

**Industrielle Demontage von Batteriemodulen und
E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer
Rohstoffe für die E-Mobilität – DeMoBat**



ABSCHLUSSBERICHT

Projektkoordination

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Leiter des Fraunhofer IPA

Projektleitung

Sabri Baazouzi

Fraunhofer IPA

Laufzeit

01.12.2019 – 30.04.2023

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

Gefördert durch



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Betreut vom



PTKA

Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Projektpartner

Projektpartner	Förderkennzeichen
1. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)	L7520101
2. Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	L7520104
3. Institut für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	L7520103
4. CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum	L7520102
5. Institut für nachhaltige Energietechnik und Mobilität (INEM) an der Hochschule Esslingen	L7520105
6. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) – Fachgebiet Physikalische Chemie	L7520106
7. acp systems AG	L7520111
8. GreenIng GmbH & Co. KG	L7520110
9. ERLOS Produktion und Montagen GmbH	L7520107
10. Silberland Sondermaschinen und Fördertechnik GmbH	L7520108

Autor*innen

Sabri Baazouzi¹, Sonja Rosenberg², Lorenz Halt¹, Christoph Konkol⁸, Eduard Gerlitz³, Leonard Kurz⁵, Andreas Sauter⁴, Sandra Huster², Frank Schultmann², Steffen Kiemel¹, Christian Schneider¹, Soumya Singh¹, Ralf Müllner¹, Thomas Götz¹, Anwar Al Assadi¹, Julian Grimm¹, Johannes Wanner¹, Tobias Nagel¹, Kai Peter Birke¹, Alexander Sauer¹, Jan-Philipp Kaiser³, Jürgen Fleischer³, Jörg Acker⁶, Anja Rietig⁶, Thomas Langner⁶, Matthias Schmidt⁹, Matthias Herpich¹⁰, Inga Landwehr¹, Carsten Glanz¹, Stefan Kuntz¹, Ralf Wörner⁵, Stephan Appel⁵, Hanno Käß⁵, Frederik Reichert⁵, Andreas Scheibe⁵, Daniel Müller⁵, Claudia Schöberl⁵, Jan Seelig⁴, Sven Birkenfeld⁴, Florian Hansen⁴, Oliver Keich⁴, Oliver Wisser⁴, Bernd Nawothnig⁴, Gerd Cronjäger⁴, Manuel Nielinger⁴, Henrike Franke⁴ und Lucas Spiehl⁴.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
2	Übergeordnete Themen	3
2.1	Marktanalyse	3
2.1.1	Rücklaufmengenplanung	4
2.1.2	Rohstoffmarktmodell und Bewertung	9
2.1.3	Recht.....	10
2.2	Demontageanalyse.....	14
2.2.1	Demontageexperiment und Auswertung.....	14
2.2.2	Demontageplaner.....	18
2.3	Geschäftsmodelle und Informationsmanagement	19
2.3.1	Zielsystementwicklung	19
2.3.2	Netzwerkplanung	21
2.3.3	Informationsmanagement	24
3	Demontage Batteriesystem zu Batteriemodulen	27
3.1	Demontagestation	28
3.2	Sicherheitskonzept	31
3.3	Programmierung.....	34
3.3.1	Offline Programming	34
3.3.2	Online Programming	38
3.4	Bildverarbeitung.....	40
3.5	Prozesse und Technologien	43
3.5.1	Verspannen der Batteriesysteme.....	43
3.5.2	Formflexibles Greifen	44
3.5.3	Greifen von Kleinteilen	45

3.5.4	Trennen von Klebeverbindungen	46
3.5.5	Lösen von Schraubverbindungen	48
3.5.6	Trennen von Verschraubungen.....	55
3.5.7	Zerstörungsfreie Demontage von Steckverbindungen	56
3.5.8	Trennen von Steckerverbindungen und Kabeln.....	63
4	Demontage Batteriemodul zu Batteriezellen.....	65
4.1	Produktanalyse.....	66
4.2	Technologieentwicklung	69
4.2.1	Demontageverfahren	69
4.2.2	Endeffektorentwicklung.....	76
4.2.3	In-Line-Sensorik	78
4.3	Systemintegration.....	82
5	Batterietest und -analyse und Prognose der elektrischen Eignung	87
6	Zelldemontage und stoffliches Recycling.....	91
6.1	Automatisierte Zerlegung und stoffliches Recycling.....	91
6.2	Monitoring des Recyclingverfahrens	97
6.3	Nachhaltigkeitsuntersuchungen zum stofflichen Recycling.....	107
6.3.1	Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI).....	107
6.3.2	Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).....	108
6.3.3	Auswertung und Schlussfolgerung.....	109
6.3.4	Prozesswasseranalyse	110
6.4	Rückführung des Rezyklats in den Kreislauf.....	111
6.4.1	Pastenherstellung/-entwicklung	111
6.4.2	Elektrochemische Charakterisierung	112
6.4.3	Zusammenfassung.....	114
7	Demontagegerechte Batteriegestaltung.....	115
7.1	Designleitfaden.....	115

7.1.1	Ergebnisse mechanische Verbindungen.....	116
7.1.2	Ergebnisse Konditionierung / Kühlung.....	118
7.1.3	Grundsätzliche Empfehlungen für demontagegerechte Gestaltung	119
7.2	Sicherheitsbetrachtung.....	120
7.2.1	Überwachung im ausgebauten Zustand	120
7.2.2	Notkühlung.....	122
7.2.3	Intelligentes Zellmodul	122
7.3	Konzeption und Modellierung.....	123
7.4	Fazit.....	127
8	Industrielle Demontage von E-Antriebsaggregaten	129
8.1	Demontagemodul für elektrische Antriebsaggregate	129
8.1.1	Demontagesysteme	129
8.1.2	Hardware.....	132
8.1.3	Software	149
8.2	Re-X Optionen.....	174
8.2.1	Bauteil-/Baugruppenprüfung	175
8.2.2	Materialanalytik	182
8.2.3	Design-for-Disassembly.....	184
8.3	Virtualisierung.....	185
8.4	Weiterführende Erkenntnisse und Ausblick.....	186
9	Zusammenfassung.....	188
10	Literaturverzeichnis	191
11	Anhang.....	199
11.1	Anhang A – Öffnung verschiedener Module mit prismatischen Zellen	199
11.2	Anhang B – Genutze generische Datensätze.....	200
11.3	Anhang C – Ergebnisse der Prozesswasseranalysen	201

1 Einführung

Ein wachsender Anteil des Individualverkehrs entfällt auf elektrisch betriebene Fahrzeuge, insbesondere Plug-In-Hybride (PHEVs) und rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2022). Die Herzstücke von BEVs und PHEVs bilden Traktionsbatteriesysteme und die elektrische Antriebsaggregate (EAAs), die den Betrieb mit elektrischer Energie ermöglichen. Dadurch ist bereits jetzt ein lokal emissionsarmer Betrieb möglich, und durch den Ausbau erneuerbarer Energien lassen sich die Gesamtemissionen perspektivisch deutlich senken im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Hill et al. 2020). Den Vorteilen im Betrieb steht eine emissionsreiche Produktion von Batteriesystemen gegenüber (Bekel und Pauliuk 2019). Außerdem enthalten sowohl Batteriesysteme als auch EAAs in der Regel Rohstoffe, deren Verfügbarkeit begrenzt ist und deren Vorkommen außerhalb Europas liegen (Olivetti et al. 2017; Lipman und Maier 2021). Um die Umweltauswirkungen zu begrenzen und die Rohstoffverfügbarkeit zu sichern, ist eine effektive und effiziente Kreislaufführung unabdingbar. Kreislaufkonzepte können dabei von der direkten Wiederverwendung, über die Wiederaufarbeitung und die Umwidmung, bis hin zum stofflichen Recycling reichen (Kadner et al. 2021). Für alle Konzepte ist es hilfreich, teilweise sogar zwingend notwendig, die Batteriesysteme und EAAs zu demontieren. Im Rahmen der Wiederaufarbeitung oder der Umwidmung kann die Demontage notwendig sein, um defekte Teile zu tauschen oder das System zu rekonfigurieren. Je nach Recyclingverfahren kann eine Demontage ebenfalls eine Voraussetzung sein, z. B. beim direkten Batterierecycling, mindestens aber erleichtert es die sortenreine Trennung von Materialien.

Die Demontage von Traktionsbatteriesystemen ist jedoch mit Gefahren verbunden. Zum einen ergeben sich bei noch geladenen Batterien Gefahren aus der Arbeit an einem Hochvoltsystem, das zudem besonders geschultes Personal erfordert (Wu et al. 2023). Zum anderen können auch tiefenentladene Batterien durch einen „Thermal Runaway“, eine unkontrollierte Reaktion der Batteriechemikalien, in Brand geraten (Liao et al. 2019).

Mit steigender Anzahl an E-Fahrzeugen ist absehbar, dass auch zahlreiche Batteriesysteme und EAAs in einigen Jahren das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen werden. Angesichts dieser Menge und angesichts der Gefahren, die der Umgang mit Batterien mit sich bringt, scheint es sinnvoll, bereits jetzt Verfahren zu entwickeln, die die automatisierte Demontage von Batteriesystemen und EAAs ermöglichen. Im Rahmen des Projekts „DeMoBat -

Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für die E-Mobilität“ war genau das die Zielsetzung. Unter Leitung des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) haben zehn Projektpartner von Dezember 2019 bis März 2023 daran gearbeitet, die Machbarkeit industrieller und automatisierter Demontage von Traktionsbatteriesystemen und EAAs zu demonstrieren. Dazu wurden nicht nur bestehende Fertigungsverfahren neu kombiniert, sondern auch Werkzeuge und Verfahren entwickelt. Während die Demontage von EAAs in einem durchgängigen Konzept umgesetzt wurde, wurde die Batteriesystemdemontage unterteilt in die automatisierte Demontage des Batteriesystems auf Modulebene und des Moduls auf Zellebene und das Öffnen der Module und das Recycling der Aktivmaterialien für den Wiedereinsatz in Batteriezellen. Damit die gefundenen Lösungen zur Demontage des Batteriesystems und des EAAs für interessierte Unternehmen anschaulich werden, wurden sie in einer dreidimensionalen, mittels Virtual Reality begehbaren Darstellung visualisiert. Darüber hinaus wurden übergeordnete Themen behandelt wie die rechtlichen Rahmenbedingungen, die Schätzung der zukünftigen Altbatterie- und Altmotormengen und die Netzwerkplanung für künftige Demontagestandorte sowie Diagnose und Prognose der Batteriezustände.

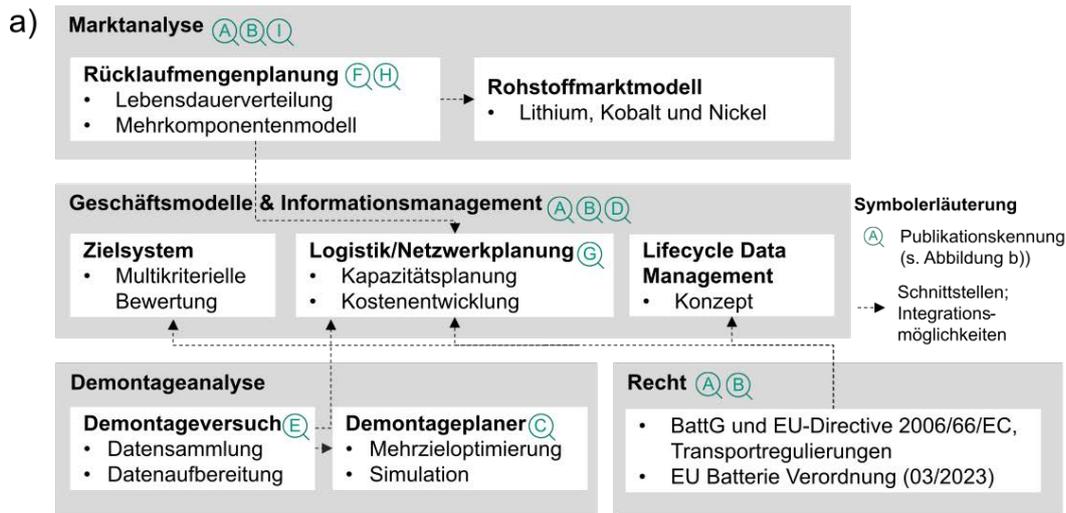
Im Folgenden werden die Projektergebnisse skizziert: Kapitel 2 erläutert die Ergebnisse der übergeordneten Untersuchungen und begleitenden Forschung. In den Kapiteln 3 und 4 werden die entwickelten Stationen für die Demontage der Batteriesysteme und -module beschrieben. Kapitel 5 widmet sich den Themen Batterietest und -analyse sowie der Prognose der elektrischen Eignung. Die Zelldemontage, das stoffliche Recycling und die Rückführung des Rezyklats in den Kreislauf werden in Kapitel 6 behandelt. In Kapitel 7 wird auf die demontagerechte Batteriegestaltung als Kernaspekt für die Etablierung effizienter Kreislaufstrategien eingegangen. Die industrielle Demontage von E-Antriebsaggregaten wird in Kapitel 8 vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Projektergebnisse in Kapitel 9.

2 Übergeordnete Themen

Das Teilprojekt Eins hat mehrere Teilbereiche umfasst, die sowohl rechtliche als auch ökonomische Perspektiven der industriellen Demontage beleuchteten. Abbildung 1 a) gibt einen Überblick über die Anordnung der Themen in vier Teilbereiche. Auf jeden der Teilbereiche wird in den folgenden Abschnitten eingegangen. Das methodische Spektrum umfasst qualitative und quantitative Analysen, Simulationen und Optimierungsansätze. Im Rahmen des Teilprojekts wurden zahlreiche Publikationen, teilweise auch in Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten, veröffentlicht. Abbildung 1 b) listet die im Rahmen des Projektes entstandenen wissenschaftlichen Publikationen auf. Eine Zuordnung zu den einzelnen Arbeitsbereichen des Teilprojektes erfolgt über die Buchstabenkennung in Abbildung 1a.

2.1 Marktanalyse

Um die Demontage von Traktionsbatteriesystemen planen zu können, ist zunächst eine Untersuchung des Marktumfeldes, in dem die Demontage stattfinden soll, erforderlich. Dazu gehört unter anderem die Schätzung der Rücklaufmengen (Abschnitt 2.1.1), die in den kommenden Jahren demontiert werden sollen. Ausgehend von den Rücklaufmengen werden die Flüsse der wichtigsten Rohstoffe betrachtet, die bei der Produktion und dem Recycling von Traktionsbatteriesystemen involviert sind (Abschnitt 2.1.2). Abschließend werden kurz die rechtlichen Rahmenbedingungen erläutert, innerhalb derer die Demontage und Verwertung stattfinden bzw. zukünftig stattfinden werden (Abschnitt 2.1.3).



Kennung	Publizierte Projektergebnisse der übergeordneten Themen
A	Glöser-Chahoud, S.; et al.; Industrial disassembling as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems; Resources, Conservation and Recycling; Vol. 174, 2021 https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105735
B	Glöser-Chahoud, S.; et al.; Return Rates and Recovery Options of Used Electric Vehicle Traction Batteries in Germany - Rücklaufmengen und Verwertungswege von Altbatterien aus Elektromobilen in Deutschland; Chemie Ingenieur Technik; in Vol. 93, Issue 11; 2021; https://doi.org/10.1002/cite.202100112
C	Baazouzi, S.; et al.; Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries; batteries; Vol. 7, Issue 4; No. 74; 2021; https://doi.org/10.3390/batteries7040074
D	Birke, K.; et al.; Multiple Contributions in: Handbook on Smart Battery Cell Manufacturing – The power of Digitalization Part V; 2022; https://doi.org/10.1142/12511
E	Rosenberg, S.; et al.; Field Study and Multimethod Analysis of an EV Battery System Disassembly; energies; Vol. 15; 2022; https://doi.org/10.3390/en15155324
F	Huster, S.; et al.; A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts; Journal of Cleaner Production; 2022; https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132225
G	Rosenberg, S.; et al.; A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling – A case study of an OEM in Germany; Waste Management; Vol. 160; 2023 https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.029
H	Huster, S; et al.; Remanufacturing Capacity Planning in New Markets - Effects of Different Forecasting Assumptions on Remanufacturing Capacity Planning for Electric Vehicle Batteries; Journal of Remanufacturing; revised/resubmitted
I	Rosenberg, S.; et al.; Combining dynamic material flow analysis and life cycle assessment to evaluate environmental benefits of recycling – a case study for direct and hydrometallurgical closed-loop recycling of electric vehicle battery systems; Resources, Conservation and Recycling; accepted in production preliminary; https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107145

Abbildung 1: Übersicht der Ergebnisse der übergeordneten Themen. a) Aufteilung in Teilbereiche und Zuordnung von Publikationen, b) Hauptinformationen zu den publizierten Projektergebnissen.

2.1.1 Rücklaufmengenplanung

Die Schätzung von Rücklaufmengen ist eine wichtige Voraussetzung für weitere Planungsschritte. Das Wissen darüber, welche Mengen an Altbatterien wann unter welchen Bedingungen zu erwarten sind, wird unter anderem für die Auslegung von Demontage- und Recyclingkapazitäten benötigt, aber auch, um zum Beispiel Logistikkonzepte zu entwerfen oder die Tragbarkeit von Geschäftsmodellen bewerten zu können. „Unter welchen Bedingungen“ welche Mengen zu erwarten sind, ist hierbei entscheidend. Der Markt für Elektromobilität ist jung und die Entwicklung von zahlreichen technologischen, politischen und sozialen Faktoren abhängig. Als Folge dessen ist die Entwicklung der Neuzulassungszahlen unsicher. Darüber hinaus liegen bisher wenige empirisch fundierte Informationen über die

Haltbarkeit von Elektrofahrzeugen (EVs), Batteriesystemen (EVBs) und elektrischen Antriebsaggregaten (EAAs) und ihrer Entwicklung im Laufe der Zeit vor. Um verschiedene Szenarien untersuchen zu können, war es das Ziel dieses Arbeitspakets, ein Modell zur Schätzung der Rücklaufmengen zu entwickeln, das die flexible Variation der Rahmenbedingungen erlaubt.

Die Schätzung von Rücklaufmengen eines Produkts kann auf verschiedene Weisen geschehen, zum Beispiel mittels Zeitreihenanalyse (Georgiadis et al. 2006), Materialflussanalyse (Ai et al. 2019; Busch et al. 2014) oder Distributed-Lag-Modellen (DLMs, Clottey und Benton 2014; Toktay et al. 2003). Während für ersteres die Rücklaufmengen der Vergangenheit extrapoliert werden, basieren Materialflussanalysen und DLMS auf vergangenen oder prognostizierten Verkaufszahlen und einer erwarteten Produktlebensdauer oder einer zeitlich verteilten Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Nutzung von historischen Rücklaufmengen ist aufgrund der Neuheit der Produkte nicht möglich. Stattdessen wurden Hochlaufprognosen und erwartete Lebensdauern als Grundlage einer Materialflussanalyse verwendet, die mithilfe der ereignisdiskreten Simulation umgesetzt wurden. Die ereignisdiskrete Simulation ermöglicht es, einzelne simulierte Entitäten zu betrachten, und so zum Beispiel den Lebenszyklus einzelner EVs, EVBs oder EAAs unabhängig von den jeweils anderen Komponenten zu verfolgen und zu steuern.

Das Simulationsmodell ist in mehreren Entwicklungsstufen entstanden, in denen jeweils unterschiedliche Funktionalitäten im Fokus standen. Diese Entwicklungsstufen wurden in wissenschaftlichen Beiträgen dokumentiert, wobei die Veröffentlichungsjahre durch unterschiedlich lange Bearbeitungsdauern bei den jeweiligen Fachzeitschriften nicht zwangsläufig einen Rückschluss auf die Chronologie zulassen. In Glöser-Chahoud et al. (2021) wurde untersucht, welche Altersverteilungen bei EV- und EVB-Rückläufern zu erwarten sind, wenn verschiedene Annahmen hinsichtlich der mittleren Lebensdauern von EVBs und EVs getroffen werden. In Rosenberg et al. (2023) wurde betrachtet, inwieweit der Bedarf an Rohstoffen für die Batterieerneuproduktion durch das Recycling von Batterierückläufern gedeckt werden kann, wenn technologische Weiterentwicklungen des Kathodenmaterials berücksichtigt werden. Der Fokus in Huster et al. (2023) lag darauf zu untersuchen, welche Annahmen sich stark auf das Ergebnis der Rücklaufmengenschätzung und der folgenden Demontagekapazitätsplanung auswirken, und welche Annahmen somit besonders gründlich gewählt werden sollten. Als Ergebnis der Voruntersuchungen wurde in Huster et al. (2022) ein Simulationsmodell vorgestellt, in dem Batterie- und Fahrzeugrückläufer auf Basis von prognostizierten BEV-Neuzulassungszahlen und von separaten EV- und EVB-Lebensdauern geschätzt wurden und zusätzlich die Möglichkeit der Zweitnutzung für Batterien berücksichtigt

wurde. Im Folgenden wird als DeMoBat-Ergebnis eine Weiterentwicklung des Modells aus Huster et al. (2022) vorgestellt, in dem zusätzlich zur EVB und dem EV auch das EAA als separate Entität abgebildet wird und einer eigenen Lebensdauererwartung folgt.

Abbildung 2 stellt die Grundlogik des entwickelten Modells zur Schätzung der Rücklaufmengen von Traktionsbatterien, elektrischen Antriebsaggregaten und Fahrzeugen dar. Die ereignisdiskrete Simulation beginnt damit, dass gemäß einer gewählten Prognose für die EV-Neuzulassungszahlen Entitäten der Typen Fahrzeug (ohne Batterie und EAA), Batterie und EAA erzeugt und zu einem Gesamtfahrzeug montiert werden. Es können verschiedene Fahrzeuggrößen (klein, mittel, groß) simuliert werden, was im Vorfeld durch Anteile der Größenklassen festgelegt wird und sich auch auf die Batterie und das EAA auswirkt. Außerdem kann festgelegt werden, dass in bestimmten Zeitabständen ein Wechsel der Batterietechnologie stattfindet. Bei der initialen Montage werden nur Neukomponenten miteinander kombiniert. Erreicht während der Nutzungsphase eine der drei Komponenten das Ende ihrer Nutzungsdauer, wird für alle drei Komponenten entschieden, welchen weiteren Nutzungsweg sie nehmen.

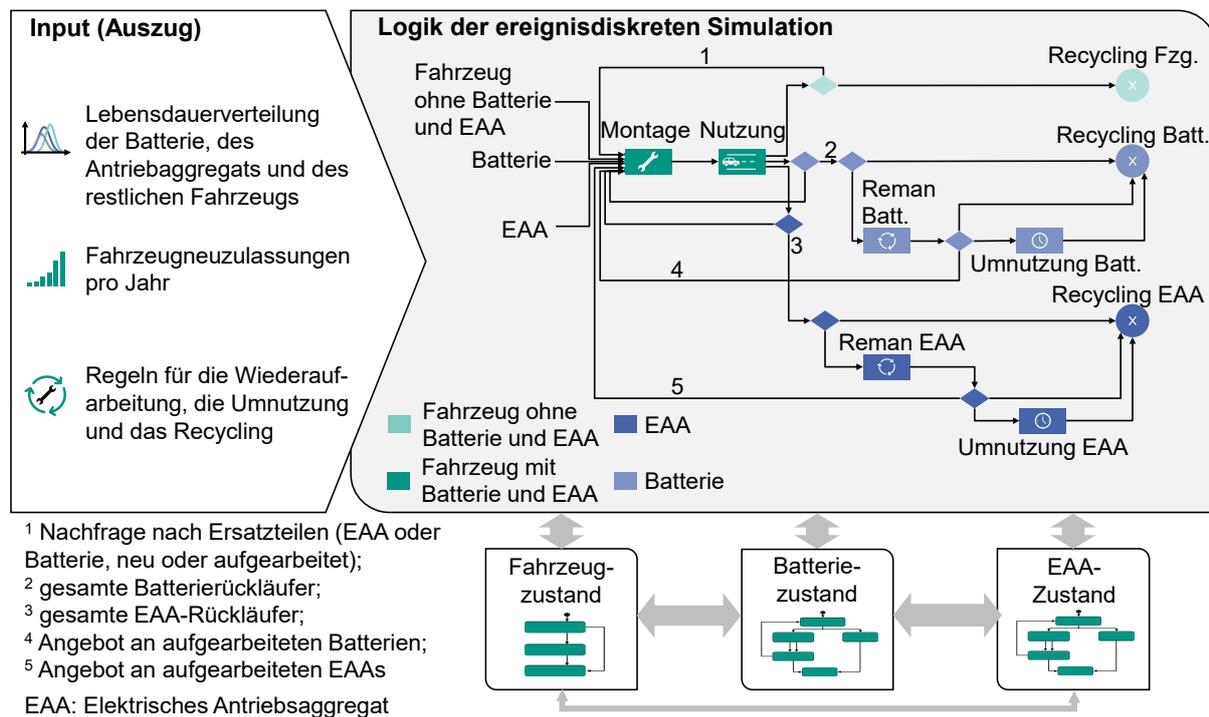


Abbildung 2: Logik des Modells zur Schätzung der Rücklaufmengen von Traktionsbatterien, elektrischen Antriebsaggregaten und Fahrzeugen.

Haben die Traktionsbatterie oder das EAA das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht, können die anderen beiden Komponenten weitergenutzt werden und lediglich eine Ersatzbatterie/ein Ersatz-EAA erhalten. Sie stellen keine Rückläufer dar. Dies ist der Fall, wenn keine Regeln

z. B. hinsichtlich eines Maximalalters oder einer minimalen Restlebensdauer der verbleibenden Komponenten bestehen oder diese Grenzen noch nicht erreicht sind. Die Nachfrage nach Ersatzteilen ist in Abbildung 2 mit „1“ gekennzeichnet. Greifen Regeln, die gegen einen Ersatz sprechen, wird die Komponente „Fahrzeug ohne Batterie und EAA“ dem Recycling zugeführt. Gleiches ist vorgesehen, wenn diese Komponente das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht. Alle Batterien und EAAs, die nicht durch einen Tausch der jeweils anderen Komponente im Fahrzeug verbleiben, zählen zu den Rückläufern („2“ und „3“ in Abbildung 2). Für diese wird ausgehend von zuvor durch den Bediener festgelegten Regeln entschieden, ob sie direkt dem Recycling zugeführt werden oder vorher aufgearbeitet werden für die Wiederverwendung im Fahrzeug („4“ und „5“ in Abbildung 2) oder für eine andere Zweitnutzung, z. B. als stationärer Speicher. Ist die Nutzung von aufgearbeiteten Batterien im Fahrzeug vorgesehen, kann auch diese beispielsweise durch Altersgrenzen des empfangenden Fahrzeugs eingeschränkt werden. Außerdem müssen die Fahrzeug- und Batteriegrößen identisch sein und die Technologien übereinstimmen. Spätestens nach einer Zweitnutzung inner- oder außerhalb des Fahrzeugs werden die Batterien dem Recycling zugeführt.

Die Anwendung des Modells soll in einem Beispiel veranschaulicht werden. Als Anwendungsfall wird der deutsche Markt für batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) bis zum Jahr 2040 gewählt. Im Rahmen von DeMoBat wurden Neuzulassungsprognosen von BEVs und Plug-in-Hybriden (PHEVs) für die Regionen Baden-Württemberg, Deutschland, Europa, USA, China, Japan, Südkorea und die Welt recherchiert, um die Bandbreite möglicher Entwicklungen der Elektromobilität aufzuzeigen. Für die jeweils höchste und niedrigste BEV-Prognose wurde das zuvor vorgestellte Modell mit verschiedenen Lebensdauerannahmen angewendet, um die Spanne möglicher Batterierückläufer zu schätzen. Die Konzentration auf den deutschen BEV-Markt bis 2040 stellt also lediglich einen Auszug der Arbeit dar. In diesem Auszug werden zwei Szenarien betrachtet. In beiden Szenarien ist die einzige Verwertungsoption für Batterien und EAAs das Recycling. Die Wiederaufarbeitung und die Umnutzung sind also ausgeschlossen. Im ersten Szenario, dargestellt in Abbildung 3 a), wird jede defekte Batterie und jedes defekte EAA durch ein neues Ersatzteil ersetzt. Im zweiten Szenario, Abbildung 3 b), werden defekte Batterien und EAAs während der Batterie-Garantiezeit von acht Jahren stets ersetzt, danach nur, wenn die jeweils noch funktionsfähigen Komponenten noch eine Restlebensdauer von mindestens vier Jahren haben. Als BEV-Neuzulassungsprognose wurde eine Schätzung von Deloitte (2020) verwendet, die im Vergleich zu anderen Prognosen eine mittelschnelle Verbreitung der E-Mobilität vorhersieht. Die Lebensdauern der Komponenten sind alle als Weibullverteilungen modelliert (Oguchi und Fuse 2015; Wang et al. 2020) mit Erwartungswerten von 14 Jahren für Fahrzeuge, 10 Jahren

für Traktionsbatterien und 12 Jahren für EAAs. Diese Werte sind innerhalb derer, die in der Literatur als erwartete Lebensdauern zu finden sind (Fahrzeuge inkl. Verbrennerfahrzeugen: 10-23 Jahre (Hao et al. 2016; Masias 2018; Mueller et al. 2007; Oguchi und Fuse 2015; Thielemann et al. 2015); Batterien: 5,5-25 Jahre (Drabik und Rizos 2018; Guenther et al. 2013; Schoch 2018; Ai et al. 2019); EAAs: 10-20 Jahre (Hernandez et al. 2017; Rassölkin et al. 2020)). In Abbildung 3 ist ersichtlich, dass bei den gewählten Annahmen in beiden Szenarien erst ab ca. 2030 größere Batterie- und EAA-Rücklaufmengen zu erwarten sind und bis dahin auch wenige Ersatzteile benötigt werden. Die Nachfrage nach Ersatzbatterien und -EAAs ist in Szenario b) erwartungsgemäß niedriger als in Szenario a). Bezüglich der Anzahl der Rückläufer sind zwei Effekte von Szenario b) im Vergleich zu Szenario a) zu beobachten. Erstens sinkt die Gesamtzahl, da weniger Ersatzteile in Umlauf gebracht werden, die später als Rückläufer verbucht würden. Zweitens wird der Rücklauf zeitlich vorgezogen. Letzteres ist vor allem bei den EAAs zu beobachten. Dadurch, dass im Falle eines Batteriedefekts bei geringer EAA- oder Fahrzeuglebensdauer kein Batteriewechsel stattfindet, erreichen auch funktionsfähige EAAs vorzeitig das Ende ihrer Nutzungsdauer und laufen somit früher zurück als wenn sie so lange wie technisch möglich oder bis zum Ausfall des Kernfahrzeugs genutzt werden.

