werden? Dies ist eine, wenn nicht die zentrale Frage, wenn es um die Umsetzung des Nachhaltigkeitsgedankens in Industrie und Wirtschaft geht. Unternehmen stehen in ständigem Wettbewerb auf nationaler und internationaler Ebene und sind damit dem Druck der Kostenminimierung und Effizienzsteigerung ausgesetzt. Gleichzeitig strebt die Gesellschaft westlicher Staaten zunehmend in Richtung eines nachhaltigen Wirtschaftens, getrieben von dem Gedanken des Erhalts unserer natürlichen Lebensgrundlagen.

Vor diesem Spagat steht die Automobilindustrie bei der Transformation hin zur Elektromobilität. Wirtschaftsstrategische Ressourcen müssen unter hohem Aufwand als Primärrohstoffe gefördert, aufbereitet und anschließend über lange Transportwege nach Deutschland befördert werden, um die Umstellung zu einem klimaneutralen Individualverkehr zu gewährleisten. Obwohl es ökologisch sinnvoll wäre, Sekundärrohstoffe oder ganze Bauteile auch unter hohem Aufwand aus stillgelegten Elektrofahrzeugen zu bergen, werden immer noch präferiert Primärrohstoffe aufgrund günstiger Weltmarktpreise und unzureichender Recyclingoptionen importiert. Ein Umdenken findet hier inzwischen zunehmend auch in der Industrie statt, da Lieferketten teils von einzelnen Zulieferländern abhängen. Neben den dadurch entstehenden ökologischen Kosten stellt die Anfälligkeit für Störungen dieses sensiblen Systems ein immenses ökonomisches Risiko dar. Bei solch einem Szenario droht eine Kostenexplosion durch stark ansteigende Rohstoffpreise sowie Produktionsstillstände. Vor diesem Hintergrund rückt die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft unter Nutzung von Sekundärrohstoffen sowie Wiedergewinnung von Bauteilen zunehmend in den Fokus der Automobilindustrie.

1.1. Elektromobilität & Kreislaufwirtschaft

Im Zuge der Transformation hin zur Elektromobilität steigt die Anzahl zugelassener E-Fahrzeuge in Deutschland stetig an (Abbildung 1) und damit auch die in Zukunft zu erwartende Menge an Rückläufern. Elektrofahrzeuge enthalten neben Materialien wie Aluminium, Stahl und Kunststoffen besonders große Mengen werthaltiger Rohstoffe (z.B. Kupfer, Seltene Erden, Halbleiter) und Komponenten (z.B. NdFeB-Permanentmagnete, Leistungselektronik, Batteriezellen). Obwohl für Elektrofahrzeuge neue innovative Recyclingkonzepte notwendig wären, basiert deren Verwertung in Deutschland bisher noch auf den gleichen Strukturen wie die Verwertung von Verbrennerfahrzeugen. In einem ersten Prozess werden dabei von zertifizierten Demontagebetrieben Betriebsmittel (z.B. Motoröl) abgelassen sowie schadstoff- und wertstoffhaltige Bauteile (z.B. Batterien, Katalysatoren) ausgebaut. Die Restkarossen werden geschreddert und die Metalle in Schmelzhütten recycelt. Obwohl

eine hohe Recyclingquote erreicht wird (Stand 2020: 87 %)¹, findet mehrheitlich ein Downcycling statt. Problematisch ist zudem, dass ca. 85 % der Altfahrzeuge nicht den Weg in das Recyclingsystem finden. Ein Grund ist, dass der Verkauf und Export dieser Altfahrzeuge in das Ausland lukrativer ist als das Recycling im Inland. Nach einer (Weiter)Nutzungsphase werden diese Exporte aufgrund fehlender Recyclingauflagen und -infrastruktur in den Importländern meist auf ungeordneten Deponien entsorgt. Die Rohstoffe sind damit nicht nur für den Standort der Exportländer wie Deutschland verloren, sondern auch global nicht mehr für die Wirtschaft verfügbar². In Bezug auf die Elektromobilität bedeutet dies einen weitaus größeren Verlust an Rohstoffen, als dies schon bei Verbrennern der Fall ist. Gerade unter diesem Gesichtspunkt muss ein wirtschaftlicher Anreiz geschaffen werden, welcher die Kreislaufwirtschaft im Inland stärkt.

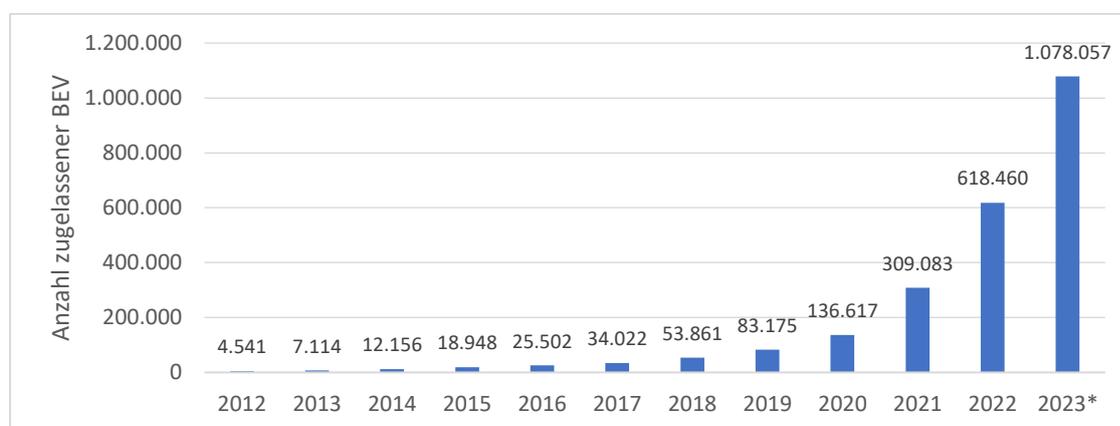


Abbildung 1: Anzahl zugelassener Pkw mit ausschließlich elektrischem Antrieb (BEV) in Deutschland von 2012 bis 2023, jeweils zum Stichtag 1. Januar; *Stand: 1. April 2023 (Quelle: KBA³)

Eine Lösung bietet die zerstörungsfreie Demontage von E-Antrieben, welche gegenüber dem derzeit gängigen stofflichen Recycling (Material Recovery) höherwertige Re-X-Optionen, wie ReUse, Refurbishment und Remanufacturing ermöglicht (Abbildung 2). Trotz des ökologischen Vorteils ist die manuelle Demontage standortabhängig mit hohen Lohnkosten verbunden und daher ökonomisch nicht sinnvoll. So wird diese bisher bei Antriebsaggregaten nur bei relativ leicht zugänglichen und sortenreinen Komponenten durchgeführt, beispielsweise bei der Bergung von Kupfersträngen, analog zum Recycling von Elektromotoren aus der Industrie⁴. Dabei findet aus Zeit- und Kostengründen

¹ www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#altfahrzeug-verwertungsquoten

² Martens, H., & Goldmann, D. (2016). *Recyclingtechnik*. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden.

³ www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Vierteljaehrlicher_Bestand/vierteljaehrlicher_bestand_node.html

⁴ um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Abschlussbericht_Demontagefabrik_I.pdf

oftmals auch keine zerstörungsfreie Demontage statt, wodurch eine Wiederverwendung von Bauteilen praktisch nicht möglich ist.

Die robotergestützte automatisierte Demontage bietet hier eine ökonomisch adäquate Lösung, indem komplette Bauteile unter Vermeidung hoher Personalkosten zerstörungsfrei geborgen werden können. Gerade im Hinblick auf den technologischen Fortschritt der letzten Jahre im Bereich Roboter-, Prozess- und Bildverarbeitungstechnik kann die automatisierte Demontage heutzutage zunehmend kostengünstiger und effizienter als in der Vergangenheit durchgeführt werden. So forscht auch die Abteilung Ressourcentechnik und -systeme am Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC) unter Beteiligung der Automobilindustrie erfolgreich an Projekten zur automatisierten Demontage von rotierenden elektrischen Maschinen.

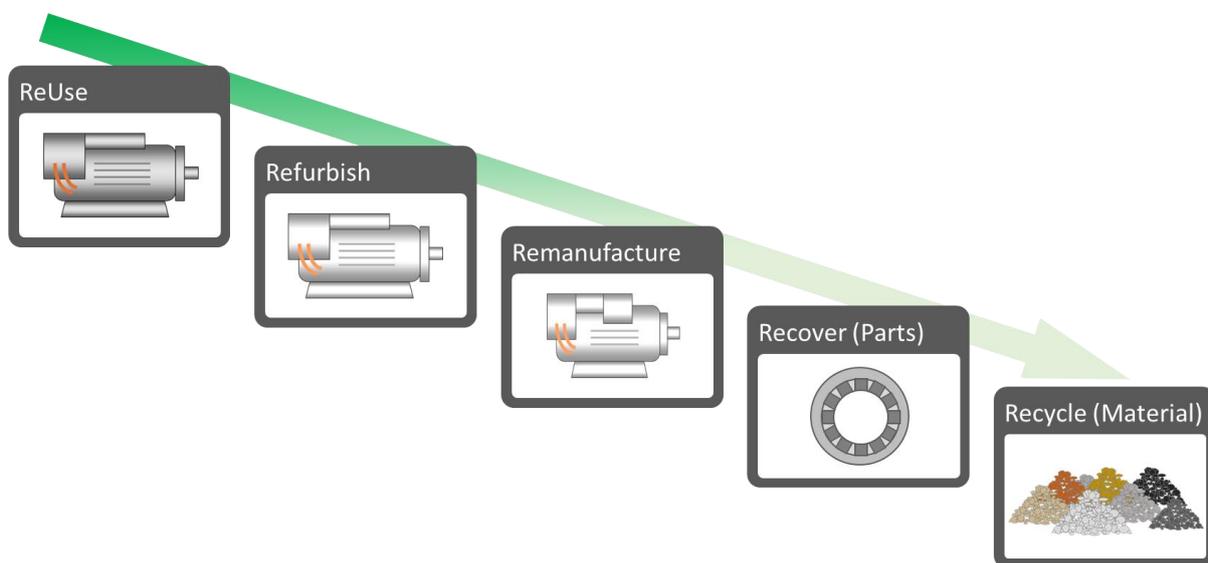


Abbildung 2: Im Rahmen von Demontageaktivitäten anzustrebende Re-X-Optionen

1.2. Vorarbeiten zur automatisierten Demontage

Im Rahmen des Teilprojektes *Industrielle Demontagefabrik 4.0*⁵ wurde von 2018 bis 2021 eine Machbarkeitsstudie zur zerstörungsfreien automatisierten Demontage von Lichtmaschinen der End-of-Life-Phase (EoL) aus KFZ durchgeführt. Dafür wurde ein Demontagemodul aufgebaut (Abbildung 3), in dem mittels dreier 6-Achs-Roboter eine Vielzahl von Arbeitsschritten, wie Schraub-, Greif- und Schneidoperationen, vollautomatisiert und zerstörungsfrei am Produkt durchgeführt werden können.

⁵ pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10389

Die Erkenntnisse wurden im Projekt *DeMoBat*⁶ (Laufzeit 2019-2023) genutzt, um ein Demontagemodul für weitaus komplexere Produkte aufzubauen (Abbildung 3). Als Modellprodukt zur Entwicklung der Techniksanlage wurden hochintegrierte Aggregate, bestehend aus E-Maschine, Leistungselektronik und Getriebe genutzt. Hier sollte zudem gezeigt werden, dass eine zerstörungsfreie Rückführung noch intakter Bauteile in die Produktion prinzipiell machbar ist. Ziel war es, ein System mit hoher Prozesssicherheit (Erfolgsquote der Demontage) zu entwickeln. Während im Projekt *Industrielle Demontagefabrik 4.0* die Werkzeugführung noch statisch programmiert wurde und damit eine gewisse Fehleranfälligkeit für Positions- und Produktabweichungen bestanden, konnten in *DemoBat* vor allem durch den Einsatz hochentwickelter RobotVision-Systeme die Roboterbewegungen teilweise dynamisch programmiert werden.

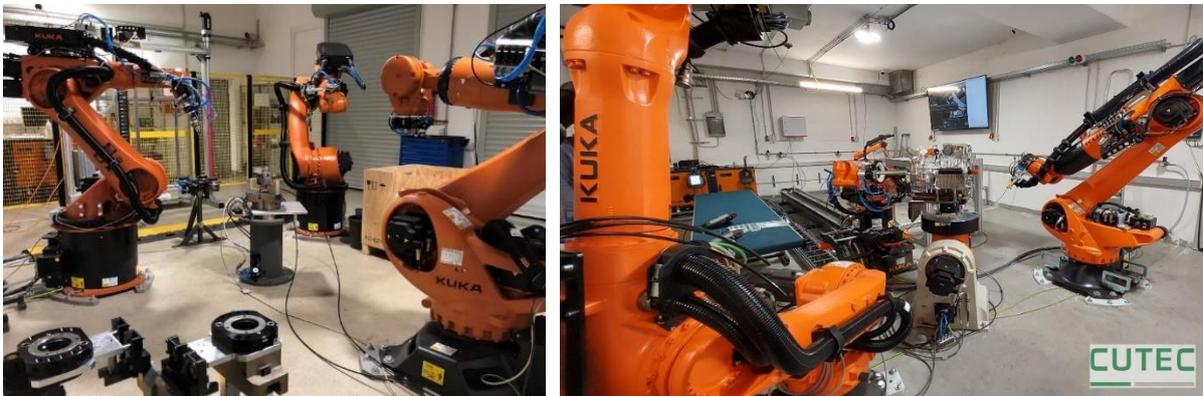


Abbildung 3: Technika am CUTEC zur automatisierten Demontage von Lichtmaschinen (links) sowie von E-Antriebsaggregaten (rechts)

Zusätzlich wurde im Sinne eines Design-for-Re-X Schwachstellen identifiziert, welche die automatisierte Demontage erschweren. Besondere Herausforderungen stellten z.B. schlecht lösbare Sicherungsringe, Verklebungen oder schwer zugängliche Geometrien dar. Die Demontage einiger dieser Baugruppen/ Bauteile ist dadurch teilweise nur unter sehr hohem Aufwand, nicht zerstörungsfrei oder nur unzuverlässig in Bezug auf die Wiederholgenauigkeit zu realisieren. Hohe Demontagetiefen und Automatisierungsgrade sind somit in Bezug auf den ökonomischen und ökologischen Nutzen der automatisierten Demontage elektrischer Antriebsaggregate nicht zwingend vorteilhaft. Dieses Optimierungsproblem war Gegenstand des hier berichteten Projektes.

⁶ www.cutec.de/default-c99f53451d/ressourcentechnik-und-systeme/aktuelle-projekte/demobat

1.3. Projektziel

Um für den automatisierten Prozess die optimale Demontagetiefe sinnvoll nach wirtschaftlichen und nachhaltigen Gesichtspunkten festzulegen, müssen in einem ersten Schritt die ökonomischen und ökologischen Kosten für die einzelnen Prozessschritte ermittelt werden. Neben der technischen Umsetzung der Anlage und den damit verbundenen Betriebs- und Anschaffungskosten trägt das Produktdesign entscheidend zu den Kosten bei. Bei einer schwer zugänglichen Produktgeometrie kann beispielsweise die Erfolgswahrscheinlichkeit für die beschädigungsfreie Bergung eines Bauteils gering ausfallen, was den durchschnittlichen Marktwert mindert, und somit ein stoffliches Recycling trotz hoher ökologischer Kosten ökonomisch sinnvoll erscheinen lässt. Weiterhin ergibt sich die Kostenbewertung auch aus der angestrebten Re-X-Option. So ist die Entscheidung für ein ReUse oder eine stoffliche Verwertung einzelner Baugruppen/Bauteile ein Abwägen des entsprechenden Marktpotenzials. Schlussendlich müssen die ökonomischen und ökologischen Kosten in eine einheitliche Währung, wie etwa Geld oder CO₂-Äquivalente, umgerechnet werden, um diese miteinander zu vergleichen. Eines der Ziele des Projektes war daher die Entwicklung eines Bewertungstools, welches diese Überlegungen einbezieht und es somit ermöglicht, die ökologischen und ökonomischen Kosten der automatisierten Demontage für jeden Schritt zu quantifizieren, für den Gesamtprozess abzuschätzen und abschließend nach präferierter ökologischer und ökonomischer Gewichtung zu optimieren. Ausgangspunkt für die Zielformulierung war die Kernfrage, welche Demontagetiefe die automatisierte Demontage von Traktionsmotoren erreichen soll, wenn der maximale ökologische Vorteil oder die maximale Wirtschaftlichkeit das erwünschte Ziel darstellen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein excelbasiertes Tool entwickelt (Kapitel 5), das für verschiedene Produkttypen und Randparameter angewendet werden kann.

Flankierend dazu wurde eine Analyse der Demontageprozesse bestehender Antriebsaggregate durchgeführt (Kapitel 3). Dazu wurden manuelle Demontageversuche an zwei unterschiedlichen elektrischen Antriebsaggregaten (aus einem VW ID.4 sowie einem Ford E-Transit) vorgenommen und Vorschläge für ein demontagefreundliches Design sowie den möglichen Automatisierungsgrad aus den konkreten Beispielen hergeleitet. Mögliche Design-for-Re-X-Ansätze wurden zudem auf verallgemeinerter Ebene dargestellt (Kapitel 4). Weiterhin wurde die Machbarkeit für die Bergung und Aufbereitung von Permanentmagneten aus Rotoren als Quelle für die besonders werthaltigen Seltenen Erden über eine Recherche untersucht (Kapitel 2).

2. Re-X Optionen für Rotoren

Die Bergung der in Rotoren verbauten Magnete birgt ein hohes Potenzial in Bezug auf den ökologischen und ökonomischen Nutzen. Die dort in der Regel verwendeten NdFeB-Magnete enthalten neben Neodym noch weitere Seltene Erden wie Dysprosium, welche als wirtschaftskritische Ressourcen einzustufen sind. Um die Wirtschaftlichkeit einer möglichst zerstörungsfreien Bergung der Magnete zu evaluieren, müssen die Herausforderungen an die Demontage aus dem Rotordesign heraus ermittelt werden.

Die unterschiedlichen Bauformen von Rotoren aus permanenterregten Antriebsaggregaten in Elektrofahrzeugen sind in zwei grundsätzliche Bautypen einzuordnen. Dies sind einerseits Rotoren mit Oberflächenmagneten (SPM) und andererseits mit vergrabenen Magneten (IPM). Während bei SPM-Rotoren die Magnete auf dem Elektroblech aufgeklebt und mit einer Glasfaserbandage (teils auch Carbonfaser) umwickelt sind, werden bei IPM-Rotoren die Magnete im Elektroblech in Aussparungen eingelassen und ggf. zusätzlich verklebt (Abbildung 4). Die Elektrobleche sind in Richtung der Rotorwelle gestapelt und segmentweise gegeneinander verschränkt.

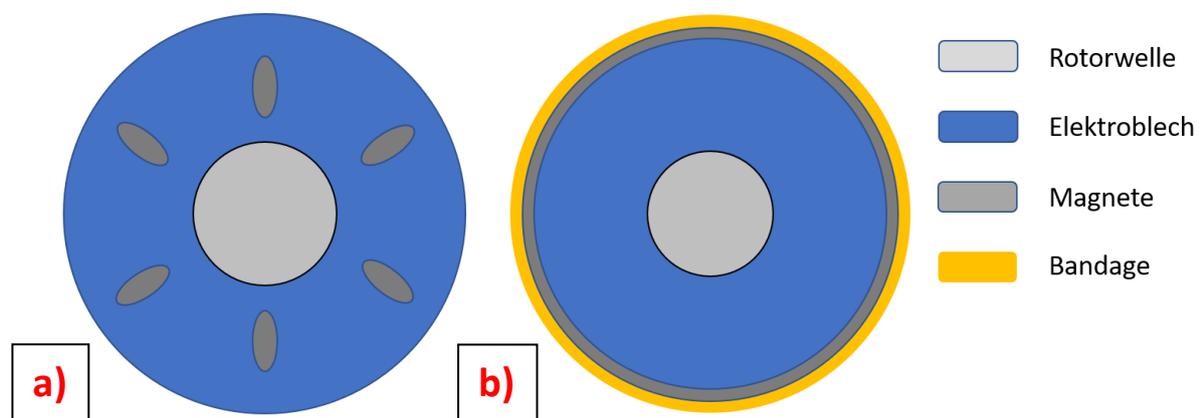


Abbildung 4: Schematisch vereinfachter Querschnitt in Elektrofahrzeugen verbauter Rotoren permanenterregter Antriebsaggregate. Die zwei grundsätzlichen Bautypen sind: a) Vergrabene Magnete (IPM) und b) Oberflächenmagnete (SPM).

Eine Literaturrecherche im Rahmen des Projektes ergab, dass die Demontage und Bergung von Magneten aus Elektrofahrzeugmotoren ein bisher wenig beachtetes Forschungsfeld ist. Während viele Projekte sich schwerpunktmäßig mit dem stofflichen Recycling des Magnetmaterials beschäftigen (z.B. das von der EU finanzierte Projekt DEMETER⁷) konnten zwei Projekte identifiziert werden, welche umfassender das Thema der Demontage und Aufbereitung der kompletten Magnete in den

⁷ cordis.europa.eu/project/id/674973

Forschungsfokus gerückt haben. So wurde im Rahmen des Projektes RECVAL-HPM⁸ die Machbarkeit der Bergung, Aufbereitung und Wiederverwendung von NdFeB-Magneten in IPM-Rotoren, im Rahmen des Projektes MORE⁹ neben IPM-Rotoren auch in SPM-Rotoren untersucht. Im Folgenden werden die in den Projekten erarbeiteten Methoden und Erkenntnisse zusammengefasst.

SPM-Rotoren

Die äußere Glasfaserbandage, welche die auf dem Blech festgeklebten Magnete fixiert, kann relativ einfach durch Aufschneiden und Abziehen oder durch Abwickeln entfernt werden. Die so freigelegten Magnete können daraufhin mit einem Keil aus nichtmagnetisierbarem Material zur einfacheren Handhabung beschädigungsfrei abgeschert werden. Auf den Magneten verblieben allerdings Kleberückstände sowohl von der Bandage als auch vom Kleber. Nach oberflächlicher Reinigung, z.B. mittels Drahtbürste, wäre laut den Autoren des MORE-Projektes allerdings eine direkte Wiederverwendung denkbar. Für ein stoffliches Recycling müsste zusätzlich die Korrosionsschutzschicht entfernt werden, welche ansonsten die magnetischen Eigenschaften der aus dem Sekundärmaterial hergestellten Magnete erheblich beeinträchtigt.