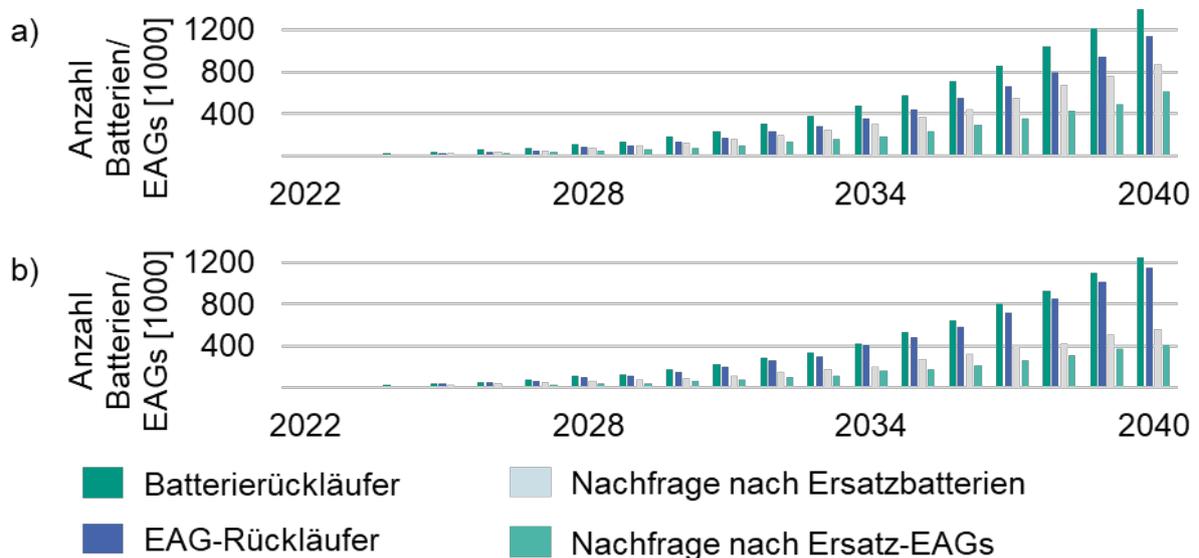


Abbildung 3: Batterie- und EAA-Rückläufer und Nachfrage nach Ersatz, a) wenn jede defekte Batterie und jedes defekte EAA ersetzt werden, b) wenn Batterie bzw. EAA nur ersetzt werden, wenn die jeweils anderen beiden Komponenten eine Restlebensdauer von mindestens vier Jahren haben und somit in einem guten Zustand sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Analysewerkzeug entwickelt wurde, mit dem Rücklaufmengen von Batterien und elektrischen Antriebsaggregaten mit eigenen Annahmen geschätzt werden können, und gleichzeitig die potentielle Nachfrage nach Ersatzteilen

abgebildet wird. Dabei können die Lebensdauern der Komponenten ebenso variiert werden wie Annahmen zum technologischen Fortschritt und zur Aufarbeitung von Batterien und EAAs. Im Vergleich zum Stand der Forschung liegt die Neuerung hauptsächlich darin, dass neben den Traktionsbatterien auch EAAs betrachtet werden, dass verschiedene Verwertungswege und die damit einhergehende Verzögerung in einem Modell integriert sind, und dass Traktionsbatterien und EAAs nicht als Einheitsprodukt im zeitlichen Verlauf gesehen werden, sondern ein technologischer Fortschritt abbildbar ist. Um die Prognosen der Rücklaufmengen zu verbessern, wäre ein Ansatzpunkt, die Annahmen durch erhobene Primärdaten zu ersetzen, vor allem bezüglich der Lebensdauern der Komponenten. Hier ist zu erwarten, dass sich die Datenlage in den kommenden Jahren mit steigender Anzahl an Alt-Elektrofahrzeugen verbessert.

2.1.2 Rohstoffmarktmodell und Bewertung

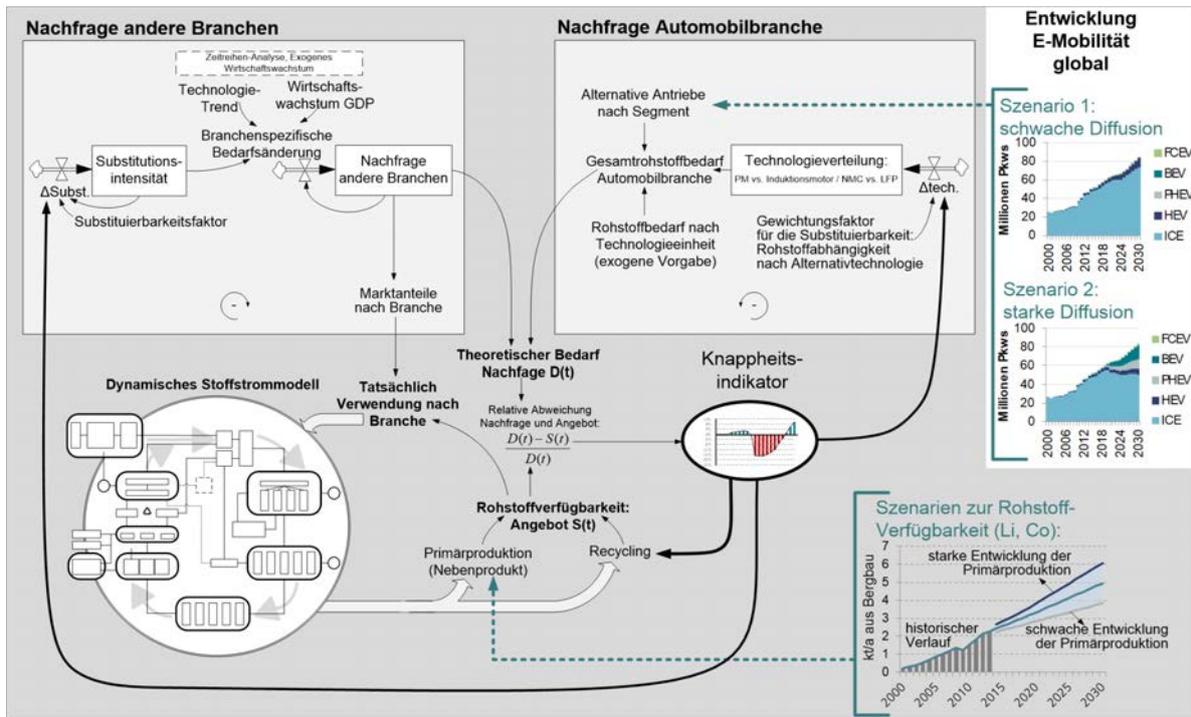
Die Versorgungslage mit relevanten Batterierohstoffen wird sowohl durch die Verfügbarkeit von Primär- als auch Sekundärrohstoffen beeinflusst. Zur Abbildung unterschiedlicher Versorgungsszenarien wurden systemdynamische Simulationsmodelle in Kombination mit Multiindikatorsystemen für die ausgewählten Batterierohstoffe Kobalt, Nickel und Lithium entwickelt. Die Simulationsmodelle stützen sich dabei unter anderem auf die Ergebnisse der Rücklaufmengenplanung.

Das entwickelte Multiindikatorsystem, welches unter anderem Kriterien wie Versorgungsrisiko und Preis beinhaltet, wurde zur Bewertung der Substituierbarkeit von Rohstoffen herangezogen und liefert somit eine wichtige Basis für weitergehende Untersuchungen, wie etwa in einem Fachartikel im Journal „Resources“ dokumentiert (Kiemel et al. 2021).

Abbildung 4 zeigt den grundlegenden Aufbau eines systemdynamischen Modells, welches einerseits die Nachfrage nach Rohstoffen abbildet und diese mit dem Angebot (Primärrohstoff und Sekundärrohstoff) gegenüberstellt. Übersteigt die Nachfrage das Angebot, entsteht kurzfristig eine Versorgungsknappheit, die mit hohen Preisen für den Rohstoff einhergeht. Dieses führt allerdings zu Anpassungseffekten, z. B. da verstärkt Möglichkeiten zur Substitution gesucht werden, wodurch die Knappheit wieder aufgehoben werden kann. Die Modellierung dieser Rückkopplungseffekte ist eine Neuerung im Vergleich zu bestehenden Modellen der Materialflussanalyse (z. B. Xu et al. (2020), Maisel et al. (2023)).

Die systemdynamische Modellierung kann in zukünftigen Arbeiten um weitere Rohstoffe erweitert werden. Hierbei sind insbesondere solche von Interesse, die als strategisch auf

europäischer Ebene angesehen werden, aber ggf. noch nicht im Fokus des Recyclings stehen (z. B. seltene Erden in Elektromotoren).



BEV: Battery Electric Vehicle, HEV: Hybrid Electric Vehicle, PHEV: Plug -In Hybrid Electric Vehicle

Abbildung 4: Struktur des systemdynamischen Marktmodells für Batterierohstoffe.

2.1.3 Recht

Rechtsrahmen können je nach Ausgestaltung bestimmte Verwertungswege in einer Kreislaufwirtschaft unterstützen bzw. erschweren. Gleichzeitig sollten sie zukunftsweisend sein, indem zum Beispiel das Thema Digitalisierung von Lebenszyklusdaten unterstützt wird bzw. verbindliche Daten zur Speicherung vorgegeben werden. Rechtliche Regulierungen können somit sowohl Aktivitäten von Geschäftsmodellen als auch Rücklaufmengen von gebrauchten Traktionsbatterien direkt oder indirekt beeinflussen.

Während der Projektdauer wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Transport, die Lagerung und die Verwertung von gebrauchten Traktionsbatterien analysiert und in mehreren internen Arbeitspapieren zusammengefasst. Die Beobachtung des Entwurfs zur EU-weit geltenden Batterieverordnung stand im Vordergrund der Projektarbeit. Diese EU Batterie Verordnung (EU BattVO) wird geltende Regelungen wie etwa das deutsche Batterriegesetz (BattG) (Umweltbundesamt), das zur Umsetzung der EU-Batterie Richtlinie 2006/66/EC (European Parliament and the European Council) genutzt wird, ergänzen bzw. ersetzen. Während der Projektlaufzeit wurde die EU BattVO durch die EU Kommission und das Parlament über mehrere Entwürfe hinweg entwickelt und durchlief außerdem Trilogue-

Gespräche. Der formal finale Gesetzesentwurf und auch das Inkrafttreten wird für den Sommer/Herbst 2023 erwartet.

Mit der neuen EU BattVO wird nicht nur die bisher geltende europäische Richtlinie (RL 2006/66/EC) überarbeitet, sondern es werden bisher nicht rechtlich geregelte Handlungsfelder des komplexer werdenden Batteriemarktes erfasst. Erstmals werden fünf Batterietypen unterschieden, wobei Traktionsbatterien einen eigenen Typ bilden. Auch wird in der EU BattVO der digitale Produktpass für Industrie- und Traktionsbatterien eingeführt, der die Nachverfolgbarkeit von ausgewählten Produktinformationen über den gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglichen soll.

Unterschiedliche Abschnitte der EU BattVO betreffen für Traktionsbatterien u.a.:

- Kennzeichnungspflichten
- Testpflicht und Sicherheitsprüfung (technisch und ökologisch/sozial)
- Due Dilligence Pflichten
- Erweiterte Herstellerverantwortung und deren Übergang, insbesondere die Pflichten vor dem in den Markt bringen der Batterie sowie der Verwertung
- Pflege eines elektronischen Datensystems und Erstellung/Pflege des digitalen Batteriepasses
- Definition der unterschiedlichen Marktakteure, deren Zusammenarbeit und Pflichten
- Einführung der Möglichkeit gemeinsamer Organisationen für Herstellerverantwortung und deren finanzielle Ausgestaltung
- Zeitliche Regelungen zur Einführung von verpflichtenden Rezyklatquoten, der Dokumentation des CO₂-Fußabdrucks etc.

Abbildung 5 liefert einen Überblick über die Eingliederung von kreislaufwirtschaftlichen Verwertungsoptionen nach EU BattVO am Beispiel eines Batterielebenszyklus.

Bevor eine (Neu-)Batterie in den europäischen Markt eingeführt wird, hat der Hersteller die Einhaltung der Regelungen der Verordnung sicherzustellen. Dazu zählt zum Beispiel die Registrierung der Batterie im elektronischen Datensystem, aber auch die Erstellung eines digitalen Batteriepasses. Nach der Registrierung werden dann erste Daten in die Systeme eingepflegt, so etwa die Daten des ermittelten CO₂-Fußabdrucks oder auch die verwendeten Batteriematerialien. Die Zugriffsrechte auf die unterschiedlichen Dateninhalte werden ebenfalls in der EU BattVO definiert (z. B. öffentlich zugänglich oder nur für beteiligte Wirtschaftsakteure). Einen zentralen rechtlichen Meilenstein vor der Einführung neuer Batterien stellt die Konformitätsprüfung durch ausgewiesene dritte Akteure dar. Damit wird dem Hersteller bestätigt, dass er alle notwendigen Pflichten erfüllt, um die Batterie im europäischen Markt einsetzen zu dürfen. Während der Nutzungsphase der Batterie muss der

Hersteller zusätzlich sicherstellen, dass bestimmte Daten des Batteriemangement-Systems von berechtigten Parteien abrufbar sind. Zu diesen Daten zählt u. a. auch der Gesundheitszustand der Batterie, welcher entscheidend für die Wahl der verschiedenen Verwertungswege sein kann.

Das Ende des Lebens einer Traktionsbatterie selbst wird nicht in der EU BattVO definiert. Es wird jedoch unterschieden, dass mit dem Ende des Lebens im Fahrzeug entweder eine gebrauchte Batterie („used battery“) oder eine Altbatterie („waste battery“) entsteht. Eine Altbatterie liegt vor, wenn die Batterie die Abfalleigenschaften nach RL 2008/98/EC (European Parliament and the European Council 2008) erfüllt, welche im deutschen Recht im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) (Umweltbundesamt) integriert sind.

§ 3 KrWG gibt eine Definition des Begriffes Abfall: „Abfälle [...] sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“. Zu beachten ist, dass es möglich ist, bestimmte Produktgruppen vom KrWG auszunehmen bzw. für diese darüberhinausgehende Regelungen zu treffen.

Unter der Bedingung, dass eine Traktionsbatterie eine Altbatterie darstellt, kann sie entweder einer Vorbereitung zur Umwandlung zu einer Gebrauchtbatterie durchlaufen oder sie wird einem Recyclingprozess zugeführt. Deponierung oder Verbrennung sind bereits heute im geltenden BattG, aber auch zukünftig in der EU BattVO, untersagt.

Die Abfalleigenschaft einer Batterie erlischt erst, wenn durch das Recycling gewonnene Materialien oder die aufbereitete Traktionsbatterie für einen bestimmten Zweck verwendet werden kann, es einen Markt für diese Produkte gibt und jeweils geltende technische und rechtliche Anforderungen erfüllt werden. Das Vorliegen der Abfalleigenschaften ist stets zu prüfen. Altbatterien stellen im Vergleich zu gebrauchten Batterien z. B. weitere Anforderungen an den Transport auf der Straße (Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) 2022). Hierzu wird in der neuen EU BattVO auch erstmalig, im Vergleich zur geltenden Batterie RL 2006/66/EC, Bezug hergestellt.

Vorbehandlungen von Altbatterien können dazu genutzt werden, um Prozesse der Wiederverwendung, der Umnutzung oder der Wiederaufarbeitung zu ermöglichen. Diese sind auch für gebrauchte Traktionsbatterien (dann ohne Vorbehandlung) möglich. Die EU BattVO unterscheidet dabei die Prozesse der Wiederverwendung („reuse“), Umnutzung („repurpose“) und der Wiederaufarbeitung („remanufacturing“).

Erstmalig findet sich im Entwurf der EU BattVO eine Definition für die Qualität aufgearbeiteter („remanufactured“) Traktionsbatterien. Demnach darf eine Batterie nur als aufgearbeitet bezeichnet werden, wenn sie über einen Gesundheitszustand von mindestens 90 % einer

Neubatterie (gemessen mit dem State of Health (SOH)) verfügt. Zusätzlich darf die Differenz der Zellen maximal 3 % SOH voneinander betragen. Der Einsatz von Bestandteilen (z. B. Batteriezellen), die Altbatterien entnommen wurden, ist bei aufgearbeiteten Batterien zulässig. Rechtlich ist die Wiederaufarbeitung von gebrauchten Batterien als ein (Extrem-)Fall der Wiederverwendung zu sehen. Demnach kann die Wiederaufarbeitung durchaus eine vollständige Demontage und den Austausch einzelner Zellen beinhalten. Eine solche Demontage und Aufarbeitung ist allerdings auch bei Altbatterien zulässig, dann erfolgt dies unter dem Begriff „Vorbereitung zur Weiterverwendung oder Wiederaufbereitung“.

Während die Verwertungsalternativen Wiederaufarbeitung und Wiederverwendung nicht als Aktivitäten in der EU BattVO definiert werden, wird dies für eine Umnutzung („Repurpose“) gemacht. Demnach ist unter Umnutzung jede Tätigkeit zu verstehen, die dazu führt, dass Bestandteile oder eine gesamte Batterie, welche keine Altbatterie ist, für einen anderen Zweck oder eine andere Anwendung eingesetzt werden als sie ursprünglich für hergestellt wurden. Durch vorgelagerte Prozesse der „Vorbereitung zur Umnutzung“ können aber auch Altbatterien letztendlich umgenutzt werden. Durch eine Umnutzung von Batterien kann es auch zu einer Änderung der Klassifizierung der Batterieart nach der EU BattVO kommen. So können Traktionsbatterien in Industriebatterien z. B. in Form von stationären Industrie- oder Großspeichern umgenutzt werden. Eine möglicherweise notwendige Überschreibung von Software des Batteriemagementsystems (BMS) ist dabei zulässig.

Wenn gebrauchte Batterien wieder in Betrieb gesetzt bzw. in den Markt eingeführt werden sollen, gehen die zuvor beim Hersteller liegenden Pflichten auf den Wirtschaftsakteur über, der die Traktionsbatterien der Verwertung unterzieht bzw. sie auf dem Markt zulassen möchte. Dazu gehört die Sicherstellung, dass die Batterien eine Konformitätsbewertung durchlaufen und die Daten des Batteriepasses und die Kennzeichnungen auf der Batterie aktualisiert werden. Außerdem übernimmt er eine erweiterte Herstellerverantwortung.

Eine erweiterte Herstellerverantwortung verpflichtet den entsprechenden Wirtschaftsakteur auch die Kosten nach dem Nutzungsende der Batterie zu tragen, was unter anderem Transport und Sammlung aber auch Verwertung inkludiert. Jedoch stehen diesen Pflichten keine Rechte über die Herausgabe gegenüber anderen Wirtschaftsakteuren von gebrauchten Batterien oder Altbatterien gegenüber.

Zwingend notwendig ist es für jede Altbatterie, die den Abfallstatus verlässt, das Ende der Abfalleigenschaft zu dokumentieren. Dies wird etwa durch die Durchführung von Performance-Tests möglich, die die technische Einsatzfähigkeit für einen bestimmten Zweck belegen, und eine Rechnung, die den Verkauf der umgenutzten/aufbereiteten Batterie dokumentiert. Sie sind ebenfalls Voraussetzung zur Bestehung der Konformitätsbewertung.

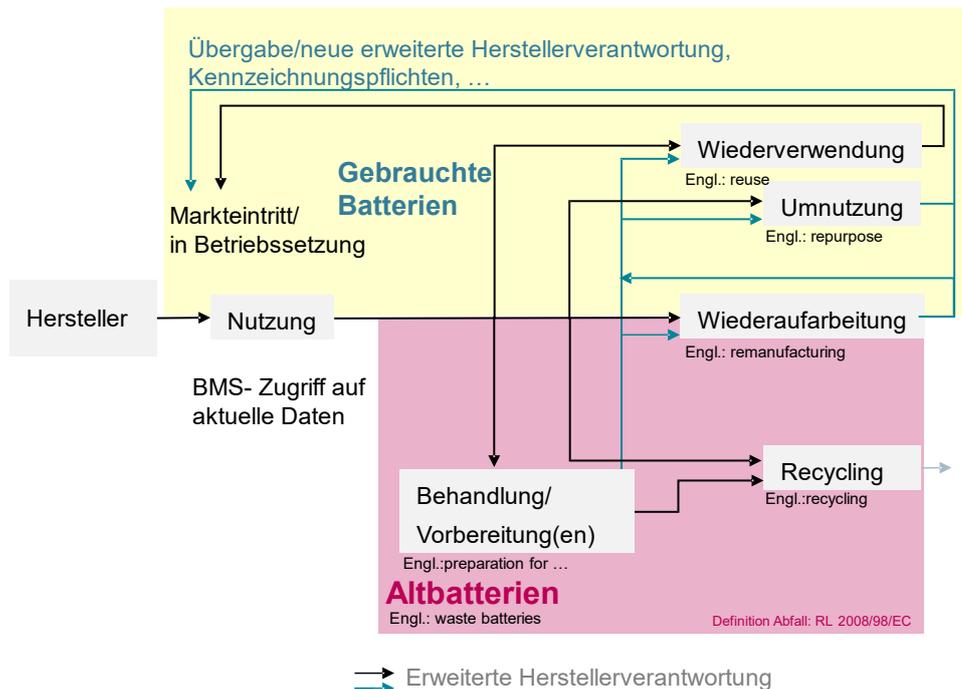


Abbildung 5: Definition und Eingliederung von kreislaufwirtschaftlichen Verwertungsoptionen nach EU BattVO am Beispiel eines Batterie-Lebenszyklus (Entwurf 03/2023).

Obwohl die neue EU BattVO als eine weitreichende legislative Toolbox für den europäischen Batteriemarkt gilt, sind mit dem Inkrafttreten der Verordnung noch nicht alle rechtlichen Arbeiten abgeschlossen. Die Verordnung selbst sieht die Entwicklung von Standards zum Beispiel für die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks vor. Dies gilt auch für die Festlegung von Sicherheitstests, die sowohl neue als auch gebrauchte Traktionsbatterien zu erfüllen haben. Auch die elektronischen Systeme (z. B. Art und Kommunikation der Datenhaltung) für den Batteriepass müssen noch festgelegt werden.

2.2 Demontageanalyse

Unter dem Begriff der Demontageanalyse werden verschiedene Arbeiten zusammengefasst: Einerseits solche, die sich mit der Analyse und Auswertung von manuellen Demontevorgängen von Traktionsbatterien beschäftigen (s. Abschnitt 2.2.1), andererseits das Modell eines simulierten automatisierten Demontageplaners (s. Abschnitt 2.2.2).

2.2.1 Demontagexperiment und Auswertung

Im Rahmen des Teilprojekts Eins wurden unterschiedliche Modelle und Bewertungsansätze zur umfassenden Bewertung der Demontage von Traktionsbatterien entwickelt. Zur realitätsnahen Anwendung der Modelle bedarf es technischer und ökonomischer

Informationen über Demontageprozesse von Traktionsbatterien. Technische Informationen wie die Dauer einzelner Demontageschritte bilden dabei eine wesentliche Quelle, um ökonomische Bewertungen durchzuführen.

Im Rahmen des Projektes wurde ein manuelles Demontageexperiment einer Hybridbatterie durchgeführt. Die Generierung der Ergebnisse des Experiments sowie darauf aufbauend die Nutzung der Versuchsdaten lassen sich in folgende Schritte unterteilen.

1. Ermittlung und Dokumentation des Demontagegraphen, welcher die Demontageprozesse vom Batteriepack zum Batteriemodul beschreibt
2. Zuweisung von unscharfen („fuzzy“) Demontagedauern für einzelne Demontageaktivitäten und Berechnung einer Demontagezeit unter Unsicherheit
3. Skalierung bzw. Übertragung der Ergebnisse auf ein Batteriesystem eines vollelektrischen Fahrzeugs
4. Kostenschätzung von manuellen Demontagefabriken

Das beschriebene Vorgehen wurde im Rahmen eines Fachartikels des Journals *Energies* veröffentlicht (Rosenberg et al. 2022) und soll im weiteren kurz zusammengefasst werden.

Der durchgeführte Demontageprozess lässt sich in über 50 Demontageaktivitäten unterteilen, welche im Detail im Anhang des Fachartikels graphisch und tabellarisch aufbereitet wurden (Rosenberg et al. (2022)). Während einige Aktivitäten, wie etwa das Entfernen gelöster Bauteile, mit der Hand erfolgten, wurde für das Lösen der Schraubverbindungen ein elektrischer Akkuschauber im Demontageversuch verwendet. Alle demontierten Bauteile wurden außerdem gewogen, vermessen und wenn möglich, das Material durch visuelle Ansicht notiert. Die einzelnen Demontageaktivitäten lassen sich in zehn übergeordnete Demontageschritte aufteilen, wie etwa das Lösen des Deckels als ersten Schritt.

Eine Herausforderung bei der Demontageplanung ist oftmals, dass Demontagedauern auch bei gleichen oder ähnlichen Produkten stark variieren (Vanegas et al. 2018). Da das Demontageexperiment nur einmalig durchgeführt werden konnte, wurde ein Ansatz entwickelt, der es erlaubt Unsicherheiten in der Demontagedauer der einzelnen Demontageschritte abzubilden. Für diesen Zweck wurde auf die sogenannte Fuzzy-Logik zurückgegriffen, die es erlaubt, Unsicherheiten von Demontagedauern abzubilden. Fuzzy steht dabei für den Begriff der Unschärfe. Wendet man die Fuzzy-Logik auf Demontagedauern von einzelnen Aktivitäten an, so lässt sich etwa folgende Aussage quantitativ modellieren:

Das Lösen einer Schraubverbindung des Typs x dauert vermutlich um die 4 Sekunden, es könnten aber auch einige Sekunden mehr sein, wenn der Akkuschauber nicht präzise auf die Schraube gesetzt wird.

Für eine quantitative Herleitung der Modellierung wird im Rahmen dieses Berichts auf Schultmann (2003) und Rosenberg et al. (2022) verwiesen. Allen Demontageaktivitäten wurden unterschiedliche Fuzzy-Dauern zugewiesen. In Verbindung mit den identifizierten Demontagereihenfolgen konnte ermittelt werden, wie lange die Demontage unter Berücksichtigung von Unsicherheiten dauert, wenn unterschiedliche Ressourcen (z. B. ein oder zwei Mitarbeiter) zur Verfügung stehen. Um die Ergebnisse auf eine fiktive vollelektrische Traktionsbatterie zu übertragen, wurde zusätzlich, unter Verwendung zahlreicher Demontagevideos unterschiedlicher Batteriesysteme, abgeschätzt, wie sich die Dauer der einzelnen Demontageschritte ändert, wenn ein größeres Batteriesystem demontiert wird. So ist zu erwarten, dass beispielsweise mehr Schrauben gelöst werden müssen, um den Deckel zu entfernen. Hingegen wird der zeitliche Aufwand zum Entfernen des Batteriemanagementsystems ungefähr gleich sein.

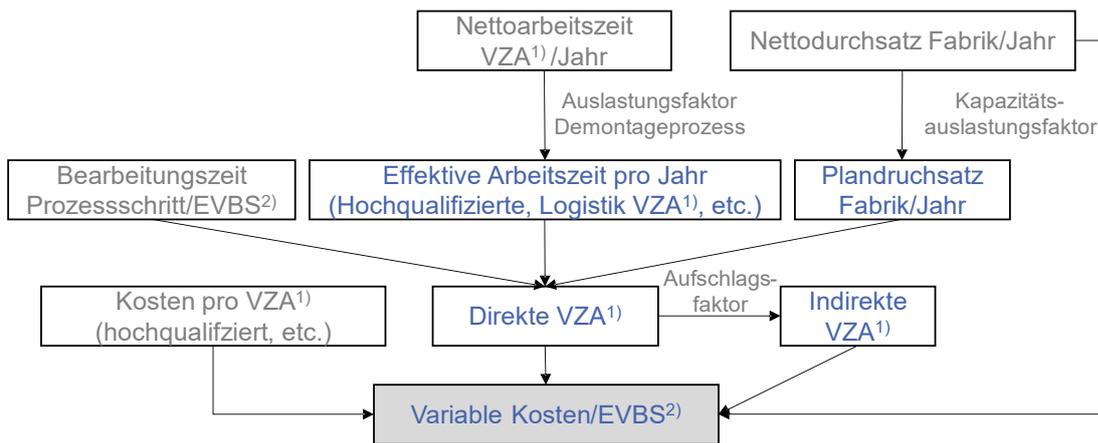
Zusammenfassend ergab sich eine Demontagedauer von 53 Minuten für eine vollelektrische Batterie, im Vergleich zur zuvor berechneten Demontagedauer von 23 Minuten für die Hybridbatterie (bei jeweils einem Mitarbeiter und unter Anwendung der Fuzzy-Logik).

Nachdem die Demontagedauer ermittelt wurde, erfolgte eine Kostenbewertung der manuellen Demontage. Abbildung 6 a) bis c) fasst die Logik der Berechnung zusammen. Damit die Kostenbewertung eine vollständige Demontagefabrik abbildet, wird der eigentliche Demontageprozess um logistische Prozesse wie etwa die Eingangslogistik erweitert (Abbildung 6 a)). Im Anschluss werden variable Kosten (Abbildung 6 b)) und fixe Kosten (Abbildung 6 c)) berechnet. Die variablen Kosten setzen sich dabei vor allem aus der benötigten Anzahl unterschiedlich qualifizierter Mitarbeiter zusammen. Für die fixen Kosten wurde zunächst die Fläche der Fabrik ermittelt, wobei sich die Flächen durch ihre Ausstattung (z. B. Lagerregale oder Entladestationen) unterscheiden.

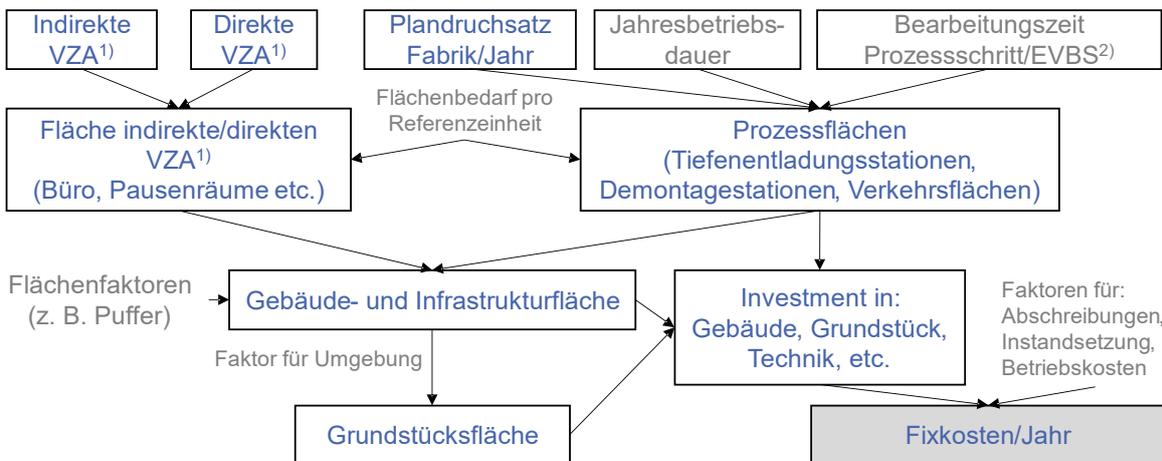
a) Abgebildete Prozessschritte in der Kostenschätzung



b) Berechnungsschemata für die variable Kosten



c) Berechnungsschemata für die fixen Kosten



¹) VZA: Vollzeitarbeiter*in

²) EVBS: Vollelektrisches Batteriesystem

Blaue Schrift: Berechnete Werte; Graue Schrift: Eingangs-/Eingabeparameter; basierend auf Literatur und Branchenwerten

Abbildung 6: Zusammenfassung der Berechnungslogik für die Kostenbewertung der manuellen Demontage.

Die Kostenbewertung ergab Gesamtkosten von circa 110 €/Traktionsbatterie bei kleinen Fabriken mit einem Durchsatz von 5.000 Traktionsbatterien/Jahr, die bei einer Steigerung des Durchsatzes auf circa 80 €/Traktionsbatterie durch Skaleneffekte gesenkt werden können (ab ca. 30.000 Traktionsbatterien/Jahr).

Der veröffentlichte Artikel (Rosenberg et al. (2022)) enthält neben den beschriebenen Arbeiten auch eine Gegenüberstellung zu bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten. Demnach sind Primärdaten der einzelnen Demontageschritte bisher kaum veröffentlicht. Entsprechend gering ist auch die Anzahl an Kostenschätzungen für Demontageaktivitäten, welche sowohl fixe als auch variable Kosten (CAPEX und OPEX) berücksichtigen. Insbesondere der Aspekt der Einbeziehung von Unsicherheit von Demontagedauern wurde mit dem entwickelten Ansatz erstmalig umgesetzt.

Auch wenn die ermittelten Demontagekosten sich auf manuelle Demontagekosten beziehen, sollten sie als Benchmark für mögliche ökonomische Bewertungen von Automatisierungen der Demontage gesehen werden. Die ermittelten Demontagedauern können auch dazu genutzt werden, das Automatisierungspotenzial einzelner Aktivitäten zu bewerten. Gerade im Hinblick auf wachsende Rücklaufmengen ist davon auszugehen, dass bei bestehenden manuellen Prozessen zunächst Teilprozesse automatisiert werden.

2.2.2 Demontageplaner

Der erste Schritt bei der Optimierung einer Demontagestrategie ist die Auswahl der geeigneten Optimierungsmethode abhängig von den verfügbaren Daten und den Optimierungszielen. Die gewählte Technik wird dann angewandt, um eine optimale Demontagestrategie zu berechnen. Die Demontagesequenzplanung (DSP) ist ein nichtdeterministisches polynomiales Problem. Dabei ist der Lösungsraum sehr groß, insbesondere bei komplexen Produkten wie EVBs. Darüber hinaus wird der Lösungsraum noch größer, wenn bei der Planung der Demontagestrategie weitere Entscheidungen getroffen werden müssen, wie z. B. die Demontagetiefe und die Kreislaufwirtschaftsstrategie auf Bauteilebene. Aus diesem Grund werden in der Literatur vor allem von der Natur inspirierte heuristische Optimierungsmethoden zur Lösung des DSP-Problems verwendet, wie z. B. genetische Algorithmen, Partikelschwarmoptimierung, Ameisenkolonieoptimierung, Streusuche und künstliche Bienenkolonieoptimierung.

In diesem Teilprojekt wurde ein modifizierter genetischer Algorithmus für die Mehrzieloptimierung von Demontagestrategien implementiert, da genetische Algorithmen flexibel anwendbar sind und die am weitesten verbreitete Optimierungsmethode für die Suche nach optimalen Demontagestrategien darstellen. Die entwickelte Methode wurde in einem Anwendungsfall unter Verwendung einer Audi A3 Sportback e-tron hybrid Li-ion Batterie erprobt. Die Methodik und die Ergebnisse der Fallstudie wurden in einem Journal-Fachbeitrag publiziert (Baazouzi et al. 2021)).

2.3 Geschäftsmodelle und Informationsmanagement

Die Arbeiten der Thematik der Geschäftsmodelle umfassten zunächst die Identifikation möglicher Geschäftsmodelle und auch deren Bewertung, wozu unter anderem ein Stakeholder-Workshop genutzt wurde. Es wurde sich abermals auf Traktionsbatterien als Produkt konzentriert, da diese das größte Potential an unterschiedlichen Geschäftsmodellen insbesondere auch durch die Umnutzungsmöglichkeiten bieten. In der Zielsystementwicklung (Abschnitt 2.3.1) werden verschiedene Geschäftsmodelle miteinander verglichen. Die Netzwerkplanung (Abschnitt 2.3.2) fokussiert auf Demontage- und Recyclingnetzwerke in der Modellierung, es wird jedoch Erweiterungspotential diskutiert. Abgerundet wird das Unterkapitel durch eine Konzepterstellung, wie über den Lebenszyklus gesammelte Daten für unterschiedliche Geschäftsmodelle genutzt werden können (Abschnitt 2.3.3)

2.3.1 Zielsystementwicklung

Wie in Abschnitt 2.1.1 dargestellt, ist in den kommenden Jahren mit einem signifikanten Wachstum der Rückläufermengen von End-of-Life (EoL) Batteriesystemen zu rechnen. Hersteller sehen sich heute der Herausforderung gegenüber, Entscheidungen über die mögliche Verwendung/ Verwertungen ihrer Produkte am Ende des Lebenszyklus treffen zu müssen. Dies schließt sowohl die Auswahl der passenden Kreislaufstrategie (Recycling vs. Remanufacturing) als auch den Automatisierungsgrad sowie die Granularität der notwendigen Demontage ein. Hierfür fehlt Entscheidungsträger:innen in betreffenden Unternehmen jedoch eine fundierte Informationsgrundlage, die sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte berücksichtigt.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Entscheidungstool in Microsoft Excel konzipiert, mithilfe dessen es möglich ist, verschiedene EoL-Strategien für Lithium-Ionen-Batterien nach ökologischen und ökonomischen Aspekten zu vergleichen und zu bewerten. Das Entscheidungstool basiert inhaltlich auf einem multikriteriellen Kennzahlenkatalog. Dieser wurde auf Basis eines Zielsystems abgeleitet, welches sich an den fünf Handlungsfeldern der Ultraeffizienzfabrik orientiert (Energie, Material, Emission, Mensch/Personal und Organisation) (Mandel et al. 2016). Zur Vervollständigung des Tools wurden Werte und Eingabeparameter vorausgewählt. Hierfür wurde sowohl ein generisches Batterieäquivalent als auch ein generischer Demontageprozess definiert.

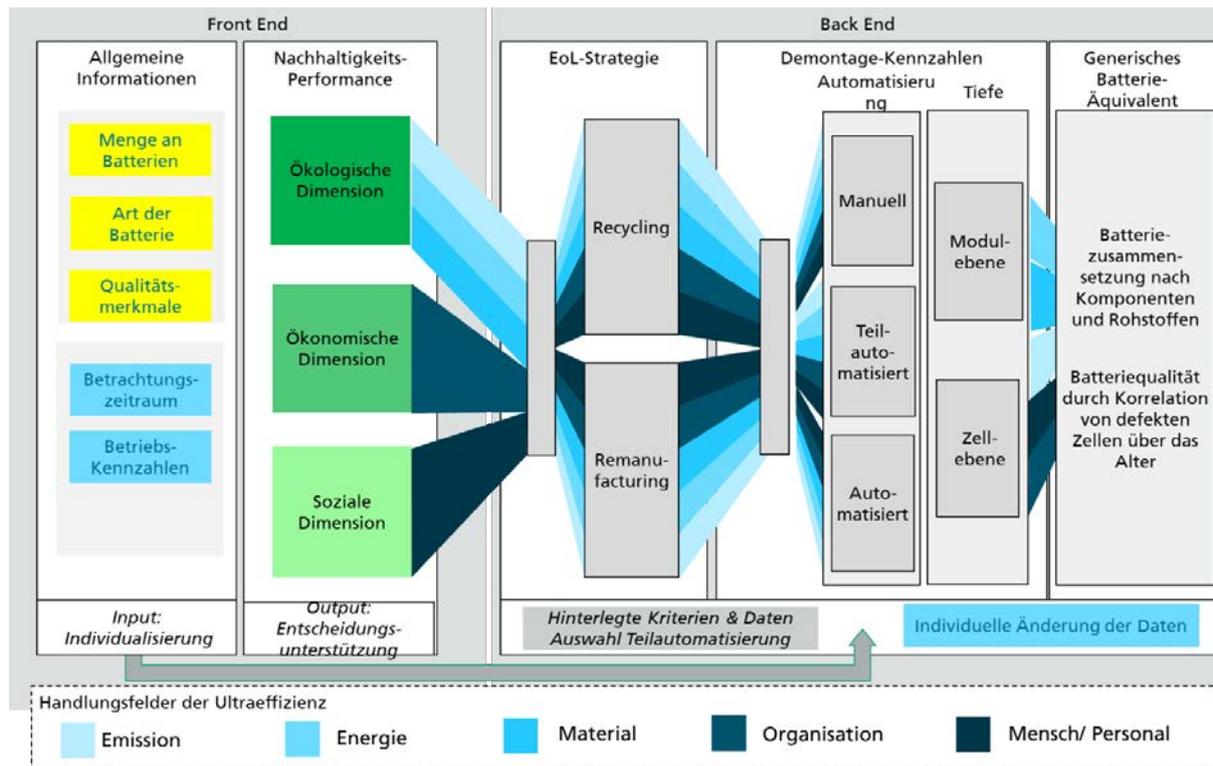


Abbildung 7: Schematische Darstellung des multikriteriellen Entscheidungsmodells.

Abbildung 7 visualisiert die Struktur des entwickelten multikriteriellen Entscheidungsmodells unter Berücksichtigung des eingeführten Ultraeffizienz-Zielsystems. Die Handlungsfelder Material, Energie und Emission werden zu einem ökologischen Ergebnis in Form einer Treibhausgasbilanz aggregiert. Das Handlungsfeld Mensch bildet das soziale Ergebnis der einzelnen Prozessvarianten über die Anzahl an beschäftigtem Betriebspersonal ab. Zudem ergeben die wirtschaftlichen Ergebnisse aus dem Handlungsfeld Organisation ein ökonomisches Gesamtergebnis über eine Rentabilitätsvergleichsrechnung bezüglich der Behandlung eines generischen Batterie-Äquivalents. Zusätzlich wurde ein Gesamtergebnis definiert, das neben den wirtschaftlichen Rentabilitäten pro generischem Batterie-Äquivalent auch ökologische Auswirkungen der Prozessvarianten mitberücksichtigt. Dazu können verschiedene Bepreisungsmethodiken für Treibhausgase mit den wirtschaftlichen Rentabilitäten verrechnet werden.

Das Modell ist auf individuelle Bedürfnisse skalier- und anpassbar ausgestaltet und kann so z. B. für einzelne Unternehmen oder einzelne Regionen verwendet werden. Hinterlegte Annahmen können variiert werden. Um das entwickelte Modell zu validieren, wurde mithilfe der zugrunde gelegten Default-Werte eine Fallstudie für das Bundesland Baden-Württemberg durchgeführt. Es ergeben sich somit spezifische, quantitative Ergebnisse für die verschiedenen Prozessvariationen für Baden-Württemberg.

Die Entscheidung über den einzuschlagenden EoL-Pfad wird in der Literatur bisher primär anhand technischer Parameter wie dem State-of-Health getroffen (Heimes et al. 2021). Neben den technischen Parametern können auch andere Kriterien, wie z. B. Marktdaten oder auch Umweltauswirkungen, in die Entscheidung einfließen, wobei der Fokus der Literatur primär auf dem SOH liegt. Hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Aspekte bietet das EverBatt-Batterie-Lebenszyklusmodell die Möglichkeit, verschiedene Recyclingoptionen (Pyrometallurgie, Hydrometallurgie sowie direktes Recycling) miteinander zu vergleichen. Weitere R-Strategien werden nicht berücksichtigt (Dai et al. 2019b). Schlesinger et al. (2021) haben eine fünfstufige Umsetzungsstrategie für das Remanufacturing von E-Mobilitätskomponenten entwickelt, die sich jedoch wiederum nur auf das Remanufacturing fokussiert. Ebenso handelt es sich um ein Vorgehensmodell und nicht um eine Entscheidungshilfe zur Wahl des geeigneten EoL-Pfades. Ähnliche Beschreibungen finden sich in entsprechenden Remanufacturing-Standards wie DIN SPEC 91472:2023-06, DIN EN 45553:2020-11 oder ISO 8887-1:2017. Berücksichtigt werden sollte außerdem, dass die ökonomische und ökologische Sinnhaftigkeit einer Wieder- bzw. Weiterverwendung der Batterie vom Zweitverwendungsszenario abhängt (Becker et al. 2019; Schulz-Mönninghoff 2022). Für die Wiederverwendung von Traktionsbatterien haben Klör und Monhof (2019) eine modellgestützte Entscheidungsunterstützung entwickelt, welche das Weiterverwendungsszenario berücksichtigt. Ziel dieser Entscheidungsunterstützung ist es, eine technisch und ökonomisch sinnvolle Weiterverwendung zu realisieren. Ökologische Aspekte sowie die Entscheidung über mögliche Recyclingoptionen werden nicht berücksichtigt. Die Entscheidungsfindung für den End-of-Life-Pfad von Batterien erfordert eine ganzheitliche Betrachtung, die technische, ökologische und ökonomische Aspekte berücksichtigt.

Das entwickelte Zielsystem bildet im Zusammenhang mit dem dargestellten multikriteriellen Modell eine fundierte Grundlage zur Unterstützung von Entscheidungsträger:innen bei inverkehrbringenden Unternehmen von Batteriesystemen. Das Modell sollte in Zusammenarbeit mit der Industrie validiert werden. Zudem sollten Potentiale zur Übertragbarkeit auf weitere Produktsysteme geprüft und entsprechende Anpassungsbedarfe zur Standardisierung implementiert werden.

2.3.2 Netzwerkplanung

Die Netzwerkplanung stellt einen Teilaspekt der Bewertung von Geschäftsmodellen zur Verwertung von Altprodukten und Abfall dar. Im Rahmen der strategischen Netzwerkplanung kann für unterschiedliche Geschäftsmodelle eine Kostenbewertung erfolgen, die im Vergleich

zur statischen Kostenberechnung, wie sie etwa in Abschnitt 2.2.1 erfolgte, Netzwerkeffekte berücksichtigt. Netzwerkeffekte zeigen zum Beispiel, welchen Einfluss regionalverteilte Rücklaufmengen von Produkten auf die kostenoptimale Gestaltung von Rückführungs- und Verwertungsnetzwerken haben. Die Netzwerkplanung im Rahmen des Projektes DeMoBat fokussierte dabei auf die Planung von Demontage- und Recyclingnetzwerken für Traktionsbatterien, welche aus mehreren Gründen von besonderem Interesse ist.

Als ein wesentliches Hindernis und entsprechenden Kostentreiber für das Recycling von Traktionsbatterien werden Transportkosten von Altbatterien aufgeführt (Slattery et al. 2021). Dies liegt einerseits in der Gefahrguteigenschaft der Batterien begründet und andererseits, in der Größe und dem Gewicht der nicht-demontierten Batteriesysteme. Neben ihrem Einfluss auf die Transportkosten sind Größe und Gewicht auch ein Grund für die komplexe manuelle Demontage und die damit verbundenen Kosten, die nur geringe Größendegressionseffekt aufweisen (Xiao et al. 2023). Damit liegt die Größendegression für die Demontage unter den für kommerzielle Batterierecycling berichteten Werten (Wang et al. 2014). Aus dem Blickwinkel der Netzwerkplanung können die Unterschiede bei der Größendegression darauf hindeuten, dass mehrstufige Verwertungsnetzwerke kostenoptimal sein können.

Da die Menge zurückkommender Altbatterien in den kommenden Jahren stark steigen wird, ist es von besonderem Interesse zu untersuchen, wie sich ein optimales Rückführungsnetzwerk über die Zeit hinweg entwickeln sollte, um die Gesamtkosten der Verwertung zu minimieren. Die Entwicklung umfasst dabei einerseits das Layout des Rückführungsnetzwerks aber auch die Kosten zur Verwertung eines einzelnen Batteriesystems. Darüber hinaus wird analysiert, ob das resultierende Layout getrennte Demontagestandorte (Pack-zu-Modul) und Recyclinganlagen beinhaltet.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurde ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, welches im Fachjournal Waste Management publiziert wurde (Rosenberg et al. 2023a). Ein solches Optimierungsmodell sucht die kostenoptimale Lösung einer Problemstellung, während bestimmte Nebenbedingungen eingehalten werden müssen und sogenannte Entscheidungsvariablen geändert werden können. Entscheidungsvariablen im entwickelten Modell sind beispielsweise, ob ein bestimmter Standort zu einer bestimmten Zeit betrieben wird und welche Verarbeitungskapazität dieser hat.

Das entwickelte Modell zielt auf eine Minimierung der Gesamtkosten der Verwertung von Traktionsaltbatterien über einen Planungszeitraum von mehreren Jahren. Die Gesamtkosten bestehen aus:

- Distanzabhängigen Transportkosten:

- Sammlung/Transport (ganzer) Batteriesysteme zu einem Demontagestandort
- Tiefenentladene Batteriemodule zu Recyclingstandorten, falls dieser nicht dem Demontagestandort entspricht
- Demontagekosten- und Recyclingkosten:
 - Fixe Demontagekosten/Recyclingkosten je betriebenem Standort und Jahr in Abhängigkeit der vorhandenen Kapazität des Standorts (Kosten steigen unterproportional zur Kapazität)
 - Variable Demontagekosten/Recyclingkosten je Batteriesystem in Abhängigkeit der vorhandenen Kapazität des Standorts (sinkende Stückkosten mit steigender Kapazität)

Die Berechnung der minimalen Gesamtkosten unterliegt dabei (mathematischen) Nebenbedingungen, die eingehalten werden müssen. Die modellierten Nebenbedingungen bilden die zulässigen Verwertungswege der Traktionsbatterien ab. Zunächst müssen alle in einer Periode anfallenden Altbatterien demontiert und im Anschluss die Batteriemodule recycelt werden. Dazu werden die Batteriesysteme zu einem offenen Demontagestandort gebracht. Dieser kann jedoch nur so viele Batteriesysteme demontieren, wie seine Kapazität zulässt. Die Batteriemodule werden im Anschluss dem Recycling zugeführt. Dieses kann am gleichen Standort erfolgen, wenn neben der Demontage dort auch eine Recyclinganlage betrieben wird. Ansonsten werden die Batteriemodule erst zum Recyclingstandort transportiert.

Das Modell beinhaltet mehrere dynamische Komponenten, die die mathematische Lösbarkeit erschweren. Da mehrere Jahre gemeinsam betrachtet werden und über diese Jahre hinweg mit einem starken Anstieg der Altbatterien zu rechnen ist, ist das Modell in der Lage, Kapazitätsänderungen in der Form von Kapazitätssteigerungen abzubilden. Jeder potenzielle Verwertungsstandort (Demontage- und/oder Recyclingstandort) kann nicht oder in einer von mehreren zur Auswahl stehenden Kapazitätsklassen betrieben werden. Durch die Nebenbedingungen wird ebenfalls sichergestellt, dass sich die verfügbaren Kapazitäten eines Standorts über den Planungszeitraum verändern können, jedoch ist kein Kapazitätenrückbau möglich. Dies spiegelt wider, dass Entscheidungen über die Eröffnung eines Standorts längerfristige Unternehmensentscheidungen sind. Weiterhin wurde in den Nebenbedingungen modelliert, dass neue Standorte und/oder Kapazitätserweiterungen von betriebenen Standorten erst möglich sind, wenn genügend Altbatterien zur Verfügung stehen, um alle Anlagen mit einem Mindestmaß auszulasten.

Das beschriebene Modell ist zunächst generisch einsetzbar, um Recyclingnetzwerke bestehend aus Demontage und Recycling zu modellieren. So könnte es genutzt werden, um

gemeinsam betriebene Netzwerke unterschiedlicher Akteure zu modellieren. Im Rahmen des publizierten Fachartikels wurde es beispielhaft auf ein durch einen OEM betriebenes deutschlandweites Demontage- und Recyclingnetzwerk angewandt. Dieses kann maximal acht Demontage- und/oder Recyclingstandorte in drei verschiedenen Kapazitätsklassen umfassen, die heute entweder Ersatzteil- und Logistikzentren oder ein bereits geöffneter Demontage- und Recyclingstandort sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die durchschnittlichen Verwertungskosten von ca. 1.300 EUR im Jahr 2030 auf 850 EUR pro Batteriesystem bis 2044 sinken. Während für Recyclinganlagen zentrale Standorte mit möglichst großen Kapazitätsklassen bevorzugt werden, sind mehrere dezentrale Demontagestandorte kostenoptimal. Im Rahmen der detaillierten Untersuchung verschiedener Szenarien konnte gezeigt werden, dass bei Annahme eines gleichen Größendegressionskoeffizienten für Demontage und Recycling integrierte Standorte kostenoptimal wären.

Das entwickelte Demontage- und Recyclingnetzwerkmodell unterscheidet sich von bestehenden Ansätzen in der Literatur durch die dynamische, mehrjährige Modellierung der Kapazitäts- und Standortentscheidungen für Demontage- und Recyclingstandorte (für einen detaillierten Vergleich siehe Rosenberg et al. (2023a)). Jedoch hat es einige Limitationen. Das Modell umfasst keine Entscheidungen über die Technologiewahl. So wird lediglich eine „zerstörende“ Demontage für das Recycling berücksichtigt und nicht, dass ein OEM neben einer „zerstörenden“ Demontage auch noch Anlagen zur „nicht-zerstörenden“ Demontage betreiben könnte. Auf diesen Anlagen könnten dann Batteriesysteme demontiert werden, bei denen Batteriemodule z. B. für eine Umnutzung gewonnen werden könnten. Die Integration einer solchen Technologiewahl in das entwickelte Modell ist allerdings modelltechnisch möglich.

2.3.3 Informationsmanagement

Für das übergeordnete Ziel einer ökologischen und ökonomischen Batterie Demontage und potentiellen Remontage ist die Nachverfolgung von Daten über mehrere Lebenszyklen hinweg notwendig. Mit Hilfe der Daten können so während der individuellen Lebensphase der Batteriezellen etwa Nutzungsdaten, Fertigungsspezifika, aber auch Supply-Chain bezogene Informationen wie Rohstoffherkunft eingesehen und in die Entscheidungsfindung der Verwertung einbezogen werden.

Im Rahmen der Konzepterstellung fürs Lifecycle Data Management wurden insgesamt neun Fallbeispiele unterschiedlicher Geschäftsmodelle für Second-Life Batterien ausgewählt. Eines dieser Geschäftsmodelle, welches in Abbildung 8 dargestellt ist, beschreibt das kollaborative Arbeiten von Fahrzeug OEMs und Unternehmen, welche Energiespeicher herstellen. Es

handelt sich folglich um eine Umnutzung der Batteriesysteme, nach ihrem Einsatz im Fahrzeug. Die Kollaboration erfolgt dabei dadurch, dass bestimmtes Expertenwissen über den Zustand der Batteriesysteme geteilt werden.

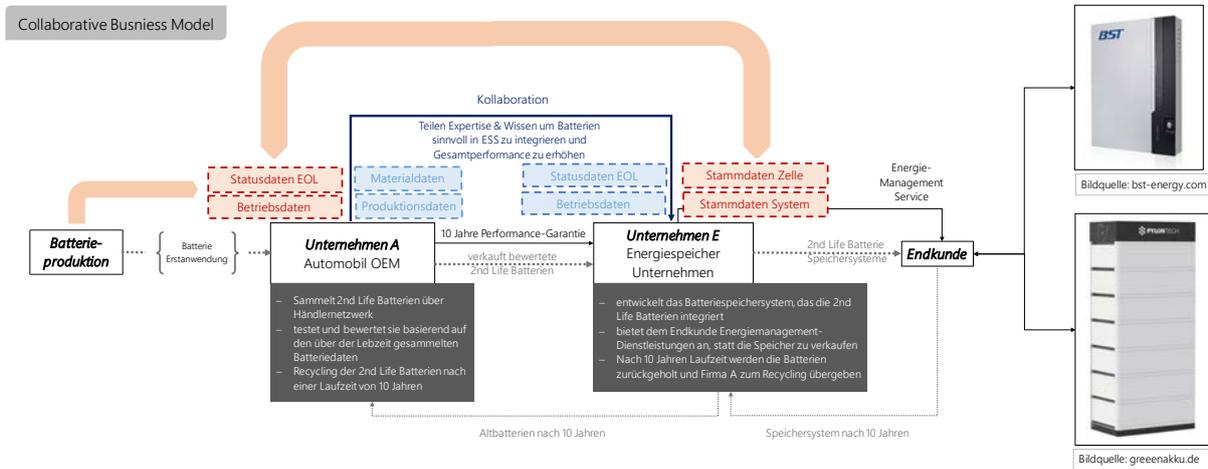


Abbildung 8: Struktur eines möglichen "Collaborative Collaborative Business Models“ unter systematischer Nutzung von Lifecycle Daten des Batteriesystems.

Eine besondere Herausforderung ist die Identifizierung der am besten geeigneten Optionen zum Daten-Traceing über die Lebenszeit. In Abbildung 9 werden vergleichend einige Traceability-Systeme dargestellt. Wie im Abschnitt 2.1.3 beschrieben, erfolgt die Einführung von digitalen Produktpässen für Traktionsbatterien in den kommenden Jahren. Individualisierte Batteriepässen versprechen vollständige Dateninformationen für jedes einzelne Batteriesystem.

Kriterien \ Ansatz		eEOL-Pass	Battery-Passport	Blockchain Tracability System
Sicherheit <i>(Datenaustausch/-übertragung)</i>	1	🟡	🟡	🟢
Vollständigkeit <i>(Menge der getrackten Daten)</i>	2	🟡	🟢	⚠️
Informationsgehalt <i>(Aussagekraft der Daten)</i>	3	🟡	🟡	⚠️
Zugriffsmanagement <i>(Datenzugriffregelung für Stakeholder)</i>	4	🟡	🟡	🟡

○ 🟡 🟢 🟣 ⚫ Erfüllungsgrad der Kriterien ⚠️ Keine Informationen verfügbar

Abbildung 9: Kriterien und Bewertung unterschiedlicher Traceability-Optionen.

Damit das Traceability-System einen Mehrwert für alle Stakeholder entlang dem Lebenszyklus einer Batterie schaffen kann, ist ein geregeltes Zugriffsmanagement essentiell. Damit die Stakeholder Vertrauen in das System gewinnen und bereitwillig sensible Daten mit anderen teilen ist es notwendig, dass eine genaue Regulierung existiert welcher Stakeholder auf

welche Daten Zugriff hat. Darüber hinaus werden die Systeme auch dahingehend bewertet, ob sie das Problem der mangelnden Datenverfügbarkeit für einzelne Stakeholder lösen und ob die Daten zu jedem Zeitpunkt abrufbar sind.

3 Demontage Batteriesystem zu Batteriemodulen

Im Rahmen des Projekts DeMoBat am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart wurden innovative Roboterkonzepte entwickelt, die eine effiziente Demontage von EVBs ermöglichen. Der Fokus lag dabei auf dem Öffnen der Batteriesysteme und der Demontage der internen Komponenten, insbesondere der Extraktion der Batteriemodule. Ein zentrales Ziel des DeMoBat-Ansatzes bestand darin, technologieunabhängige Lösungen zu entwickeln, die sich für verschiedene Batterievarianten eignen. Daher wurden möglichst wenige Annahmen über die Form und Beschaffenheit der Batteriesysteme getroffen.

Die entwickelten Konzepte zeichnen sich durch ihre Flexibilität aus und bieten Industrieunternehmen die Möglichkeit, maßgeschneiderte Teilkonzepte für ihre individuellen Herausforderungen auszuwählen und in ihre Produktionsprozesse zu integrieren. Um die Umsetzung zu demonstrieren, wurde ein vielseitiges Robotersystem aufgebaut, das verschiedene relevante Technologien erproben und vorführen kann.

Das roboterbasierte Demontagesystem verarbeitet ausgediente und entladene Batteriesysteme, deren demontierte Einzelkomponenten je nach Zustand verschiedene Wege gehen können. Wenn einzelne Teile noch verwendbar sind, können sie repariert oder wiederverwendet werden. Andernfalls werden die extrahierten Module an weitere Demontagestationen übergeben, um die Zellen zu entnehmen und anschließend zu öffnen, um die Aktivmaterialien freizulegen und weiterzuverarbeiten.