Alternativ kann der Kleber durch eine thermische Behandlung größtenteils aufgelöst werden, was vor allem dann sinnvoll ist, wenn die Magnete zudem thermisch entmagnetisiert werden sollen. Dafür ist ein Überschreiten der Curie-Temperatur notwendig, die bei herkömmlichen NdFeB-Magneten bei 310-370 °C liegt. Diese wird in der thermischen Zersetzung (Pyrolyse) der Klebstoffe schnell überschritten. Die Entmagnetisierung erleichtert auch das Handling der Magnete im Demontageprozess. Im Prozessverlauf wird der Rotor zunächst so weit erhitzt, dass der Kleber flüssig wird. Da sich die Permanentmagnete zu diesem Zeitpunkt aufgrund der noch vorhandenen ferromagnetischen Eigenschaften abstoßen, kann es zu Absprengungen durch die nun fehlende Bindewirkung des Klebers kommen. Als Lösung wurde im Projekt MORE eine Lochblechhülse über dem Rotor gestülpt, welche die Magnete auffängt. Eine weitere Erhitzung über die Curie-Temperatur entmagnetisiert die Magnete schließlich, was das weitere Handling durch eine bessere Trennung der Einzelmagneten erleichtert. Die durch den zersetzenden Klebstoff resultierende Rauchentwicklung macht den Einsatz eines Rauchabzugs unbedingt notwendig. Einige Magnete verbleiben nach diesem Prozess auf dem Rotorblechpaket. Diese können relativ einfach abgeschert werden, wobei vereinzelt verkockte Klebstoffreste an den Magneten haften, welche ggf. abgebürstet werden können.

⁸ www.iwks.fraunhofer.de/content/dam/iwks/de/documents/BMBF_Fkz033RF002_RECVAL-HPM_Schlussbericht.pdf

⁹ publica.fraunhofer.de/entities/publication/d606f86b-cac2-4d14-83ca-60c2edfe5be5/details

Bei der Demontage unter Nutzung der Pyrolyse entstand laut den Autoren ein Ausschuss von etwa 10 % aufgrund von Abplatzungen. Der Rest der Magnete wies eine Festigkeit und, nach erneuter Magnetisierung, magnetische Eigenschaften vergleichbar mit neuwertigen Magneten auf und könnte theoretisch einer Wiederverwendung zugeführt werden. Bei den restlichen 10 % ist ein stoffliches Recycling denkbar, ggf. unter Durchführung einer chemischen Vorbehandlung zum Entfernen von Kleberrückständen mittels Natronlauge.

IPM-Rotoren

Im Projekt MORE wurden die Blechpakete mit vergrabenen Magneten segmentweise voneinander getrennt und dazu in einem ersten Schritt die Welle ausgepresst. Die einzelnen Bleche waren daraufhin noch durch die magnetische Anziehung und den Kleber miteinander verbunden. Zur Trennung der Blechpakete wurde eine Vorrichtung mit einer passenden Geometrie konzipiert. Weiterhin wurde ein Stempel entwickelt, welcher die Magneten von oben aus einem einzelnen Blechpaket (Segment) herausdrückt. Im Rahmen einer aktuellen Studie (Heim et al. 2023)¹⁰ wurde auf Grundlage der Erkenntnisse des Projektes MORE ein Demonstrator entwickelt. Die Autoren bargen Magnete aus verschiedenen IPM-Rotoren, welche einerseits mit Epoxidharz und andererseits mit Nickel beschichtet waren, mittels eines Auspressstempels. Die gemessenen und modellierten Kräfte, welche auf die Magnete wirkten, überschritten dabei die für den Einbau minimal zu erreichenden Bruchtoleranzen. Somit kann es beim Auspressen zu Bruchereignissen kommen.

Um die eingesetzten Kräfte zu reduzieren, wäre wiederum ein Erhitzen des Rotors anwendbar, um den Kleber zu zersetzen. So wurde beispielsweise im Projekt RECVAL-HPM der Rotor auf 400 °C erhitzt und im Anschluss die Magnete über die gesamte Länge manuell herausgepresst. Dies ist allerdings nur möglich, wenn es keine zueinander verschränkten Blechpakete gibt, wie bei den Rotoren des VW ID.4- und des E-Transit-Motors, wo diese wieder vereinzelt werden müssten.

Im Projekt RECVAL-HPM wurde zudem die Magnetoberfläche nach der thermischen Behandlung untersucht. Laut den Autoren machen verbliebene Rückstände von Kleber und die teils auch durch den Auspressvorgang beschädigte Beschichtung ein Abschleifen der Magnetoberfläche und eine Neubeschichtung notwendig.

Aufbereitung und stoffliches Recycling

Als Alternative zu dem direkten ReUse der Magnete können diese nach Bergung und Reinigung in Pulverform gebracht, aufbereitet und zu neuen Magneten verarbeitet werden. In den Projekten MORE

¹⁰ www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123000112

und RECVAL-HPM wurden dazu verschiedene Verfahren untersucht. Im Folgenden soll eine Auswahl der geeignetsten Verfahren vorgestellt werden.

Zur Vorbehandlung ist eine (thermische) Entmagnetisierung der Permanentmagnete notwendig, falls diese noch nicht im Demontageprozess durchgeführt wurde. Als nächstes muss die Antikorrosionsbeschichtung oder, falls diese nicht vorhanden ist, die oxidierte Oberfläche der Magnete per Sandstrahlen (RECVAL-HPM) oder in einem Gleitschliffprozess mit Siliziumcarbid (MORE) entfernt werden, da Verunreinigungen die magnetischen Eigenschaften erheblich mindern. Für die Pulverisierung empfehlen die Autoren beider Studien eine Vorbehandlung in Form einer Wasserstoffversprödung, da die Magneten sich anschließend effektiver mahlen lassen. Die Weiterbehandlung des Pulvers kann auf unterschiedliche Arten erfolgen.

So kann recyceltes Pulver mit neuwertigem Magnetpulver aus der Produktion gemischt werden, so dass ein Gemisch mit 20-30 % recyceltem Pulver entsteht, welches im Anschluss gepresst und gesintert wird. Laut den Studienautoren in beiden Projekten wiesen die auf diesem Weg hergestellten Magnete eine etwas geringere Remanenz (minus 3 %) sowie ähnliche Koerzitivfeldstärke im Vergleich zu Magneten aus neuwertigem Produktionspulver auf.

Im Projekt RECVAL-HTM wurde eine Weiterbehandlung des Pulvers mittels dHDDR-Prozessierung¹¹ vorgenommen. Dabei wurde das Pulver unter Wasserstoffatmosphäre (0,5–1,5 bar) auf über 800 °C erhitzt, um einen vollständigen Zerfall des Gefüges zu erreichen. Danach wurden sukzessive der Druck und die Temperatur verringert (0,1–0,5 bar), wobei sich das Gefüge hoch anisotrop wiederherstellt. Aus dem Pulver wurden nun, im Verbund mit Epoxidharz, Magneten hergestellt, welche eine höhere Remanenz und Koerzitivfeldstärke als Magneten aus Primärpulver aufwiesen.

Ein stoffliches Recycling zur Abtrennung Seltener Erden (SE) aus dem Magnetpulver mittels hydrometallurgischer Behandlung wurde in beiden Projekten durchgeführt und soll hier aufgrund des sich bietenden Marktpotenzials aufgegriffen werden. Dazu wurde in MORE eine Solventextraktion getestet, vergleichbar mit dem Trennverfahren in der Primärproduktion, bei der das Magnetpulver in Lauge (NaOH) gelöst und anschließend in einem mehrstufigen Verfahren über Zugabe von Säure (HCl) SE-Oxide gewonnen wurden. Dabei war der Reinheitsgrad teilweise höher als in der Primärproduktion. Die Autoren begründen dies mit einer geringeren Vielfalt enthaltener SE-Elemente in den Sekundärmagneten, was zu einer schärferen Trennung bei den Fällungsreaktionen führt. Im Projekt RECVAL-HTM wurde ebenfalls eine Fällung von SE mittels Laugen und Säuren getestet. Hier zeigte sich beim Einsatz von Oxalsäure eine hohe Rückgewinnungsrate, wobei Eisen- und

¹¹ dynamic hydrogenation, disproportionation, desorption, and recombination

Natriumkontaminationen nachgewiesen wurden. Diese stellen laut den Autoren allerdings keine Probleme bei der Weiterverarbeitung dar.

Bei der dHDDR-Prozessierung sowie chemischen Behandlungsmethoden zum stofflichen Recycling ist eine Kenntnis über die Materialzusammensetzung des eingesetzten Magnetmaterials zwingend notwendig, um die Verfahrensparameter optimal abstimmen zu können. Zudem müssten die Prozesse hochskaliert werden, um die Wirtschaftlichkeit in großem Maßstab zu untersuchen, da die vorgestellten Verfahren lediglich für den Laboreinsatz getestet wurden.

Abschließende Erkenntnisse

Eine zerstörungsfreie Bergung von Magneten aus Rotoren von E-Fahrzeugen ist grundsätzlich möglich. Die magnetischen Eigenschaften und die Festigkeit der demontierten Magneten lagen in den gesichteten Studien innerhalb der Produktspezifikation, was eine Wiederverwendung möglich macht. Dem entgegen stehen unterschiedliche Rotordesigns mit verschiedenen Magnetgeometrien sowie die stetige Bestrebung zur Weiterentwicklung von Magnetlegierungen zum Erreichen höherer Wirkungsgrade. Ob eine Wiederverwendung unter diesen Voraussetzungen sinnvoll ist, bleibt daher weiterhin zu untersuchen. Bedingt durch die Bestrebung zur Maximierung der Reichweiten von Elektrofahrzeugen sind gegebenenfalls keine Kompromisse zugunsten einer erhöhten Ressourceneffizienz durch direkte Wiederverwendung der geborgenen Magnete zu erwarten. Im Fokus steht daher voraussichtlich zunächst das materielle Recycling der Magnete. Vor diesem Hintergrund ist eine kosteneffiziente Demontage eine Option, auch wenn die Magnete dabei teilweise eine Beschädigung erfahren. Sofern eine Wiederverwendung einzelner Komponenten nicht angestrebt wird, ist in diesem Fall auch die aggregatzerstörende Bergung der (Magnet)Materialien denkbar. Zu diesem Zweck bietet der Recyclingmaschinenbau bereits Lösungen an, wie beispielsweise Elektromotorknacker verschiedener Anbieter¹².

Abschließend ist festzuhalten, dass alle Re-X-Optionen hinsichtlich des ökologischen Fußabdrucks, zukünftig steigender Rohstoffpreise sowie bestehender Lieferabhängigkeiten einen wesentlichen Vorteil gegenüber der Nutzung von Primärrohstoffen aufweisen können.

¹² www.stokkermill.com/maschinen-recycling/elektromotorenknacker
www.bronneberg.de/recyclingmaschinen/elektromotorenknacker/

3. Analyse der Demontageprozesse

3.1. Demontage des Ford Motors

3.1.1. Übersicht über das Aggregat

Das vorliegende elektrische Antriebsaggregat der Ford Corporation wird im Ford E-Transit als auch im Ford Mustang Mach-E zum Zeitpunkt der Demontage verwendet. Das Aggregat besteht aus den wesentlichen Funktionsbaugruppen Leistungselektronik, Planetengetriebe und der elektrischen Maschine. Bei dem elektrischen Antriebsaggregat der Firma Ford Corporation handelt es sich um eine permanenterrregte Synchronmaschine mit einer Leistung von 135 kW. Das Aggregat treibt im Ford E-Transit die Hinterachse an.

3.1.2. Dokumentation der Demontageschritte

Das elektrische Antriebsaggregat weist bei der Anlieferung starke Oberflächenverschmutzung und Korrosion auf (Abbildung 5). Entsprechend muss eine potenzielle Reinigung und Aufbereitung ausgelegt sein, wenn Gehäuseteile einer Wiederverwendung zugeführt werden sollen. Bedingt durch die Verschmutzung ist die Lesbarkeit der aufgeklebten Sticker mit QR-Codes eingeschränkt möglich.

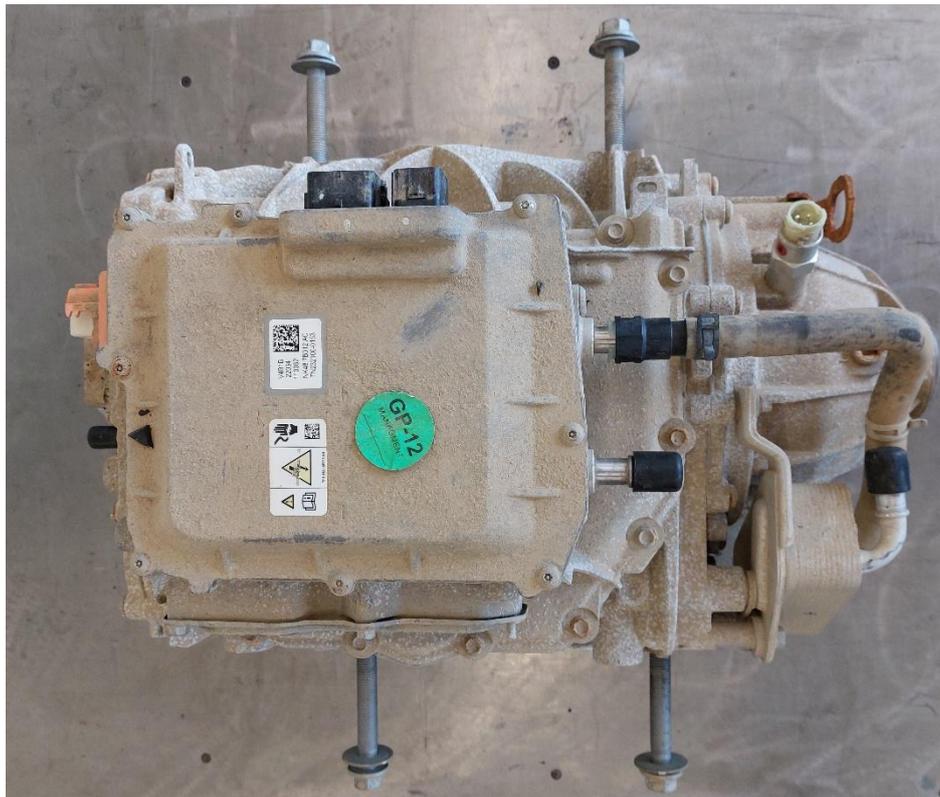


Abbildung 5: Das Ford E-Transit Antriebsaggregat im Anlieferzustand (Draufsicht)

Als erster Arbeitsschritt wurden die Betriebsflüssigkeiten abgelassen. Dabei hat sich gezeigt, dass die benötigten Öffnungen recht unterschiedliche Platzierungen und Orientierungen aufweisen, was ein entsprechendes Handling während des Ablassens erschwert.

Nach der Ausbringung der Betriebsflüssigkeiten wurde zwecks der frühzeitigen Trennung der wesentlichen Baugruppen die Leistungselektronik (Abbildung 6) demontiert. Diese ist mit 13 Schrauben mit Außensechskant (Schlüsselweite (SW) 10) und einem Stehbolzen (SW 13) auf dem Gehäuse der elektrischen Maschine befestigt.



Abbildung 6: Leistungselektronik des E-Transit Antriebsaggregats

Weiterhin muss die elektrische Kontaktierung zwischen den Baugruppen getrennt werden, dazu wurden zunächst vier weitere Außensechskantschrauben (SW 10) gelöst. Daraufhin konnte der Deckel der Stromschienen abgenommen werden (Abbildung 7). Drei weitere Außensechskantschrauben (ebenfalls SW 10) mit Scheiben verbinden die Stromschienen und müssen ebenfalls gelöst werden.



Abbildung 7: Demontierter Deckel der Stromschienen bei der Verbindungsstelle von elektrischer Maschine und Leistungselektronik

Die frühe Trennung der wesentlichen Funktionsbaugruppen im Demontageprozess trägt positiv zu einer hochwertigen Re-X-Option bei. Da die Leistungselektronik nicht Gegenstand der Arbeiten war, wurde diese nicht weiter demontiert.

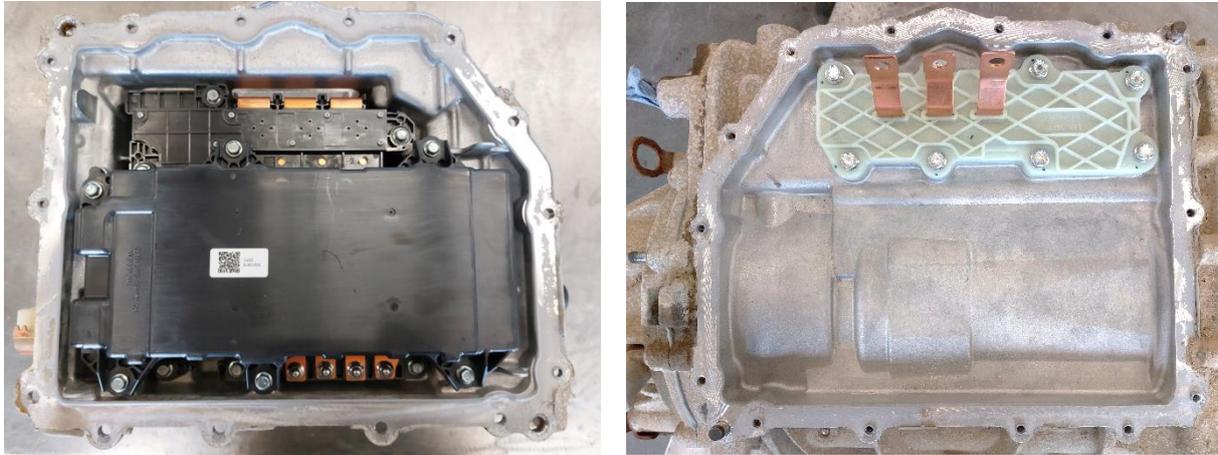


Abbildung 8: Untersicht der demontierten Leistungselektronik (links) und Draufsicht auf Stromschienen, die aus der elektrischen Maschine ragen (rechts)

Da das Hauptgehäuse des Antriebsaggregats gleichzeitig als Gehäusedeckel der Leistungselektronik fungiert (Abbildung 9), ist am Übergang zum Hauptgehäuse eine Dichtmasse aufgetragen. Bei der Demontage zeigte sich, dass diese trotz der aufgerauten Dichtflächen vergleichsweise leicht abzutragen war. Die Dichtmasse weist im getrockneten Zustand sowohl eher geringe Kohäsion als auch geringe Adhäsion auf. Dies ist für eine Aufbereitung der Gehäuse von Vorteil, jedoch kann, insbesondere durch die geringe Kohäsion der Dichtmasse, diese in den Bauraum fallen und sowohl die Leistungselektronik als auch das Demontagemodul unnötig verschmutzen. Weiterhin zeigte sich, dass die beiden verwendeten Passstifte aus Stahl leichte Korrosion aufweisen (Abbildung 9).



Abbildung 9: Angeraute und mit Resten der Dichtmasse versehene Dichtflächen sowie korrodierter Passstift

Nach der Demontage der Leistungselektronik wurde der Getriebedeckel demontiert (Abbildung 10). Dazu wurden zunächst 14 trilobulare Schrauben (Innensechsrund T 40) und ein Stehbolzen (Außensechsrund E 7) ausgeschraubt. Die Verwendung von trilobularen Schrauben ist insbesondere hervorzuheben, da diese ihr Gegengewinde im Montageprozess selbst formen, wodurch diese eine höhere Festigkeit als geschnittene Gewinde aufweisen. Dies ist insbesondere bei Bauteilen wie dem vorliegenden Gehäuse sinnvoll, da somit das Ausreißen der Gewinde unwahrscheinlicher wird und die Gehäuseteile eher einer hochwertigen Re-X Option zugeführt werden können. Gleichzeitig sind die Gewinde, die durch trilobulare Schrauben geformt wurden, genauso für reguläre, metrische Schrauben geeignet.

Sowohl der Getriebedeckel als auch das Hauptgehäuse weisen Konterpunkte (Abbildung 10, Abbildung 11) auf, sodass der durch die Dichtmasse angeklebte Getriebedeckel vergleichsweise einfach demontiert werden konnte. Die Konterpunkte sind sowohl in der manuellen als auch in der automatisierten Demontage hilfreich.

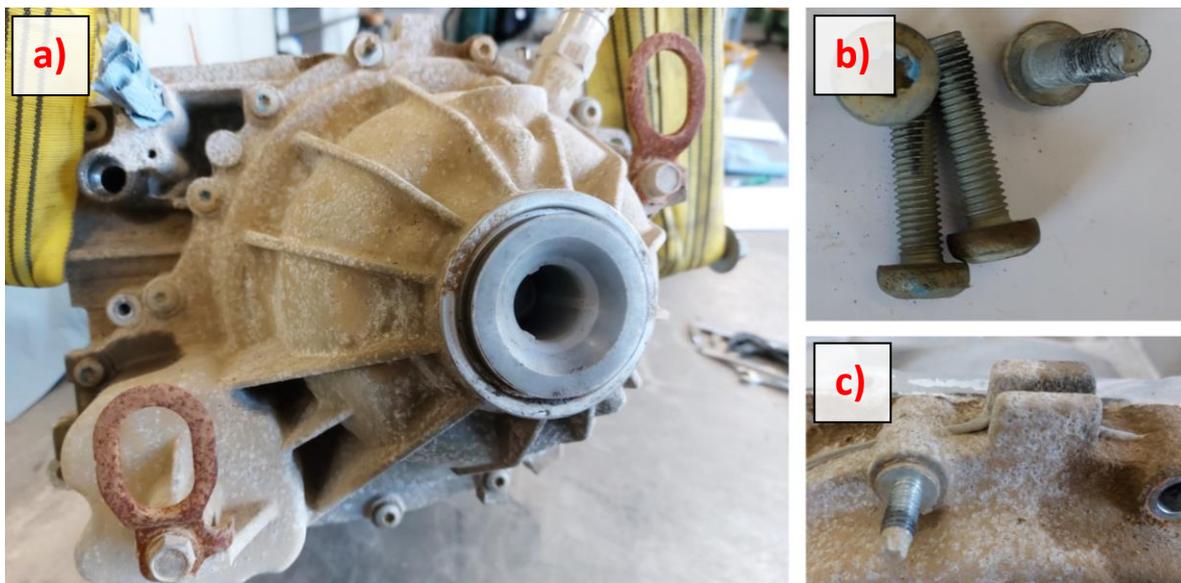


Abbildung 10: Seitenansicht auf Getriebedeckel mit eingestecktem Schonstopfen (a), demontierte trilobulare Schrauben (b), Stehbolzen und Konterpunkte an Getriebedeckel (c)

Der Getriebedeckel ist mit der gleichen Dichtmasse verklebt wie die Leistungselektronik und das Hauptgehäuse. Entsprechend besteht ebenfalls ein gewisses Kontaminationsrisiko.