Eine Vielzahl von grundlegenden Technologien wurde im Rahmen des Projekts verfolgt, untersucht und erprobt. Diese Technologien lassen sich in sechs Überkategorien einteilen, siehe Abbildung 10:

- Planen: Das strukturierte Programmieren der Demontagezelle – systematische Auswahl der notwendigen Prozesse, sowie CAD gestützte Roboterprogrammierung,
- Steuern: Geführte Onlineprogrammierung unter der Bezugnahme von Bildverarbeitung und Kraft-Momenten-Regelung,
- Trennen: Verschiedene Strategien um Verklebungen zu trennen sowie die Untersuchung von zerspanenden Verfahren wie fräsen, sägen und schneiden,
- Lösen: Industrielles Lösen von Schrauben, Steckverbindungen und anderer Komponenten,

- Handhabung: Die generelle Handhabung vieler prinzipiell unterschiedlicher Teilkomponenten
- und Optimieren: Inhärente Prozessoptimierung.

Mit den erzielten Ergebnissen bietet das DeMoBat-Projekt vielversprechende Perspektiven für die industrielle Demontage von Traktionsbatterien und leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Förderung der nachhaltigen Kreislaufführung elektromobiler Komponenten.



Abbildung 10: Übersicht der Technologien.

Im Folgenden wird die Demontagestation vorgestellt (Abschnitt 3.1). In Abschnitt 3.2 wird das Sicherheitskonzept beschrieben. In den Abschnitten 3.3 und 3.4 wird auf die entwickelten Programmierverfahren, das Vision-System und die dazugehörige Bildverarbeitung eingegangen. Prozesse und Technologien werden im Abschnitt 3.5 dargestellt.

3.1 Demontagestation

In diesem Teilprojekt wurde eine automatisierte Demontagestation entwickelt und aufgebaut, um Batteriemodule aus den Batteriepacks zu entnehmen. Als Anwendungsfall wurde die Batterie PB300 von Mercedes-Benz AG eingesetzt. In Abbildung 11 sind die Bestandteile der Demontagestation ersichtlich. Die Basis der Demontagestation bildet ein

Bearbeitungstisch (1). Auf diesem werden die Batteriesysteme (2) manuell mit einem Flurförderfahrzeug zunächst auf Hubleisten abgelegt. Nach dem Absenken der Batterien auf die Tischoberfläche können diese an beliebiger Stelle mittels magnetisch-pneumatischer Spannsysteme (3) fixiert werden. Über dem Bearbeitungstisch befindet sich ein stationäres Vision-System (4), das mittels Bildverarbeitung die Situation auf dem Bearbeitungstisch erfasst, die für den späteren Prozess benötigten Informationen auswertet und an den Steuerungsrechner weitergibt.

Der Demontagevorgang erfolgt dann mittels Roboters (5). Dieser ist mit einer Kupplung (6) ausgerüstet, die es erlaubt, automatisch unterschiedliche Werkzeuge (7) einzusetzen. Diese Werkzeuge, die jeweils speziell für die konkreten Anforderungen entwickelt wurden, werden in einem Werkzeugbahnhof (8) bereitgestellt. Der Werkzeugpark des Bahnhofs umfasst dabei sowohl zahlreiche Werkzeuge für den Demontageprozess – zum Öffnen und Abführen auch defekter Schrauben, zum Lösen des Gehäusedeckels, zum Demontieren der Systembestandteile, wie z. B. Stromschienen, Elektronik- und Batteriemodule, zum Durchtrennen von Kabeln, Lösen von Steckverbindungen, Heraustrennen der verklebten Batteriemodule – bis hin zur Entnahme der einzelnen demontierten Bauteile unter Einsatz an die jeweilige Aufgabe angepasster Greifersysteme. Darüber hinaus steht für die Bildverarbeitung ein Werkzeug für den mobilen Einsatz von Kameras für Inspektionszwecke als Ergänzung für das stationäre Vision-System (4) zur Verfügung. Die Demontagezelle wird durch weitere zum Betrieb notwendige Komponenten wie z. B. ein Aggregat zur Unterdruckerzeugung (9) oder die die Zelle schützende Umzäunung mit ihren Sicherheitseinrichtungen vervollständigt.

Eine zusätzliche Herausforderung stellte die Zusammenführung der in diesem Forschungsprojekt entwickelten unterschiedlichen Technologien, Verfahren und Funktionseinheiten in die Demontagestation dar.

Wie im Steuerungsschema in Abbildung 2 skizziert, erforderte dies die Integration und Vernetzung verschiedenster Steuerungs- und Rechnersysteme. Die Kommunikation dieser Systeme wurde gleichzeitig über mehrere unterschiedliche Bussysteme realisiert.

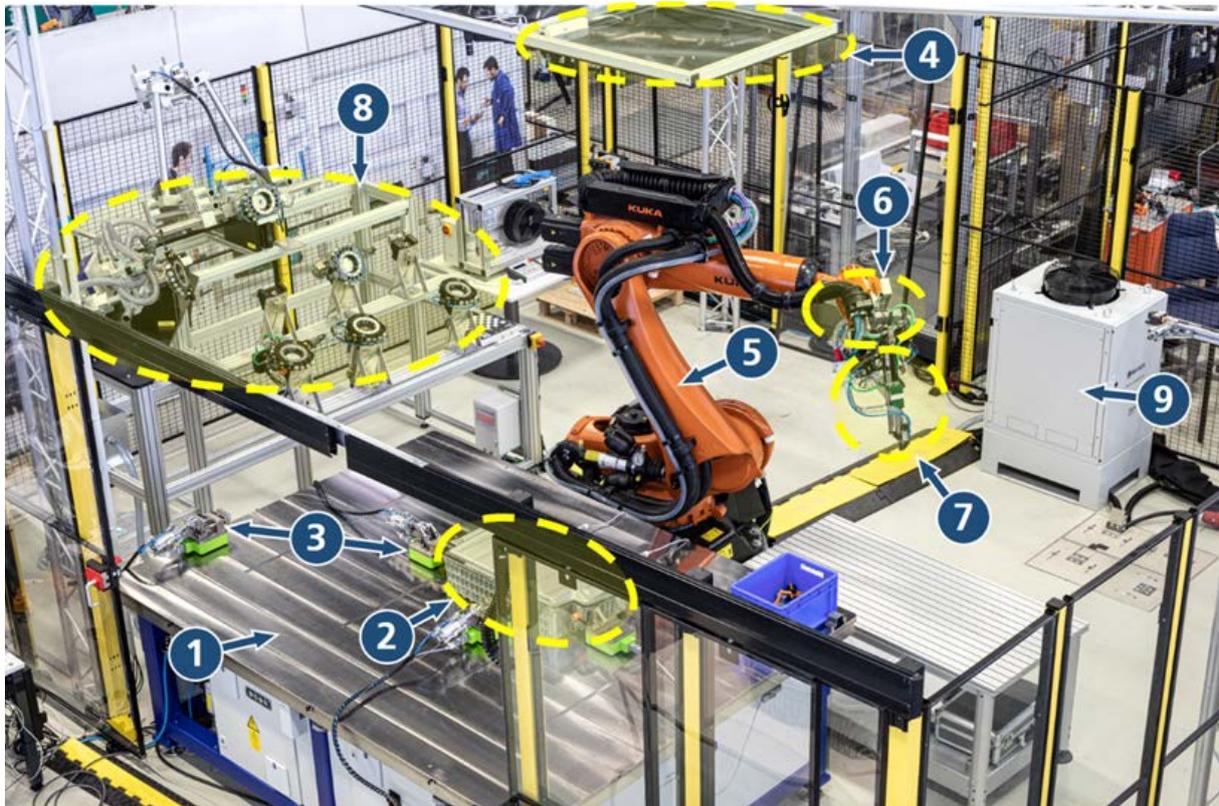


Abbildung 11: Bestandteile der Demontagestation: (1) Bearbeitungstisch; (2) Batteriesystem; (3) Spannsysteme; (4) Vision-System; (5) Roboter; (6) Kupplungssystem; (7) Einwechselbares Werkzeug; (8) Werkzeugbahnhof; (9) Unterdruckerzeugung.

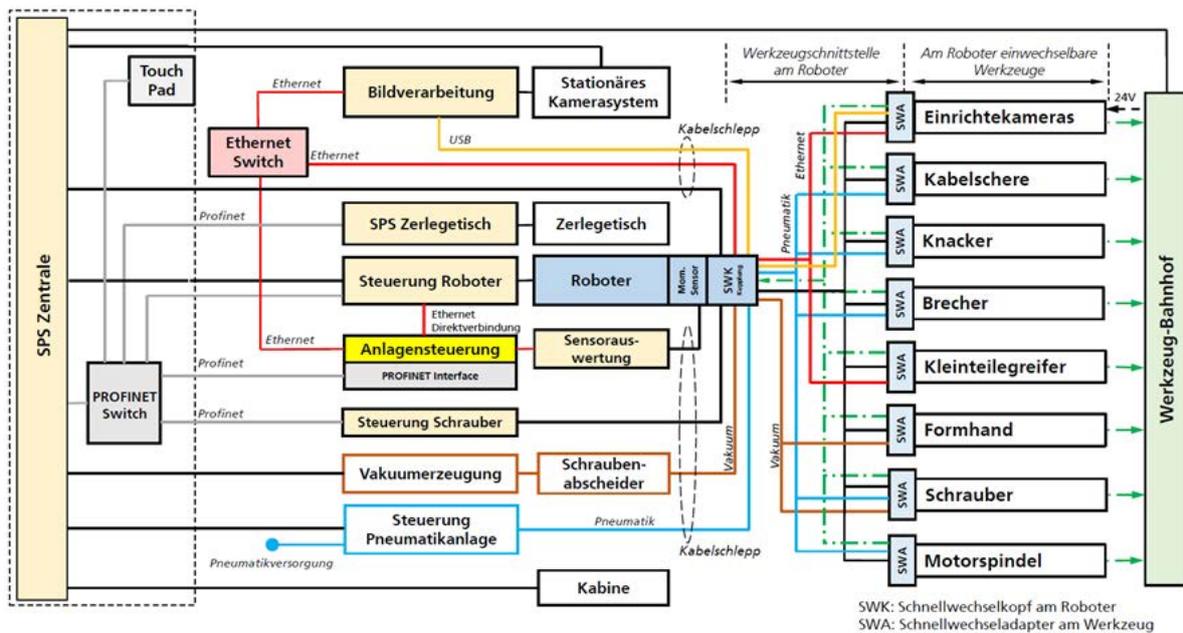


Abbildung 2: Steuerungsschema der Demontagestation.

3.2 Sicherheitskonzept

Für die automatisierte Demontage von Traktionsbatterien sind seitens der Risikobetrachtung zum einen die klassischen Maschinenrisiken zu berücksichtigen. Zudem kommt jedoch hinzu, dass durch das zu demontierende Produkt eine zusätzliche Risikoquelle vorhanden ist. Des Weiteren soll eine schnelle Änderung des zu demontierenden Batterietyps ebenfalls sicher möglich sein. Somit sind regulatorisch zwei Bereiche betroffen: zum einen mit dem konstruktiven Aufbau des Robotersystems die Maschinenrichtlinie (2006/42/EG umgesetzt in der 9. ProdSV) sowie für den späteren Betrieb der Anlage die Betriebssicherheitsverordnung (2009/104/EG umgesetzt in der BetrSichV). Aufgrund der regulatorischen Vorgaben (insbesondere durch die Maschinenrichtlinie) sind hinsichtlich eines potentiellen thermal runaways offene Fragestellungen, wie eine entsprechende Betrachtung im Rahmen einer Risikobeurteilung erfolgen soll sowie wie mögliche Risikominderungsmaßnahmen (im Sinne von Detektion und Reaktion) aussehen können.

Um die Risiken systematisch abzuleiten wurden zuerst die hinsichtlich eines thermal runaways kritischen Faktoren identifiziert: Mechanische Risiken durch Krafteinwirkung auf die Zellen im Modul, elektrische Risiken durch Kurzschluss sowie Temperaturrisiken. Letztere können als direkter Einfluss in der Demontage ausgeschlossen werden. In einem nächsten Schritt wurde der Zerlegeprozess anhand der manuellen Demontage in einzelne Unterschritte zerlegt und mögliche Fehler und zugehörige Ursachen im Rahmen einer PHA (Preliminary Hazard Analysis) identifiziert und bereits mögliche Risikominderungsmaßnahmen aufgelistet. Für den Teilbereich der mechanischen Risiken wurde ein Modell erstellt, in dem u.a. auf Basis von regulatorischen Anforderungen aus dem Transporttest nach UN 38.3 Kraftgrenzen abgeleitet werden können. Weitergehend erfolgte anhand der Risikobeurteilung für den automatisierten Demontageprozess die Ableitung von Sicherheitsanforderungen sowie möglichen Konzepten. Dabei wurden zwei Konzepte detaillierter für eine spätere Umsetzung beschrieben. Hinsichtlich der Anforderungen aus der Betriebssicherheitsverordnung, die eine verpflichtende Gefährdungsbeurteilung vorsieht sind in dem Teachvorgang bei der Demontageplanung eine einfache Möglichkeit implementiert worden, die eine begleitende Gefährdungsbeurteilung ermöglicht, um die je Batterie spezifischen Risiken je Verfahrensschritt zu identifizieren und zu bestätigen, dass entsprechende Vorsichtsmaßnahmen beachtet wurden.

Die PHA wurde anhand der Batterien des Nissan Leaf und GM Bolt, für die detaillierte Videoanalysen im Internet zu Verfügung stehen, durchgeführt. Die Demontage wurde dabei in einzelne Schritte zerlegt, notwendige Handlungen und Werkzeuge aufgeführt und mögliche

Fehler identifiziert. Als Fehler wurden dabei zum einen die bereits angesprochenen mechanischen und elektrischen Risiken (diese wiederum unterteilt in einen Kurzschluss der Signalleitungen und Kurzschluss der HV-Bereiche) betrachtet, aber auch die für eine spätere Wiederverwendung der Module relevanten Fälle wie z. B. die Beschädigung oder Positionsänderung der Temperaturfühler, die somit eine Weiterverwendung ausschließen.

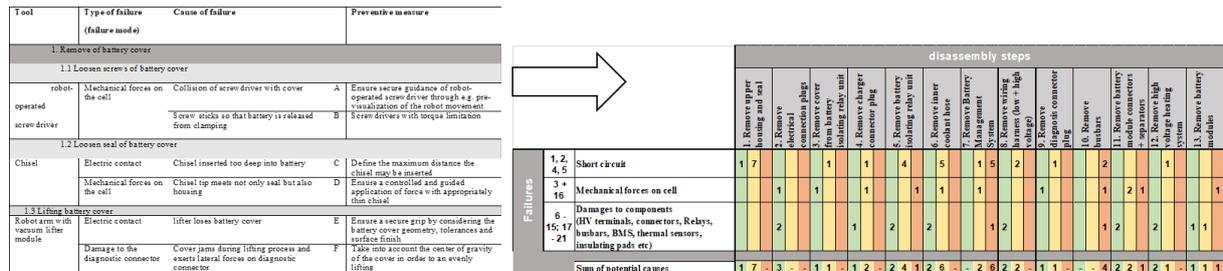


Abbildung 12: Ausschnitt aus der PHA - Identifizierte Fehler und Ursachen sowie abgeleitete mögliche Maßnahmen sowie aggregierte bewertete Darstellung über die Prozessschritte.

Die Risiken wurden im Anschluss hinsichtlich der Kritizität mit den Faktoren gering, mittel und hoch belegt und aggregiert über den Gesamtdemontageprozess dargestellt.

Wie sich in der Risikobeurteilung zeigte sind auch die mechanischen Einflüsse als mögliche Fehlerquelle für einen thermal runaway signifikant. Zu einer Kraftausübung auf die Zellen im Modul kann es zum einen durch eine Fehlfunktion im System, das einen Fall des Moduls bewirkt kommen zum zweiten aber auch durch die direkten Greifkräfte selbst. Für die beiden Fälle wurde ein Kräfteabgleichmodell entwickelt, dass basierend auf regulatorischen Vorgaben wie der UN 38.3 die jeweils max. zulässigen Kräfte auf eine Einzelzelle auf das spezifische System überträgt und abschätzt, ob die maximale Kräfte und Fallhöhen zulässig wären.

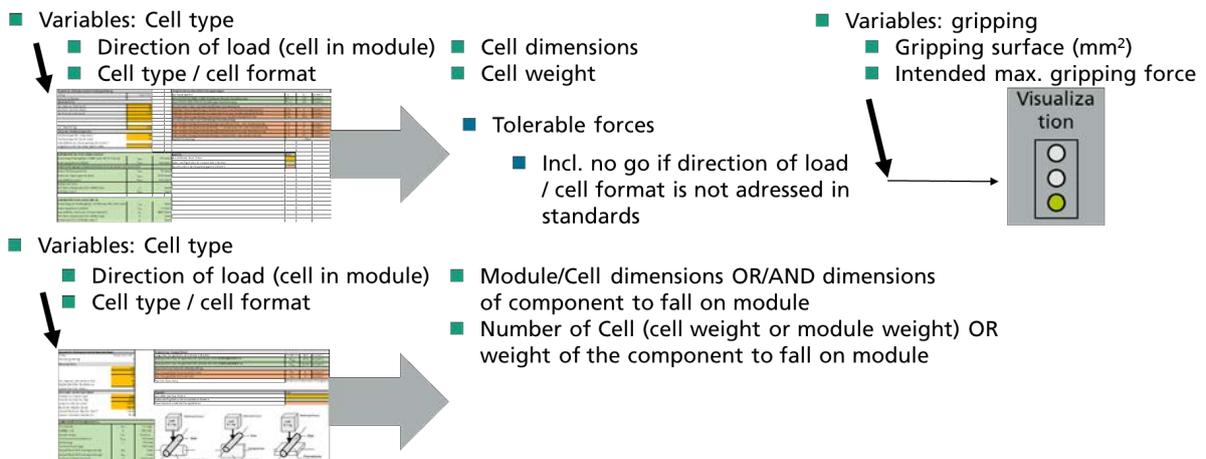


Abbildung 13: Kräfteabgleichmodell für unterschiedliche Zelltypen.

Im Rahmen der Gesamtrisikobeurteilung wurden die einzelnen Risiken der automatisierten Demontage analog der EN 12100 bewertet und folgende Sicherheitsanforderungen definiert:

Sicherheitsanforderung/Konzept 1 (Verifizierung): Für jede Batterievariante müssen die erforderlichen Greifkräfte mit den maximalen Kräften des Kräfteabgleichmodells verglichen werden. Wenn die Kräfte nicht erreicht werden können, müssen größere Greiferflächen oder andere Greifer verwendet werden.

Sicherheitsanforderung/Konzept 2a (Konstruktion): Um die mögliche Fallhöhe der Module zu begrenzen und die Zeit für ein mögliches Sturzereignis zu minimieren, müssen die Module nach der Demontage auf einer Fläche in der Nähe der Demontagebank und ohne große Höhenunterschiede während der Bewegung der Module abgelegt werden.

Sicherheitsanforderung/Konzept 2b (Verifizierung): Für jede Batterievariante muss die mögliche Fallhöhe mit der nach dem Kräfteabgleichmodell zulässigen maximalen Höhe verglichen werden.

Sicherheitsanforderung/Konzept 2c (sicherheitsbezogene Steuerungsfunktion): Die maximale Bewegungshöhe sollte als sicherheitsrelevante Steuerungsfunktion gemäß EN 13489-1 als sicher begrenzte Position (Safely Limited Position - SLP) mit einem Performance Level (PLd) berücksichtigt werden. Zusätzlich sollte die Überwachung des greifens des Moduls ebenfalls mit einer sicherheitsgerichteten Steuerungsfunktion nach EN 13489-1 gewährleistet werden.

Sicherheitsanforderung/Konzept 3 (Roboter-Teaching): Das Bewegen von Objekten über Module sollte vermieden werden oder, falls dies nicht möglich ist, sollte das Gewicht der Objekte mit den Ergebnissen im Schätzungswerkzeug verglichen werden.

Sicherheitsanforderung/Konzept 4 (sicherheitsbezogene Steuerungsfunktion - Erkennung): Thermische Ereignisse sollten entweder mit Geräten detektiert werden, die einen Performance Level (PLd) gemäß EN ISO 13849-1:2016-06 haben, oder mit einer diversen Redundanzkombination von Geräten - z. B. einer Wärmebildkamera und einem Rauchmelder. Wenn der zweite Ansatz verwendet wird, sollten beide Geräte nach domänenspezifischen Normen hergestellt werden.

Sicherheitsanforderung/Konzept 5 (sicherheitsbezogene Steuerungsfunktion - Reaktion): Wenn ein potenzielles thermisches Ereignis erkannt wird, sollte ein schnelles Ausschleusen und der Transport des gesamten Pakets in einen sicheren Bereich gewährleistet sein.

Ein erster Entwurf dieses Konzepts besteht aus einem Auswurfzylinder, der die Batterie von der Demontagebank auf eine geneigte Rollenbahn schiebt. Anschließend wird sie durch die Schwerkraft in eine sichere Box transportiert. Diese Box sollte dann selbstdichtend sein und

mit geeigneten Materialien (z. B. Pyrobubbles) gefüllt werden, die die entstehende Wärme absorbieren und zusätzliche Zeit für die manuelle Entnahme bieten.

Zudem wurden für die aufgebaute Demonstrator-Roboterzelle analog der Anforderungen der Maschinenrichtlinie sowie der DGUV-Information 202-002 (Herstellen und Betrieben von Geräten und Anlagen für Forschungszwecke) eine Risikobeurteilung nach EN 12100 erstellt. Basis in der mittels des Programmes Safexpert erstellten Analyse war die Norm EN 10218-2. Die im Rahmen der Risikobeurteilung abgeleiteten technischen Schutzmaßnahmen mit den notwendigen Performance-Leveln wurden im Rahmen der Validierung nach EN 13849-2 rechnerisch belegt.

SRP/CS-Übersicht					
System/Modul	Erforderlicher PL	Ergebnis	CCF-Faktor	PFH _D	Erreichter PL
SRCFA1a: Tür auf Roboter	d	Ziel erreicht	Ziel erreicht	9,90E-08	d
SRCFA2a: Tür auf Formhand	b	Ziel erreicht	Ziel erreicht	1,15E-08	e
SRCFA3a: Tür auf Knacker	d	Ziel erreicht	Nicht relevant	5,10E-08	e
SRCFA5a: Tür auf Kabelschneider	d	Ziel erreicht	Nicht relevant	5,10E-08	e
SRCFA6a: Tür auf Kleinteilegreifer	b	Ziel erreicht	Ziel erreicht	1,15E-08	e
SRCFA7a: Tür auf Schrauber	d	Ziel erreicht	Nicht relevant	1,09E-07	d

Abbildung 14: Nachweis der erreichten Performance-Level für die Demonstratoranlage.

3.3 Programmierung

3.3.1 Offline Programming

Batterien von Elektrofahrzeugen haben unterschiedlichste Bauformen, Größen und genutzte Verbindungstechniken. Die Einrichtung eines neuen Batterietyps auf einer universellen Demontagezelle geht mit langen Stillstandszeiten einher, in der die Zelle nicht betrieben kann. Offline-Programmierung ermöglicht es, die Einrichtungs- und damit die Stillstandszeit zu reduzieren. Um die Programmierung am Computer zu beschleunigen, soll der Prozess im *Arbeitspakets TP2.2.2.5 – CAD-gestützte Roboterprogrammierung* zu Teilen automatisiert werden, in dem das Produktmodell einer Batterie analysiert und der Planer unterstützt wird, indem das Roboterprogramm auf diesen Daten basierend für eine bestehende Roboterzelle erstellt werden kann. Dieses soll als Programmtemplate für das Einrichten an der realen Batterie zur Verfügung gestellt werden.

Basis des gesamten Arbeitspakets war das Batteriemodell im STEP Format. Aus diesem galt es, für die Demontage relevante Informationen zu extrahieren. Dazu gehören neben der

Demontagerihenfolge die Demontagerichtung jeder Komponente sowie die dazugehörigen Prozesse und Werkzeuge, die dafür benötigt werden. Auf der anderen Seite wurden für die Programmgenerierung Informationen über die Roboterzelle benötigt, in der die Batterie demontiert werden soll. Eine Datenbank an in dem Demonstrator verfügbaren Werkzeugen wurde erstellt, um die Prozesse den Technologien zuordnen zu können. Ein Modell des Demonstrators wurde in einer Simulations-/Offline Programmiersoftware erstellt. In dieses Anlagenmodell wurde das Batteriemodell importiert.

Aus der Zerteilung der notwendigen Informationen - batteriespezifisch und anlagen-spezifisch - hat sich ein zweigeteiltes Vorgehen entwickelt, wie in Abbildung 15 dargestellt: Während für die Datenverarbeitung aus dem CAD-Modell der Batterie ein Demontageplanungstool entwickelt wurde, wurde für die Roboterprogrammierung eine Programmerweiterung für VisualComponents umgesetzt.

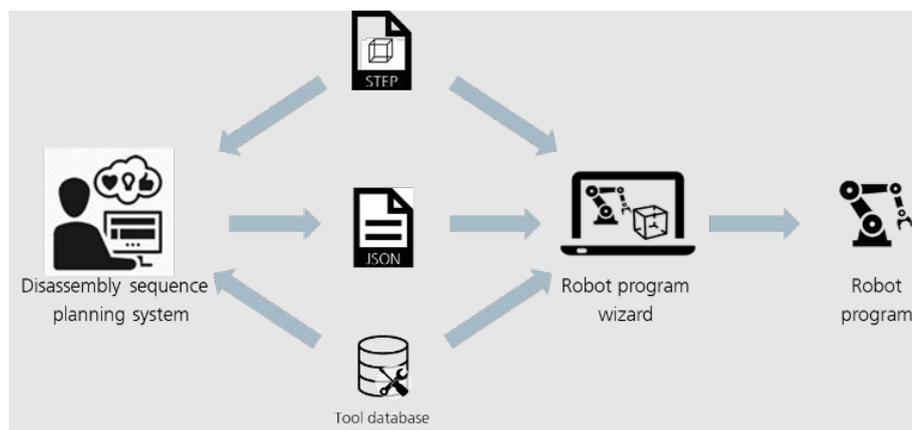


Abbildung 15: Übersicht der Toolchain.

Der Demontage-Planungsassistent vereint zwei Funktionen in sich. Ein auf pythonOCC basierendes Programm liest die STEP-Datei einer Batterie ein, um daraus die Demontagerihenfolge, Demontagerichtung sowie geometrische Informationen und den Typ einer Komponente zu definieren. Dabei wird mittels einer Kollisionsanalyse interferenzfreie, lineare Pfade für die Komponenten von ihrer montierten Position aus hin zu einem ausgebauten Zustand gesucht. Diese Funktion wurde um ein *Graphical User Interface* (GUI), welches mit Hilfe der Gameengine *Unity* umgesetzt worden ist, ergänzt. In der GUI kann die automatisch erstellte Reihenfolge validiert und ggf. geändert werden. Zusätzliche Informationen, wie die Auswahl eines geeigneten Werkzeugs, dessen Greifposition, kann manuell ergänzt werden. Dem Benutzer steht es zudem frei, eine eigene Montagereihenfolge ohne etwaige Vorgaben aus dem STEP-Analysierer zu generieren. Die gesammelten

Informationen werden in einem neutralen Datenübergangsformat an die Simulationssoftware übergeben.

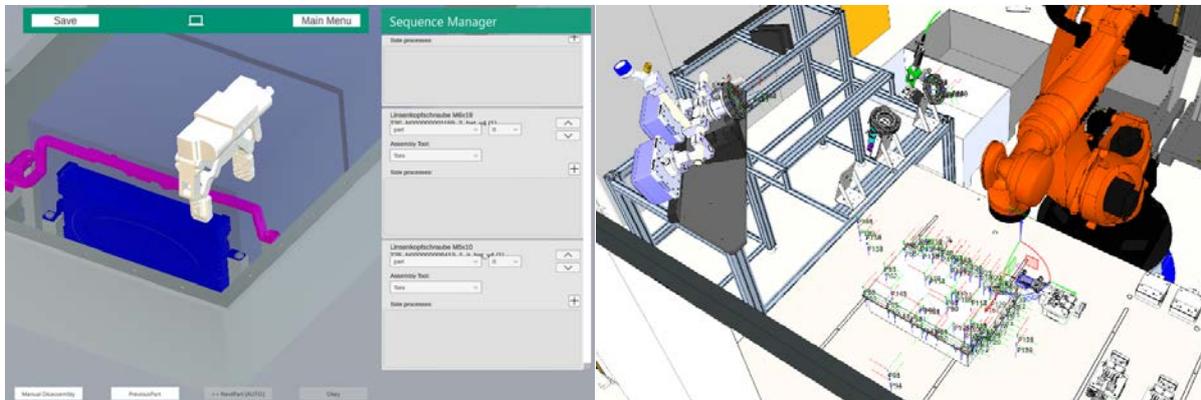


Abbildung 16: Links: Definition der Werkzeugposition in Unity, rechts: Erstelltes Roboterprogramm in der Simulationsumgebung dargestellt als Wegpunkte.

Die Programmerweiterung für VisualComponents umfasst eine GUI, die die verschiedenen Funktionalitäten beinhaltet. Während der Projektlaufzeit wurde ein CAD-Modell des Demonstrators erstellt, welches als Grundlage für die Simulationsumgebung diente. Nach dem Laden der Zelle in die Software kann das Batteriemodell und die JSON importiert werden. Informationen, die die Anlage betreffen und nicht aus dem Batteriemodell entnommen werden können, wie die Demontageposition der Baugruppe oder die Ablageposition der einzelnen Teile, können vom Benutzer definiert werden. Alle weiteren Schritte, von der Modellierung der Batterie in einzelne Komponenten über die Programmierung der Werkzeugwechsel und Anfahrposition des Roboters für den jeweiligen Prozess übernahm die entwickelte Programmerweiterung. Dabei verfolgt die Demontage folgender Logik: Es werden zuerst *Zusatzprozesse* durchgeführt, die vor der eigentlichen Demontage einer Komponente vollzogen werden müssen. Dies beinhaltet zum Beispiel das Durchschneiden von Kabeln an einem Steuergerät, bevor dieses mit einem Greifer aus der Batterie entnommen werden kann. Als Programmbausteine wurden die am häufigsten wiederkehrenden Prozesse – *Pick & Place*, *Schrauben*, *Schneiden* - definiert. Dabei wurde darauf geachtet, die Bausteine modular aufzubauen. Zusätzliche Funktionen, wie die Programmanalyse, helfen dem Nutzer beim Generieren eines lauffähigen Programmcodes. Ein Pfadplaner basierend auf einer Probabilistic Roadmap und der Verwendung des A*-Algorithmus wurde implementiert, um bei Transferbewegungen zwischen zwei Prozessen kollisionsfreie Bahnen erzeugen zu können. Der Programmcode konnte über die verwendete Software in nativen Programmcode übersetzt und auf die Steuerung des Roboters im Demonstrator übertragen werden.

Für das Projekt wurde von dem Verbundpartner Daimler Batterien des Typs PB320 sowie die dazugehörige STEP Datei bereitgestellt. Die bereitgestellten Daten haben sich jedoch als fehlerbehaftet herausgestellt. Um das Modell dennoch zur Validierung nutzen zu können, wurde die Gehäuseunterschale mit den Funktionsflächen nachkonstruiert und die fehlerhafte Geometrie ausgetauscht. Daneben wurde ein Batteriedummy entwickelt, um elementare Funktionen testen zu können. Diese wurde in 3 Phasen mit unterschiedlicher Komplexität gestaltet, wie in Abbildung 17 dargestellt. Biegeschlaiffe Teile wurden aus den Modellen entfernt. Der Ansatz konzentriert sich auf formstabile Komponenten. Kabel, die für die Demontage gezogen oder durchgeschnitten werden mussten, wurden in der dritten Phase durch ihre Stecker an den Kabelenden dargestellt.

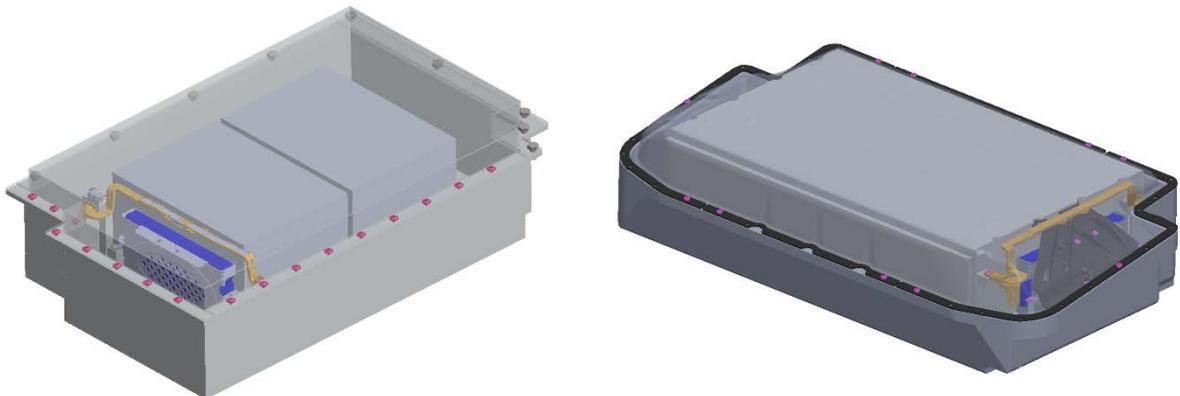


Abbildung 17: links: Batteriedummy mit einzelnen Originalkomponenten, rechts: STEP-Datei der PB320 mit nachkonstruierter Gehäuseunterschale.

Der Demontageplaner konnte bei allen Varianten der Batterien bei der Analyse der STEP-Datei die einzelnen Teile korrekt identifizieren und eine valide Demontagereihenfolge bestimmen.

In der GUI des Demontageplaners war es möglich, die genaue Position des Werkzeugs für die Demontage zu definieren, indem ein 3D-Modell davon in die Darstellung geladen und positioniert wurde. Außerdem konnte die Reihenfolge über einen Sequenzbaum manipuliert werden.

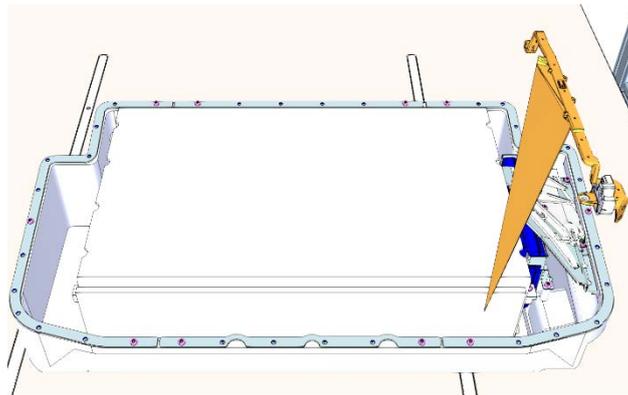


Abbildung 18: Aufbaufehler aus STEP-Datei.

Beim Import des Batteriemodells in die Simulationsumgebung hat sich ein weiterer Aufbaufehler in der bereitgestellten STEP-Datei herausgestellt. So konnte eine Leistungsbrücke, die die beiden Batteriemodule in der PB320 verbindet, nicht korrekt dargestellt und entsprechend nicht den Informationen aus der CAD-Analyse zugewiesen werden. Mit dieser Ausnahme funktionierte der Import und die Nachbehandlung der STEP-Datei sowie der JSON reibungslos. Der Nutzer musste lediglich die Position vorgeben, an der die Batterie demontiert werden sollte. Danach wurde die Demontagesequenz abgearbeitet. Um die Ablageposition eines Bauteils zu bestimmen, musste diese an die Position verschoben und diese anschließend bestätigt werden. Greif- und Anfahrpositionen, die im Baugruppenkoordinatensystem der Batterie definiert worden sind, wurden automatisch auf das jeweilige Bauteil transformiert. Über die Analysefunktion ließ sich die Erreichbarkeit und Kollisionsfreiheit der Positionen überprüfen. War eine Ablageposition für den Roboter nicht erreichbar, konnte dem durch ein Verschieben des jeweiligen Bauteils entgegengewirkt werden. Handelte es sich bei der kollisionsbehafteten Position um eine direkt an der Batterie, konnte die Position der Batterie neu definiert werden, um eine Pose zu erhalten, bei der sämtliche Positionen an der Batterie für den Roboter erreichbar waren. Der Programmcode für die Batterie wurde zum Schluss als nativer Programmcode für den *KUKA KS 270 R 2700* in der *KukaRobotLanguage (KRL)* exportiert.

3.3.2 Online Programming

Eine Offline-Programmierung von Demontevorgängen ist nur möglich, wenn hinreichend exakte CAD-Modelle der zu demontierenden Komponente(n) beim Recycler vorhanden sind. Desweiteren kann der Zustand von Komponenten am Ende ihres Lifecycles durchaus vom Originalzustand abweichen, sei es durch Korrosion oder die ständige mechanische Beanspruchung in einem Automobil. Daher wird als Alternative zur Offline-Programmierung

auch die Online-Programmierung untersucht. Da eine Traktionsbatterie sehr komplex ist und verschiedene Werkzeuge zur Demontage benötigt, muss der Programmierer, der einen neuen Batterietyp einteachen soll, im Hinblick auf eine kurze und effiziente Einrichtung unterstützt werden, während gleichzeitig die nötigen Vorkenntnisse im Bereich Roboterprogrammierung so gering wie möglich gehalten werden sollen, damit auch Facharbeiter ggfs. eine Einrichtung vornehmen können.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird komplett auf die Erstellung von Kuka-Code verzichtet. Stattdessen wird als Roboterprogrammierungssoftware pitasc (<https://www.pitasc.fraunhofer.de/>) verwendet, wodurch die Roboterprogrammierung auf eine eigene Domänen-spezifische Sprache abstrahiert wird. Da der Einrichter auch diese Sprache nicht beherrschen muss, werden zwei Software-Tools zur Verfügung gestellt: Zum einen eine Einrichtoberfläche, wo der Bediener die einzelnen Komponenten wie Schrauben, Deckel, Kabel und sonstige Bauteile einzeln einteachen kann, mit Unterstützung aus Daten der Bildverarbeitung und eines 3D-Joysticks zum millimetergenauen Anfahren und Einteachen von Demontagepositionen. Auch sicherheitsrelevante Aspekte der jeweiligen Komponenten werden hier erfasst und dokumentiert. Zum anderen gibt es eine Oberfläche zur zeitlichen Verknüpfung der geteachten Demontageschritte, d.h. die Reihenfolge der geteachten Elemente kann hier festgelegt und ein komplettes Roboterprogramm exportiert werden. Beide Oberflächen sind mobil nutzbar, d.h. sowohl am Bediener-PC als auch am Einrichttablet.

Die Einrichtoberfläche wurde unter Nutzung von Node-Red implementiert und bietet eine Übersicht über die aktuell geteachten Elemente, sowie eine Auswahl zum Teachen neuer Elemente. Dabei wurden zunächst Schrauben, Nieten, Deckel, Kabel und Greifteile betrachtet. Für jedes Element öffnet sich ein individueller Einrichtwizard, der den Benutzer durch die notwendigen Schritte zum Einteachen leitet. Für eine Schraube ist das beispielhaft: 1) Festlegen der Orientierung, entweder durch direktes Festlegen entlang einer bestehenden Achse, oder Einteachen durch Aufnahme von 3 Punkten der Oberfläche. Aus diesen Punkten wird dann eine Ebene berechnet und der Normalenvektor als Schraubachse genutzt; 2) Festlegen der Schraubenposition, entweder durch kraftüberwachtes Anfahren per Teleoperation mit dem 3D-Joystick oder durch Anfahren einer aus der Bildverarbeitung erhaltenen Position; 3) Ausfüllen der Gefahrenbeurteilung; 4) Test der Entschraubung für die geteachte Position und ggfs. Anpassung.

Die Oberfläche zur zeitlichen Verknüpfung der geteachten Elemente wurde ebenfalls mit Node-Red entwickelt und nutzt die Node-Red-Bedienoberfläche, die auf einem grafischen low-

code Ansatz basiert. Hier kann der Benutzer neue Roboterskills per drag- and drop hinzufügen und per Mausklick zusammenfügen und parametrieren.

3.4 Bildverarbeitung

Um Batterien von Elektrofahrzeugen mit ihren unterschiedlichen Bauformen, Größen und genutzten Verbindungstechniken automatisch demontieren zu können, ist es zunächst erforderlich relevante Bauteile mittels Bildverarbeitung (BV) zu identifizieren. Hierbei sind grundsätzlich zwei verschiedene Fälle zu unterscheiden:

- Der Demontageprozess eines neuen Batterietyps wird dem System geteached
- Ein bereits bekannter Batterietyp soll demontiert werden

Für den Fall des Teachens eines neuen Batterietyps soll der Anwender unterstützt werden, in dem ihm in der Nutzeroberfläche die Live-Ansicht der Batterie angezeigt und erkannte Verbindungstechniken für den nächsten Demontageschritt vorgeschlagen werden. Hierfür mussten entsprechende BV-Werkzeuge entwickelt und in das Demontagesystem integriert werden. Bei der Demontage eines bereits geteachten Batterietyps muss zunächst die Lage der Batterie auf dem Demontagetisch bestimmt werden, um Positionen relevanter Bauteile der zuerst geteachten Referenz-Batterie in die aktuelle Lage projizieren zu können. In der Folge geht es dann um das Prüfen der Lage zu demontierender Teile, also beispielsweise ob ein Kabel dort verläuft, wo es bei der ersten Batterie des Typs der Fall war, oder ob eine zu lösende Schraube tatsächlich vorhanden ist und dem erwarteten Typ/Größe entspricht.

Die Erstellung des Konzeptes der erforderlichen BV-Sensorik (Kameras/3D-Sensoren) und die funktionale Einbindung in das Hard- und Software-Layout der Roboterzelle war ebenso Teil der Problemstellung wie die Entwicklung oben beschriebener BV-Tools.

Wegen der zu erwartenden Vielfalt an Batteriebauformen und den sich aus der Problemstellung ergebenden unterschiedlichen BV-Fragestellungen wurde ein kombinierter Ansatz von 2D- und 3D-Sensorik verfolgt, um prozessorientiert auf den bestgeeigneten, bereits existierenden 2D- und 3D-Ansätzen aufbauen zu können.

In der Verarbeitung von 2D- und 3D-Daten wurden neben etablierten BV-Werkzeugen wie Feature Matching und Punktwolkenregistrierung auch state-of-the-art-Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz genutzt. Für das Training entsprechender Netzstrukturen wurden eigens Datensätze der zu erkennenden Objekte (Schrauben, Kabel, etc.) erzeugt.

Stationär über dem Demontagetisch angebrachte 2D-Kameras (Basler acA5472-5gc) und der 3D-Sensor (Ensenso X36) können parallel zum Demontagevorgang verwendet werden und verzögern damit nicht den Gesamtprozess. Da es zwangsläufig zu Situationen kommt, in denen beispielsweise Schrauben von der stationären Sensorik nicht einsehbar sind, wurde parallel ein „Einrichtwerkzeug“ mit einer Endoskopkamera und einem weiteren 3D-Sensor (Zivid Two) entwickelt und eingesetzt, das robotergeführt in der Lage ist, für die erforderliche Flexibilität im Arbeitsbereich des Roboters zu sorgen.

Für die Implementierung der erforderlichen BV-Werkzeuge wurden frei zugängliche Software-Bibliotheken wie OpenCV, Open3D und andere verwendet. Verwendete Neuronale Netze, wie zum Beispiel *MaskRCNN* oder *Point Transformer*, basieren auf Pytorch, was den künftigen Implementierungsaufwand reduziert.

Hardwareseitig wurden alle Kameras und Sensoren beschafft und mittels entsprechender Treiber ins Robot Operating System (ROS) des Zellenrechners integriert, sodass aktuelle Bilder/Punktwolken in Form von ROS-Services abgerufen und für spezifische BV-Aufgaben (Bestimmung Batterielage, Lokalisierung von Schrauben, etc.) verwendet werden. Darüber hinaus wurde ein ROS-Service implementiert, der automatisiert alle bildgebenden 2D- und 3D-Sensoren extrinsisch kalibriert, das heißt ihre exakte Position relativ zur Roboterbasis bestimmt. So kann die mittels BV erkannte Lage von Objekten in das Koordinatensystem des Roboters transformiert werden und entsprechende Demontageschritte ausgeführt werden.

Für die Lagebestimmung von Kabeln und Drähten wurde ein eigener Bild-Datensatz erstellt und ein neuronales Netz trainiert. Kabel und Drähte werden im RGB-Bild erkannt und in der Depthmap, bzw. der daraus erstellten Punktwolke extrahiert (Abbildung 19). Basierend auf der Lage der markierten Kabel können diese geschnitten und entnommen werden.

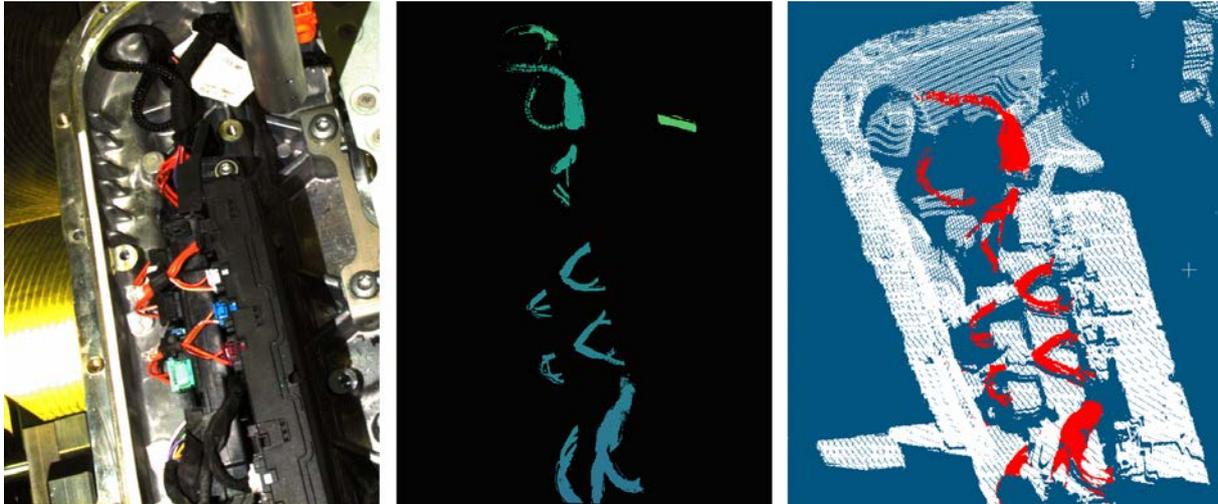


Abbildung 19: (a) RGB-Bild des 3D-Sensors, (b) erkannte Kabel aus Depth Map des 3D-Sensors extrahieren, (c) Lage der Kabel in 3D-Punktwolke als Grundlage fürs Schneiden und Greifen.

Für die Bestimmung von Schraubentyp und -größe wurde ein KI-basierter Ansatz gewählt. Die Segmentierung von Schraubenkopftriebs (z. B. Sechseck bei Inbus) sowie die Klassifizierung des Schraubentyps erfolgt dabei mittels transfer learning einer *MaskRCNN*-Architektur anhand eines eigenen 2D-Bilddatensatzes. Parallel wird mit den 3D-Daten die Entfernung zwischen 2D-Kamera und Schraube bestimmt, sodass die pro Pixel abgebildete Fläche berechnet werden kann. Nimmt man die Anzahl an Pixel, die innerhalb eines segmentierten Antriebs liegen, kommt man auf dessen Gesamtfläche und kann die Größe ableiten (z. B. M5, M6 oder M8). Auch Kabelbinder können mittels *MaskRCNN* erkannt und unter Zuhilfenahme der 3D-Daten für das automatisierte Schneiden lokalisiert werden.

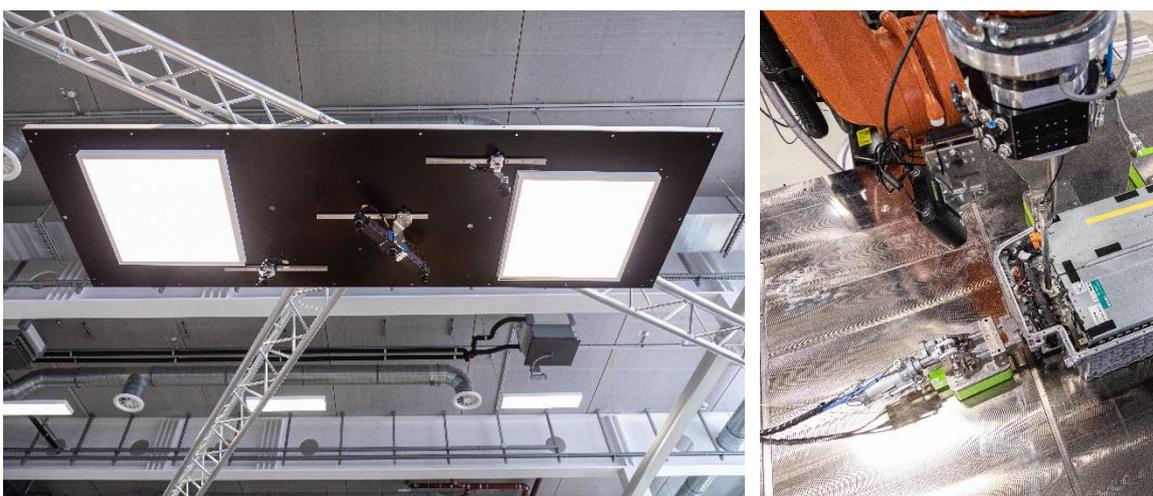


Abbildung 20: links, stationäres Vision-System mit Beleuchtung, 3D-Sensor und zwei hochauflösenden RGB-Kameras; rechts, mobiles Vision-System mit Endoskopkamera und 3D-Sensor.

3.5 Prozesse und Technologien

3.5.1 Verspannen der Batteriesysteme

Die fortschreitende Entwicklung von Batteriemodulen und insbesondere deren Integration in die Fahrzeugkarosserie ist nicht abgeschlossen. Immer wieder werden neue Konzepte und Realisierungen präsentiert, welche die Batterie beispielsweise als strukturelle Einheit des Fahrzeugs unterbringen und die Integrationsdichte weiter erhöhen. Neben den Herausforderungen, welche diese kontinuierliche Weiterentwicklung für die Demontage und letztendlich den Rücklauf von Batteriemodulen stellt, ist auch das Verspannen und das Handhaben der Batteriemodule in einer allgemeinen Form schwierig. Um dieser Unsicherheit durch Flexibilität zu begegnen, wurden in DeMoBat keine spezifischen geometrischen Eigenschaften der Batteriezellen angenommen um darauf das entsprechende Konzept zu basieren.

Es stellt sich die grundlegende Frage wie eine Batterie auf einem Bearbeitungstisch für eine industrielle Bearbeitung verspannt wird, obwohl die Außengeometrie nicht im Vorfeld bekannt ist. Eine ähnliche Problematik prägt auch die entsprechende Handhabungstechnik. Als Ansatz wurde hier nach einer Möglichkeit gesucht eine Batterie mit mehr oder weniger beliebiger Form zu verspannen ohne dabei spezifische Geometrie Eigenschaften dieser zu verspannenden Batterieform vorauszusetzen.

Ein formflexibler Verspanntisch wurde aufgebaut, welcher sich normaler Spanntechnik (bspw. Kniehebel, Anschläge usw.) bedient, welche sich allerdings durch elektrisch schaltbaren Elektromagneten beliebig auf der Arbeitsfläche positionieren lassen (siehe Abbildung 21). Um die Befestigung der Verspannelemente zu garantieren, wurden hier Lastmagneten aus dem Bereich der Handhabung mit Kränen eingesetzt. Somit wird die Robustheit der Anwendung durch konventionelle Technik garantiert, und gleichzeitig eine hohe Flexibilität durch die freie Positionierbarkeit der Verspannelemente erreicht.

Zusätzlich kann in einem Havariefall der Elektromagnet der Verspannelemente automatisch gelöst werden und die Batterie zur Evakuierung freigegeben werden.

Zur Anlieferung der Batterien mit einem Gabelstapler wurden verschiedene Elemente wie beispielsweise Hubschienen und Anschläge so in der Tischplatte eingearbeitet, dass diese pneumatisch ein- und ausgefahren werden können. Zum Bestücken des Arbeitstisches werden diese ausgefahren und dienen dem Gabelstaplerfahrer als Orientierung. Nachdem die Batterie auf dem Arbeitstisch durch die frei positionierbaren Verspannelemente gehalten

werden, können die pneumatischen Anschläge wieder eingezogen werden. Somit stellen sie keine Kollisionsflächen für einen eventuellen Havariefall dar.

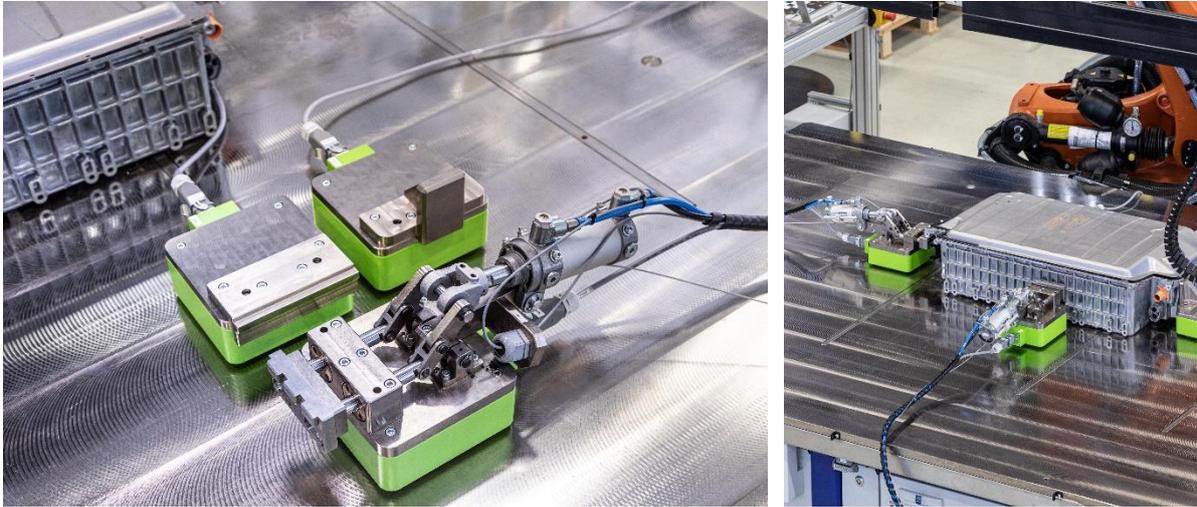


Abbildung 21: Formflexibler Spanntisch mit Spannelementen, welche sich beliebig auf der Arbeitsfläche positionieren lassen.

3.5.2 Formflexibles Greifen

Eine ähnliche Problemstellung bietet sich auch für die generelle Handhabung bspw. des Batteriedeckels. Die Form des Batteriedeckels, welcher nach dem Entschrauben abgenommen werden muss, ist prinzipiell batteriemodell- oder individuell (bspw. Durch Verschleiß oder Beschädigung der Batteriehülle) unterschiedlich. Daher wurden hier formflexible Ansaugkissen der Firma Formhand eingesetzt (Abbildung 22). Diese formflexiblen Ansaugkissen sind mit Granulat gefüllt und nehmen durch die Erzeugung von Vakuum eine feste Form an. Diese feste Form ermöglicht einen Kraftschluss und das sichere Halten von schweren Lasten. Da das Granulat im nicht-vakuumierten Zustand formflexibel ist, ergeben sich Handhabungsmöglichkeiten trotz unbekannter Außenkontur.

Durch die vergleichbaren hohen Lasten, welche durch die Formhandkissen getragen werden müssen, wurden nach einer ursprünglichen Experimentierphase ein Greifer so ausgelegt, dass er bis zu 300 kg tragen kann. Somit eignet sich der Handhabungsgreifer zum Transport der kompletten PB300 Batterie, aber auch für die Handhabung des Deckels und der Unterschale. An einen zusätzlichen Kragarm ist auch ein kleineres Formhandmodul an dem Greifer angebracht. Dieser ermöglicht kleineren Modulen nach dem Lösen von bspw. den entsprechenden Schraubverbindungen formflexibel aufzunehmen.

Sowohl der Bearbeitungstisch und acht exemplarische Spannelemente mit Lastmagneten (beschrieben im vorherigen Abschnitt) als auch der Formhandgreifer für Groß und kleine

Objekte wurden aufgebaut und realisiert. Das gesamte Konzept, sowohl des Tisches als auch der des Greifers, wurde so skalierbar ausgelegt, dass je dem Anwendungszweck angepasst werden kann ohne konzeptionelle Änderung vornehmen zu müssen.

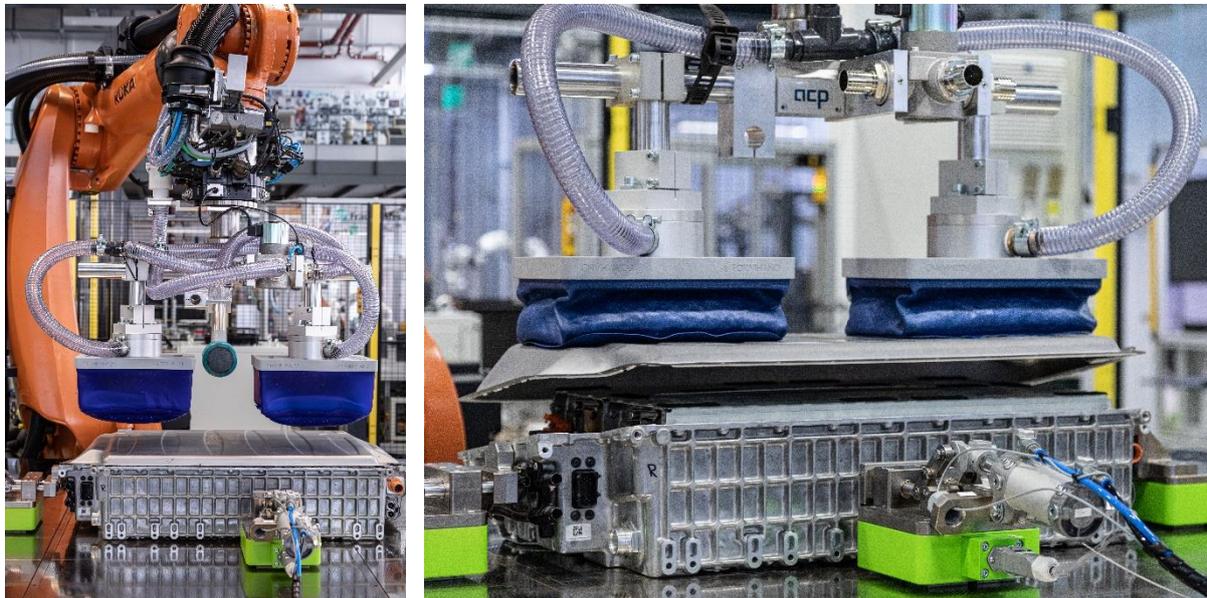


Abbildung 22: Formattflexibles Greifen durch Ansaugkissen.

3.5.3 Greifen von Kleinteilen

Einige Komponenten lassen sich nicht durch die flexiblen Formhandgreifer aus dem Gehäuse entnehmen. Dies liegt unter anderem an der Geometrie oder dem Verbauungszustand innerhalb des Gehäuses, die es dem großen Vakuumgreifer nicht ermöglichen haben, bestimmte Komponenten zu erreichen. Deshalb wurde ein modularer Greifer, der automatisiert rekonfiguriert werden kann, entwickelt und aufgebaut, siehe Abbildung 23.