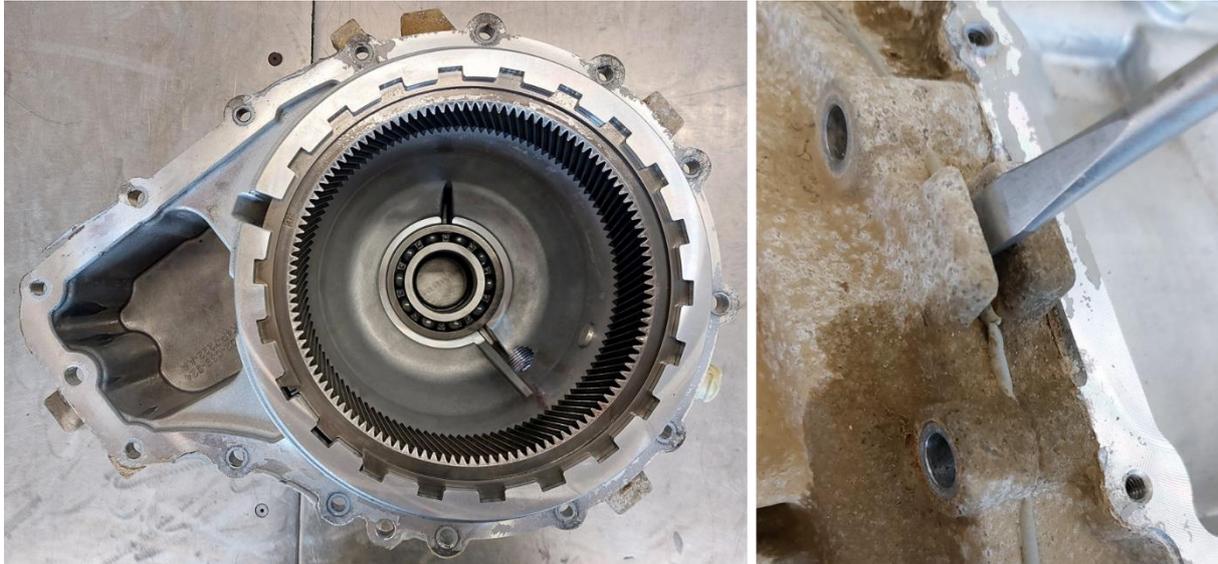


Abbildung 11: Im Getriebedeckel fixiertes Hohlradsatz (links) und Ansatz eines Hebelwerkzeugs an Konterpunkten (rechts)

Vom Getriebedeckel wurde in der Folge eine Reihe weiterer Bauteile demontiert. Dazu zählen der Drehzahlsensor, ein Wellendichtring sowie ein Radialkugellager (äußeres Lager des Differentials, Abbildung 12). Der Drehzahlsensor ist in den Getriebedeckel geschraubt und kann mit einer Langnuss ausgeschraubt werden. Im Vergleich zu anderen Befestigungsmethoden ist der Drehzahlsensor für die automatisierte Demontage sehr geeignet verbaut, da dieser Funktionsbauteil und Befestigungsmittel in einem darstellt. Ebenso ist als positiv zu verzeichnen, dass der Wellendichtring sowie das Radialkugellager getrennt voneinander und vergleichsweise gut auszutreiben sind, sodass hier keine Teile am Getriebedeckel verbleiben. Entsprechend hochwertig sind die Re-X Optionen für den Getriebedeckel.

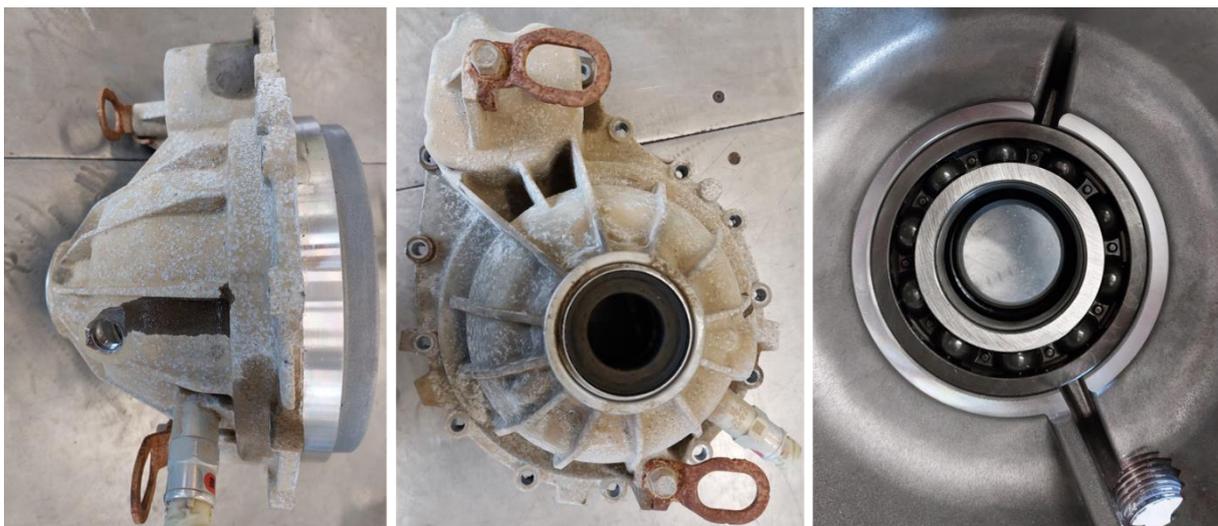


Abbildung 12: Demontierter Getriebedeckel mit peripheren Bauteilen (links: Seitensicht; Mitte: Draufsicht), eingepresstes Radialkugellager im Getriebedeckel (rechts)

Neben den genannten Bauteilen ist in den Getriebedeckel das Hohlrad des Planetengetriebes eingebaut. Bevor dieses demontiert werden kann, muss zunächst ein großer Sprengring demontiert werden, der etwa den Außendurchmesser des Hohlrads aufweist (Abbildung 13). Der Sprengring hat keine Ösen für eine vereinfachte Demontage und muss manuell mit geeigneten Hebelwerkzeugen an unterschiedlichen Stellen aus der Nut gehebelt werden. Der genannte Sicherungsring ist für eine automatisierte Demontage ungeeignet, da neben der besonderen Schwierigkeit der Demontage auch in der Folge die Gefahr eines undefinierten Zustands und damit verbunden die kamerabasierte Zustandserkennung besonders herausfordernd ist. Nach der Demontage des Sicherungsringes kann das Hohlrad unter geringem Kraftaufwand aus seinem Sitz gezogen werden. Das Hohlrad ist durch elf darauf sitzende Metallspangen im Getriebedeckel verspannt (Abbildung 13). Bei der Demontage des Hohlrads besteht die Gefahr, dass die Metallspangen abspringen und einen undefinierten Zustand hervorrufen können.

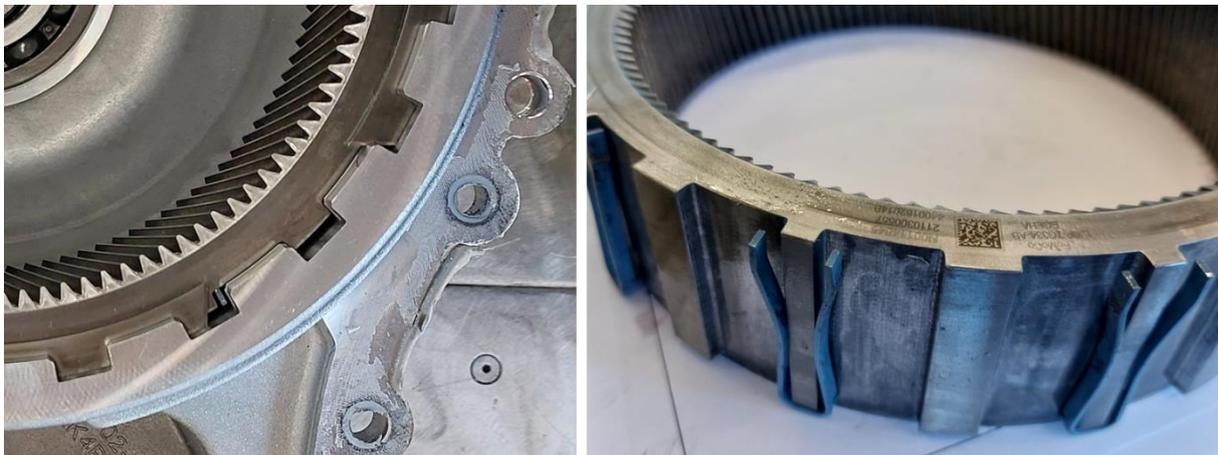


Abbildung 13: Nahaufnahme der Enden des Sicherungsringes (links) und demontiertes Hohlrad mit angeklebten Metallspangen (rechts)

Parallel zur Demontage des Getriebedeckels und seiner Bauteile kann der innere Teil des Getriebes demontiert werden. Dieser steckt mit einer Kerbzahnverbindung auf der Rotorwelle. Der innere Teil des Getriebes umfasst die Planetenräder sowie das Differential mitsamt Käfig und innenliegenden Zahnradern (Abbildung 14). Auffällig war, dass die Planetenräder jeweils zwei (Schräg-)Verzahnungen aufweisen, obwohl lediglich eine davon in Kontakt zum Hohlrad steht. Es wird vermutet, dass es sich bei den Planetenrädern um Gleichteile aus einem anderen Aggregat handelt. In Anbetracht der hohen Fertigungskosten für Schrägverzahnungen wird klar empfohlen, auf den zweiten ungenutzten Zahnkranz zu verzichten.

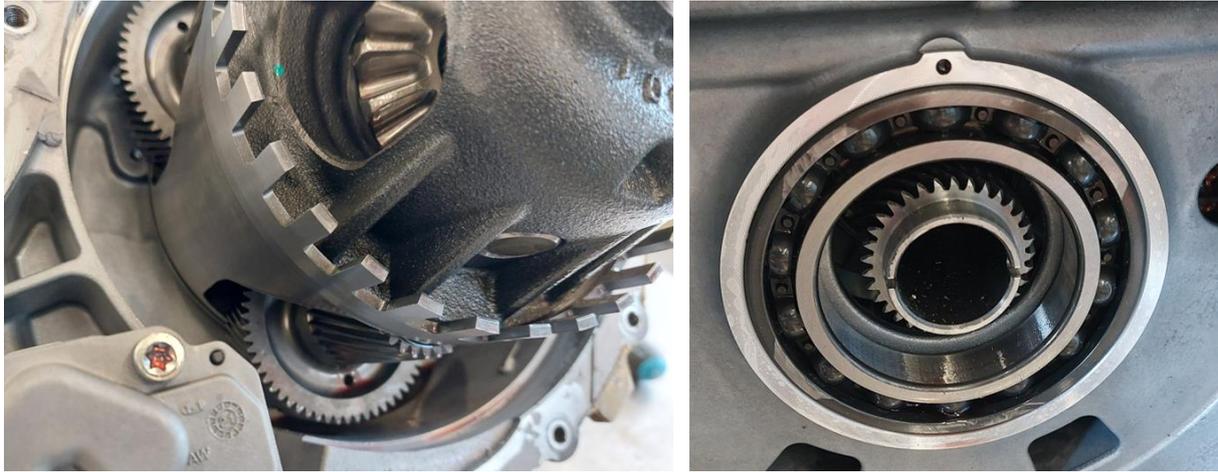


Abbildung 14: Nahaufnahme von Differential und Planetengetriebe (links) sowie inneres Radialkugellager (rechts, Rotorwelle mit Zahnung hier bereits teilweise gezogen)

Nach der Demontage des Getriebes wurde der Fokus auf die Seite der elektrischen Maschine gerichtet. Zur Demontage des E-Maschinendeckels müssen zunächst 17 trilobuläre Schrauben (Innensechsrund T 40) demontiert werden. Erneut wird die graue Dichtmasse verwendet, die eine Kontamination des Bauraums bewirken kann. Jedoch weisen sowohl das Hauptgehäuse als auch der E-Maschinendeckel Konterpunkte und Schlagpunkte auf (Abbildung 15), sodass der E-Maschinendeckel hinsichtlich der aufzubringenden Kräfte gut demontiert werden konnte.



Abbildung 15: Leicht abgehobener E-Maschinendeckel zur Demontage des Elektrosteckers. Rote Pfeile verweisen auf einen Schlagpunkt (links) sowie einen Konterpunkt (rechts).

Im E-Maschinendeckel ist zusätzlich ein Elektrostecker eingebaut, der ebenfalls demontiert wurde. Dieser lässt sich im montierten Zustand des E-Maschinendeckels nicht demontieren, da dieser nicht vollständig durch den E-Maschinendeckel zur Innenseite geschoben werden kann. Daher muss der E-Maschinendeckel zunächst gelöst, jedoch nicht vollständig entfernt werden, da ansonsten die innere Verkabelung reißt. Entsprechend wurde der E-Maschinendeckel angehoben und gleichzeitig der Elektrostecker entriegelt (Abbildung 16) und durchgeschoben. Manuell war der Prozess zu bewältigen, jedoch sind im Fall der automatisierten Demontage eher zwei Roboter erforderlich, die den Elektrostecker synchron demontieren müssen. Alternativ kann auch der E-Maschinendeckel angehoben und eine weitere Steckverbindung von innen gelöst werden. Dieser Vorgang ist im Hinblick auf die automatisierte Demontage als noch schwieriger einzuordnen.



Abbildung 16: Nahaufnahme des stark verschmutzten Elektrosteckers im E-Maschinendeckel. Gut zu sehen sind die Verriegelungen

Im E-Maschinendeckel ist weiterhin eine lange Welle befestigt, die durch die elektrische Maschine in das Differential auf der anderen Seite des elektrischen Antriebsaggregats ragt (Abbildung 17). Dadurch bedingt kann der E-Maschinendeckel nur präzise senkrecht zur Rotorachse abgezogen werden. Nach der Demontage des E-Maschinendeckels wurde zunächst die Welle ausgeschlagen. Danach wurden sowohl das Radialkugellager als auch der Wellendichtring gemeinsam ausgeschlagen. Der Wellendichtring war im E-Maschinendeckel festkorrodiert, was die manuelle Demontage stark

erschwert hat. Bedingt durch die hohen aufzubringenden Kräfte wird vermutet, dass eine gewisse Beschädigungsgefahr für den E-Maschinendeckel besteht.

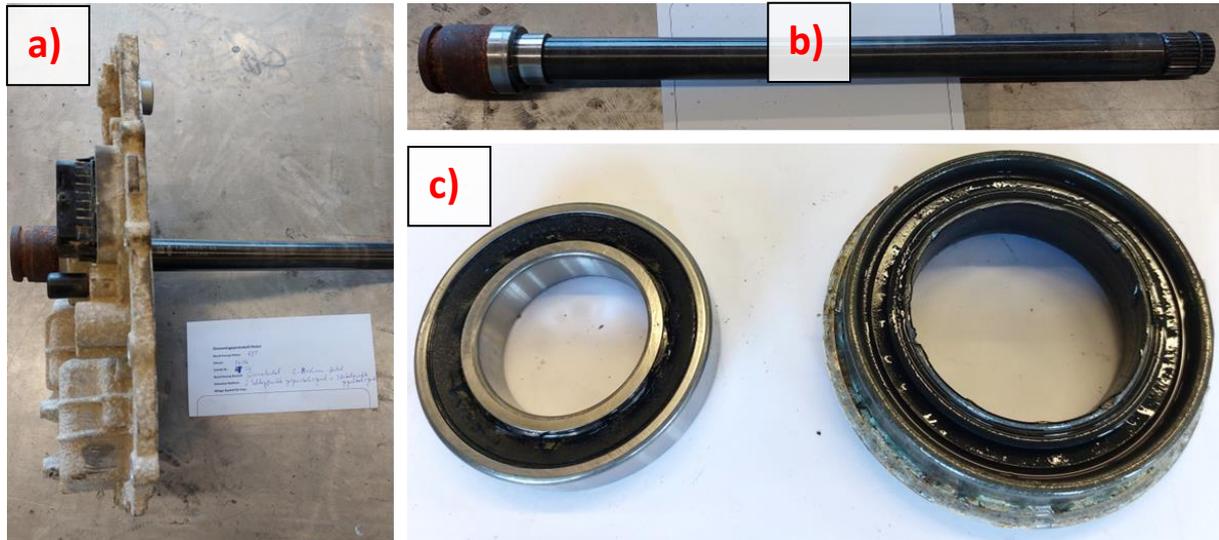


Abbildung 17: E-Maschinendeckel mit montierter langer Welle (a), lange Welle (b), Radialkugellager und Wellendichtring, die E-Maschinendeckel und lange Welle verbinden (c)

Nach der Demontage des E-Maschinendeckels kann die Baugruppe Rotor & Parksperre demontiert werden (Abbildung 18).



Abbildung 18: Sicht auf das Aggregat nach Entfernen des E-Maschinendeckels

Dazu wurde zunächst ein Kabelbinder zerschnitten und ein Stecker demontiert, der die Baugruppe mit der Ölpumpe sowie dem Temperatursensor des Stators verbindet (Abbildung 19). Der Stecker weist eine Entriegelungssicherung auf und ist damit für eine automatisierte Demontage eher ungeeignet. In der Folge kann die Baugruppe Rotor & Parksperre unter leicht erhöhtem Kraftaufwand aus dem Stator gezogen werden. Wichtig dabei ist eine sehr präzise Führung der Baugruppe, um einer Beschädigung von Rotor oder Stator vorzubeugen.

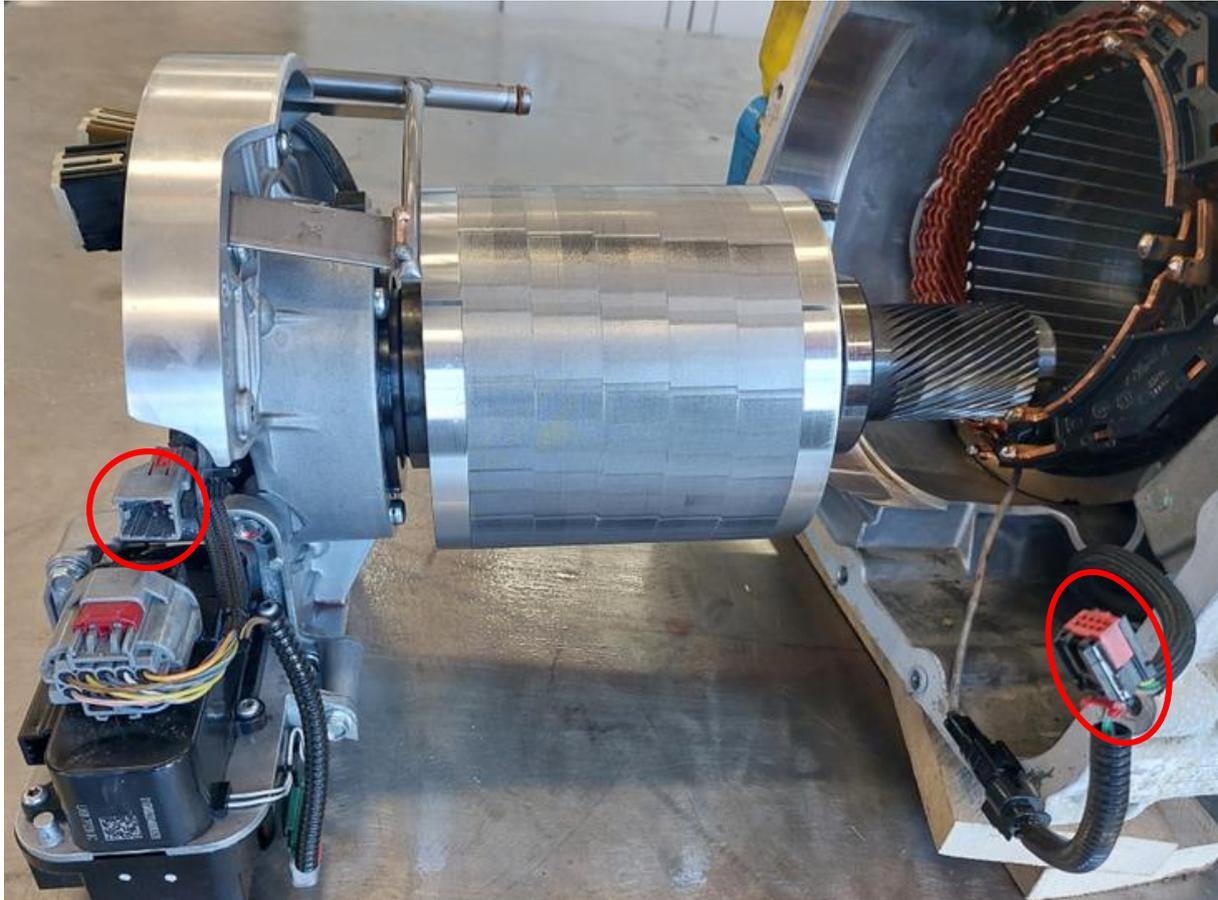


Abbildung 19: Baugruppe Rotor & Parkbremse, aus dem Stator gezogen. Bei der Demontage zu lösende Steckverbindung ist rot markiert

In der Folge wurde die Baugruppe Rotor & Parksperre weiter in Ihre Einzelteile zerlegt. Dazu wurden als erstes zwei Schrauben (Innensechsrund T 30) gelöst und das Ölrohr demontiert (Abbildung 20). Schrauben und Ölrohr waren magnetisiert. Danach wurden zwei weitere Elektrostecker (6-polig und 10-polig, Abbildung 20) demontiert. Beide Stecker weisen eine Entriegelungssicherung auf und erschweren die automatisierte Demontage entsprechend.

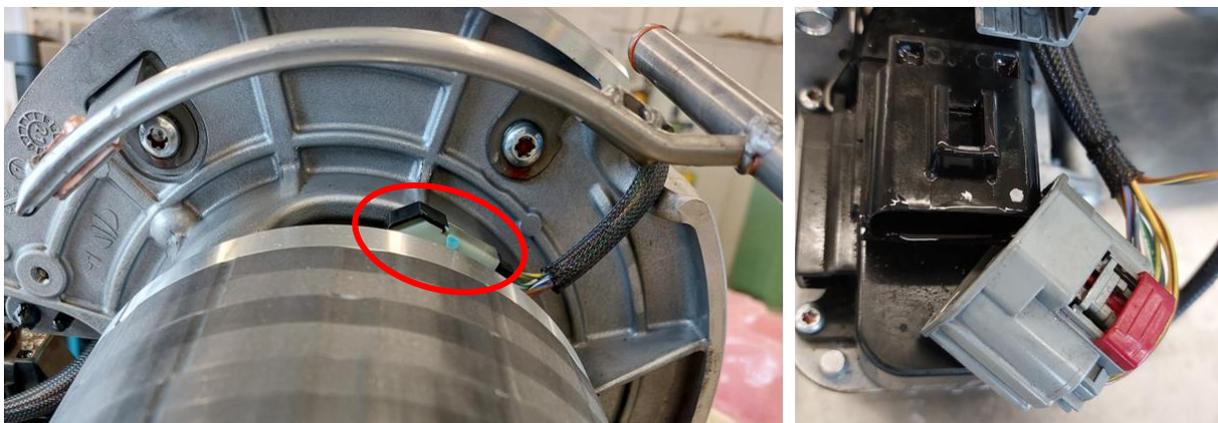


Abbildung 20: Ölrohr, welches am Rotorschild befestigt ist, sowie 6-poliger Stecker des Drehzahlgebers (links) und gelöster Stecker (10-polig) mit Entriegelungssicherung (rechts)

Nachdem die Stecker gelöst sind, kann der Kabelbaum entfernt werden, der sich durch die Baugruppe Rotor & Parksperrre zieht. Dazu musste am Aktuator der Parksperrre ein weiterer 2-poliger Stecker mit Entriegelungssicherung gelöst werden. Weiterhin ist der Kabelbaum auf einem Blech montiert, welches durch zwei Schrauben (Innensechsrund T 30, Abbildung 21) fixiert ist. Dies ist für die automatisierte Demontage als positiv einzustufen. Bedingt durch die biegeschlaffen Eigenschaften des Kabelbaums können jedoch weiterhin undefinierte Zustände erreicht werden. Im Falle der automatisierten Demontage empfiehlt sich daher die Verwendung von zwei Robotern, wobei ein Roboter zunächst den Kabelbaum fixiert, bevor der zweite Roboter Verschraubungen löst.