Als Greifmodul wurde ein Schunk Universalgreifer WSG 050-110-P verwendet, für den für die Komponenten passende Greiffinger konstruiert worden sind. Für das Greifen der Schienen wurde zusätzlich ein Magnetgreifer entwickelt, der mit den Greiffingern manipuliert werden konnte. Zum Lösen der Schienen wurden diese über der Ablage mittels einem Haken von dem Magnetgreifer abgestriffen. Mit diesen war es möglich, die einzelnen Bauteile nach dem Lösen ihrer Schrauben aus der Batterie zu entnehmen. In Betracht einer universell einsetzbaren Demontagezelle ist die Entwicklung von bauteilspezifischen Greiffingern nur in äußersten Notfällen zu betrachten. Der Einsatz von flexiblen Greifsystemen ist hierbei vorzuziehen.

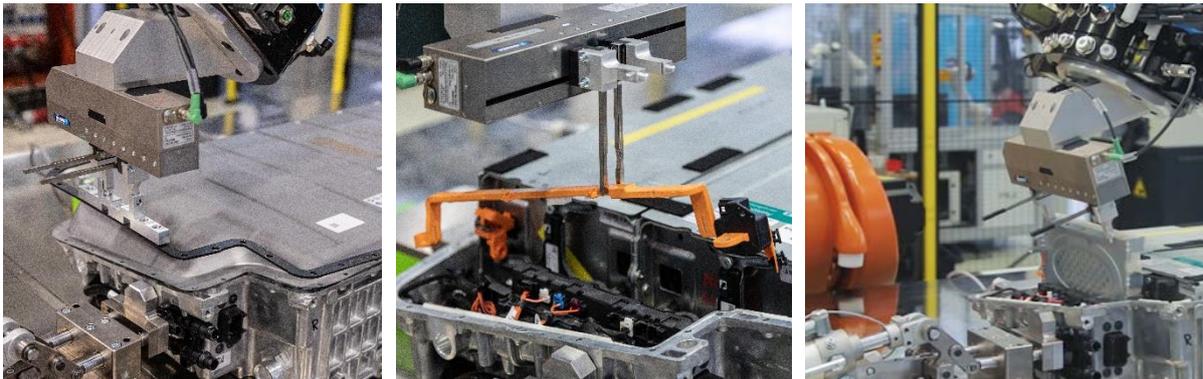


Abbildung 23: Einsatz des Kleinteilegreifers für die Abnahme ausgewählter Teile aus der Batterie PB300 der Mercedes-Benz AG.

3.5.4 Trennen von Klebeverbindungen

Da Batteriemodule starken Schwingungen und Umgebungseinflüssen trotzen müssen, hat sich Kleben und Verfugen als Füge- und Fixierprozesstechnologie als Standardprozess etabliert. Dies hat sich bei der Recherche, Untersuchungen und den Gesprächen mit Batteriemodullieferanten auch für zukünftige Produktgenerationen als sehr relevantes Themenfeld herausgestellt. Klebeverbindungen wirken bei Batteriemodulen auf vielerlei Weisen: Als Befestigung, als Schwingungsdämpfung, als Brandhemmung, als Wärmeleitung, als Ausgleichselement und zur Abdichtung gegen Feuchtigkeit. Als nicht reversibler Verbindungsprozess sind Klebeverbindungen für modulares Recycling unvorteilhaft.

Beim Öffnen und Ablösen der Module der, in DeMoBat vorliegenden Hybrid-Batterie PB 300 der Mercedes-Benz AG, sind die relevantesten Klebeverbindungen zum einen die Verfugung zwischen Deckel und Unterschale und zum anderen die Wärmeleitpaste, welche die Batteriemodule an der Unterschale der Batteriehülle befestigt.

Bei der Verklebung der Unter- und Oberschalen handelt es sich insb. um eine Abdichtung gegen Nässe. Durch den unregelmäßigen Fugenverlauf ist es nicht möglich bspw. mit einer Drahtsäge diese Verfugung aufzutrennen. Vielmehr ist es notwendig den gesamten Rand, ähnlich eines Dosenöffners, entlang zu arbeiten und dort die Verklebung zu trennen.

Für die Verklebung der Batteriemodule an der Unterschale wird eine wärmeleitfähige Paste genutzt. Diese wärmeleitfähige Paste hat verschiedene Eigenschaften, die die Demontage schwierig gestalten. Zum einen ist die Verklebung sehr stark, so dass der Roboter mit einer zulässigen Tragkraft von 300 kg, nicht die benötigte Kraft aufbringen kann um die Module herauszureißen. Zum anderen klebt die Verfugung nach dem Lösen erneut an und hält die Module weiterhin fest, sollte darauf erneut abgelegt werden.

Diese beiden Verklebungen werden exemplarisch in DeMoBat mit verschiedenen Werkzeugen behandelt. Hierbei sei erwähnt, dass diese Werkzeuge auf die spezifische Batterie (PB 400) angepasst worden sind. Trotzdem sind die Funktionsprinzipien und Technologien auf vergleichbare Herausforderung bei anderen Batteriemodulen anwendbar.

Zur Öffnung der Klebeverbindung zwischen Ober- und Unterschale wurde ein Werkzeug mit dem Namen *Knacker* entwickelt (siehe Abbildung 24). Der Knacker besteht aus einem langen Vorbau mit einer beweglichen Messerstahlklinge am Ende, die mit Hilfe eines Pneumatikzylinders bewegt werden und somit enorme schneid- und Öffnungskräfte aufbringen kann. Mit einem Wegetaster ist es möglich die Klinge sehr exakt zwischen Ober- und Unterschale zu platzieren und die Schneidfläche in die Fuge zu treiben. Durch den Aufbau sind zwei Funktionsweisen möglich. Zum einen kann die Schneidklinge in verschiedene Stellen getrieben und dort mit dem Pneumatikzylinder so bewegt werden, dass der Oberdeckel sich verbiegt, ablöst und danach abgenommen werden kann. Somit wird die Verfugung perforiert und die Haltekraft verringert. Sollte dieses Verfahren nicht erfolgreich sein, ist es weiterhin möglich die Schneidklinge an der Fuge entlang zu treiben und mit dem Roboter ein komplettes Freischneiden der Fuge zu ermöglichen.

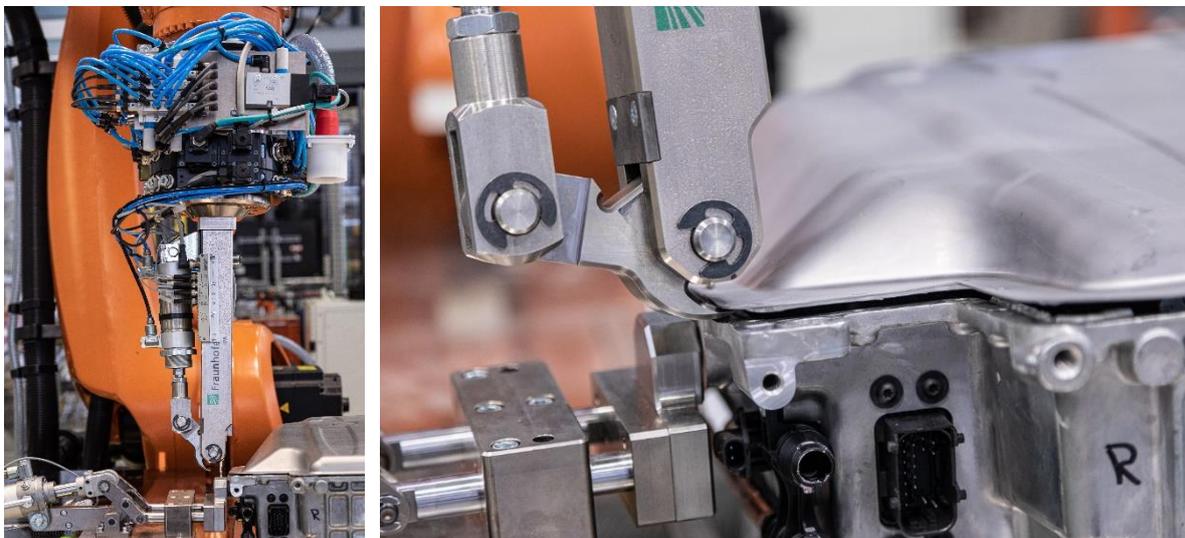


Abbildung 24: Knacker zur Öffnung der Klebeverbindung zwischen Ober- und Unterschale.

Die Module, welche an der Unterseite der Schale aufgeklebt sind, können nicht mit bloßer Anhebekraft des Roboters ausgerissen werden, wie sich in Versuchen gezeigt hat. Hierfür wurde der sogenannte *Brecher* entwickelt. Der Brecher ist ein großes Roboterwerkzeug welches sich unter die Batteriemodule einhängt und gegen die Schale der Hybridbatterie abstützt. Pneumatikzylinder erlauben dann ein einseitiges anziehen zwischen den Batteriemodulen und der Bodenschale. Somit ermöglicht es ein schräges Ausbrechen der

Batteriemodule. Der Klebstoff wird an einer Seite gelöst und dann schräg abgezogen. Die Haltekräfte der Verklebung sind daher niedriger und die Kräfte werden zwischen den Batteriemodulen und dem Boden direkt angewendet. Die Robotertraglast ist damit nur noch notwendig um die abgelösten Batteriemodule aus dem Boden zu heben.

Der Brecher (Abbildung 25) wurde zunächst hochflexibel ausgelegt, so dass die Batteriemodule durch einen Formhandgreifer gehalten wurden. Da die Formhandmodule auch zur Handhabung insb. des Batteriedeckels eingesetzt werden, wurde in der Realisierung insofern abgewichen als das eine spezielle Vorrichtung für die PB300 Module angesetzt wurden. Trotzdem liegen die Konzepte für beide Versionen vor. Die Wahl für die spezialisiertere Version ohne Formhandgreifer liegt insbesondere daran, dass die Formhandgreifer sehr teuer sind und hier Kosten gespart werden konnten. Eine weitere Beweisführung war nicht notwendig da die Formhandmodule bereits in dem anderen Kontext eingesetzt werden.

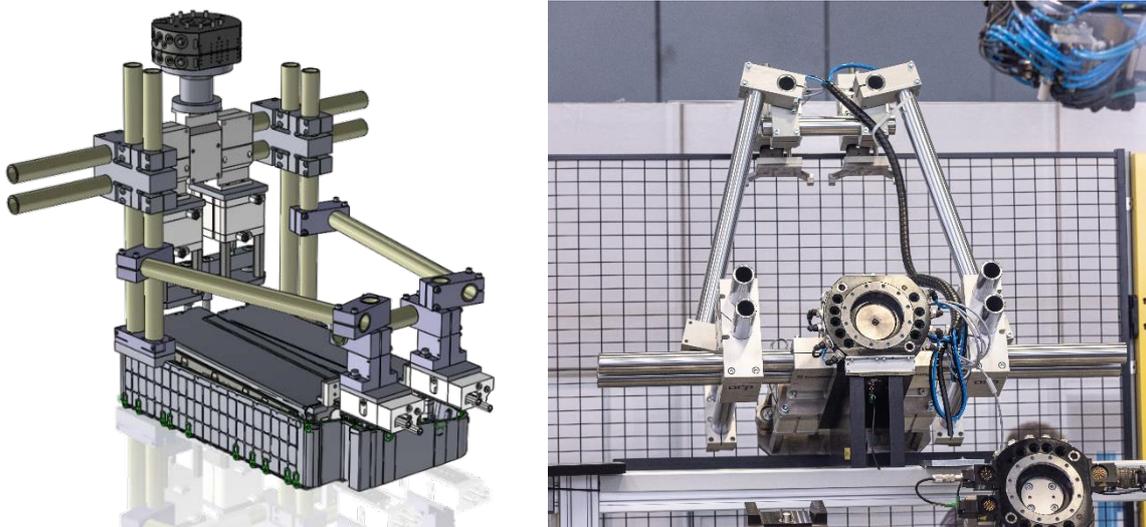


Abbildung 25: Brecher zur Entfernung der Module: (a) CAD-Modell; (b) Aufgebautes Werkzeug.

3.5.5 Lösen von Schraubverbindungen

Bei der Demontage von Batteriesystemen müssen zahlreiche Schrauben gelöst und entfernt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall des Projekts (PB320 Batterie) werden insgesamt 40 Schrauben gelöst, um den Deckel zu entfernen. Zusätzlich sind sämtliche Komponenten, die den Zugang zu den Modulen ermöglichen, ebenfalls verschraubt. Die Demontage von Schraubverbindungen besteht aus vier Phasen:

1. Anfahrt
2. Suche und Formschlussherstellung

3. Lösen der Schraube
4. Abführen der Schraube

Im Rahmen dieses Teilprojektes wurde ein Werkzeug entwickelt und aufgebaut, um die Schrauben zu lösen und abzuführen, siehe Abbildung 26.

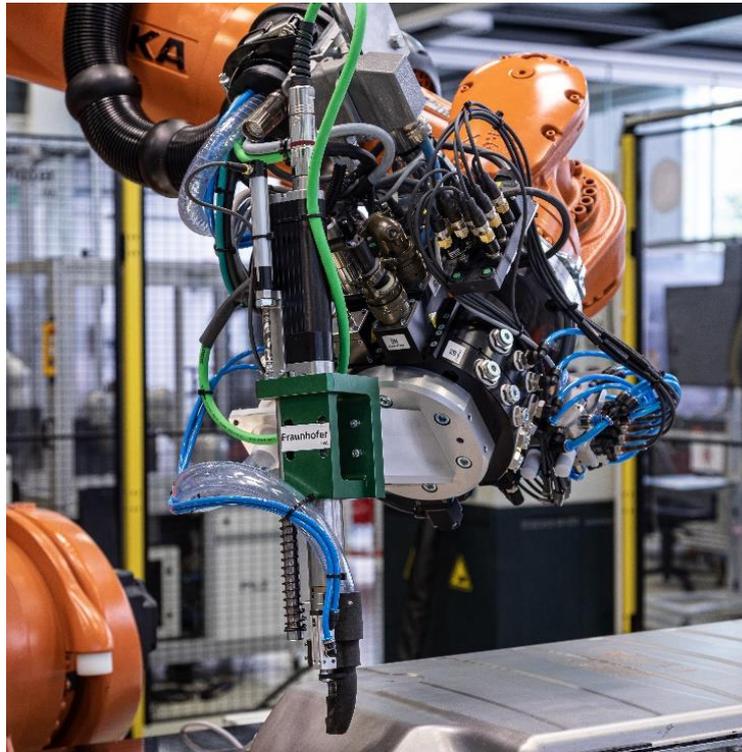


Abbildung 26: Werkzeug zum Lösen und Abführen der Schrauben.

Abführen der Schrauben

Das Abführen der Schrauben kann mit Hilfe von zwei verschiedenen Methoden realisiert werden. Die erste Methode lässt sich mit Magnetbits/Nüssen und einer Abstreifplatte umsetzen. Dabei verfährt der Roboter an einer Abstreifplatte und die Schrauben können aus einer Box entnommen werden. Nachteil dieses Ansatzes ist die Voraussetzung einer magnetischen Schraube (mit FE-Anteil). Die zweite Methode, welche hier im Laufe des Projektes realisiert wurde, ist die lokale Absaugung der Schraube an der Einbaustelle. Hierfür wurde ein Absaugstück konstruiert und gefertigt. Die Funktionsweise des Absaugstücks ist in Abbildung 27 zu entnehmen. Die Vorwärts- und Rückwärtsaktorik wird mit Hilfe eines Pneumatikzylinders realisiert.

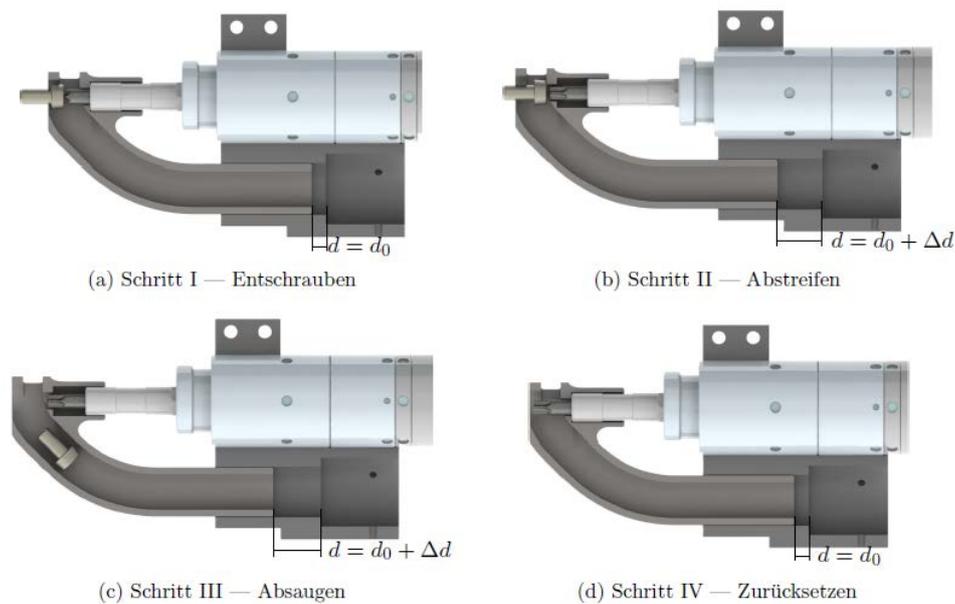


Abbildung 27: Die Funktionsweise der lokalen Absaugung von Schrauben.

Eine Abscheidevorrichtung ermöglicht die Separation der Schraube aus dem Luftstrom, vgl. Abbildung 28.



Abbildung 28: Abscheidevorrichtung für Schrauben: links, CAD-Modell; rechts: Prototyp.

Um die Zuverlässigkeit der Abscheidevorrichtung zu überprüfen wurden drei verschiedene Einbausituationen der Schraubverbindungen hinzugezogen. In Abbildung 29 sind die Einbausituationen zu entnehmen. Eine Zusammenfassung der drei Einbausituationen und den dazugehörigen Versuchsparameter sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Suchen und Formschlusserstellung

Neben der Zuverlässigkeit lokalen Absaugung ist die Zuverlässigkeit einer Spiralsuche als einer der Hauptfragestellung dieser Untersuchung.



Abbildung 29: Einbausituationen der Schraubverbindungen.

Tabelle 1: Versuchsparameter für die drei Einbausituationen.

Versuchsreihe	1	2	3
Einbaulage	A	B	C
Beschreibung	Prüfstand, freizugänglich	PB320, Batteriedeckel	PB320, Anbaukomponente
Schraubenkopfantrieb	Außensechskant	Torx	Torx
Schraubengröße	M8	M5	M5
Absaugung	Nein	Ja	Ja

Die Mehrzahl der Versuche zeigen einen erfolgreichen Formschluss, vgl. Abbildung 30. Jedoch tangiert die Anzahl der nicht erfolgreichen Versuche zwischen 16 % und 34 %. Fehlerfälle dabei sind ein verpasster Formschluss, was zu einer Wiederholung der Spiralsuche führen muss. Ein anderer häufiger Fall betrifft einen initialen Formschluss, der nicht von der

Steuerung als solchen erkannt wird. Insgesamt hat sich der Ansatz einer lokalen Absaugung der Schrauben als erfolgreich gezeigt.

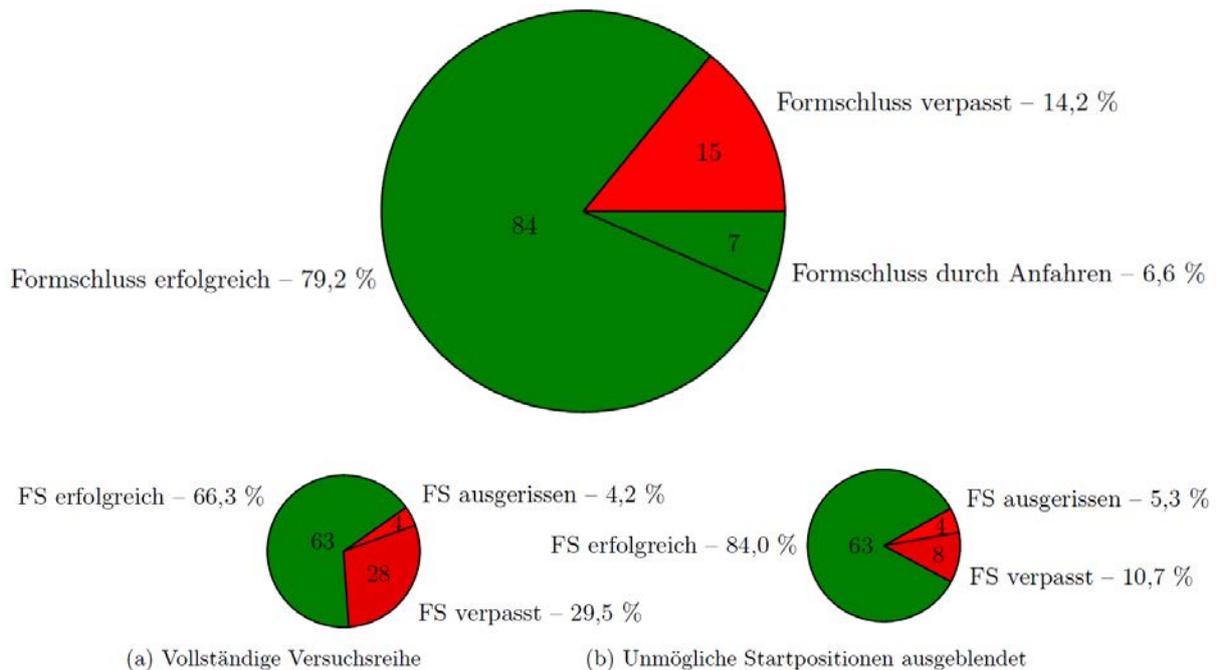


Abbildung 30: Versuchsergebnisse zum Suchen und Formschlussherstellung.

ML-Schraubenensuchstrategie

Die Fehlerkette einer roboter-basierten Demontage von Schraubverbindung beinhaltet die Genauigkeit eines Roboterarms, eines Werkzeugwechslers und dem Schrauber selbst. Dies führt eine Positionsabweichung (lateraler Versatz) zwischen der realen Position des Schraubkopfes und der des Werkzeuges. Eine weitere Abweichung besteht zwischen Orientierung des Werkzeuges und der der Schraube (Winkelversatz).

Um diesen Versatz zu kompensieren wird nach aktuellem Stand der Technik eine Spiralsuche durchgeführt, um einen Formschluss zu gewährleisten. Diese Technik bedarf Zeit in der Ausführung, eine adäquate Parametrierung und ist nicht immer erfolgreich. Daher leitet sich hier die Fragestellung einer alternativen Lösung zum Erreichen eines Formschlusses.

Ein möglicher Lösungsansatz ist die Verwendung von Methoden des Maschinellen Lernens. Dort wird zwischen überwachtem Lernen, unbewachtem Lernen und bestärktem Lernen unterschieden. In diesem Fall wurde eines Softwarerahmenwerks zum Erlernen des Formschlusses entwickelt. In Abbildung 31 sind die vier Phasen des Rahmenwerkes skizziert.

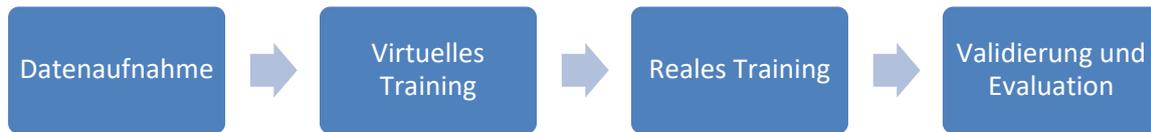


Abbildung 31: Die vier Phasen des Software-Rahmenwerks zum Erlernen des Formschlusses.

Hierzu wird im ersten Schritt eine Datenaufnahme durchgeführt. Dies folgt durch die Aufnahme von Kraft-Momenten-Werte, Motorströme des Roboters, Drehmomente der einzelnen Robotermotoren und die Position des Roboters. Anschließend wird in einer virtuellen vereinfachten Umgebung der Positionsausgleich in der X-Y-Ebene gelernt. Diese gelernte Strategie wird durch weiteres Lernen in der realen Welt verfeinert.

Das Softwarerahmenwerk beinhaltet eine Umgebung, einen Agenten und zugehörige Interaktion (Aktion, Zustand, Belohnung) im Sinne des Markov-Entscheidungsprozesses. Abbildung 32 zeigt den Aufbau des Rahmenwerkes.

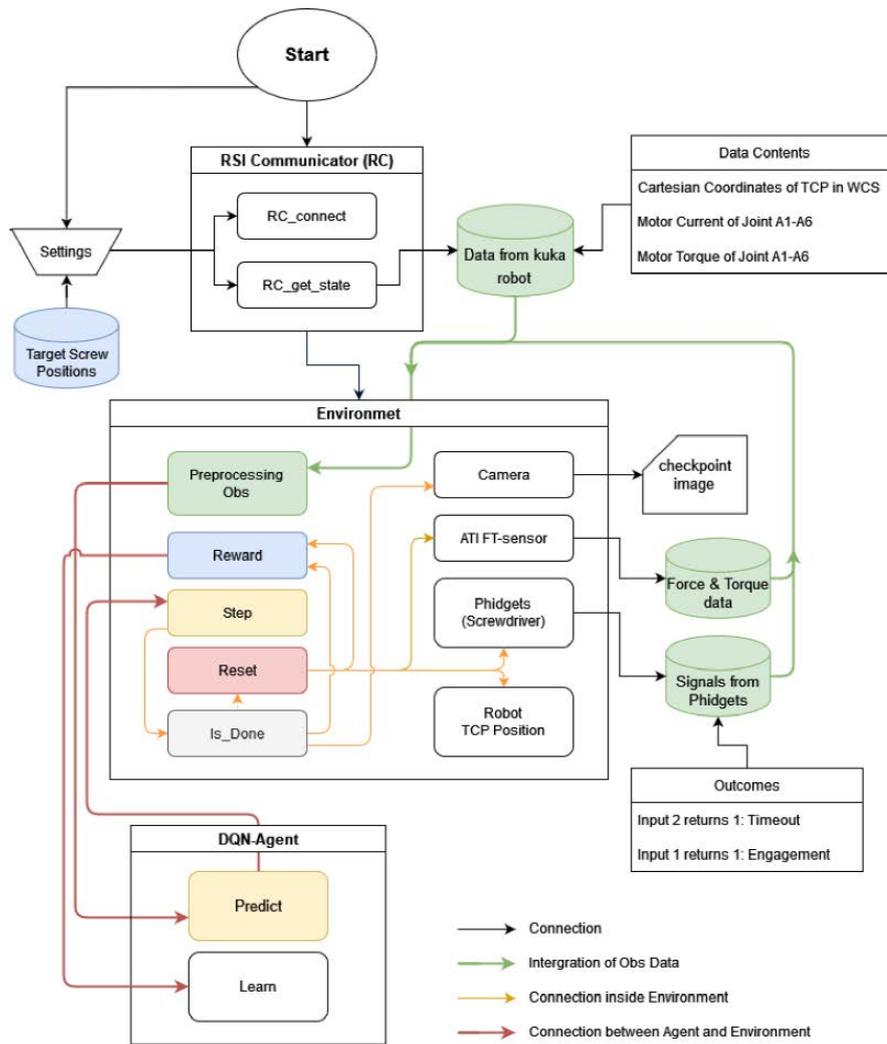


Abbildung 32: Aufbau des Softwarerahmenwerkes.

Erkennen des Schraubenkopfzustands

Umwelteinflüsse und unsachgemäße Wartung können zum Ausreißen von Gewindetrieben führen. Industrielle Schrauber werten das Lösen von Schraubenverbindung in binärer Form als OK und NOK (Not OK) aus. Für die Entscheidung zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Demontage und die daraus resultierende Werkzeugauswahl sind jedoch tieferegehende Auswertungen wie die Erkennung von rundgedrehten/defekten Schraubenkopfantrieben notwendig. In diesem Teilprojekt wird ein neuartiger, auf überwachtem Lernen basierender Ansatz zur Erkennung von rundgedrehten/defekten Schraubenkopfantrieben während der Formschlussphase vorgestellt, indem intrinsische Daten (Drehmoment des Schraubendrehers) verwendet werden. Grundlage dieser Arbeit ist ein experimenteller Datensatz mit mehr als 1.000 Demontagevorgängen von einem manuellen und robotergestützten Prüfstand, der vier Schraubenkopfantrieben umfasst: Torx,

Kreuzschlitz, Außensechskant und Innensechskant. Anhand des experimentellen Datensatzes wurde ein Vergleich zwischen mehrschichtigen Perzeptrons (MLPs) und faltendes neuronales Netzwerk (CNNs) durchgeführt. Außerdem wurden die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Ansatzes untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen die Machbarkeit der CNN-basierten Erkennung für eine Umdrehungszahl von weniger als einer Umdrehung, was eine Umdrehung besser ist als der Stand der Technik, außerdem ist der Ansatz unabhängig vom Schraubkopfantrieb. Das CNN-Modell liefert eine Genauigkeit von 98 % bei der Vorhersage des Schraubenzustands. Die Ergebnisse wurden in einem Fachjournal veröffentlicht (Al Assadi et al. 2022).

3.5.6 Trennen von Verschraubungen

Das zerstörungsfreie Lösen von Schraubverbindungen erfolgt nach aktuellem Stand der Technik mithilfe robotergeführter Schraubwerkzeuge. Das Verfahren bietet Vorteile im Hinblick auf die Zerstörungsfreiheit, Prozesszeit sowie die vorhandene Zugänglichkeit, stößt jedoch bei korrodierten Gehäuseschrauben an seine Grenzen. Zur Aufrechterhaltung der Prozessverfügbarkeit in der automatisierten Demontage muss somit eine Zusammenstellung zerstörungsfreier und zerstörender Trennverfahren erfolgen. Hierzu wurde das robotergestützte Fräsen untersucht.

Für die Zerspanversuche wurde ein Versuchsträger entwickelt, der sich aus einem Aluminiumrohr mit aufgesetztem Aluminiumblech zusammensetzt, welcher über einen Stahlring mithilfe von verzinkten Linsenkopfschrauben mit TORX-Antrieb der Größe M6x12mm miteinander verbunden wurde.

Als Frässtrategie kam das Zirkularfräsen zur Anwendung (Abbildung 33, links). Bei dieser Bewegungsart taucht das Fräswerkzeug mit einer kreisförmigen Vorschubbewegung um seine Längsachse in den Schraubenkopf ein, wodurch der Einsatz eines werkzeugumschließenden Absaugsystems zur Späneerfassung ermöglicht wird.

Es wurden vierschneidige Vollhartmetall-Eckradiusfräser mit Durchmesser 8 mm und einem Eckradius von 1 mm der Firma *Pokolm Frästechnik GmbH & Co. KG* vom Typ NVV 0334 56 081 eingesetzt, wobei eine Drehzahl von $n = 4777 \text{ min}^{-1}$, eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 1433 \text{ mm/min}$, eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120 \text{ m/min}$, ein Helixdurchmesser von $D_h = 5 \text{ mm}$ (Bohrungsdurchmesser $D_B = 13 \text{ mm}$) und eine axiale Schnitttiefe pro Helixumdrehung von $a^*_p = 0,35 \text{ mm}$ gewählt wurden, wobei eine Zerspanzeit von rund 9,6 Sekunden je Schraubverbindung erreicht wurde.

In den Fräsversuchen konnte beobachtet werden, dass die Frässtrategie ein sicheres Trennen der Schraubverbindungen erlaubte (Abbildung 33, Mitte). Eine Verschleißuntersuchung mit drei Versuchswerkzeugen zeigte, dass unter den gegebenen Voraussetzungen (Verzicht auf Einsatz von Kühlschmierstoffen) mit einem Fräswerkzeug rund 200 Schraubverbindungen bis zum Erreichen der Verschleißgrenze prozesssicher getrennt werden konnten.

Für die Erfassung des anfallenden Spanguts wurde ein einwechselbares Absaugsystem in Aggregatbauweise entwickelt (Abbildung 33, rechts) und getestet. Die Erfassung erfolgt über eine in z-Richtung verstellbare Absaugglocke, an die ein Spänesauger angeschlossen wird. Um den Glockenrand herum wurde ein Bürstenkranz montiert, der das Fräswerkzeug umschließt. Durch den Bürstenkranz werden die vom Zerspanwerkzeug ausgeworfenen Späne abgebremst, sodass sie durch den Luftstrom des Spänesaugers aufgenommen und abtransportiert werden können.



Abbildung 33: Zirkularfäsen (links); Trennprozess (Mitte); Absaugsystem (rechts).

3.5.7 Zerstörungsfreie Demontage von Steckverbindungen

Die Hauptaufgabe dieses Arbeitspakets besteht darin, die Kabel zwischen einzelnen Modulen zu demontieren. Dabei sollte, sofern möglich, auf eine Zerstörung des Steckers verzichtet werden. Um dies zu erreichen, wurden zwei Teilprobleme betrachtet: Erstens galt es, den Steckertyp anhand von CAD-Daten zu identifizieren. Zweitens musste der identifizierte Stecker mithilfe eines geeigneten Werkzeugs, erfasst und gelöst werden. Basierend auf den generierten Demontageinformationen wurde hier für jeden Demontageprozess die Auswahl eines geeigneten Werkzeugs getroffen. Die Herausforderung dabei ist, dass die Steckverbindungen nicht für eine automatisierte Demontage konzipiert worden sind und eine generell schlechte Demontierbarkeit aufweisen. Aufgrund dessen wurden dafür spezielle Werkzeuge benötigt.

Für die Entwicklung dieser Werkzeuge wurde der Demontageprozess der Steck- und Schraubverbindungen untersucht. Der gesamte Entwicklungsprozess der Werkzeuge

orientierte sich an den VDI 2221-Richtlinien. Zunächst wurde eine Systematisierung der verschiedenen Modellbatterien durchgeführt, um die verschiedenen Bauteile identifizieren zu können und sie entsprechend dem jeweiligen Demontageprinzip zuzuordnen. Im weiteren Verlauf wurden verschiedene Lösungsvarianten dargestellt und anschließend anhand technischer und wirtschaftlicher Kriterien bewertet. Die ausgewählten Lösungsvarianten wurden dann konzipiert und mit verschiedenen Bauteilen aus einer Batterie validiert.

Für die Auswahl eines geeigneten Werkzeugs zur Demontage eines Steckers und anderer Komponenten wurde ein System aufgebaut, welches ein zentrales neuronales Netz besitzt. Die Systemarchitektur ist in Abbildung 34 skizziert. Der Prozess beginnt damit, dass aus CAD-Daten und Demontageinformationen repräsentative Punktwolken für einen Demontageabschnitt erzeugt wurden. Anschließend erfolgt der zweigeteilte Aufbau einer Netzwerkarchitektur.

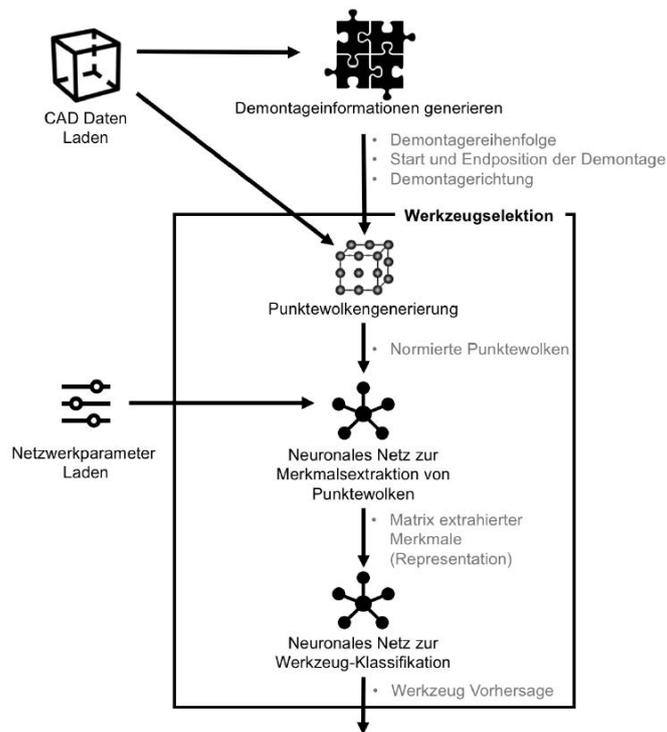


Abbildung 34: Werkzeugauswahl, Systemarchitektur.

Im ersten Teil, dem Merkmalsextraktionsmodell, wurden relevante Merkmale aus den Daten extrahiert. Da die verfügbaren Daten aus der Batteriedemontage nicht ausreichen, um ein Merkmalsextraktionsverfahren vollständig zu trainieren, wurde auf Transfer Learning-Methoden zurückgegriffen. Die Netzwerkparameter des Merkmalsextraktionsmodells wurden daher mit der Datenbank ModelNet40 trainiert. Als Merkmalsextraktionsmodelle wurden die PointNet++- und die PointConv-Architektur angewendet. Die mit den vortrainierten

Merkmalsextraktionsmodellen generierten Merkmale wurden anschließend über ein Klassifikationsmodell ausgewertet. Das Klassifikationsmodell approximiert eine Funktion, die die extrahierten repräsentativen Merkmale auf Demontagewerkzeuge abbildet.

Der Trainingsdatensatz bestand aus normierten und annotierten Punktwolken, die durch den Annotationsprozess gemäß Abbildung 35 erstellt worden sind.

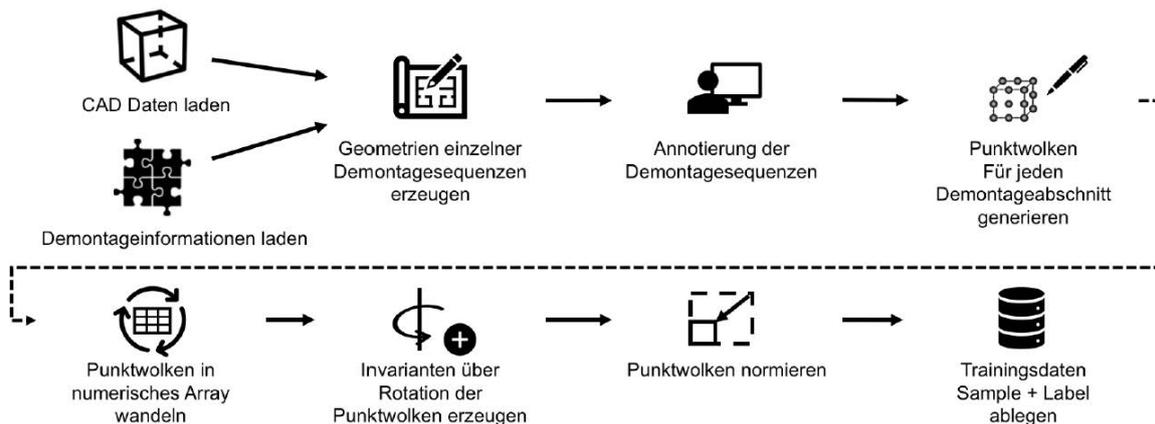


Abbildung 35: Annotationsprozess und Datenaufbereitung.

Bei der Punktwolkengenerierung wurde besonderer Fokus auf die demontagerelevanten Bereiche gelegt. In Anlehnung an die menschliche Wahrnehmung wurde angenommen, dass ein Mensch in der Lage ist, anhand des sichtbaren Umgebungsbereichs einer Demontagesituation ein entsprechendes Demontagewerkzeug abzuleiten. Es wurde daher angenommen, dass dieser Bereich auch für ein neuronales Netz ausreichend ist, um ein entsprechendes Demontagewerkzeug abzuleiten. Ziel der Punktwolkengenerierung war eine gleichmäßige Verteilung von Punkten in der, wie es in Abbildung 29 für zwei Beispiele dargestellt wird.

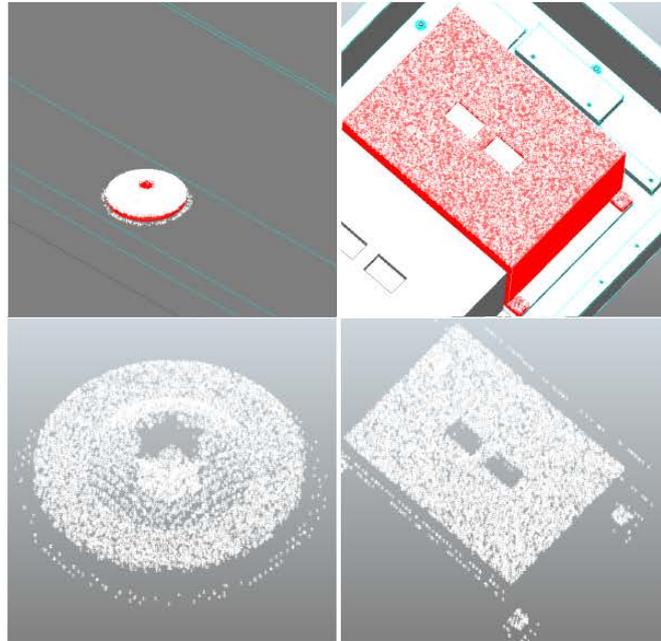


Abbildung 36: Generierte Beispielpunktwolken aus Bauteilen.

Für die ergonomische Generierung von Trainingsdaten wurde ein Wizard implementiert, der in Abbildung 37 dargestellt wird. Der Wizard umfasst das System zur Werkzeugselektion und ermöglicht eine Benutzerinteraktion, um das System für neue Antriebsbatteriedemontagen anzulernen.

Mit Hilfe der Benutzeroberfläche des Wizards wird der Benutzer virtuell durch die Antriebsbatteriedemontage geführt. Die Demontagereihenfolge wurde aus den Demontageinformationen eingelesen. Bei jedem Wechsel wird die zu demontierende Geometrie im Anzeigebereich rot markiert, eine Vorhersage für den nächsten Demontageabschnitt generiert und im Informationsbereich angezeigt. Sobald die Vorhersage für ein Werkzeug einen definierten Schwellenwert überschritten hat, wurde im Annotierungsbereich das entsprechende Werkzeug ausgewählt.

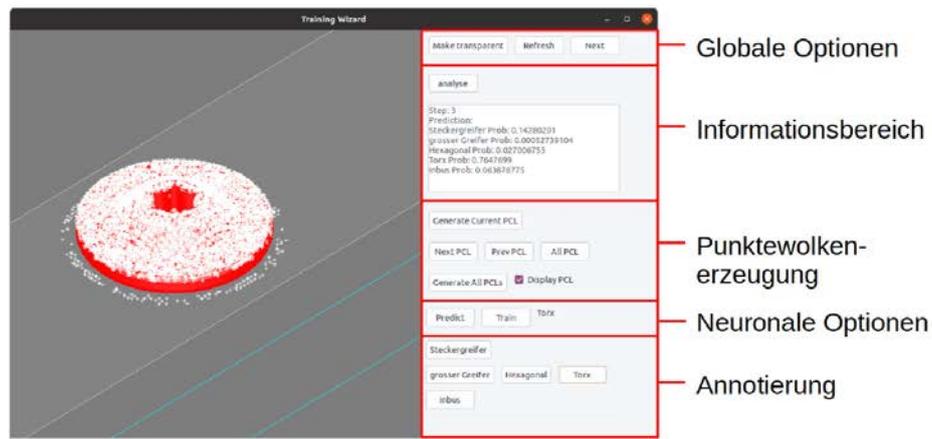


Abbildung 37: Wizard Interface.

Die Konstruktion geeigneter Greiffinger für die zerstörungsfreie Demontage von Steckverbindungen war aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit, des kleinen Raums zwischen zwei Steckteilen und der vorkommenden Clips-Verbindungen aufwendig. Es wurden ein Zwei-Finger-Greifer hergestellt, wie in Abbildung 38 dargestellt. Die Auswahl fiel auf Greiffinger, mit denen vier verschiedene Steckverbindungsvarianten gelöst werden konnten, die in der Batterie vorhanden sind. Sämtliche Steckverbindungsvarianten abzudecken hätte den Rahmen des Arbeitspakets überstiegen.

Die additiv gefertigten Greiffinger wurden einer Wärmebehandlung unterzogen. Grund dafür waren hohe Festigkeitsanforderungen der Finger bei gleichzeitig minimalen Querschnitt. Zum Erproben der Greiffinger und der Strategie zum Lösen der Stecker wurde auf eine Roboterzelle mit einem UR10 und einem Greifmodul IEG76-030 von Weiss Robotics zurückgegriffen. In dieser Zelle wurden einzelne Komponenten der Batterie aufgebaut, um die Machbarkeit einer zerstörungsfreien Demontage von Steckverbindungen zu untersuchen.



Abbildung 38: 3D-gesyntheter Greiffinger für Steckerverbindungen.

Der realisierte Versuchsaufbau bestand aus vier verschiedenen Baugruppen der PB320-Batterie, die verschiedene Stecker aufwies. Die Auswahl der Stecker erfolgte basierend auf den hergestellten Greiffingern. Je nach Positionierung der Stecker erfordert das Roboterprogramm vor der Greifsequenz mehrere Wegpunkte, um den Anfahrpunkt zu erreichen.

Der in Abbildung 39 abgebildete Demontageprozess konnte ohne größere Komplikationen durchgeführt werden. Bei der Demontage war kein Entriegelungshaken, wie er bei den anderen Steckern zu finden ist, zu lösen.



Abbildung 39: Beispielhafte Demontagesequenz eines Steckers ohne Widerhaken.

Im Vergleich dazu gestaltete sich die Demontage des AMP-Steckers aufgrund der Einbausituation deutlich schwieriger. Der Abstand zwischen dem Stecker und der Leistungsbrücke war minimal, wie in Abbildung 40, links zu sehen ist.



Abbildung 40: Beispielhafte Einbausituation eines Steckers.

Hier bestand der Anfahrweg aus zwei Teilbewegungen. Zunächst erfolgte eine senkrechte lineare Bewegung von oben, um das orangefarbene Bauteil mit dem Greiffinger minimal nach hinten bzw. weg vom Stecker zu drücken. Dadurch wurde Platz geschaffen für die nachfolgende horizontale Bewegung in Richtung der Greifposition. Die eigentliche Demontage des Steckers verlief ohne Probleme. Sowohl das Lösen des Entriegelungshakens als auch das Herausziehen des Steckers aus der Baugruppe konnte erfolgen.

Das Ergebnis dieses Arbeitspakets lässt sich zusammenfassen zu:

- Der Einsatz von neuronalen Netzen ermöglicht die Detektion von Bauteilen und Identifikation passender Werkzeuge für die Demontage aus einer aus dem Produktmodell erstellten Punktwolke.
- Es ist möglich, Steckverbindungen zerstörungsfrei zu demontieren, jedoch mit einem hohen zeitlichen wie auch monetären Aufwand.
- Es wurde festgestellt, dass die Demontagerihenfolge entscheidend ist, um mögliche Kollisionen zu vermeiden und einen guten Zugang zu den verschiedenen Steckern zu gewährleisten.
- Starre Programmbausteine funktionieren im Zusammenhang mit der Demontage von Kabeln nicht. Insbesondere die Zugänglichkeit zur Greifposition muss kontrolliert und zum Teil durch die Bahnführung des Werkzeugs geschaffen werden, in dem das Kabel aus dem Weg geräumt wird.
- Der Aufwand war zu hoch, als dass sich der Einsatz bei standardmäßigen Steckern lohnen könnte, deren Einkaufswert im cent-Bereich liegen. Dies begründet sich in der Bauform und der Vielzahl an unterschiedlichen Steckertypen. Deshalb wurde die zerstörungsfreie Demontage der Steckverbindungen nicht weiter betrachtet.

- Ziel für eine automatisierte Demontage sollte es sein, die Varianten an Steckverbindungen innerhalb einer Batterie möglichst gering zu halten.

3.5.8 Trennen von Steckerverbindungen und Kabeln

Das zerstörungsfreie Öffnen von Steckerverbindungen kann in der Batteriedemontage händisch oder mithilfe von Greifern erfolgen, wobei sich herstellerspezifische Stecker teilweise nur mit Spezialwerkzeug öffnen lassen. Ein zerstörungsfreies Öffnen von Steckerverbindungen mit robotergeführten Greifern ist beispielsweise aufgrund Einschränkungen in Bezug auf die Zugänglichkeit jedoch nicht immer möglich. Um die Automatisierbarkeit auch für den Demontageschritt des Trennens von Steckerverbindungen sicherzustellen, wurden im Rahmen des DeMoBat-Projektes zerstörende Trennverfahren als Ergänzung zum zerstörungsfreien Öffnen der Steckerverbindungen betrachtet.

Zunächst wurden auf Basis einer Steckeranalyse der PHEV PB320 Batterie vier verschiedene Steckerverbindungen ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Auswahl sowohl den von den Abmessungen her größten und kleinsten Stecker, den gesamten Materialmix aller verbauten Stecker als auch alle unterschiedlichen Bauformen abdeckt.

Für die Zerspanversuche wurde eine modulare Spannvorrichtung entwickelt. Als Versuchswerkzeug wurde ein zweischneidiger HSS-Langlochfräser mit Zentrumschnitt mit spezieller Bohrstirn der Firma *Gühring KG* vom Typ 3453 im Durchmesser 10 mm eingesetzt. Als Trennstrategien wurden das Umfangsfräsen im Gleichlauf, das Tauchen sowie eine Kombination aus Tauchen und Umfangsfräsen betrachtet, wobei die Prozessparameter für jeden Steckertyp angepasst wurden.

In den Zerspanversuchen (Abbildung 41) stellten insbesondere die Tru Components Pre-fab braid Stecker eine Herausforderung dar. So wichen in einigen Fällen bei der Strategie des Tauchens die biegsamen Crimpkontakte dem Fräser aus, sodass die Verbindung nicht vollständig getrennt werden konnte. Eine Abhilfe verschaffte das Umfangsfräsen, wobei für ein sicheres Trennen darauf geachtet werden musste, dass der Fräser möglichst nahe am Gegenstecker entlanggeführt wurde. Im Vergleich hierzu stellten die Cimco Flachstecker, die mit ihrem hohen metallischen Anteil eine höhere Stabilität aufwiesen, hingegen keine Herausforderung dar. Auch die AMP Super Seal sowie die Molex Micro-Fit Steckerverbindungen konnten sowohl mittels Umfangsfräsen als auch mit einer Kombination aus einer tauchenden Bewegung und anschließendem Umfangsfräsen prozesssicher getrennt werden.



Abbildung 41: Trennversuche (v. l. n. r.) Tru Components Pre-fab braid Steckers; Cimco Flachstecker; AMP Super Seal; Molex Micro-Fit.

Als Ergebnis der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass es grundsätzlich möglich ist, durch den Einsatz spanender Verfahren Steckerverbindungen prozesssicher zu trennen. Nachteilig ist jedoch die Verschmutzung durch die Späne. Bei Steckern mit einem hohen Metallanteil können diese in der Batterie zu Kurzschlüssen führen, weshalb eine Erfassung der Späne notwendig ist. In der untersuchten Batterie ist jedoch nicht für jede Steckerverbindung die hierfür notwendige Zugänglichkeit gegeben.

Aus diesem Grund wurde als Alternative das (steckernahe) Trennen von Kabeln untersucht. Als Trennwerkzeug wurde eine pneumatische Schere (Abbildung 42, links) eingesetzt, die nach dem Verfahren des Messerschneidens die Kabel mithilfe einer keilförmigen Schneide trennt, die auf eine plane Oberfläche bewegt wird. Zur Durchführung der Kabeltrennversuche wurde nach VDI Richtlinie 2221 ein Prüfstand (Abbildung 42, Mitte und rechts) entwickelt, der es erlaubt, mit der pneumatischen Schere eine definierbare Anzahl an Schnitten zu tätigen.

Als Versuchskabel wurden 12 Leitungen im Querschnitt $0,34 \text{ mm}^2$ und 6 Leitungen im Querschnitt von $0,75 \text{ mm}^2$ gebündelt und mithilfe eines Gewebebesandes ummantelt, was dem dicksten in der der PHEV PB320 Batterie verbauten Kabelbündel entspricht. In den Untersuchungen konnte die Eignung der pneumatischen Schere zum Trennen von Kabeln nachgewiesen werden. Selbst nach 2.500 Schnitten wies die Schneide keinen nennenswerten Verschleiß auf.

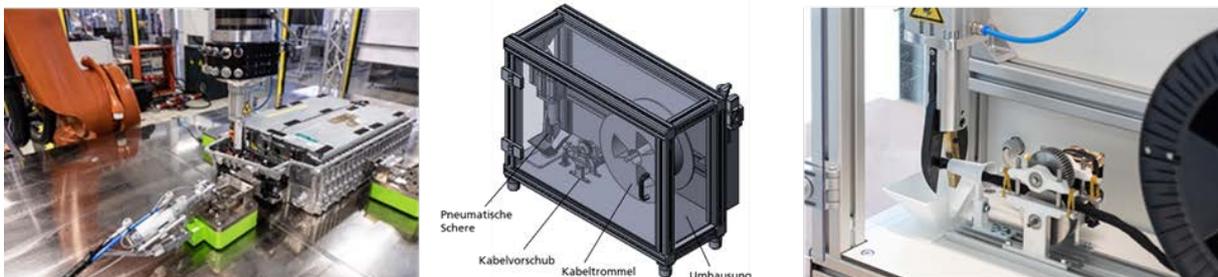


Abbildung 42: Pneumatische Schere (links); Konstruktion Kabeltrennprüfstand (Mitte); Kabeltrennprüfstand im Einsatz (rechts).

4 Demontage Batteriemodul zu Batteriezellen

Die Entwicklung eines (teil-)automatisierten Anlagenkonzept mit anschließendem Aufzeigen des Proof-of-Concepts für den Demontageschritt „Batteriemodul zu Zelle“ erfolgt in drei Arbeitspaketen (AP).

AP 1 Produktanalyse setzt sich zum Ziel, das bereitgestellte Batteriemodul hinsichtlich der Bestandteile sowie seines Aufbaus zu analysieren und mögliche Demontagereihenfolgen abzuleiten.

In *AP 2 Technologieentwicklung* werden Kerntechnologien erarbeitet und getestet. Innerhalb von AP 2.1 soll für die identifizierten Fügeverbindungen mit Fokus auf unlösbare mechanische und chemische Fügeverbindungen zunächst eine Vorauswahl an geeigneten Trennverfahren durch Vorversuche getroffen werden. Die ausgewählten Trennverfahren werden im nächsten Schritt hinsichtlich geeigneter Prozessparameter durch systematische Versuchsreihen evaluiert. AP 2.2 adressiert die Entwicklung der Endeffektoren. Hierzu werden zunächst Anforderung seitens Batteriemodul und weiteren anlagentechnischen Restriktionen definiert und in ein Lastenheft überführt. Dies bildet die Basis für Konzeptionierung, die in der Konstruktion bzw. Beschaffung der jeweiligen Endeffektoren mündet. Für die durchgehende Überwachung des Produktzustandes des Batteriemoduls soll in AP 2.3 ein In-Line-Sensorikkonzept erarbeitet werden. Primäres Ziel ist die Detektion des sogenannten thermischen Durchgehens (engl: Thermal Runaway).

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen erfolgen in *AP 3 Gesamtsystemintegration* die Integration des Gesamtsystems sowie die Validierung. Hierzu werden auf Basis von technischen Konstruktionen und Entwicklungen aus AP 2 die erforderlichen Komponenten beschafft bzw. gefertigt und zu funktionsfähigen Subsystemen integriert. Weiterhin soll eine Steuerungsarchitektur konzipiert und umgesetzt werden. Nach der erfolgreichen Gesamtsystemintegration folgt die Validierung zum Aufzeigen der Machbarkeiten anhand des durch die Mercedes-Benz AG (MBAG) zur Verfügung gestellten Batteriemoduls Typ PB320.

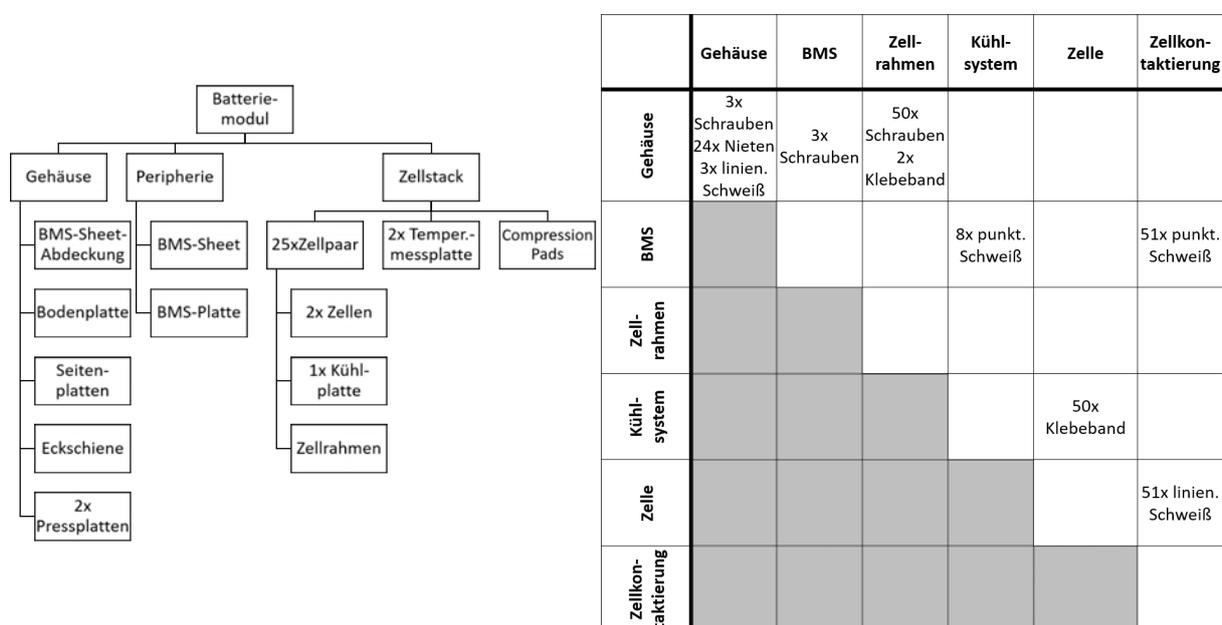
Nachfolgend sind die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst dargestellt.

4.1 Produktanalyse

Traktions-Batteriemodule weisen aufgrund fehlender Normen und verschiedener Anforderungen durch die Automobilhersteller eine sehr hohe Variantenvielfalt auf. Dies äußert sich insbesondere durch unterschiedliche Dimensionen, Materialien, eingesetzte Zelltypen, Art und Position der Fügeverbindungen usw. Diese Tatsache erschwert die Automatisierung der Batteriemoduldemontage, welche für eine wirtschaftliche und sichere Zerlegung für das effiziente Recycling unabdingbar ist, ungemein. Weiterhin erfordern unlösbare Fügeverbindungen wie Niet- und Schweißverbindungen bzw. Klebeverbindungen gemäß DIN2343 teil- bzw. zerstörende Trennverfahren. In Kombination mit den Gefahren, die von Li-Ionen-Zellen ausgehen, wie beispielsweise Brand-, Explosions-, elektrische und chemische Gefahren, stellt dies eine weitere große Herausforderung für die automatisierte Batteriemoduldemontage dar. Alles in allem ist eine flexible Demontageanlage für variantenreiche Zerlegung mit Berücksichtigung der Gefahren durch Li-Ionen-Zellen erforderlich.