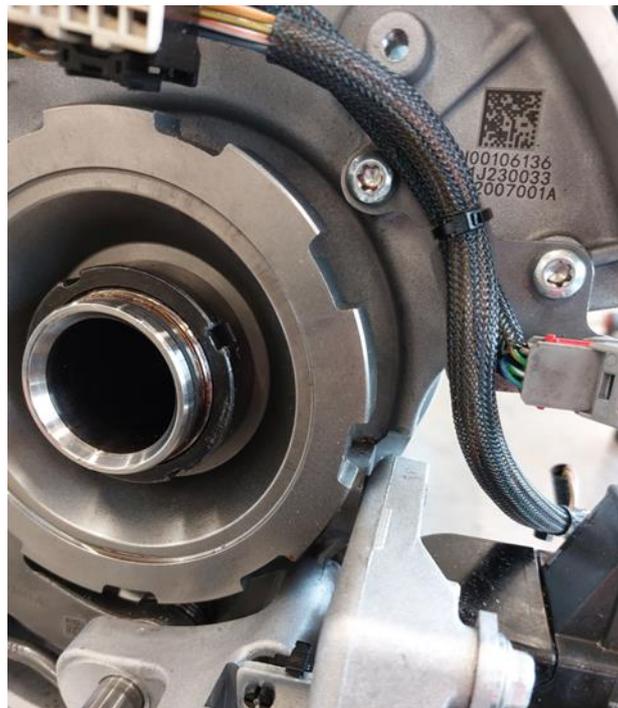


Abbildung 21: Halteblech des Kabelbaums und Parksperrrenrad

Nachdem die peripheren Bauteile der Baugruppe Rotor & Parksperrre demontiert sind, kann die Parksperrre selbst demontiert werden. Dafür wurden zunächst zwei Außensechskantschrauben (SW 10) gelöst (Abbildung 22), welche ein Halteelement für eine Schubstange befestigen. Diese sind in orthogonalen Richtungen orientiert, was einen höheren Handhabungsaufwand erzeugt. Weiterhin steht das Halteelement der Parksperrre durch eine Druckfeder auf der Schubstange unter mechanischer Spannung. Nachdem die Parksperrre initial gelöst wurde, kann diese unter Umständen, bedingt durch die Entspannung der Feder, einen undefinierten Zustand einnehmen. Die Haltekräfte sind im Fall der automatisierten Demontage entsprechend zu berücksichtigen.



Abbildung 22: Halteelement der Parksperre mit gelösten Schrauben (links) sowie Sicht auf teildemontierte Parksperre mit ausgefederter Sperrklinke

Weiterhin wurde der Aktuator der Parksperre demontiert (Abbildung 23). Dazu wurden zunächst drei Außensechskantschrauben (SW 10) gelöst, jedoch musste Aktuator bei der Entnahme zusätzlich verkantet werden, um die enthaltene Schubstange durch die Halterung des Aktuators zu führen, was einen automatisierten Prozess erschweren würde. Der Aktuator ist wiederum an eine Halterung geschraubt, die mit drei weiteren Außensechskantschrauben (SW 10) auf dem Rotorschild befestigt ist. Hierbei ist eine Schraube in gegensätzlicher Richtung orientiert, was das ohnehin schon problematische Handling der Baugruppe Rotor & Parksperre noch verkompliziert. Alternativ wird vorgeschlagen, die gesamte Parksperre modularisiert vorzusehen um diese als kohärente Einheit vom Rotorschild lösen zu können.

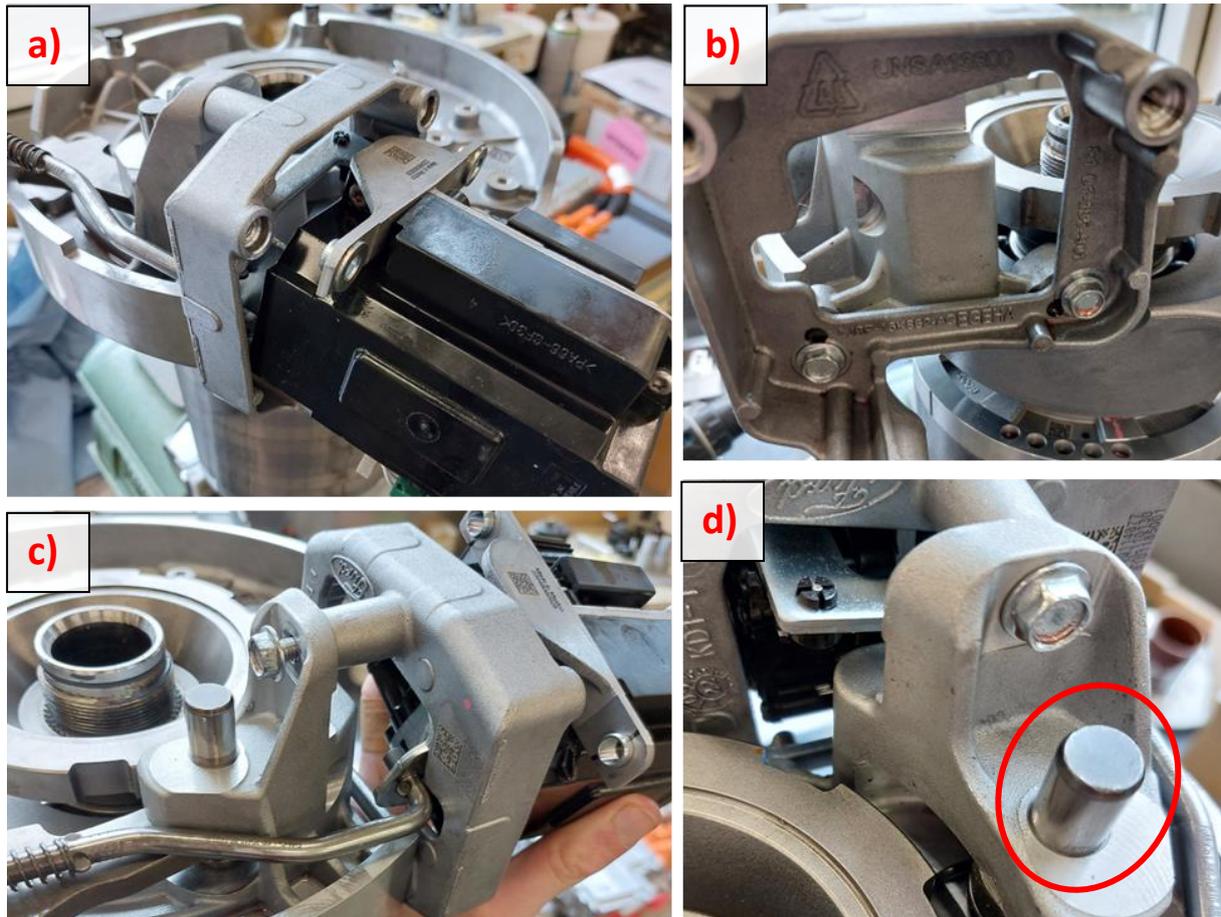


Abbildung 23: Aktuator der Parksperr (a), Halterung des Aktuators (b), eingehängte Schubstange im Aktuator (c), Haltebolzen der Sperrklinke. Bolzen greift in E-Maschinendeckel (d)

Nach der erfolgten Demontage des Aktuators wurde die Nutmutter mittels eines speziellen Nutmutternschlüssels von der Hohlwelle des Rotors abgeschraubt. Es empfiehlt sich, die Nutmutter vor der Demontage der Sperrklinke zu lösen, sodass diese den Rotor während des Schraubvorgangs arretieren kann. Nachdem die Nutmutter demontiert wurde, konnte die Sperrklinke demontiert werden. Dazu wurde als erstes der Haltebolzen gezogen, dabei muss unbedingt beachtet werden, dass gleichzeitig eine mechanische Feder ausspringen kann. Auch dieser Prozess erfordert im Fall der automatisierten Demontage mehrere Roboter.

Als letzter Teilprozessschritt der Demontage der Parksperr konnte das Parksperrrenrad demontiert werden (Abbildung 24). Dieses ist mittels einer zentralen Nutmutter auf der Rotorwelle verschraubt. Die Nutmutter konnte im manuellen Prozess nur mit erhöhtem Kraftaufwand gelöst werden. Anschließend kann das Parksperrrenrad problemlos von der mit einer Kerbzahnung versehenen Rotorwelle abgezogen werden.



Abbildung 24: Sperrklinke am Parksperrenrad (links), zentrale Nutmutter zur Befestigung des Parksperrenrads (Mitte), Demontage des Parksperrenrads an von der Korbverzahnung der Rotorwelle (rechts)

Die Demontage der Parksperre konnte nunmehr abgeschlossen werden. Es verbleiben der Rotor, der im Rotorschild in ein Radialkugellager eingepresst ist, sowie ein weiteres Radialkugellager, welches auf der Getriebeseite aufgepresst ist. Letzteres wurde mittels eines dreiarmligen Lagerabziehers von der Rotorwelle gezogen (Abbildung 25).



Abbildung 25: Demontage des getriebeseitigen Radialkugellagers vom Rotor mittels eines dreiarmligen Lagerabziehers

In der Folge wurde der Rotor mitsamt dem Rotorschild in eine spezielle Vorrichtung gelegt (Abbildung 26), sodass der Rotor unter erheblichem Kraftaufwand mittels Vorschlaghammer aus dem Lager des Rotorschilds getrieben werden konnte.

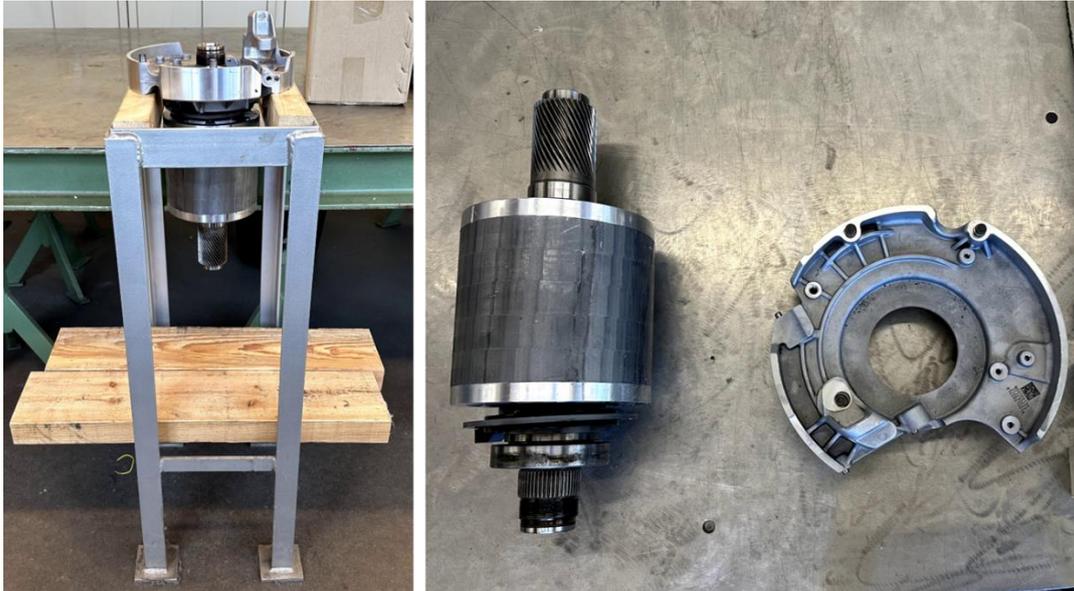


Abbildung 26: Vorbereitung für das Ausschlagen des Rotors aus dem Rotorschild (links) und getrennter Rotorschild und Rotor (rechts)

Nach der Demontage des Rotorschilds wurde der Rotor erneut fixiert. Daraufhin wurde das auf der Rotorwelle verbliebene Radialkugellager erneut mithilfe des dreiarmigen Lagerabziehers demontiert (Abbildung 27).



Abbildung 27: Demontage des auf die Rotorwelle aufgepressten Radialkugellagers auf Seite der E-Maschine
 Nachdem dieses entfernt wurde, konnte der äußere Teil des Drehzahlgebers (Abbildung 28) von der Rotorwelle abgenommen werden. Dieser liegt lose auf der Rotorwelle auf.



Abbildung 28: Äußerer Teil des Drehzahlgebers

Als nächster Demontageschritt wurde der innere Teil des Drehzahlgebers von der Rotorwelle demontiert (Abbildung 29). Dies war manuell durch Abhebeln mit mäßigem Kraftaufwand möglich. Im Rahmen einer automatisierten Demontage könnte der Prozess mit einem speziellen formschlüssigen Werkzeug vermutlich direkt durch einen Roboter durchgeführt werden. Der innere Teil des Drehzahlgebers ist zusätzlich durch einen vor diesem aufgepressten Spannring fixiert, dieser kann aufgrund mangelnder Hinterschnitte nicht direkt und einzeln, sondern lediglich indirekt über die Demontage des inneren Teils des Drehzahlgebers demontiert werden.



Abbildung 29: Abhebeln des inneren Teils des Drehzahlsensors und des davor aufgepressten Spannringes

Der innere Teil des Drehzahlsensors besteht aus einer Reihe von Elektroblechen, die sich im Demontageprozess verbiegen und voneinander lösen. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an das oben beschriebene Werkzeug, wenn eine zerstörungsfreie Demontage angestrebt werden sollte.

Auf der Rotorwelle befindet sich vor der Verzahnung des Parksperrenrades eine Umlaufnut, in der ein Stahlring sitzt (Abbildung 30). Dieser weist keine hohe Spannkraft auf und konnte manuell gut demontiert werden, ist jedoch aufgrund mangelnder Handlingschnittstellen für eine automatisierte Demontage als eher ungeeignet einzuordnen.



Abbildung 30: Stahlring aus der Umlaufnut an der Rotorwelle

Als nächster Demontageschritt kann die Flachmutter gelöst werden, welche die Aluminiumscheibe auf dem Elektroblechpaket des Rotors hält. Dazu wurden in einem ersten Schritt vier kleine Eindrückungen des inneren Randes der Flachmutter aus den Nuten im Gegengewinde auf der Rotorwelle gebogen, die als Rotationssicherung dienen. Die Flachmutter sollte zunächst mit einer speziell angefertigten Stahlschablone abgeschraubt werden, jedoch wurde diese im Demontageprozess zerstört. Weiterhin wurde mit 80 cm langen Wasserpumpenzangen und erheblichem Kraftaufwand versucht, die Nutmutter zu lösen, was ebenfalls nicht erfolgreich war. Daraufhin wurde die Flachmutter aufwendig mit einem Winkelschleifer in großen Teilen aufgetrennt (Abbildung 31), jedoch konnte diese aufgrund der räumlichen Einschränkungen nicht vollständig zerstört werden. Mit einer Handsäge wurden die letzten Teile der Flachmutter aufgetrennt und diese in der Folge ebenfalls mit einer großen Wasserpumpenzange vom Rotor gelöst. Durch die starke Magnetisierung des Rotors waren alle Demontageversuche erschwert, da die genutzten Werkzeuge vom Rotor angezogen wurden. Die hohe Magnetkraft sorgte ebenfalls dafür, dass ein großer Teil der Metallspäne der Flachmutter bei der Zerstörung mittels Winkelschleifer am Rotor hängen blieben. Eine vollständige Entfrachtung des Rotors

von den Metallpartikeln ist ohne vorherige Entmagnetisierung als eher unwahrscheinlich einzustufen. Ebenfalls wurde die Rotorwelle im Demontageprozess der Flachmutter beschädigt. Unter Umständen ist eine Demontage der Flachmutter mit speziellen Werkzeugen und hohem Kraftaufwand möglich, jedoch ist der (automatisierte) Demontageprozess insgesamt als sehr schwer durchführbar einzuordnen.



Abbildung 31: Flachmutter der Rotorwelle während der Demontage mittels eines Winkelschleifers mit erheblicher Verschmutzung des Rotors durch Metallstäube (links), rot umrandet: eine der vier als Rotationssicherung vorgesehenen Eindrücke). Rechts: Demontierte und zerstörte Flachmutter nach erfolgter Demontage

Die folgende Demontage der Aluminiumscheibe auf dem Blechpaket konnte mit geringem Kraftaufwand durchgeführt werden, da diese vergleichsweise leicht auf der Welle klemmte. Nach der Demontage der Aluminiumscheibe wurde das Elektroblechpaket freigegeben, das die eingeklebten Permanentmagnete beinhaltet (Abbildung 32). An dieser Stelle sei für weitere Optionen der Wiedergewinnung der Magnete bzw. des Magnetmaterials auf Kapitel 2 verwiesen.



Abbildung 32: Elektroblechpaket mitsamt eingeklebten Permanentmagneten

Bereits parallel zur Demontage der Baugruppe Rotor & Parksperre kann der Stator aus dem Hauptgehäuse ausgebaut werden. Im ersten Schritt können dazu drei Sechskantschrauben (SW8, Abbildung 33) im Gehäuseinneren (hinter dem E-Maschinendeckel) demontiert werden. Diese sichern die elektrisch leitende Verbindung zwischen den Kupferschienen (Hairpins) des Stators und dem Stromschienen-Element. Die Schrauben umfassen Unterlegscheiben, welche sich bei Entnahme jedoch nicht von der Schraube trennen. Nach Demontage weiterer acht Sechskantschrauben (SW 10), die das Stromschienen-Element am Gehäuse fixieren, kann dieses entfernt werden. Dazu ist eine Ziehbewegung unter Anwinkeln des Elements notwendig.

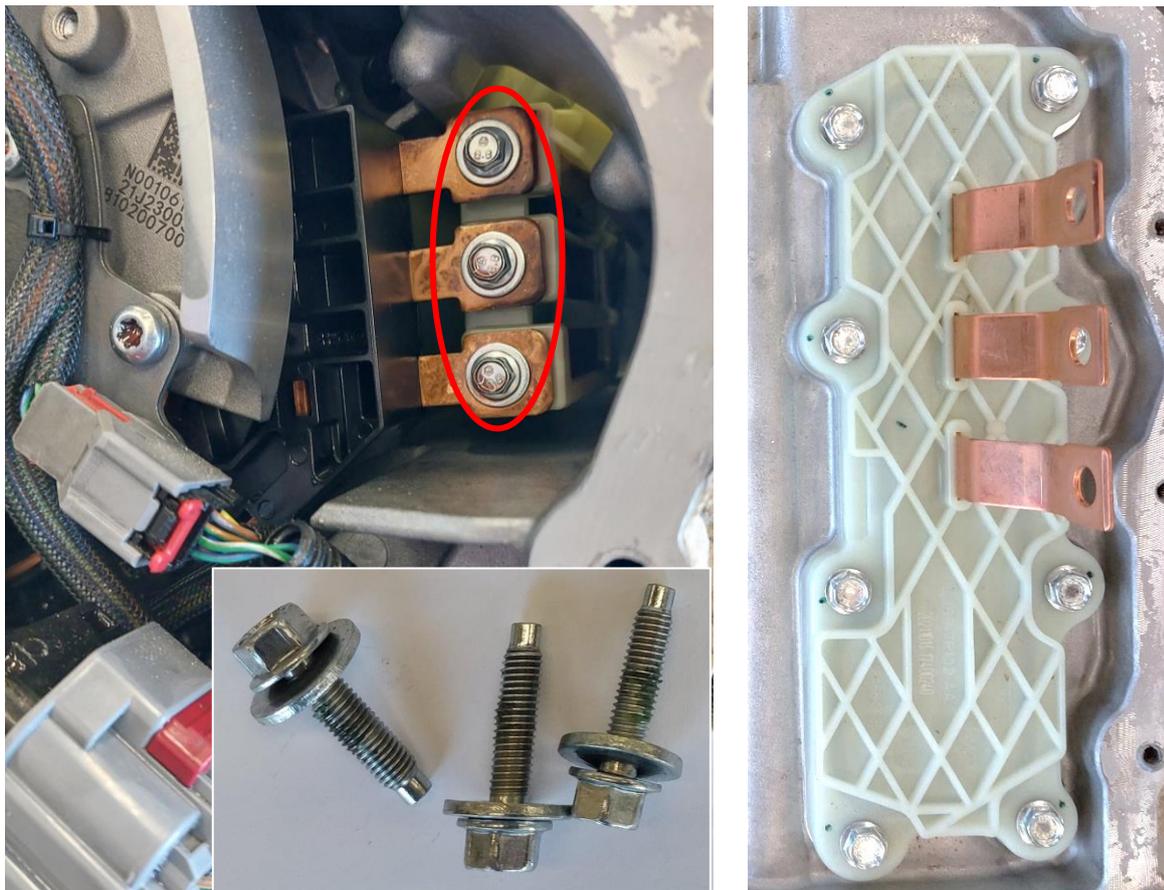


Abbildung 33: Stromschienen-Element zur Kontaktierung zwischen Stator und Leistungselektronik. Links: Rot umrandet: Die drei Sechskantschrauben der Kontaktierung zum Stator (ebenfalls in demontiertem Zustand abgebildet). Rechts: Einbaulage des Elements am Gehäuse (unter der Leistungselektronik).

Der nächste Schritt ist die Trennung einer elektrischen Steckerverbindung zum Temperatursensor des Stators (Abbildung 34). Hinsichtlich einer automatisierten Demontage ist hierbei zu beachten, dass der Stecker eine undefinierte Lage aufweist, was das initiale Greifen durch ein robotergeführtes Werkzeug erschwert. Zu vermerken ist, dass die Steckerverbindung durch einen Sicherungsmechanismus fixiert ist, der tendenziell durch Einsatz eines speziell darauf ausgelegten Werkzeuges zerstörungsfrei zu öffnen ist.

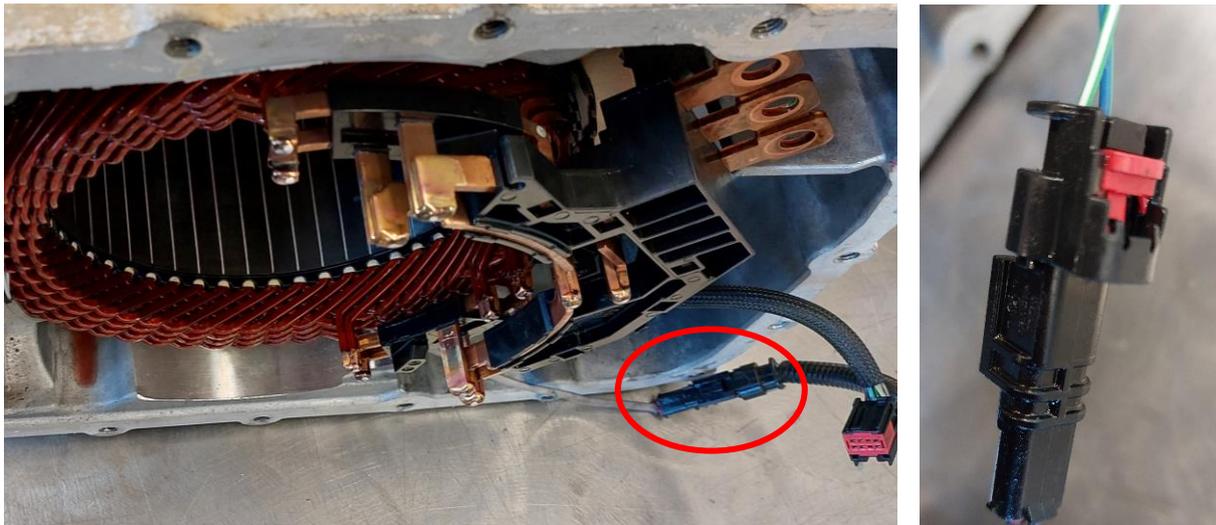


Abbildung 34: Links: Stator, Zustand nach Demontage des Stromschienen-Elements. Rot markiert, unten rechts im Bild: Steckerverbindung zum Temperatursensor. Rechts: Nahaufnahme der Steckerverbindung.