Zur Erfassung der Variantenvielfalt fand ein Screening vom Stand der Technik zum Aufbau von Batteriemodulen aus Veröffentlichungen, Patenten, Herstellerdatenblättern sowie Tear-Down-Videos mit anschließender Modellierung mittels eines morphologischen Kastens statt. Hierbei wurden insbesondere sechs Kernkomponenten in einem Batteriemodul identifiziert, welche jeweils eine essentielle Funktion innerhalb des Moduls zeigen: Batteriezellen, elektrische Zellkontaktierung, Zellfixierung, Gehäuse, Temperierung sowie Batteriemanagementsystem. Für weiterführende Informationen wie z. B. mögliche Ausprägungen der einzelnen Komponenten wird auf die Publikation (Gerlitz et. al. 2021A) verwiesen. Es wurde weiterhin ein Trend mit der Bezeichnung Cell-to-Pack (C2P) identifiziert. Hierbei wird auf die Modulebene verzichtet und es findet eine direkte Integration der Zellen in das Batteriepack statt. Vorteile hierdurch sind höhere volumetrische und gravimetrische Energiedichten durch den Entfall von beispielsweise Strukturkomponenten sowie eine Reduzierung von Montageschritten und daraus resultierenden Kostenreduktionen. Nähere Informationen können aus (Gerlitz et. al. 2021B) entnommen werden. Da die Anforderungen an die Fügeverbindungen wie beispielsweise an die elektrische Zellkontaktierung (z. B. niedriger Übergangswiderstand, hohe mechanische Festigkeit) erhalten bleiben, finden sich diese auf Packebene innerhalb der C2P-Technologie wieder. Aus diesem Grund sind die gewonnenen Erkenntnisse aus Teilprojekt 2.3 auf die Packebene innerhalb C2P-Technologie z. T. übertragbar.

Das bereitgestellte Batteriemodul PB320 wurde hinsichtlich dessen Produktstruktur und der Komponenten(-relation) analysiert. Die Produktstruktur ist mithilfe eines Baumdiagramms modelliert (siehe Abbildung 43), die Komponentenrelationen bzw. Fügeverbindungen zwischen Komponenten sind in einer Matrix abgebildet. Es wurden kritische unlösbare Fügeverbindungen (Stanznieten am Gehäuse, Schweißverbindungen am Gehäuse sowie Schweißverbindungen an der Zellkontaktierung) identifiziert, welche im Fokus weiterer Untersuchungen stehen. Erwähnenswert ist, dass das Batteriemodul PB320 eine recht hohe Ähnlichkeit hinsichtlich topologischen Aufbaus zu anderen Varianten aus dem Stand der Technik aufweist.



	Gehäuse	BMS	Zellrahmen	Kühl-system	Zelle	Zellkon-taktierung
Gehäuse	3x Schrauben 24x Nieten 3x linien. Schweiß	3x Schrauben	50x Schrauben 2x Klebeband			
BMS				8x punkt. Schweiß		51x punkt. Schweiß
Zell-rahmen						
Kühl-system					50x Klebeband	
Zelle						51x linien. Schweiß
Zellkon-taktierung						

Abbildung 43: (links) Produktstruktur (rechts) Komponentenrelationen des Batteriemoduls PB320.

Im Rahmen des Projekts fand zudem die Demontage von Nissan Leaf Batteriemodulen statt. Dabei wurden die Machbarkeit der Demontage gezeigt sowie Herausforderungen identifiziert. Die einzelnen Schritte der Probedemontage sind in Abbildung 44 ersichtlich. Als Werkzeuge bzw. Trennverfahren kamen Schraubenzieher, Dremel, Zange, Zahnseide, Blechschere, händisches Abschälen und Entnahme zum Einsatz. Zu den identifizierten Herausforderungen zählen: lange Prozesszeiten der Trennverfahren, starker Werkzeugverschleiß, Staub- und Spanbildung, komplexe Prozessführung, hoher Kraftaufwand, Beschädigungsgefahr des Zellgehäuses, Kurzschlussgefahr, erschwerte Zugänglichkeit zu Fügeverbindungen.

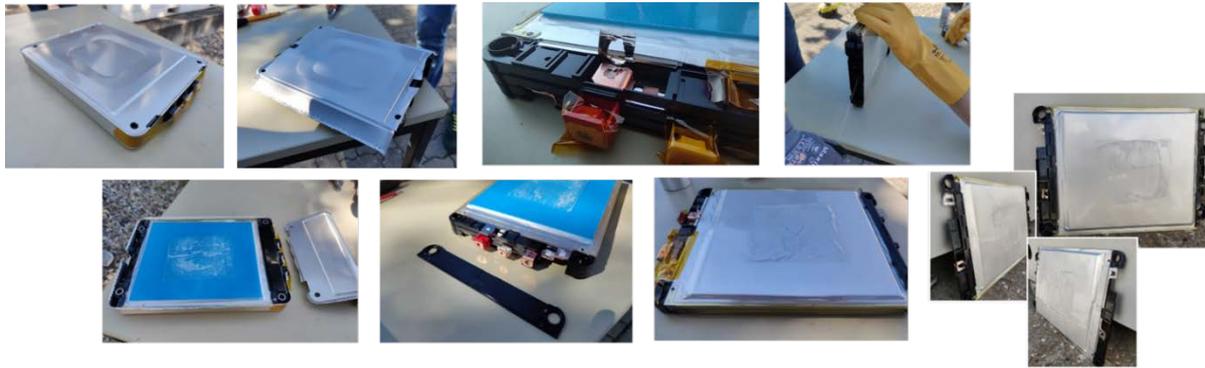


Abbildung 44: Probedemontage eines Nissan Leaf Batteriemodulen.

Ein besonders kritischer Prozessschritt, welcher bei der Demontage von Nissan Leaf Batteriemodulen identifiziert wurde, ist das Trennen der Klebeverbindungen zwischen den Pouchfolien zweier Pouchzellen innerhalb eines Zellstapels. Hierbei bestehen die Herausforderungen in der Operation in unmittelbarer Zellnähe, in dem fehlenden direkten Zugang zur Klebeverbindung sowie in der fehlenden Kenntnis über die Art und Charakteristika der Klebeverbindung. Die Klebeverbindung zwischen zwei Pouchzellen konnte erfolgreich mittels Zahnseide getrennt werden, hierbei kam es mehrfach zum Riss des Werkzeugs. Ein alternativer Ansatz, welcher erfolgreich getestet wurde, stellt das Abkühlen des Zellstapels auf ca. -30°C und anschließendem Abziehen der Zellen dar.

Eine Demontage-Reihenfolge des vorliegenden MBAG Batteriemoduls PB320 wurde auf Basis der CAD-Datei auf der Grundlage von logischen und produktionstechnischen Prinzipien (Vereinfachung Operationen, Reduzierung Taktzeit...) abgeleitet. Die Reihenfolge wurde durch eine erfolgreiche Probedemontage eines Batteriemodul-Dummys vom PB320 validiert und leicht angepasst. Die Demontage lässt sich in folgende sequentielle Schritte unterteilen: Entfernen der Abdeckplatte, Entfernen der BMS-Leiterplatte, Auflösen der Schweißverbindung an der Zellkontaktierung, Auflösen der Schraubverbindung am Zellrahmen, Auflösen der Stanznietverbindungen und Schweißverbindungen am Gehäuse, Entfernen der Eckleisten und Seitenbleche, Entstapeln des Zellverbund-Stapels.

Der Anlieferungszustand des Batteriemodul-Dummys sowie die extrahierten Komponenten durch händische Demontage sind in Abbildung 45 dargestellt.



Abbildung 45: (links) Anlieferungszustand des Batteriemodul-Dummys PB320 (rechts) extrahierte Komponenten durch händische Demontage.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus AP1 bilden die Grundlage für die nachfolgende Prozessuntersuchungen sowie -auslegung und der Auslegung und Entwicklung der Endeffektoren und der flexiblen Demontageanlage.

4.2 Technologieentwicklung

Im folgenden Kapitel werden die entwickelten Kerntechnologien, welche für die Demontage von Batteriemodulen erforderlich sind, vorgestellt. Dies ist untergliedert in die Punkte Eingrenzung und Auswahl von geeigneten Demontageverfahren sowie Prozessparametern, Entwicklung und Funktionstest von Endeffektoren und Konzeption der In-Line-Sensorik.

4.2.1 Demontageverfahren

Innerhalb der Demontage von Batteriemodulen zu Zellen ist das Lösen von unlösbaren Fügeverbindungen unumgänglich. Es wird im Folgenden zwischen chemischen und mechanischen Fügeverbindungen unterschieden, welche aufgrund der Natur der Verbindung jeweils einen anderen Satz an Trennverfahren erfordern. Chemische Fügeverbindungen, welche insbesondere durch Klebeverbindungen repräsentiert werden, sind v.a. durch flächige Fügestellen sowie erschwerte Zugänglichkeit gekennzeichnet. Dagegen sind mechanische Fügeverbindungen, zu den Niet-, Schweißverbindungen oder Bördelung gehören, durch (einseitig) gegebene Zugänglichkeit sowie punkt- und linienförmige Fügestellen charakterisiert. Im Folgenden werden insbesondere Demontageverfahren und damit verbunden Werkzeuge fokussiert, welche bei möglichst unterschiedlichen Fügeverbindungen und Materialien einsetzbar sind. Hierdurch reduziert sich bei der Demontage die Anzahl der erforderlichen Werkzeuge sowie Werkzeugwechsel und damit verbunden die Taktzeit.

Zur Identifikation von passenden Demontageverfahren, jeweils für chemische und mechanische Fügeverbindungen, wird eine Eingrenzung der Trennverfahren durch gegebene produktseitige Randbedingungen vorgenommen. Weiterhin wird für ausgewählte Fügeverbindungen, die am Batteriemodul PB320 sowie Nissan Leaf vorliegen, eine Qualifikation der ausgewählten Trennverfahren durchgeführt. Im Anschluss finden für vielversprechende Verfahren eine Prozessparameterexploration sowie eine Einflussanalyse auf kritische Einflussgrößen statt.

Mögliche Trennverfahren nach DIN8580 und DIN/TS 54405 sowie eine Vorauswahl (fett markiert) durch einschränkende, produktseitige Randbedingungen (fehlende Kenntnisse über Fügemitte, Beschädigungsgefahr der Zelle, fehlende Zugänglichkeit) sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Mögliche Trennverfahren und Vorauswahl durch gegebene Randbedingungen

Chemische Fügeverbindungen	Mechanische Fügeverbindungen
<ul style="list-style-type: none"> • Abschälen • Abscheren • Lösungsmittel • Erhitzung / Kältemittel • Seilschneiden 	<ul style="list-style-type: none"> • Brennschneiden • Plasmaschneiden • Laserstrahlschneiden • Wasserstrahlschneiden • Zerteilen • Bohren, Fräsen • Schleifen

Für die vorausgewählten Trennverfahren wurden Trennversuche zur Qualifikation der Trennverfahren sowie der Prozesscharakterisierung durchgeführt.

Das Trennen von zwei geklebten Pouchfolien fand durch Abschälen, Abscheren sowie dem Seilschneiden auf einer Zugprüfmaschine (vgl. Abbildung 46) mit Vorgabe eines konstanten Vorschubs und Messung der Prozesskraft statt. Es kamen Klebstoffe auf Epoxid-, Acrylat-, Polyurethan- und Silikonbasis zum Einsatz. Bei der Versuchsdurchführung konnte ein vollfaktorieller Versuchsplan zugrunde gelegt werden. Zur Beurteilung der Prozessfähigkeit wurden der Kraftverlauf sowie das Bruchbild (Adhäsionsbruch, Kohäsionsbruch, gemischter Bruch) herangezogen. Die zugrundeliegende Norm sowie daraus abgeleiteten Vorschubgeschwindigkeit sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Prüfverfahren für das Trennen der Klebeverbindungen sowie zugrundeliegende Normen

Trennverfahren	Norm	Vorschubgeschwindigkeit
T-Schälprüfung	DIN EN ISO 11339	100 mm/min
Scherprüfung	DIN EN 1465	50 mm/min
Seilschneiden	DIN EN ISO 11343	60, 600 mm/min (angepasst)

Insgesamt konnten bis auf wenige Ausnahmen alle Klebeverbindungen mit allen drei vorgestellten Verfahren gelöst werden. Hierbei konnten Fehlerbilder an der Pouchfolie wie z. B. Delamination, plastische Deformationen oder Oberflächenkratzer festgestellt werden. Weiterhin ergab sich erwartungsgemäß eine große Spannweite der mittleren und maximalen Kräfte bei unterschiedlichen Klebstofftypen sowie Trennverfahren. Bei gleichem Klebstoff sind bei der T-Schälprüfung grundsätzlich kleinere Kräfte im Vergleich zur Scherprüfung aufgetreten. Das Schälen von geklebten Pouchzellen ist jedoch aufgrund der Biegebeanspruchung der Zelle und einer möglichen internen Kurzschlussgefahr nur bedingt bzw. nicht möglich. Beim Scheren hingegen sind aufgrund der hohen Kräfte plastische Deformationen aufgetreten, teilweise kam es zum Riss der Pouchfolie. Über alle Klebstoffe hinweg konnte Adhäsionsbruch (mit ggf. kleinem Anteil an Kohäsionsbruch) festgestellt werden, das heißt die Haftkräfte zwischen Substrat und Kleber (Adhäsionskräfte) sind geringer als die intermolekularen Kräfte im Kleber (Kohäsionskräfte). Insgesamt zeigen Schälen und Scheren aus den genannten Gründen eine bedingte Eignung für das Trennen von geklebten Pouchzellen.



Abbildung 46: (links, Mitte) Prüfstands Aufbau für Trennversuche von geklebten Pouchfolien mittels Seilschneiden inklusive Werkzeugs, (rechts) erfolgreich getrennte Pouchfolien.

Das Seilschneiden hingegen stellt ein vielversprechendes Verfahren dar: Es liegen im Kontrast zum Schälen keine (globale) Biegebelastungen der Pouchzelle vor, gleichzeitig weist das Seilschneiden im Gegenteil zum Scheren nur eine lineare Abhängigkeit von der Klebstoffbreite und keine Abhängigkeit von der Klebstofftiefe auf. Nichtsdestotrotz konnten beim

Seilschneiden hohe Trennkraften identifiziert werden, die z. T. zu plastischen Deformationen der Pouchfolie führten. Ein Potential in der Reduzierung der erforderlichen Prozesskraft liegt in der richtigen Wahl der Parameter Vorschubgeschwindigkeit, Drahttemperatur sowie Drahtgeometrie. In den systematischen Versuchen konnten jedoch keine eindeutigen Gesetzmäßigkeiten über allen Klebstoff hinweg ermittelt werden. Es wurde sowohl ein positiver, als auch ein negativer Einfluss der Drahttemperatur sowie der Geschwindigkeit auf den Kraftverlauf festgestellt. Der auffälligste Klebstoff stellt in dieser Hinsicht das Klebeband aus Acrylschaum dar, der eine signifikante Reduzierung der maximalen Prozesskraft bis zu 28% bei erhöhter Drahttemperatur (bis 200°C) aufweist. Die Untersuchungen zeigen insbesondere, dass jede Klebeverbindung (Fügepartner und Fügemitte) ein jeweils unterschiedliches Verhalten aufweist. Es wird daher vor der Demontage geraten, jede Klebeverbindung gesondert zu charakterisieren und hierbei optimale Prozessparameter zu ermitteln.

Die vorangegangenen Untersuchungen zum Trennen von geklebten Pouchfolien mittels Seilschneiden dienen als Auslegunggrundlage für den Drahtseilschneider zum Trennen von geklebten Pouchzellen (dargestellt in Abbildung 47 links). Dieser beinhaltet zwei, in Vorschubrichtung synchronisierte Verfahrsachsen mit Antriebs- bzw. Abtriebsradeinheit zur Aufnahme für Drahtseilschlaufen. Eine Hubeinheit mit integriertem Vakuum-Spannsystem dient der Höhenverstellung des fixierten Zellstapels. Es lassen sich unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten und dank digitaler Kurvenscheiben verschiedene Schnittstrategien realisieren. Eine Kinematik mit Sauggreifer ist für die Handhabung des Zellstapels sowie der einzelnen extrahieren Zellen verantwortlich. Abbildung 47 rechts zeigt einen erfolgreichen Trennschnitt zwischen zwei geklebten Pouchzellen, die Prozessparameter sind angelehnt an die Trennversuche mittels Seilschneiden in der Zugprüfmaschine (Vorschub bis 600 mm/min). Untersuchungen mit verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten bis 60 m/min konnten eine Reduzierung der Vorschubkraft mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit aufzeigen, gleichzeitig wurden bei erhöhten Schnittgeschwindigkeiten zunehmend Beschädigungen an der Pouchfolie wie Oberflächenkratzer oder lokale plastische Deformationen festgestellt. Die Vorschubkraft wurde auf Basis der Auslenkung der Drahtseilschlaufe in Vorschubrichtung abgeschätzt.

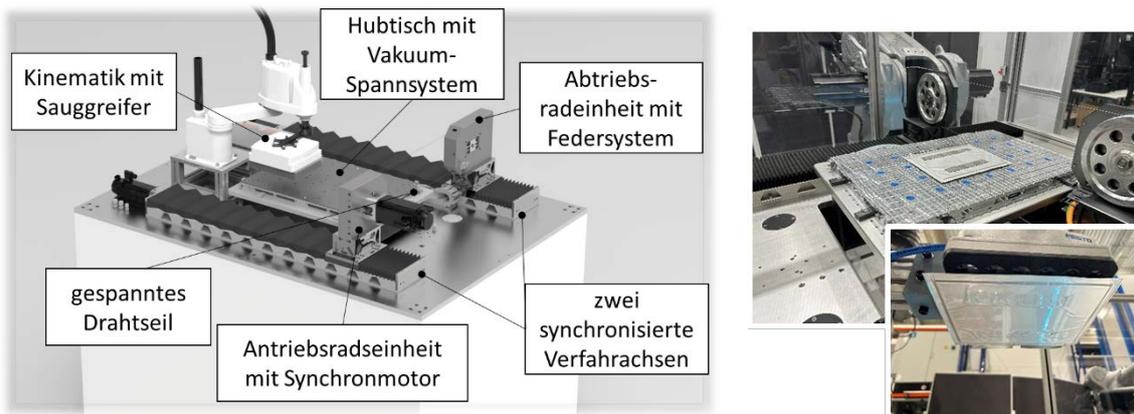


Abbildung 47: (links) Aufbau des Drahtseilschneiders (rechts) erfolgreicher Trennschnitt im Drahtseilschneider.

Für das Trennen der mechanischen Fügeverbindungen (Stanznieten am Gehäuse, Schweißverbindungen am Modulgehäuse, Pouchzellen-Ableitertabs sowie Busbars als Verbindung zwischen Zell-Ableitertabs) werden im Folgenden zerspanende Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide (vorzugsweise Bohren und Fräsen) fokussiert. Zerspanende Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide wie z. B. das Schleifen haben den großen Nachteil, dass durch Abnutzung der Tool Center Point (TCP) des Werkzeugs sich ständig ändert und ohne sensorielle Erfassung bzw. kraftgeregelter Prozessführung das Verfahren nur schwer automatisierbar ist.

Beim Trennen von Stanznieten handelt es sich um eine Multimaterial-Zerspanung, da das umgebende Material rund um die Niete beim Auflösen der Stanznietverbindung zwangsläufig aufgrund der unmittelbaren Nähe auch zerspannt werden müsste. Sowohl die Niete als das umgebende Material bestehen aus Stahl, die sich jedoch in der Legierung unterscheiden. Als Werkzeug kommen ein Vollhartmetall (VHM)- Bohrer sowie Fräser zur Stahlbearbeitung zum Einsatz. Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeit sowie Zahnvorschub sind den Herstellerangaben entnommen. Ein erfolgreicher Trennschnitt konnte sowohl mittels Bohrens als auch Bohrfräsen gezeigt werden (vgl. Abbildung 48). Weiterhin wurde das Trennen von Schraubverbindungen mittels Bohrens untersucht. Hierbei ist insbesondere mit Anomalien wie Ringansammlung, Funken-, Rauch- Geräuschbildung, Zusetzen des Fräsers sowie sehr hohen Prozesskräften zu rechnen.

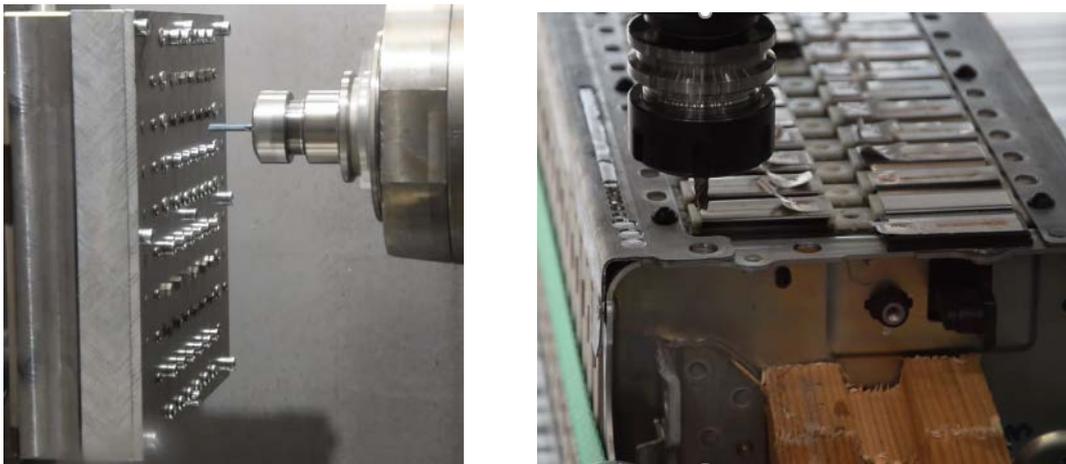


Abbildung 48: (links) Bohren von (Stanz-)Nieten und Schrauben, (rechts) Bohrfräsen von Stanznieten vor Prozessbeginn nach Prozessende.

Da der Schweißprozess eine Kohlenstoffanreicherung an der Schweißnaht bedingt und dies für die Standzeit des Werkzeugs nachteilig ist, ist das Zerspanen direkt an der Schweißnaht möglichst zu meiden. Ferner soll das Trennen der Schweißverbindung in unmittelbarer Nähe zur Schweißnaht erfolgen. Hierbei handelt es sich um ein klassisches Zerspanungsproblem, bei welchem mittels Schafffräsens Schlitzte ausgebildet werden. Wichtig dabei ist die genaue Kenntnis über die Geometrie sowie das Material des zu zerspanenden Werkstoffes. Als Werkzeuge kommen im Folgenden VHM-Schafffräser zum Einsatz. Das Gehäuseblech besteht aus Stahl einer bekannten Legierung. Für diese existieren auf dem Markt passende vierschneidige Schafffräser mit Prozessparametern, welche vom Hersteller für verschiedene Stahllegierungen empfohlen werden. Die Ausbildung von linearen Schlitzten am präparierten Probekörper, welcher das Gehäuseblech abbildet, konnte mittels ausgewähltem Schafffräser erfolgreich durchgeführt werden (siehe Abbildung 49 links). Ferner konnten auch mit dem gleichen Werkzeug und den gleichen Prozessparametern erfolgreich Schlitzte bei beiden Typen der Zell-Ableitertabs gesetzt werden (siehe Abbildung 49 rechts).



Abbildung 49: (links) Fräsen von Gehäuseblech aus Stahl, (rechts) Fräsen von Zell-Ableitertabs.

Beim Trennen der Schweißverbindung an Busbars, wie sie oft als elektrische Verbindung zwischen zwei Zellpolen an prismatischen Zellen eingesetzt werden, handelt es sich um das Zerspanen von reinen Aluminiumblechen der Spezifikation EN AW-1050A mit Dicken im Bereich von 1,0-2,5 mm. Das vorliegende Material ist durch seine weiche Eigenschaft geprägt und neigt insbesondere beim Zerspanen aufgrund der vergleichbar niedrigen Schmelztemperatur bei ca. 650°C zum Schmieren, was das prozesssichere Zerspanen ungemein erschwert. In der Literatur sind zum Zerspanen von reinem Aluminium nur wenige bis keine Angaben hinsichtlich Werkzeugs und optimalen Prozessparametern bekannt. Da das Trennen der Busbars einen essentiellen und zugleich kritischen Demontageschritt aufgrund der unmittelbaren Zellnähe darstellt, wurden ausgiebige Versuchsreihen (vgl. Abbildung 50) zur Identifikation eines geeigneten Parameterraums durch schrittweises Abtasten der Prozessgrößen Schnittgeschwindigkeit sowie Zahnvorschub durchgeführt. Des Weiteren wurden die maximalen Temperaturen in unmittelbarer Nähe zum Trennschnitt aufgezeichnet. Dies ist erforderlich, da zu hohe Temperaturen an den Zellen im schlimmsten Fall zu einem Thermal Runaway führen können (vgl. Kapitel 4.2.3). Auch wurde die kritische Länge der entstandenen Späne, welche im schlimmsten Fall einen Kurzschluss zwischen zwei benachbarten Zellpolen herbeirufen könnten, gemessen. Als Fräser wurde ein VHM-Fräser mit zwei Schneiden und einer DLC-Beschichtung mit den Durchmessern 4mm, 6mm und 8mm ausgewählt. Dieser ist ausgelegt zum Zerspanen von niedriglegierten Aluminiumverbindungen. Die Versuchsreihen zur Parameterraumeingrenzung ergaben einen breiten Parameterraum insbesondere bei dem 8mm-Fräser. Für Schnittgeschwindigkeiten zwischen 400 und 600 mm/min sowie Zahnvorschüben zwischen 0,02 und 0,2 mm konnte ein stabiler Prozess ohne besondere Anomalien identifiziert werden. Im stabilen Prozessfenster wurden Temperaturen bis maximal 48°C gemessen, was als sicher einzustufen ist. Kommt es hingegen zu Prozessinstabilitäten, gekennzeichnet z. B. durch Wirrspannbildung (vgl. Abbildung 50, rechter Schnitt), wurden Temperaturen bis 134°C gemessen, was als kritisch betrachtet werden kann. Ferner wurde beobachtet, dass mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit sowie Zahnvorschub die maximale Temperatur sinkt. Im Hinblick auf die Spanlänge wurde im stabilen Prozessfenster eine kritische Länge von max. 6,4 mm gemessen. Sofern der Abstand zwischen beiden Zellpolen größer als dieser Wert ist, stellen die entstehenden Späne für Module mit nicht-tiefentladenen Zellen kein Problem dar. Insgesamt wird geraten, den Fräsprozess mit möglichst hohem Werkzeugdurchmesser, Zahnvorschub sowie Schnittgeschwindigkeit durchzuführen. Dies geht mit einem erhöhten Vorschub und einer erhöhten Produktivität einher.

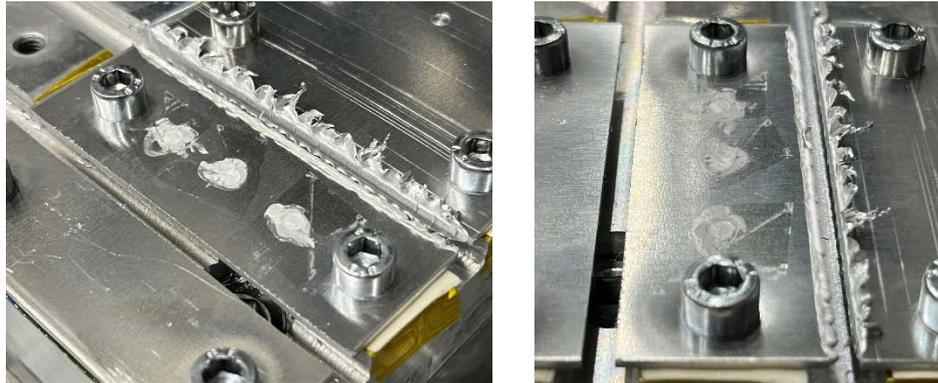


Abbildung 50: (linker Schnitt) erfolgreiche Trennversuche von Blechen aus reinem Aluminium (rechter Schnitt) Fräsungen mit instabilen Prozessparameter, gekennzeichnet durch Wirrspannbildung.

4.2.2 Endeffektorentwicklung

Für die verschiedenen Prozessschritte während der Batteriemoduldemontage sind unterschiedliche Operationen erforderlich, als Funktionsträger dienen Endeffektoren sowie Subsysteme. Identifizierte Endeffektoren, welche für die Batteriemoduldemontage essentiell sind, sind:

- Kleinteilegreifer zur Handhabung von demontierten Komponenten
- Modulgreifer zur Handhabung des Batteriemoduls
- Spannsystem für das Batteriemodul
- Spindel für Trennoperationen

Da, wie bereits in Kap 1.1 beschrieben, für eine variantenreiche Demontage eine flexible Anlage erforderlich ist, wird im vorliegenden Fall auf zwei 6-Achs-Knickarmroboter zur Ausführung von Bewegungen vom Werkzeug sowie Werkstück gesetzt (vgl. Kap 1.3). Mittels eines Schnellwechselsystems und standardisierten Schnittstellen auf Hardware- und Software-Ebene können erforderliche Werkzeuge je nach erforderlichem Prozessschritt gewechselt werden. Außerdem sollten Werkzeuge möglichst flexibel gestaltet werden, sodass mit dem jeweiligen Werkzeug ein möglichst hoher Prozessparameterraum abgedeckt werden kann. Als Beispiel hierfür ist das Greifen und die Handhabung von möglichst unterschiedlichen Größen oder das Trennen von unterschiedlichen Typen von Fügeverbindungen wie Niet- oder Schraubverbindung zu nennen. Durch den Einsatz von hochflexiblen Endeffektoren können die Anzahl an erforderlichen Werkzeugen sowie Werkzeugwechsel stark reduziert werden.

Die Entwicklung der Werkzeuge und Subsysteme fand auf Basis von VDI2221 statt. Hierzu wurden zunächst Anforderungslisten ausgehend vom vorliegenden MBAG Batteriemodul PB320 definiert. Daraufhin wurden unterschiedliche Konzepte definiert und das geeignetste Konzept mittels einer Nutzwertanalyse auf Basis von definierten Kriterien (Kosten,

Umsetzbarkeit, Bauraum, Flexibilität, Sicherheit, Kraft) für jeden Endeffektor und Subsystem ausgewählt. Die jeweiligen Konzepte wurden konstruiert und im Rahmen einer statischen Absicherung wurde ein Festigkeitsnachweis mittels Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Auf Basis der abgesicherten Konstruktionen wurden Komponenten gefertigt bzw. beschafft und integriert. Im Anschluss fand ein Funktionstest der jeweiligen Subsysteme statt. Die konstruierten Endeffektoren und Subsysteme sind in Abbildung 51 dargestellt. Eine Funktionsbeschreibung sowie technische Randbedingungen der einzelnen Endeffektoren sowie Subsystemen sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Da es sich