Der Stator selbst ist lediglich mit vier stirnseitigen Schrauben (M5x150 mm, SW 10) im Hauptgehäuse befestigt (Abbildung 35). Aufgrund der Länge der Schrauben wird bei Automatisierung eine Entnahme in senkrechtem Zustand empfohlen.

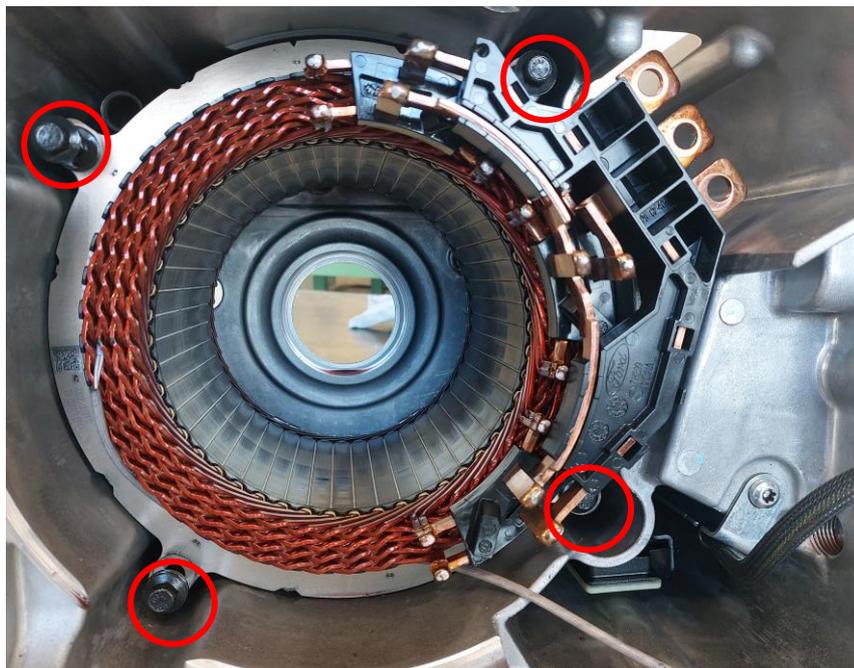


Abbildung 35: Stirnseitige Verschraubung des Stators im Hauptgehäuse. Schraubenköpfe rot markiert.

Aufgrund des hohen Gewichts der Schrauben ist die Entnahme mittels Absaugung nicht möglich. Der Einsatz weiterer gängiger Methoden (Magnethalterung, Klemmung am Bit) wäre zu prüfen. Der Stator ist nach diesen Schritten bereit zur Entnahme. Die Zugänglichkeit von der Getriebeseite her ist gegeben (Abbildung 36).



Abbildung 36: Zugänglichkeit zum Stator zwecks Entnahme aus dem Hauptgehäuse. Getriebeseitige Ansicht. Die Kontaktflächen für ein potenziell zu entwickelndes Zugwerkzeug sind sehr begrenzt, weshalb eine Entnahme ohne Beschädigung trotz geringen notwendigen Kraftaufwandes fraglich erscheint. Nach der manuellen Demontage konnten auf der Außenseite des Blechpaketes Schleifspuren festgestellt werden. Der Stator ist nach Entnahme nicht tiefergehend zerstörungsfrei zu demontieren.

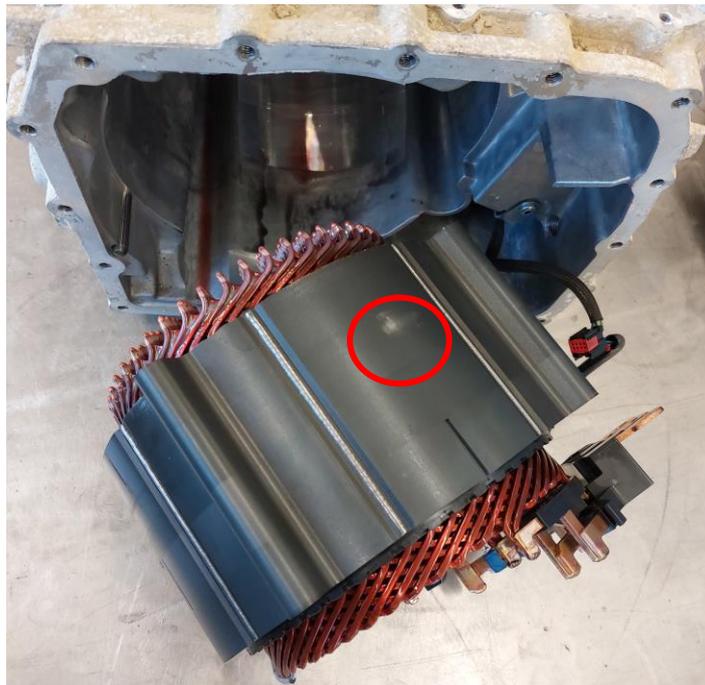


Abbildung 37: Stator nach Entnahme aus dem Hauptgehäuse. Oberflächliche Schleifspuren rot markiert.

Nach Entnahme des Stators ist ein Ölrohr (Abbildung 38) zugänglich, zu dessen Demontage zwei Innensechsrundsrauben (T 30) gelöst werden müssen. Die Herausforderung bei der Automatisierung ist hier in dem begrenzten Raum zu sehen, in dem zwei Roboter gleichzeitig arbeiten müssen. Dies ist notwendig, da das Ölrohr beim Entfernen der Schrauben gehalten werden muss, um einen ansonsten eintretenden undefinierten Zustand zu vermeiden.



Abbildung 38: Ölrohr im Hauptgehäuse. Einbaulage hinter dem Stator.

Im Hauptgehäuse befindet sich nun als wesentliche Komponente noch die Ölpumpe (Abbildung 39). Für deren Demontage muss im ersten Schritt ein Steckeranschluss gelöst werden, welcher mit einer einzelnen Sicherung gesichert ist.

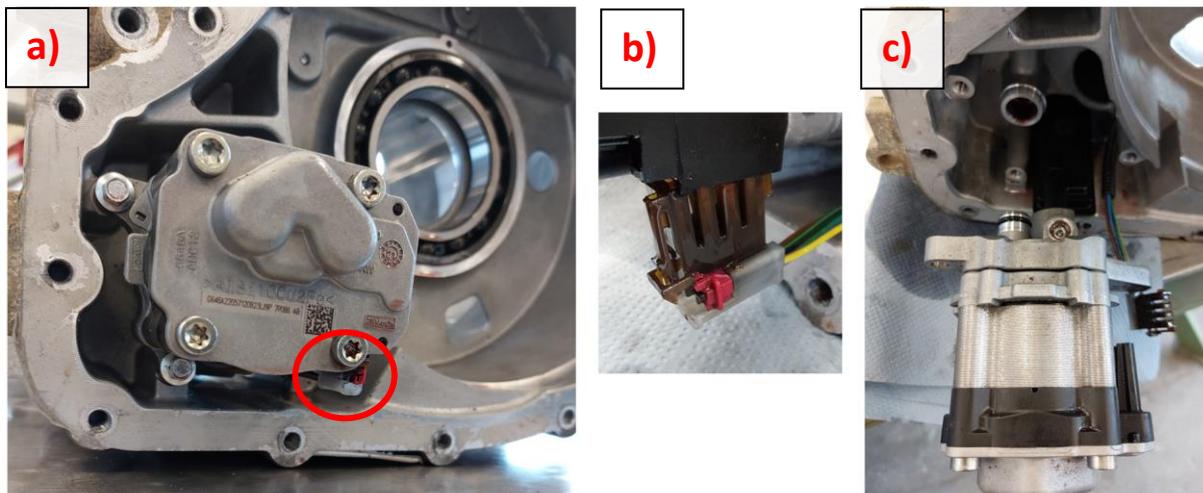


Abbildung 39: Ölpumpe. a) Im eingebauten Zustand b) Steckeranschluss c) Herausgezogen

3.2. Demontage des VW ID.4 Motors

3.2.1. Übersicht über das Aggregat

Zunächst soll eine kurze Übersicht über das Volkswagen ID.4 Antriebsaggregat gegeben werden, sodass die folgend beschriebenen Demontageschritte und Design-for-Re-X Ansätze besser nachvollzogen werden können. Das ID.4 Antriebsaggregat wurde am CUTEC ohne Leistungselektronik angeliefert und umfasst daher die elektrische Maschine und das Getriebe (Abbildung 40).



Abbildung 40: Das ID.4 Antriebsaggregat im Anlieferungszustand (links Untersicht, rechts Draufsicht)

Bei äußerlicher Betrachtung des ID.4 Antriebsaggregates wurde festgestellt, dass teilweise scharfkantige und raue Oberflächen vorliegen, die auch Spuren von Verschmutzungen aufweisen können. Diese können unter Umständen eine Beeinträchtigung von optischen Bildverarbeitungsmethoden verursachen, die im Rahmen einer industriellen Demontage und Zustandsbewertung für die Erkennung von oberflächlichen Schäden angewandt werden können. Zudem kann das automatisierte maschinelle Handling beeinträchtigt werden, vor allem wenn (zerstörungsfreier) Formschluss für die Greifprozesse genutzt wird. Am CUTEC Forschungszentrum hat sich gezeigt, dass eine Beschädigung von Bauteilen durch automatisierte Prozesse reduziert werden kann, wenn Werkzeuge formschlüssig greifen.

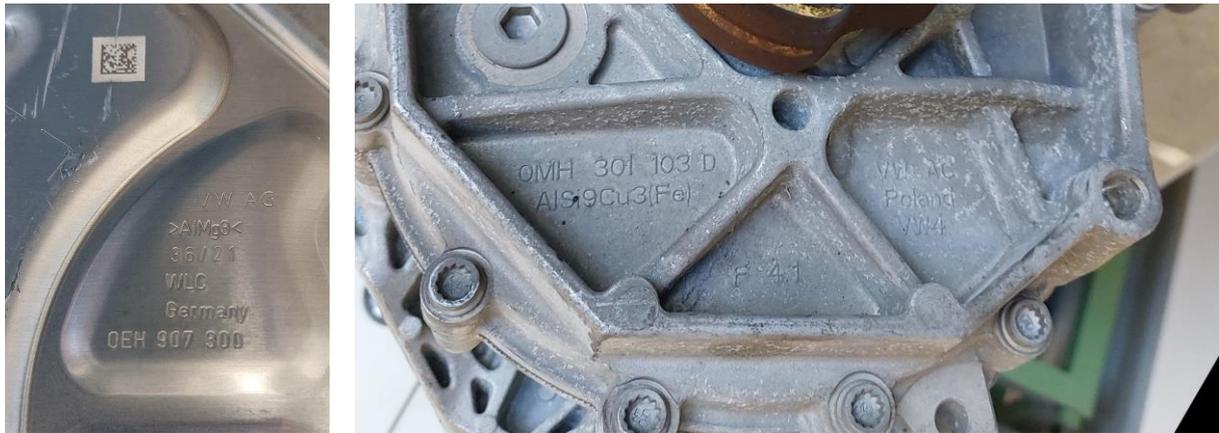


Abbildung 41: Markierungen an Gehäuseteilen des ID.4 Aggregats

Hinsichtlich der Identifikation sind QR-Codes, Seriennummern und Materialbezeichnung auf einigen Bauteilen, wie den Gehäuseteilen, vorhanden (Abbildung 41). Somit kann die Identifizierung des vorliegenden Produkts erleichtert werden. Auch die Einordnung in Materialfraktionen bei materiellem Recycling wird dadurch erleichtert.

3.2.2. Dokumentation der Demontageschritte

Es empfiehlt sich, möglichst früh im Demontageprozess die Betriebsflüssigkeiten abzulassen, um Kontaminationen des Demontageraumes sowie demontierter Bauteile zu vermeiden – im vorliegenden ID.4 Aggregat entsprechend das Getriebeöl. Dieses wird abgelassen, indem ein Blindstopfen (Abbildung 42) gelöst und das Aggregat gekippt wird. Das Aggregat wurde für circa drei Minuten in gekipptem Zustand belassen, sodass ein Großteil des Getriebeöls ausgebracht werden konnte.



Abbildung 42: Blindstopfen zum Ablassen des Getriebeöls am ID.4 Aggregat (rot markiert)

Der nächste Schritt war die Demontage unterschiedlicher peripherer Anbauteile, wie einer Motoraufhängung sowie einer Kabelhalterung (Abbildung 43).



Abbildung 43: Peripher zu demontierende Komponenten am ID.4 Aggregat: Motoraufhängung (links) und Kabelhalterung (rechts)

Die Demontage der Motoraufhängung ist problemlos, nach der Demontage der Kabelhalterung verbleibt jedoch ein Stehbolzen im Gehäuse, der mit einer langen Bitnuss demontiert werden muss. Dadurch steigt die Anzahl der notwendigen Demontagewerkzeuge und Werkzeugwechsel. Im nächsten Schritt wurde eine weitere Kabelhalterung demontiert (Abbildung 44).

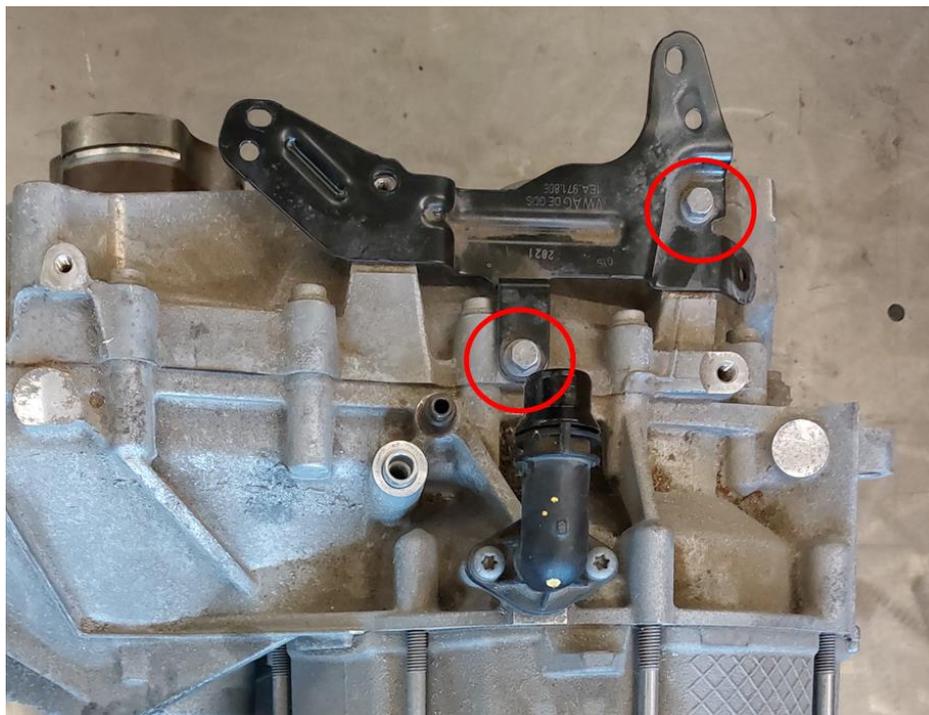


Abbildung 44: Peripher montierte, lackierte Kabelhalterung (rot markiert sind die zu lösenden Schrauben)

Positiv hervorzuheben bei der Demontage des lackierten Kabelhalters ist wie bei der zuvor demontierten Motorhalterung, dass die zu lösenden Schrauben allesamt gleich ausgerichtet sind, was die Schraubenkopferkennung durch RobotVision-Systeme in einem Schritt ermöglicht.

Der darauffolgend demontierte, gewinkelte Kühlmittelstutzen (Abbildung 45) kann ebenfalls problemlos demontiert werden, jedoch wurde eine zum vorherig genutzten Sechskant andere Schraubenkopfform genutzt (Innensechsrund). Würden für die Fixierung von Kabelhalterung und Kühlmittelstutzen identische Schraubenköpfe genutzt, könnte ein Werkzeugwechsel des Demontageschraubers eingespart werden.



Abbildung 45: Kühlmittelstutzen (gewinkelt)

Ein weiterer, im Vergleich kürzerer Kühlmittelstutzen ist im äußeren Hauptgehäuse kraftschlüssig verbunden (Abbildung 46). Dieser kann voraussichtlich automatisiert durch ein geeignetes Spreizwerkzeug zerstörungsfrei geborgen werden.

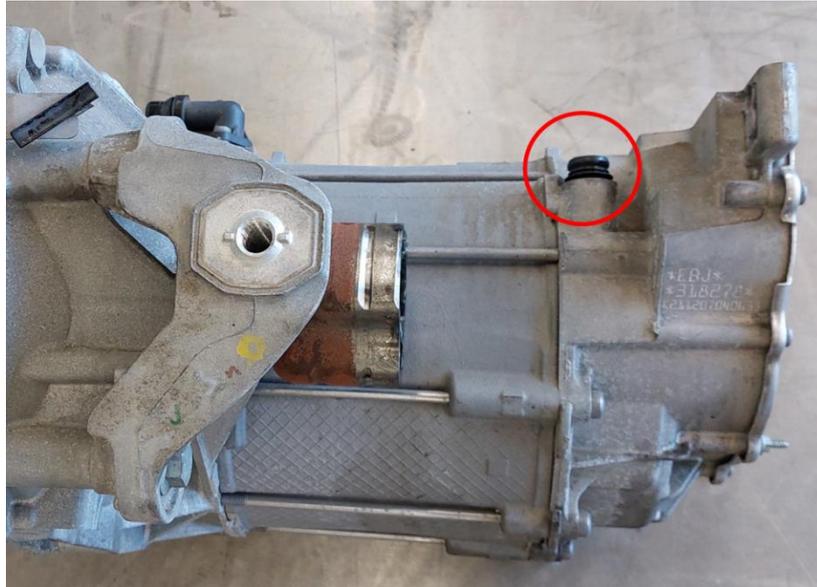


Abbildung 46: Kühlmittelstutzen am äußeren Hauptgehäuse (elektrofachseitig)

Im nächsten Demontageschritt wird der Elektrofachdeckel demontiert (Abbildung 47). Hierbei bestehen mehrere Herausforderungen. Zunächst müssen dazu unterschiedliche Schraubentypen gelöst werden (Außensechskant mit langer Nuss und Innensechsrund). Hierbei könnte der Schraubentyp vereinheitlicht werden. Weiterhin zeigte sich, dass die Klebe-/Dichtflächen am Gehäuse stark aufgeraut sind, sodass eine Reinigung desselbigen deutlich erschwert wird. Zusätzlich verbleibt eine erhebliche Menge der Klebedichtung am Deckel des Elektrofachs, der somit ebenfalls im Falle eines ReUse aufwendig gereinigt werden müsste. Ergänzend zeigte sich, dass der Deckel des Elektrofachs bei der Demontage verbogen werden kann, sodass vor einem ReUse eine Prüfung notwendig sein wird. Wären Konter- oder Greifpunkte am Deckel vorgesehen, wäre eine zerstörungsfreie Demontage eher möglich.

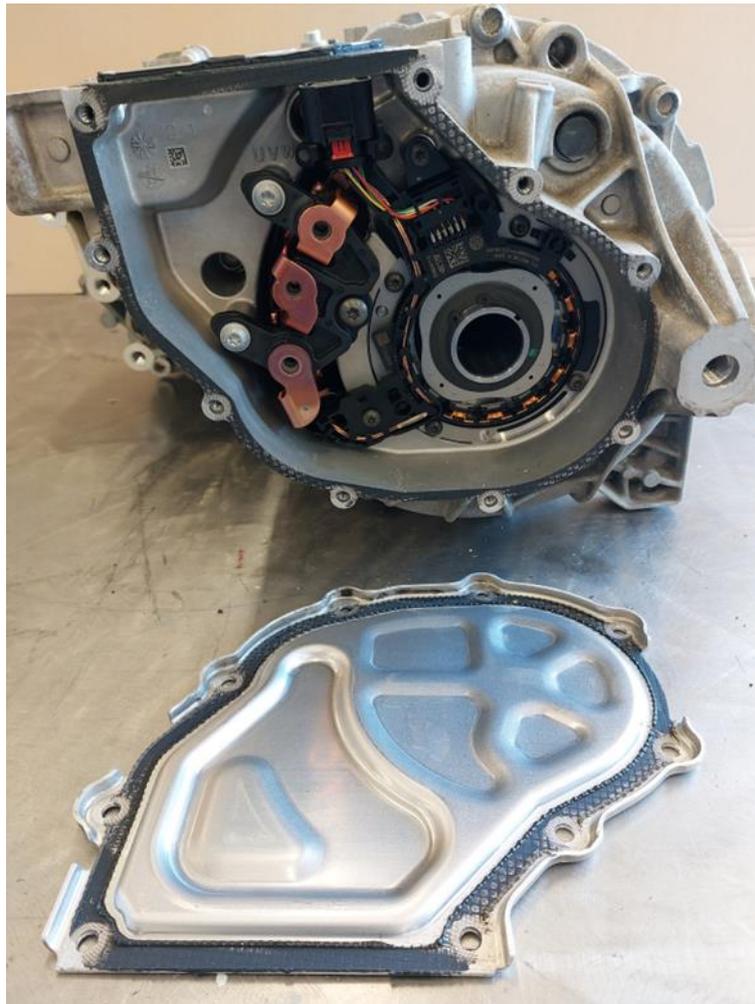


Abbildung 47: Elektrofachdeckel im demontierten Zustand

Nachdem der Deckel entfernt wurde, kann im nächsten Schritt eine Sensoreinheit (Abbildung 48) demontiert werden, die zur Messung der Drehzahl sowie der Temperatur des Stators dient. Diese ist durch sechs Innensechsrundsrauben im Gehäuse fixiert (Positionen siehe Abbildung 49) und klemmt zusätzlich mit einem Steckverbinder auf einem Hairpin des Stators (Abbildung 50). Die Klemmverbindung zwischen Temperatursensor und Statorpin ist recht fest ausgelegt und ist weit vom Volumenschwerpunkt des Bauteils entfernt, weswegen die Eignung für eine zerstörungsfreie, automatisierte Demontage als eher gering eingeschätzt wird. Die Einheit umfasst zudem einen Steckverbinder (Abbildung 48), der bei der Demontage der Leistungselektronik gelöst werden müsste. Von einer tieferen Demontage der Sensoreinheit für Drehzahl und Temperatur wurde abgesehen.

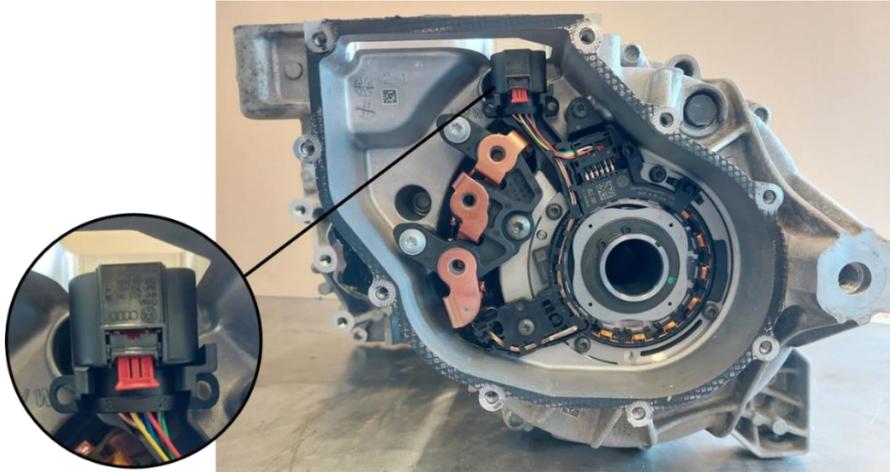


Abbildung 48: Elektrofach mit Sensoreinheit zur Messung der Drehzahl sowie der Temperatur der Statorwicklung. In Vergrößerung ein Steckverbinder, der Kontakt zur Leistungselektronik herstellt.

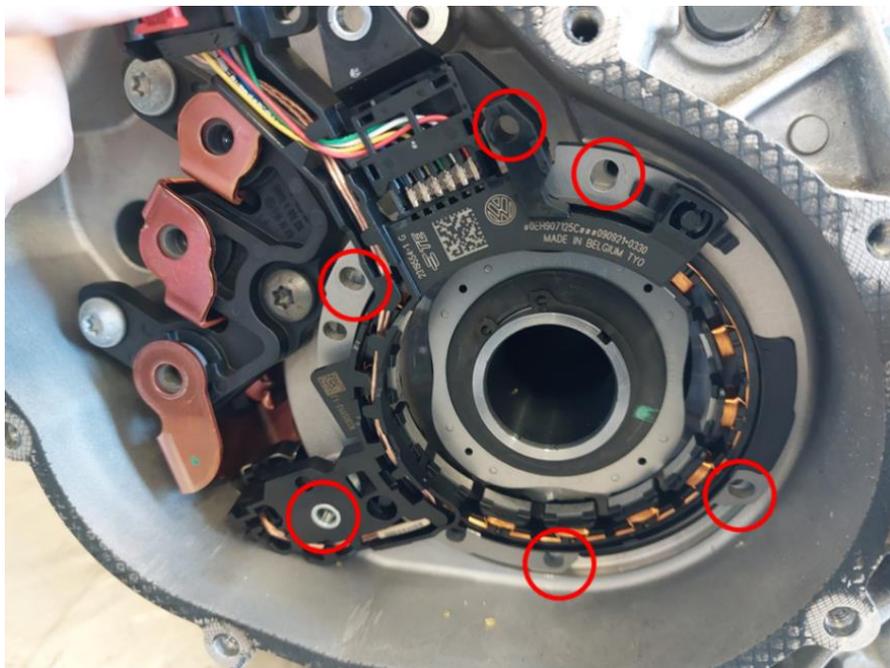


Abbildung 49: Position der fixierenden Schrauben der Elektronikeinheit (rot markiert)

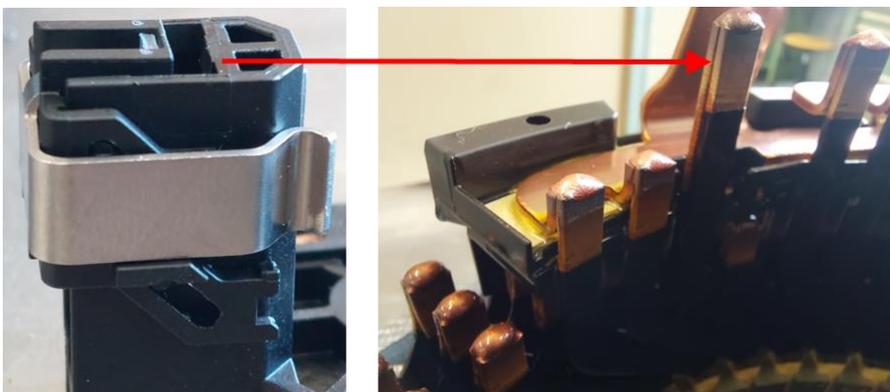


Abbildung 50: Steckverbinder für die Temperaturmessung (links) sowie der Statorpin, auf den dieser aufgesteckt ist (rechts)

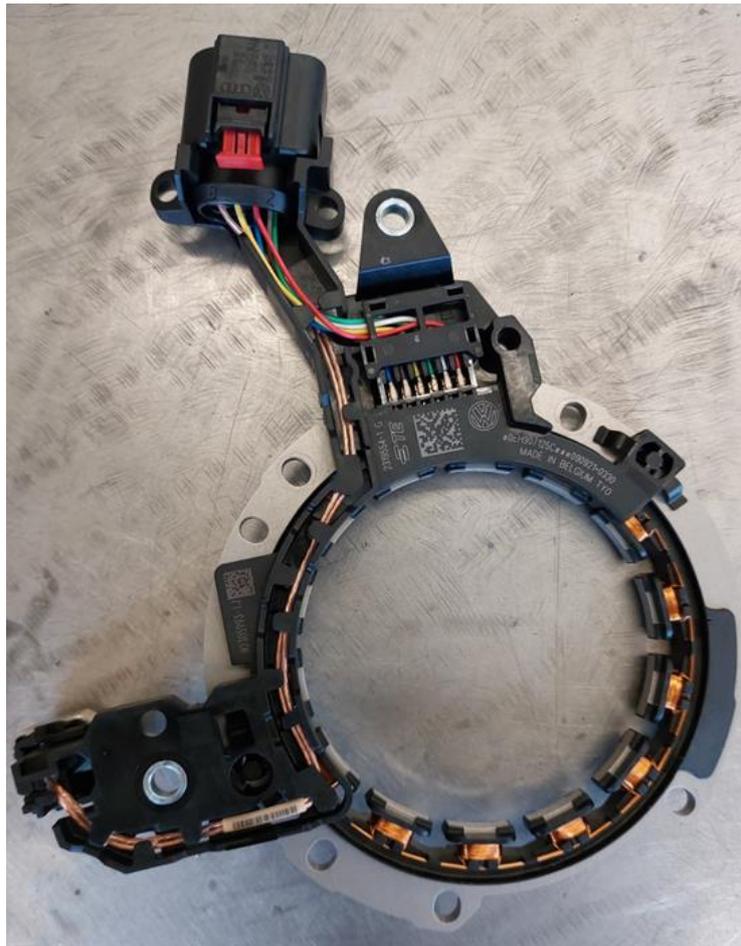


Abbildung 51: Demontierte Sensoreinheit

Nachdem die Sensoreinheit ausgebaut wurde (Abbildung 51), kann das Kontaktierungselement für die Verbindung von Leistungselektronik mit der elektrischen Maschine nach dem Lösen dreier Innensechsrundsrauben durchgeführt werden (Abbildung 52).

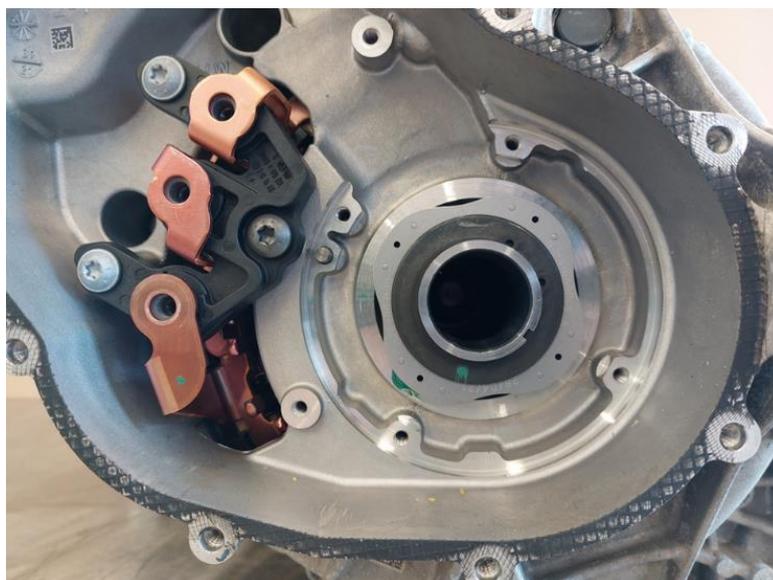


Abbildung 52: Kontaktierungselement zwischen Stator und Leistungselektronik

Das Kontaktierungselement dient als Sockel, auf dem die durchreichenden Stromschiene der Leistungselektronik fixiert werden. Die vergleichsweise leichte und im Demontageprozess früh durchführbare Trennung der Leistungselektronik von Getriebe und elektrischer Maschine ist für mögliche Re-X Optionen als besonders positiv einzuschätzen. So kann beispielsweise die Leistungselektronik recht simpel durch eine neue oder aufgewertete Variante ersetzt werden, ohne wesentliche Veränderungen am Rest des Antriebsaggregats vorzunehmen. Die Entnahme des Kontaktierungselements aus dem Bauraum war jedoch mit leichten Schwierigkeiten verbunden, da es dabei verkantet werden muss. Auch hier ist eine zerstörungsfreie, automatisierte Demontage nur eingeschränkt bzw. mit erhöhtem Aufwand möglich.

Nach der Demontage des Kontaktierungselements kann das Geberrad für den Drehzahlsensor demontiert werden (Abbildung 53). Dieses liegt lose und formschlüssig auf der Rotorwelle auf, ist jedoch durch einen Sicherungsring und eine Druckscheibe gesichert.

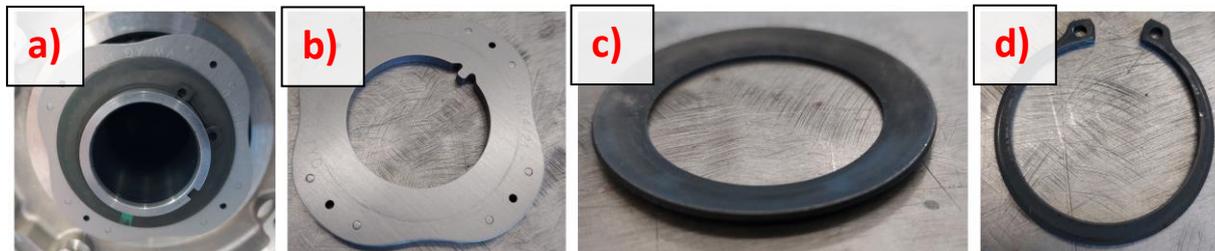


Abbildung 53: Geberrad für den Drehzahlsensor. a) Montiert b) demontiert c) Druckscheibe d) Sicherungsring
Die Demontage eines Sicherungsring stellt üblicherweise im Rahmen der automatisierten Demontage eine extrem schwierig lösbare Herausforderung dar, ist jedoch manuell durchführbar.

Als nächster Demontageschritt wurde das verbliebene, teildemontierte Aggregat neu ausgerichtet und die erste Gleichlaufgelenkwelle (Abbildung 54, auf der motorabgewandten Getriebeseite) demontiert. Diese ist mittels einer Kerbverzahnung mit dem Differential verbunden und mit Hilfe eines Sprenglings gesichert.

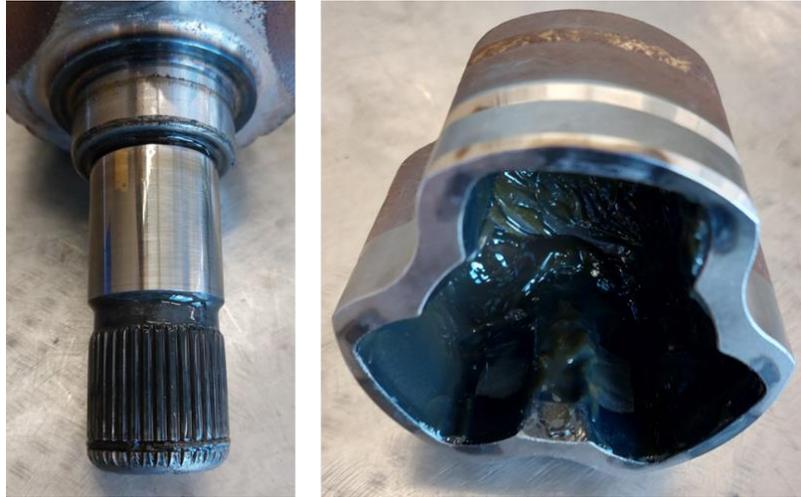


Abbildung 54: Gleichlaufgelenkwelle. Steckverbindung mit Kerbverzahnung (links), Gelenkkörper (rechts)

Der Demontageschritt ist nur unter hohem Kraftaufwand durchzuführen und eignet sich gut für die automatisierte Demontage. Es fällt auf, dass die Gleichlaufgelenkwelle massiv mit Fett ausgekleidet ist, das bei der Demontage in der Werkstatt bei circa 20° C geringfügig fließfähig wurde. Es wird ein potenziell hohes Kontaminationsrisiko vermutet, das bei einer automatisierten Demontage das Demontagemodul verunreinigen könnte.

Nachdem die getriebeseitige Gleichlaufgelenkwelle demontiert ist, kann der Getriebedeckel demontiert werden (Abbildung 55), wofür zunächst 17 Vielzahn-schrauben gelöst werden müssen. Vielzahn-schraubenköpfe stellen die nunmehr dritte Schraubenkopfform dar, was eine entsprechende Ausstattung des Demontageschraubers mit Bitnüssen und entsprechende Werkzeugwechselzeiten bedingt. Außerdem wird der Getriebegehäusedeckel, wie auch schon der Elektrofachdeckel, mit einer schwarzen, stark haftenden Dichtmasse am Gehäuse verklebt. Die Klebung kann zwar durch zwei gegenüberliegende Konterpunkte aufgehebelt werden, jedoch verbleibt die Dichtmasse sowohl am Getriebegehäusedeckel als auch am Gehäuse. Dies erschwert die Reinigung wesentlich. Solange die zweite Gleichlaufgelenkwelle nicht ebenfalls demontiert wird, verbleibt das nun offengelegte Differential in einem definierten Zustand. Dahingegen hängt es von der Positionierung des teildemontierten Aggregats ab, ob die Kunststoffwanne zur Verteilung des Getriebeöls im Getriebegehäusedeckel oder im Gehäuse verbleibt, da diese lediglich gesteckt ist. Hier kann demnach ein undefinierter Zustand entstehen, der zusätzlich durch die ölhaltigen Oberflächen eine Kontamination des Demontagemoduls verursachen kann.

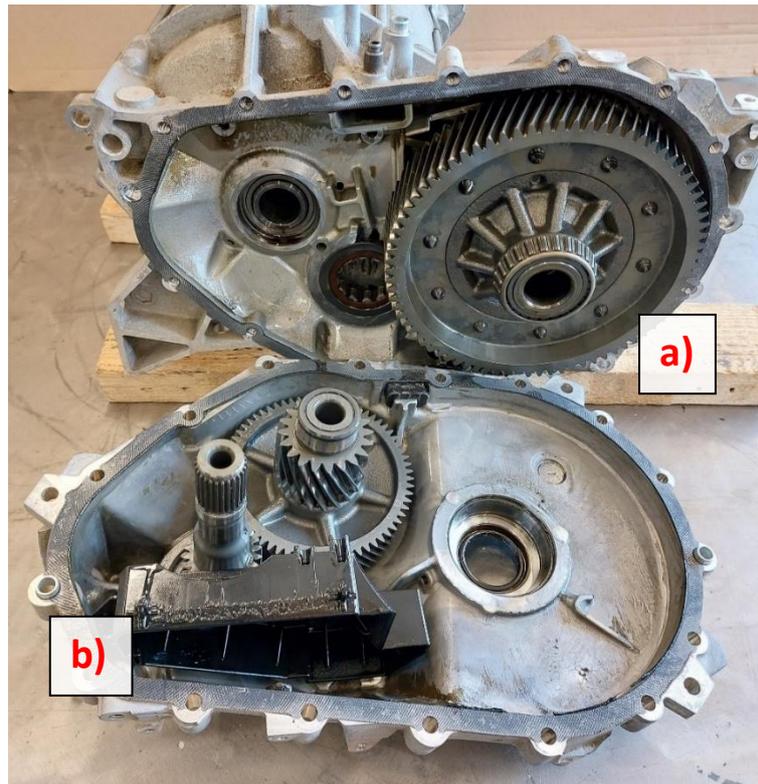


Abbildung 55: Geöffneter Getriebedeckel. Markiert sind a) Differential und b) Ölwanne

Nach der Öffnung des Getriebes verbleiben zwei Zahnräder im Getriebedeckel. Die Demontage dieser ist mit erheblichen Schwierigkeiten versehen. Zunächst wurden dazu die außenliegenden Lagerabdeckungen (Abbildung 56) aufgebohrt und aus dem Getriebedeckel gehiebt. Dabei wurden die Abdeckungen zerstört. Eine leichte Beschädigung des Getriebedeckels ist nicht auszuschließen, sodass für eine Automatisierung eine andere Lösung anzustreben ist.

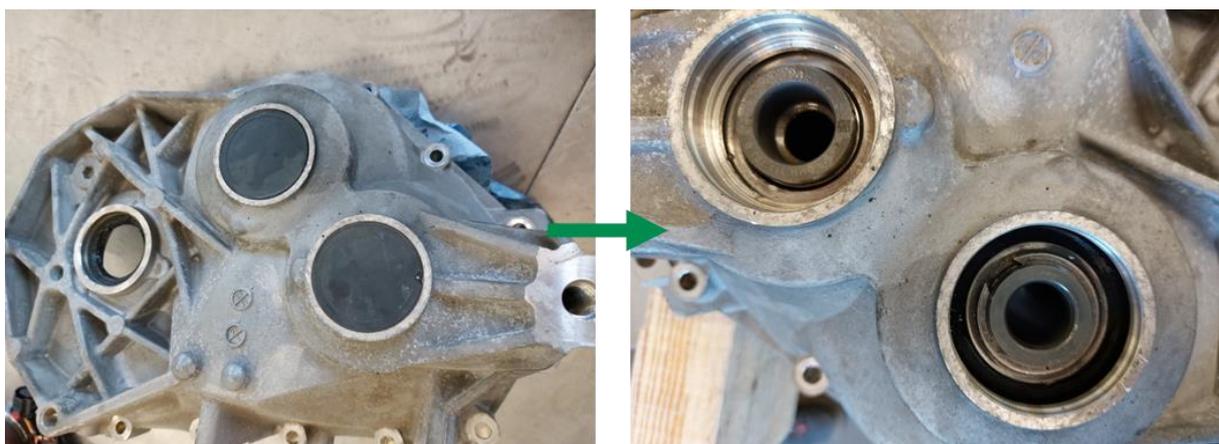


Abbildung 56: Lagerabdeckungen (links) sowie darunter liegende Enden der Zahnradwellen (rechts, rechte Welle noch mit Sicherungsring)

Unter den Lagerabdeckungen liegen Sicherungsringe ohne Montageösen um die Zahnradwellen. Durch den Mangel an Ösen wurde die ohnehin schon schwierige Demontage noch weiter erschwert. Der Einschätzung nach ist eine automatisierte Demontage an dieser Stelle somit ausgeschlossen. Nach der

Demontage der Sicherungsringe können die in die Lager gepressten Zahnräder unter hohem Kraftaufwand ausgetrieben werden (Abbildung 57).



Abbildung 57: Demontierte Getriebezahnräder: Abtreibendes Zahnrad des Rotors (links) sowie Zwischenwelle (rechts)

Auch hier ist eine Beschädigung peripherer Bauteile, bis hin zu einer Deformation des Getriebedeckels, nicht auszuschließen. Aus Sicht der Demontage wird empfohlen, die Lagerkonfiguration zu ändern und stattdessen Schrägwälzlager in X-Konfiguration einzusetzen. Diese könnten vergleichsweise leicht im Getriebedeckel eingelegt werden und sind im Fall eine Demontage deutlich leichter (auch zerstörungsfrei) zu bergen. Zusätzlich können die Lagersitze als Sacklöcher vorgesehen werden, sodass auf den zusätzlichen De- und Montageschritt der Lagerabdeckungen verzichtet werden kann. Dies stellt lediglich die Sicht des Demonteurs dar, für den Vorschlag der alternativen Lagerkonfiguration wurden nicht die Geräuschentwicklung, Haltbarkeit, etc. des Getriebes berücksichtigt.

Sobald die Zahnräder demontiert sind, sind die Lager im Getriebedeckel offengelegt (Abbildung 58). Die beiden Radialwälzlager können nach der Demontage von Sicherungsringen vergleichsweise leicht ausgepresst werden. Die dem Lager des Differentials zugehörige Lagerschale ist hingegen in ihren Lagersitz hinterschnittfrei eingepresst, sodass eine Demontage nicht möglich ist. Entsprechend beschränkt sind die Re-X Optionen für den Gehäusedeckel. Für eine Wiederverwendung müsste die Lagerschale als Abnutzungsbauteil vermutlich ausgetauscht werden, für ein stoffliches Recycling wäre es ebenfalls sehr sinnvoll, die Lagerschale aus Stahl vom Getriebedeckel aus Aluminium zu trennen. Im Inneren des Getriebedeckels finden sich leichte Rauigkeiten (Abbildung 58), die bei einer optischen Bauteilprüfung zu ungenauen Ergebnissen führen können. Zuletzt wurden die Passhülsen aus dem Getriebedeckel ausgepresst und ein Simmering (Durchtrittsöffnung der Gelenkwelle) ausgestoßen. Beide Prozesse lassen sich potenziell gut vollautomatisiert durchführen.

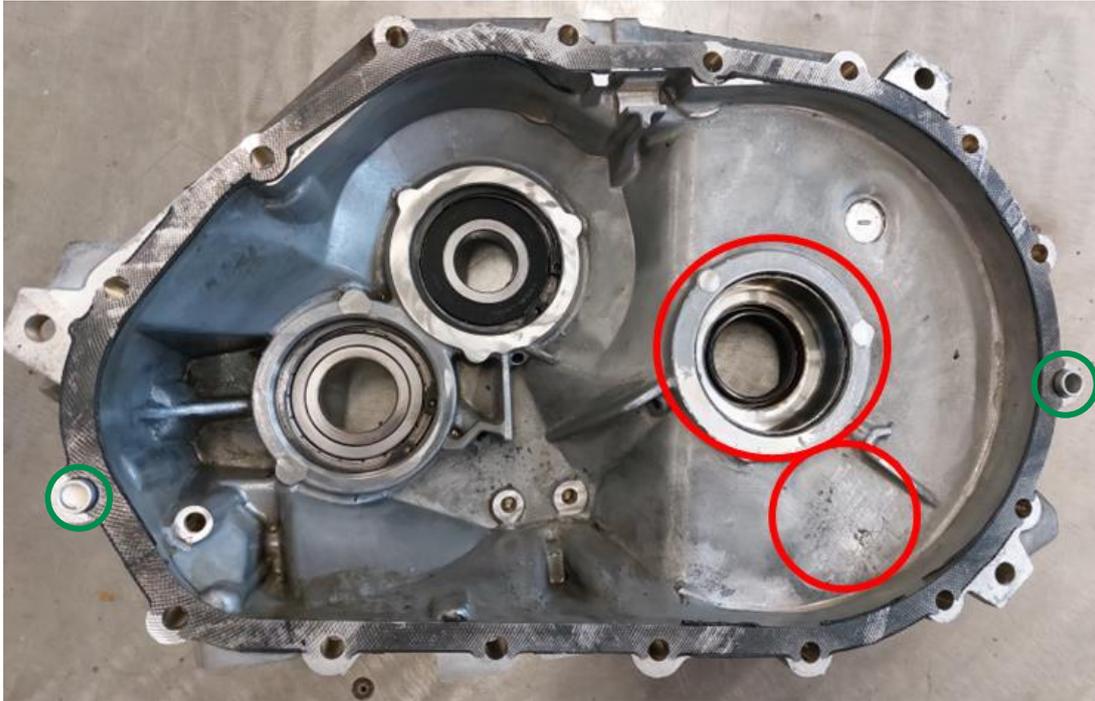


Abbildung 58: Getriebedeckel vor Demontage der hier verbauten Lager. Rot markiert sind die erwähnten Problemstellen: Die Lagerschale des Differentials ohne Hinterschneidung sowie die verbliebenen Rauigkeiten aus dem Gussprozess. Grün markiert: Passhülsen

Parallel zur Demontage der Zahnräder und der Lager aus dem Getriebedeckel kann die Demontage des Differentials erfolgen (Abbildung 59). Dieses ist durch einen Sprengring und eine Kerbverzahnung mit der zweiten Gleichlaufgelenkwelle verbunden und kann mit erhöhtem Kraftaufwand von dieser abgezogen werden. Im Demontageprozess müssen dementsprechend beide gehalten werden, um undefinierte Zustände zu vermeiden. Das Differential selbst ist mehrteilig aufgebaut, die innenliegenden Zahnräder fallen nach der Demontage der Steckwellen mittels Splinttreiber aus dem Gehäuse. Die im Differential befindlichen Zahnräder wiederum liegen zusätzlich auf Gleitschalen, die ebenfalls nach dem Lösen der Steckwellen aus dem Gehäuse fallen. Auf das Gehäuse des Differentials ist ein Zahnkranz gepresst, der zusätzlich mittels zehn Vielzahnschrauben fixiert ist. Die starke Verpressung ließ sich nur unter sehr hohem Kraftaufwand lösen, jedoch ist durch die Trennung von Gehäuse und dem (Abnutzung unterliegenden) Zahnkranz eine bessere Reparierbarkeit des Differentials gegeben. Die Rollenwälzlager, die an beiden Enden des Differentialgehäuses aufgepresst sind, ließen sich auch mit speziell für die Anwendung vorgesehenen Lagerabziehern nicht lösen. Lediglich der Lagerkäfig konnte unter Zerstörung entfernt werden, die inneren Lagerschalen verblieben auf dem Differentialgehäuse.

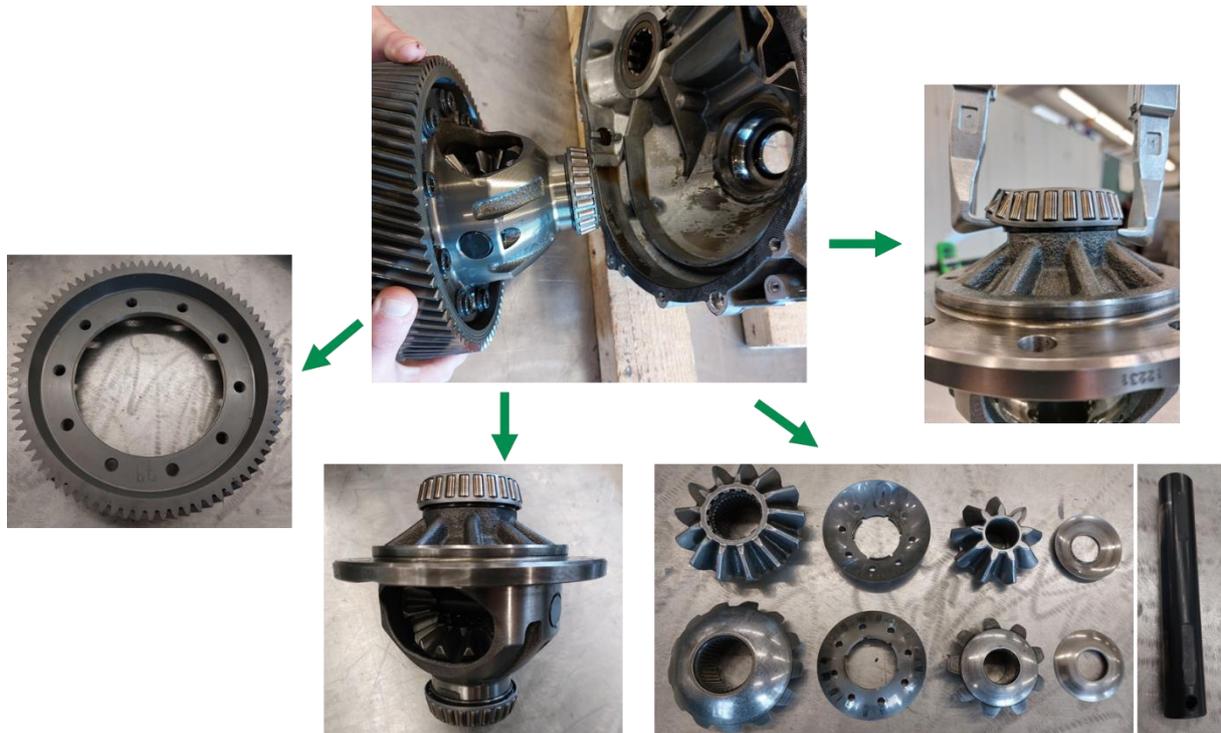


Abbildung 59: Demontage des Differentials

Nach Demontage des Differentials aus dem Getriebegehäuse kann die Demontage des im Hauptgehäuse verbleibenden Lagers der Zwischenwelle (Abbildung 60) durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich um ein Radialrollenlager, welches einen Hinterschnitt durch den Rollenkäfig bietet. Dieser wurde jedoch beim manuellen Abziehversuch zerstört. Gleichzeitig wird die Außenschale des Lagers durch einen Sicherungsring im Gehäuse fixiert, was die Demontage kompliziert gestaltet.



Abbildung 60: Lager der Zwischenwelle im Hauptgehäuse. Sichtbar sind im oberen Bereich die Enden des Sicherungsrings

Als Alternative wird aus Sicht der Demontage erneut eine Lagerkonfiguration in X-Anordnung vorgeschlagen, sodass die Lagerschalen deutlich leichter und zerstörungsfrei geborgen werden könnten.

In der Folge wurde das Restaggregat wieder gedreht und die Seite der elektrischen Maschine rückt in den Fokus. Hier wurde als nächster Schritt der Distanzring auf der Motorwelle (Abbildung 61) unter hohem Kraftaufwand abgezogen, was insbesondere vor dem Hintergrund des abgerundeten Hinterschnitts mittels Standardwerkzeugen schwierig war. Würde ein entsprechender, an die abgerundete Kontur angepasster Abzieher zum Einsatz kommen, könnte die Demontage des Distanzrings voraussichtlich auch automatisiert erfolgen.

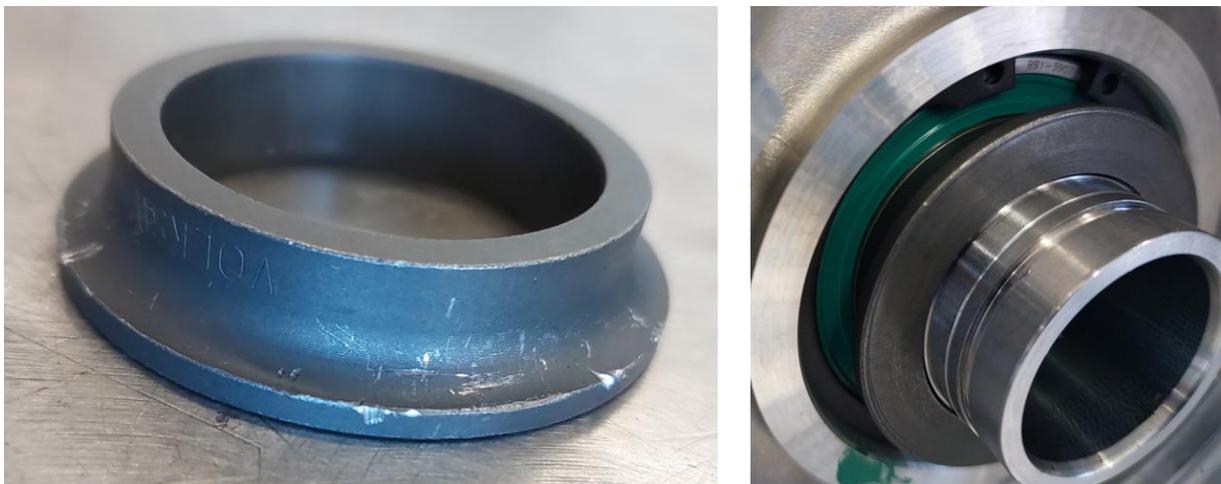


Abbildung 61: Distanzring auf der Motorwelle (links demontiert, rechts montiert)

Darauffolgend wurden neun Gehäusespannschrauben (Abbildung 62) gelöst, um das Gehäuse der elektrischen Maschine zu demontieren. Die Schraubenköpfe liegen teilweise sehr tief (zugänglich durch das Elektrofach) und bedürfen im Fall der automatisierten Demontage besonderer Schraubbits. Weiterhin sind die Gehäusespannschrauben so lang, dass der automatisierte Abtransport mittels Absaugung nicht möglich ist. Der Einsatz weiterer gängiger Methoden (Magnethalterung, Klemmung am Bit) wäre zu prüfen. Zusätzlich weisen die zwei tief liegend verbauten Gehäusespannschrauben Kupferscheiben auf, die lose auf dem Schaft liegen und unter Umständen beim Abtransport zurück in den Bauraum fallen können.



Abbildung 62: Gehäusespannschrauben. Rot markiert zwei Kupferscheiben.

Sobald der Gehäuseteil der elektrischen Maschine unter größerem Kraftaufwand vom Rest des Aggregats getrennt wird (Abbildung 63, Mitte), ist nicht klar, in welchem der verbleibenden Wälzlager der Rotor verbleibt. Bei der vorliegenden Demontage verblieb der Rotor initial im Gehäuseteil des Elektrofachs. Aus diesem wurde der Rotor mit erhöhtem Kraftaufwand ausgetrieben und aufgefangen.



Abbildung 63: Öffnen des Hauptgehäuses: Demontieren der Spannschrauben (links), Trennen der Gehäuseteile (Mitte), Ziehen des Gehäuseteils der elektrischen Maschine (rechts). In diesem Fall verblieb der Rotor im Lager seitens der elektrischen Maschine.

Die drei Haupt-Gehäuseteile liegen danach vereinzelt vor, das zentrale Hauptgehäuse beinhaltet dann noch den Stator (Abbildung 64).

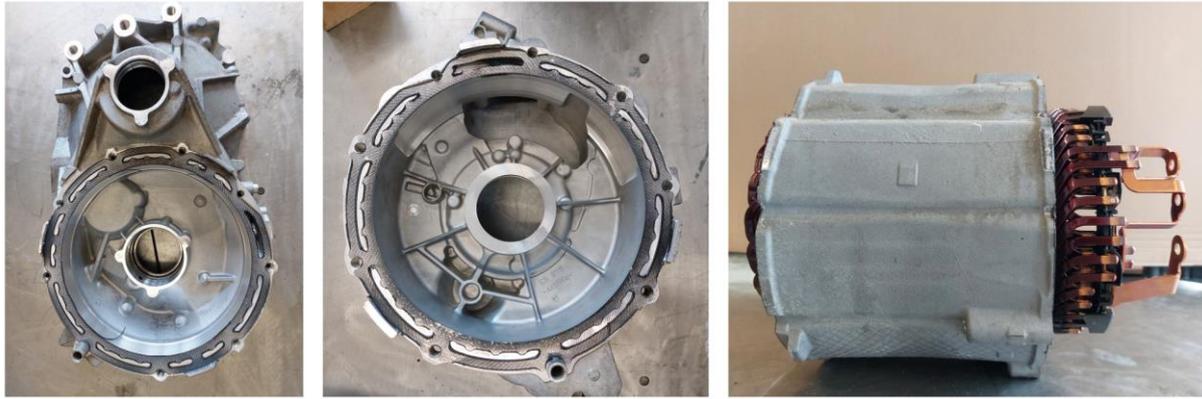


Abbildung 64: Haupt-Gehäuseteile: Getriebegehäuse (links), Gehäuseteil des Elektrofachs (Mitte), zentrales Hauptgehäuse mit Stator (rechts)

Der Rotor weist vier Spannschrauben auf, die durch das Elektroblechpaket des Rotors reichen und mit Muttern gesichert sind. Bei der Demontage ist daher ein beidseitiges Halten notwendig, was im Falle der automatisierten Demontage zwei Roboter erfordert. Gleichzeitig ist der Rotor stark magnetisiert, was eine entsprechende Auslegung der Werkzeuge aus nicht ferromagnetischen Materialien erfordert. Für die Demontage wäre es besser, wenn die Rotorspannschrauben auf einer Seite in der stirnseitigen Aluminiumscheibe eingeschraubt wären, sodass ein einzelner Roboter für diese Aufgabe ausreicht.

Die stirnseitigen Aluminiumscheiben (Abbildung 65) weisen keinerlei Hinterschnitte auf, weswegen sie nicht ohne einen die Oberflächen beschädigenden Kraftaufwand abgezogen werden können. Daher wurde mittels eines Keils eine Spalte zwischen Elektroblechpaket und Aluminiumscheiben erzeugt, in der Hebel angesetzt werden konnten. Erneut gilt, dass besondere nichtmagnetisierbare Werkzeuge zum Einsatz kommen sollten. Beim Eintreiben des Keils wurden sowohl die Aluminiumscheiben als auch das Elektroblechpaket beschädigt.

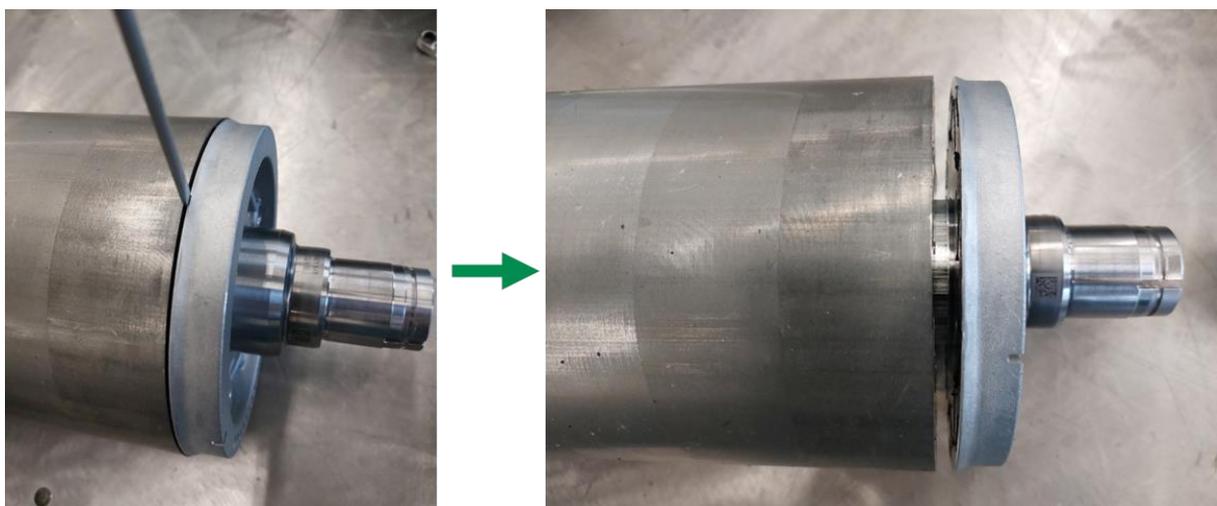


Abbildung 65: Demontage der stirnseitigen Aluminiumscheiben des Rotors mittels Hebel

Nach der Demontage der Aluminiumscheiben werden das Elektroblechpaket und die innenliegenden, verklebten Magneten des permanenterregten Rotors sichtbar. Probesthalber wurden einzelne Bleche des Elektroblechpaketes vom Rotor gezogen. Dies geschah unter mäßigem Kraftaufwand, hatte jedoch eine starke Verformung der Bleche zur Folge. Durch die dreifache Schränkung (vier Segmente) des Rotors stehen die Magnete nicht axial übereinander. Daher wird ein Austreiben der Magnete in diesem Demontagezustand als nicht möglich eingestuft. Ein Vereinzeln der Segmente müsste dementsprechend zuvor erfolgen. Für weitergehende Optionen siehe Kapitel 2.

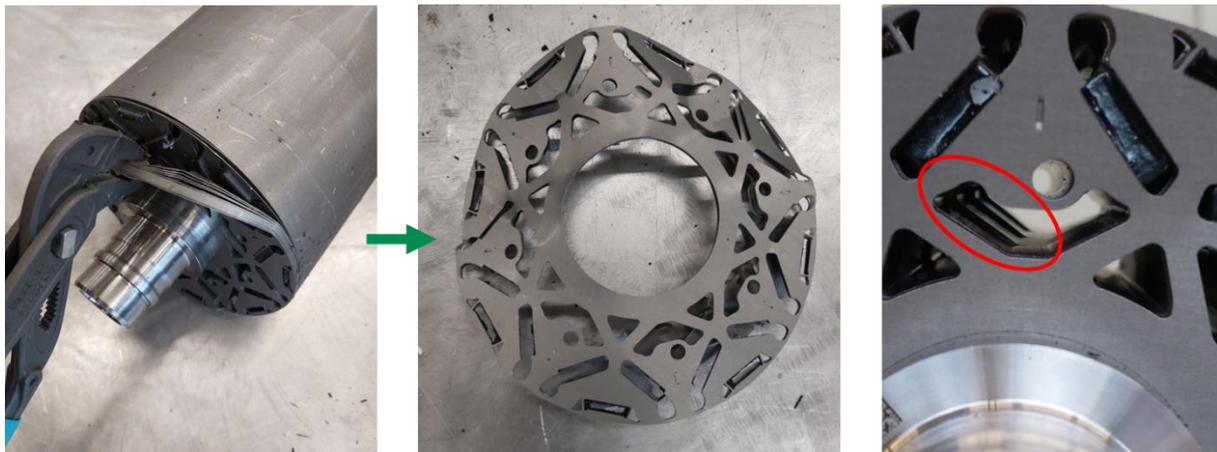


Abbildung 66: Zerstörende Demontage der Rotorbleche (links und Mitte) sowie Detailaufnahme der Schränkung des Blechpakets (rechts, rot markiert)

Parallel zur Demontage des Rotors können der Stator und das Hauptgehäuse demontiert werden. Diese sind lediglich noch miteinander verklebt und abgedichtet. Die eingesetzte Dichtmasse verbleibt wie bei der Demontage der anderen Gehäuseteile auf den aufgerauten Stirnflächen und muss für eine Wiederverwendung aufwendig gereinigt werden. Die Kühlleitungen des Stators liegen außerhalb im den Stator beinhaltenden, zentralen Hauptgehäuse (Abbildung 64) und laufen in axialer Richtung hin und her. Die Wendepunkte der Kühlbahnen liegen jeweils auf den Stirnflächen des Hauptgehäuses bzw. des Gehäuseteils des Elektrofachs. Dadurch ist die Reinigung der Kühlgänge deutlich vereinfacht im Vergleich zu einem durchgängigen Kühlgang. Wird die Ausbringung des Kühlmittels wie die Ausbringung des Getriebeöls den eigentlichen Demontageschritten vorgeschaltet, entfällt das Argument der guten Reinigungsfähigkeit. Ebenso ist zu beachten, dass bei optionaler Verwendung einer anderen Dichtungsmöglichkeit (wie bspw. einer Einlegedichtung aus Papier, Kupfer o.ä.) diese deutlich schwieriger mit dem vorliegenden Kühlkonzept zu vereinbaren wäre.

Abschließend sollen einige allgemeine Aspekte zur Demontage des ID.4-Aggregates genannt werden. Insgesamt wurden 63 Bauteile bzw. Baugruppen demontiert, ein nicht unerheblicher Teil davon zerstörend. Im Vergleich zu anderen elektrischen Antriebsaggregaten sind vergleichsweise wenige Stecker vorhanden, was allerdings auch auf den Anlieferzustand mit bereits entfernter

Leistungselektronik zurückzuführen ist. Prinzipiell gilt, dass Stecker automatisiert eher schwer zu lösen sind und häufig an dieser Stelle auf eine zerstörende Demontage zurückgegriffen wird.

Größtenteils sind die Bauteile gut zu erreichen, was eine der Grundbedingungen für die automatisierte Demontage ist. Weiterhin finden sich wenige Überlappungen einzelner Bauteile vor, was einer guten Demontagestruktur entspricht und den Einsatz optischer Erkennungssysteme begünstigt. Einzig die hohe Variation von Schraubenkopfformen und -größen macht die Demontage deutlich aufwendiger. Insbesondere im Hinblick auf die automatisierte Demontage gehören Schraubverbindungen zu den zeitlich eher aufwendigen Prozessen, da jede Schraube optisch geprüft wird. Da Schrauben häufig vielfach bei einer Bauteilfügung vorliegen, müssen entsprechende Zeiten für Ausschraubprozesse eingeplant werden. Durch die eher hohe Anzahl an Schraubenkopfformen wird die Dauer der Schraubprozesse durch die notwendige Häufigkeit der Werkzeugwechsel noch weiter erhöht.

Hinsichtlich der verwendeten Materialien im ID.4 Motor ist aufgefallen, dass unterschiedliche Aluminiumlegierungen für die Gehäuseteile verwendet wurden (AlMg3, AlSiCu3(Fe), AlSi9Cu). Ebenso liegt eine Kabelhalterung verzinkt vor, während eine andere lackiert wurde. Aus Sicht der stofflichen Verwertung bietet es sich an, die Anzahl unterschiedlicher Materialien so weit zu reduzieren, wie möglich, was die Lagerung nach der Demontage vereinfacht und die Vielfalt der Verwertungswege verringert.

4. Design-for-Re-X Ansätze

Bei der manuellen Demontage der elektrischen Antriebsaggregate des Ford E-Transit und des VW ID.4 sind konstruktive Details aufgefallen, die im Hinblick auf eine (automatisierte) Demontage verbessert werden können, um diese zu erleichtern und unter Umständen auch ökonomisch besser darstellen zu können. Dabei gilt generell, dass die hier gegebenen Design-for-Re-X-Hinweise ausschließlich vor dem Hintergrund der Demontage aufgezeigt werden, da wesentliche Einflussfaktoren aus Planung, Fertigung, Produktion, Nutzung, Vertrieb, etc. nicht vorlagen und entsprechend nicht berücksichtigt werden konnten.

Für die Einordnung bestehender Design-for-Re-X-Optionen wurden drei wesentliche Wirkfelder identifiziert. Diese sind 1) die Morphologie des Produktes, 2) die verwendeten Materialien sowie 3) der (De)Montageprozess. Da sich die Design-for-Re-X-Optionen in der Regel nicht auf einzelnes Feld auswirken, wurden diese graphisch in einem Dreiecksdiagramm angeordnet, welches die zu erzielende Gesamtwirkung, welche sich aus der Umsetzung der genannten Maßnahmen ergibt, anteilig auf die Auswirkungsfelder verteilt (Abbildung 67).

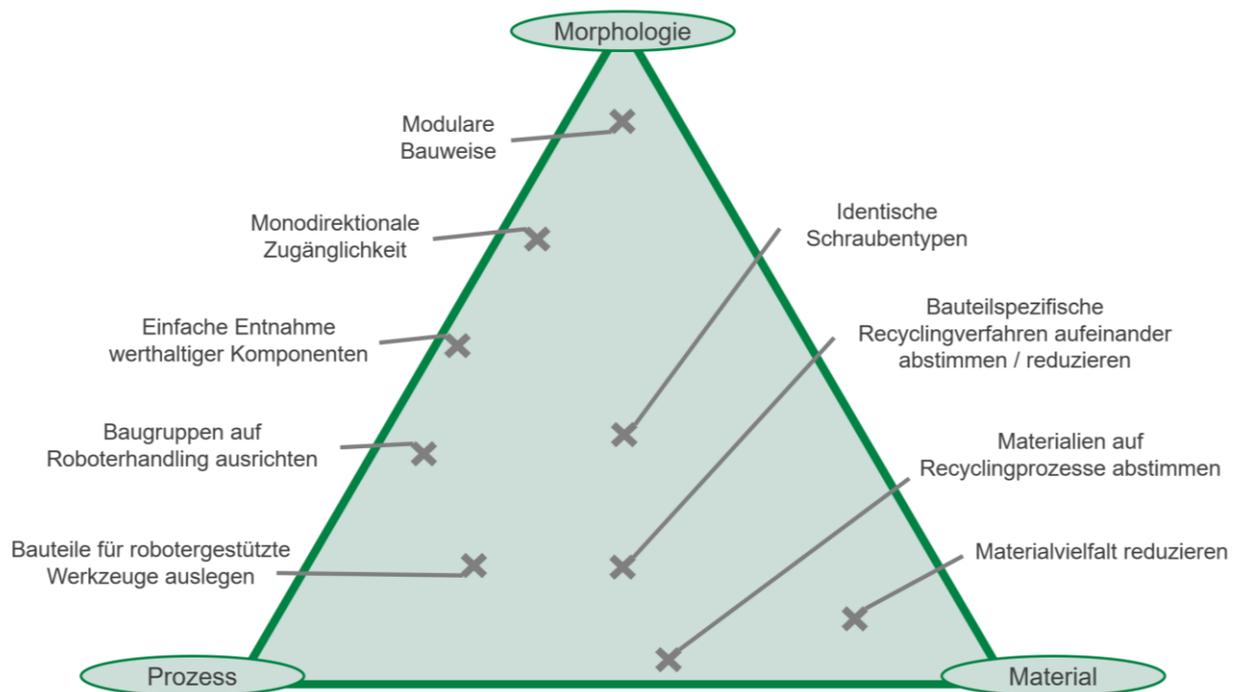


Abbildung 67: Verortung identifizierter Design-for-Re-X-Ansätze in den Wirkfeldern Morphologie, Prozess und Material

Folgend wird auf die dargestellten Design-for-Re-X-Optionen im Einzelnen eingegangen.

Modulare Bauweise

Eine modulare Bauweise der Antriebsaggregate wirkt sich von allen aufgeführten Optionen am stärksten auf die Morphologie des Produktes aus. Die modulare Bauweise ist dann von gesteigertem Interesse, wenn eine Demontageanlage für unterschiedliche Produkttypen geeignet sein soll. Modularität reduziert in diesem Fall voraussichtlich die Anzahl vorzuhaltender Werkzeuge in den automatisierten Demontagemodulen, da einzelne Baugruppen (Getriebe, E-Maschine, Leistungselektronik) übergreifend in mehreren Produktvarianten genutzt werden. Auch auf die Wiederverwendung wirkt sich die modulare Bauweise positiv aus, da noch einsatzfähige Module nach der Wiedergewinnung durch Demontage auch in abgeänderten Konfigurationen wiederverwendet werden können. Sofern die vorgesehenen Schnittstellen beibehalten werden können, ist auch die Wiederverwendung in Kombination mit technisch verbesserten Modulen denkbar.

Monodirektionale Zugänglichkeit

Die Umsetzung des Prinzips der monodirektionalen Zugänglichkeit wirkt sich ebenfalls stark auf die Produktmorphologie aus, hat jedoch demgegenüber auch einen hohen Einfluss auf den Demontageprozess. Hier ist im Wesentlichen eine Beschleunigung des Demontageprozesses zu erwarten, da die bei automatisierter Demontage mittels Industrierobotern zentral aufgespannten Antriebsaggregate seltener neu positioniert werden müssen. Eine Zeitersparnis wird sich dabei voraussichtlich aus dem Wegfall der zum Positionieren notwendigen Zeit ergeben und andererseits auch aus dem Wegfallen der im Demontageprozess vielfach verwendeten Szenenanalyse mittels optischer Verfahren. Bei vollständiger Zerlegbarkeit bspw. der E-Maschine von einer Seite her, kann zudem evtl. die maschinelle Ausstattung eines automatisierten Demontagemoduls deutlich reduziert werden.

Einfache Entnahme werthaltiger Komponenten

Die einfache Entnahme werthaltiger Komponenten ist eine Option, die sich ebenfalls stark auf Morphologie und Prozess auswirkt. Eine vollständige Demontage ist aus ökonomischer Sicht nicht immer die sinnvollste Option (siehe dazu Kapitel 5). Sofern die Zielstellung der Demontage eines Antriebsaggregates stark auf einzelne Komponenten fokussiert ist, ist im Design des Antriebsaggregates speziell deren einfache Demontierbarkeit zu beachten. Ein Beispiel ist der Rotor, welcher aufgrund des enthaltenen Magnetmaterials von gesteigertem strategischen Interesse sein kann. Die Entnahme des Rotors kann z.B. begünstigt werden, indem einerseits die Anzahl der für die Entnahme notwendigen Demontageschritte möglichst gering gehalten wird und andererseits, indem demontagefreundliche Verbindungstypen, die eine hohe Prozesssicherheit aufweisen, verwendet werden. Insofern ist die

einfache Entnahme werthaltiger Komponenten ein Ansatz, der sich aus der Umsetzung verschiedener Aspekte ergibt.

Baugruppen auf Roboterhandling ausrichten

Bei den bisherigen Demontageprojekten am CUTEC Forschungszentrum hat sich immer wieder herausgestellt, dass das Design geeigneter Werkzeuge besonders herausfordernd ist, vor allem wenn eine zerstörungsfreie Demontage umgesetzt werden soll und die Bauteile bisher nicht für ein roboterseitiges Handling vorgesehen sind. Hinsichtlich des Handlings empfiehlt es sich insbesondere, auf formschlüssige Greifmechanismen zurückzugreifen, da diese eher eine Beschädigung der Bauteiloberflächen vermeiden können. Da im vorliegenden Fall die Gehäuseteile vornehmlich im Gussverfahren hergestellt werden, weisen diese tendenziell wenige Hinterschnitte auf (gute Entnahme aus der Gussform), was das formschlüssige Greifen stark erschwert. Daher empfiehlt es sich aus Sicht der Demontage, speziell vorgesehene Handlingschnittstellen an den wesentlichen Gehäuseteilen vorzusehen. Insbesondere für das Handling vollständiger Elektromotoren können diese Schnittstellen mit den Aufnahmepunkten im Chassis zusammenfallen, da diese ohnehin eine ausreichende Festigkeit aufweisen müssen. Um dabei die Anzahl unterschiedlicher Werkzeuge zu reduzieren, könnte zudem produktübergreifend auf standardisierte Schnittstellen zurückgegriffen werden.

Bauteile für robotergestützte Werkzeuge auslegen

Neben dem Handling ist auch die Demontage von Einzelbauteilen häufig schwer automatisiert umzusetzen, da oft menschliche Prozesse nachgeahmt werden müssen, die auf erfahrungsbasierten komplexen Bewegungen und intensiven Auge-Hand-Feedbackschleifen beruhen. Ein häufig angetroffenes Beispiel ist die Demontage von Sicherungsringen, die für einen menschlichen Demonteur zwar schwierig durchführbar, aber aufgrund der flexiblen Reaktion auf den Prozesszustand zu überwinden ist. Im Gegensatz dazu weisen die robotergeführten Werkzeuge weniger Feedback auf und können somit schlecht auf ungewünschte Zustände reagieren. Diese Zustände lassen sich teilweise nur vermeiden, indem Bauteile bereits in der Produktentstehungsphase auf ein Handling durch robotergeführte Werkzeuge ausgelegt werden.

Ebenso gilt, insbesondere für werthaltige Komponenten, der gleiche Ansatz wie für das Handling des Gesamtprodukts: Definierte Schnittstellen, an denen standardisierte Greifer ansetzen können, können die automatisierte Demontage stark vereinfachen und eher wirtschaftlich gestalten.

Identische Schraubentypen

Eine Design-for-Re-X-Option, welche sich auf Morphologie, Material und Prozess gleichermaßen auswirken kann, ist die Verwendung identischer Schraubentypen. Hier ist insbesondere die Ausprägung der Kopfform entscheidend. Durch Umsetzung dieser Option kann die Werkzeugausstattung eines

Demontagemoduls reduziert werden, wichtiger jedoch wird die Zeitersparnis im Prozess durch Wegfallen von Werkzeugwechseln angesehen. Speziell die Schraubentypen in aufeinanderfolgenden Demontageschritten sollten dazu möglichst aufeinander angepasst werden. Die Auswirkung des Angleichens der Schraubentypen auf den Demontageprozess wird im Vergleich mit anderen hier vorgestellten Optionen als eher gering eingeschätzt, kann jedoch aufgrund eines ebenso geringen Aufwandes in der Produktion voraussichtlich schnell etabliert werden. Ebenso sind die Auswirkungen auf eine Aufbereitung nicht außer Acht zu lassen, da die Reduktion der Schraubentypen hier evtl. eine Verringerung des Logistikaufwandes bewirken kann.

Bauteilspezifische Recyclingverfahren aufeinander abstimmen / reduzieren

Häufig sind Bauteile so ausgelegt, dass die enthaltenen Materialverbände für die automatisierte Demontage untrennbar sind. Sowohl die verschiedenen Materialien als auch die Verbindungstypen erfordern dabei oft unterschiedliche Recyclingschritte. Ein Beispiel sind Rotoren, die aufgrund der vielfältigen an sie gestellten Anforderungen eine sehr komplexe Baustruktur aufweisen. Beispielsweise enthalten sie Schrumpf- und Klebeverbindungen, die unter hohem Kraftaufwand voneinander abgestemmt bzw. aufgebrochen werden müssen. Durch eine geschickte Kombination von Materialien und Verbindungstypen ließe sich voraussichtlich dennoch ein verminderter Recyclingaufwand ohne Einschränkung der funktionellen Anforderungen im Betrieb realisieren. Als Fallbeispiel sei hier der Carbon-Sleeved-Rotor der Firma Tesla genannt. Bei diesem sind die Rotorbleche segmentiert und die enthaltenen Magnete in den Segmenten eingeklemmt. Die Stabilität der Baugruppe wird durch Ummantelung mit Carbonfaserverbundwerkstoff erreicht. Was zunächst nach einer zusätzlichen Komplikation für das Materialrecycling klingt, stellt bei näherer Betrachtung eine Vereinfachung dar. Bei diesem Design können durch eine Pyrolyse der Rotoren mehrere Recyclingschritte kombiniert überwunden werden: Die bei der Pyrolyse erreichten Temperaturen erzeugen die erforderliche Entmagnetisierung des Magnetmaterials, im Pyrolyseprozess wird die Matrix der Carbonfaserummantelung thermisch zersetzt und eventuell zusätzlich verwendete Klebstoffe werden ebenfalls zersetzt. Anschließend liegen die werthaltigen Magnete separiert vor.

Materialien auf Recyclingprozesse abstimmen

Unterschiedliche Materialien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Recyclingeignung. Sollen die im Demontageprozess erhaltenen Materialien möglichst effizient recycelt werden, lohnt es sich, die entsprechenden Kennwerte zu vergleichen. Beispielsweise lassen sich einige Kunststoffe hochwertig im Kreislauf führen, ohne eine wesentliche Verminderung des Einsatzspektrums zu erfahren. Andere Kunststoffe lassen sich hingegen vornehmlich thermisch verwerten. Mit dem Ziel des Erhalts der eigenen Rohstoffbasis gilt es, Letzteres zu vermeiden.

Eine weitere Option ist die Vermeidung von Materialkombinationen bzw. Störstoffen, welche zu Problemen in den etablierten Recyclingrouten führen können. Diese sind für die Recyclingrouten der Massenmetalle gemeinhin bekannt. Eine Übersicht ist beispielsweise im Report „Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel“¹³ des International Resource Panel des Umweltprogramms der Vereinten Nationen gegeben. Vor diesem Hintergrund wäre die Nutzung von Substitutionsoptionen für Materialkombinationen, welche im Demontageprozess schwer trennbar sind, zu prüfen.

Materialvielfalt reduzieren

Neben den genannten Punkten gilt es allgemein, die Vielfalt verwendeter Materialien in den Antriebsaggregaten möglichst gering zu halten. Dies kann teilweise weitgehend ohne Einfluss auf die Morphologie oder den Produktionsprozess umgesetzt werden. Ein Beispiel sind die im ID.4-Motor verwendeten Gehäusematerialien. Da diese aus unterschiedlichen Aluminiumlegierungen hergestellt wurden, wäre ein getrenntes Materialrecycling anzuraten, um ein Downcycling zu verhindern. Dies bedingt jedoch eine Trennung und separate Lagerung und damit erhöhte Aufwände. Bei Nutzung identischer Legierungen wäre eine Separation obsolet. Zudem würden größere Mengen der dann verwendeten Legierung anfallen, was einen positiven Effekt für die Planbarkeit spezifischer Recyclingverfahren bedingen kann.

¹³ www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/e-book_metals_report2b_recyclingopportunities_130919.pdf

5. Exceltool zur Berechnung optimaler Demontagetiefen

5.1. Vorstellung des Exceltools

Eines der zentralen Ziele der Studie war die Beantwortung der Fragestellung nach der optimalen Demontagetiefe elektrischer Traktionsmotoren – sowohl hinsichtlich des ökologischen als auch des ökonomischen Optimums. Ebenso sollten Stadien zwischen diesen beiden Optima kalkuliert werden. Da diese Fragestellung unabhängig von der Struktur eines spezifischen Traktionsmotors beantwortet werden sollte, wurde ein Excel-basiertes Tool entwickelt. Die Grundidee des Tools ist, dass der Anwender spezifische Informationen zu einer linearen Demontagesequenz in das Tool eingibt, welche zu einem Endergebnis in Form eines Handlungsvorschlags verrechnet werden. Um dem Anwender die Verwendung zu vereinfachen, wurde das Tool so gestaltet, dass Eingabefelder markiert sind und auf eventuell fehlende Einträge hingewiesen wird.

Nach Eingabe der für die ökonomisch-ökologische Bewertung notwendigen Informationen werden die Ergebnisse zentral auf einem Ergebnisblatt ausgegeben. Auf diesem ist ebenso die Einstellung der gewünschten Abwägung zwischen ökonomisch und ökologisch ausgerichteter Demontageaktivität vorgesehen. Als Ergebnis werden Daten zur CO₂-Einsparung sowie dem zu erwirtschaftenden Gewinn ausgegeben, die mit einer Demontage bis zu einer beliebigen Demontagetiefe verknüpft sind. Zudem wird der Schritt ausgegeben, bis zu dem die Demontage unter der eingegebenen ökonomisch-ökologischen Zielstellung durchgeführt werden sollte.

5.2. Berechnungsmethoden

Im Rahmen der Entwicklung des Tools wurden verschiedene Möglichkeiten zur Abwägung zwischen ökonomischem und ökologischem Optimum entwickelt und getestet. Unter anderem wurde ein Ansatz zur Verrechnung der möglichen Emissionseinsparungen sowie der zu erwirtschaftenden Gewinne aus dem Demontageprozess mittels der gegebenen Marktpreise für CO₂-Zertifikate umgesetzt. Dieser Ansatz wurde im Projektverlauf jedoch verworfen, da die bis dahin bestehenden Marktpreise für CO₂-Zertifikate keine sinnvolle Umrechnung zuließen. Bei einem Preis von unter 100 Euro pro Tonne CO₂-Äquivalent wäre im Großteil der eingegebenen Datensätze das Ergebnis, die Demontage bis zum ökonomisch vorteilhaftesten Demontageschritt fortzuführen und den erwirtschafteten Gewinn anteilig in CO₂-Zertifikate zu investieren, um diese vom Markt zu nehmen und die damit rechnerisch resultierende, hohe Emissionseinsparung zu erzielen. Vielmehr wird es als zielführend betrachtet, die direkt durch die Demontageaktivität eröffneten Optionen der Emissionseinsparung zu realisieren. Das im Tool final umgesetzte Vorgehen der Abwägung zwischen den beiden Randoptima wird folgend erläutert. Ausgangspunkt sind die, nach Eingabe sämtlicher erforderlichen Parameter für jeden Demontageschritt in der linearen Demontageabfolge automatisch berechneten, aufsummierten

monetären Gewinne sowie Emissionseinsparungen. Diese Wertepaare sind auf der Ergebnisseite vollständig einsehbar. Der Schritt mit dem maximalen ökonomischen Nutzen (Gewinn) sowie derjenige mit dem maximal zu realisierenden ökologischen Nutzen (Emissionseinsparung) werden automatisch hervorgehoben. Die Gewinn- und Emissionsdaten werden im nächsten Schritt normiert, sodass die Optima jeweils den Wert 1 erhalten. Dieser Schritt ermöglicht die Bestimmung der optimalen Demontagetiefe, basierend auf der gewählten Abwägung zwischen Ökonomie und Ökologie. Die Abwägung geschieht durch Festlegung der ökonomischen und ökologischen Gewichtungsfaktoren. Die normierten Werte werden jeweils mit den gewählten Gewichtungsfaktoren multipliziert und die Ergebnisse addiert. Aus den resultierenden Werten wird nun das Maximum ermittelt und graphisch hervorgehoben. Der dem Maximum zugehörige Demontageschritt stellt den letzten Demontageschritt dar und indiziert somit die errechnete optimale Demontagetiefe für die eingegebene Zielstellung. Ein weiterer Schritt umfasst die Normierung der erhaltenen Ergebnisse. Dadurch wird eine schnelle Sichtbarkeit der prozentualen Abweichung vom errechneten Optimum erreicht. Neben dem Optimum werden zusätzlich die besten 10 % der ermittelten Werte graphisch hervorgehoben. Die bei Demontage bis zu diesen Schritten erzielbaren Wertepaarungen aus Gewinnen sowie Emissionseinsparungen können für den Anwender vorteilhafte Ergebnisse darstellen.

6. Fazit & Ausblick

Durch die Demontage der bereitgestellten elektrischen Antriebsaggregate des VW ID.4 sowie des Ford E-Transit konnte im Rahmen des Projekts eine produktnahe Bewertung der Demontageeignung vorgenommen werden. Dabei wurden konstruktive Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Aggregaten deutlich. Es handelt sich in beiden Fällen um permanenterregte Synchronmaschinen, die einen Stator mit Hairpin-Technologie enthalten. Auch die Rotoren weisen einen ähnlichen Aufbau auf. Deutliche Unterschiede ergeben sich hinsichtlich der Produktstruktur. So ist das Getriebe im Fall des VW-Aggregates so konstruiert, dass eine Abdichtung der elektrischen Maschine gegenüber dem Getrieberaum besteht, bei dem Ford-Aggregat hingegen findet eine offene, gemeinsame Ölschmierung von Getriebe und Motorenlagern statt, ohne dass Getriebe- und Motorinnenraum gegeneinander gedichtet sind. In diesem Konzept leitet das Öl auch die Abwärme aus der elektrischen Maschine ab, beim VW-Aggregat hingegen ist das Gehäuse des Stators von Kühlmittel durchflossen. Bei dem Ford-Aggregat ist zudem die Ölpumpe innerhalb des Aggregates verbaut, ebenso wie eine elektrisch angesteuerte Parksperre. Auch die Positionierung der abtreibenden Wellen ist zwischen den Aggregaten unterschiedlich gelöst worden. Bei dem Ford-Aggregat wird eine der Wellen durch die Hohlachse des Rotors geführt. Die abtreibenden Wellen des VW-Aggregates hingegen liegen außerhalb der elektrischen Maschine.

Die Unterschiede in der Produktstruktur führen nicht zu einer grundsätzlich besseren oder schlechteren Demontageeignung. Die Eignung für eine effiziente automatisierte Demontage erwies sich vielmehr abhängig von kleineren Details der gewählten konstruktiven Lösungen. Negative Beispiele sind die Verwendung einer Dichtmasse, die sich als unzureichend kohäsiv erwies, um eine Kontamination des Demontageraumes auszuschließen, Sprengringe ohne ausreichende Werkzeugansatzpunkte, korrosive Materialien, die eine beschädigungsfreie Trennung von Bauteilen im End-of-Life erschweren, Steckverbindungen mit komplexen Verriegelungsmechanismen, stark verpresste Verbindungen sowie ein Mangel an Konterpunkten oder Hinterschnitten. Ebenso sind einige konstruktive Details aufgefallen, die sich deutlich positiv auswirken. Dazu zählen beispielsweise eine frühe Trennbarkeit der Leistungselektronik vom Restaggregat, ohne elektrische Maschine oder Getriebe öffnen zu müssen, die Befestigung des Stators mit Spanschrauben, die eine beschädigungsfreie Entnahme stark begünstigt oder die Montage von Kabelsträngen auf Halblechen, die eine definierte Lage garantieren. Mit Hinblick auf eine Eignung zur Wiederverwendung ist zudem die Trennbarkeit von Gehäuse und Zahnkranz des Differentials positiv zu vermerken. Im Fall der permanenterregten Rotoren konnte in den manuellen Versuchen die Verspannung der Blechpakete mittels Spanschrauben (VW ID.4) gegenüber der Verspannung mit einer zentralen Flachmutter (Ford E-Transit) deutlich einfacher demontiert werden.

Zusammenfassend wurde im Rahmen der Studie ein grundlegender Überblick über geeignete Design-for-Re-X-Ansätze geschaffen, der die Industrie bei der zukünftigen Etablierung einer effizienten automatisierten Demontage elektrischer Antriebsaggregate unterstützen soll. Es verbleibt nun die Aufgabe für die Forschung, die aus den manuellen Demontageversuchen gewonnenen Erkenntnisse in automatisierte Lösungen umzusetzen. Speziell im Hinblick auf die angestrebte Wiedergewinnung des wirtschaftsstrategisch relevanten Permanentmagnetmaterials sind an individuelle Rotordesigns angepasste Werkzeuge und Prozesse zu entwickeln, um die in der vorliegenden Studie dargestellten Lösungen aus der Forschung in die industrielle Anwendung zu überführen. Das im Projekt erstellte Exceltool unterstützt die industrielle Umsetzung konkreter Anwendungsfälle durch die realisierte Möglichkeit zur Ermittlung ökonomischer und ökologischer Optima der Demontagetiefe.

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2019)

Nr.	Titel
316	MULTIC-Tooling, 2019
317	EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
318	Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
319	Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
320	Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
321	Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
322	Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
323	Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
324	Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
325	Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
326	Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
327	Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
328	Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
329	Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
330	Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
331	Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
332	Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
333	Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
334	Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
335	Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
336	Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
337	Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
338	Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckguss-komponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020

- 339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
- 340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
- 341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
- 342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
- 343 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
- 344 Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
- 345 Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
- 346 Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021
- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
- 349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
- 350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
- 351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
- 352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
- 353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
- 354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
- 355 Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
- 356 Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
- 357 Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
- 358 Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022
- 359 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
- 360 Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022
- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022

- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023
- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023
- 375 Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe, 2023
- 376 Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität - Eine Studie zur Optimierung der Demontage, 2023

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2023

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik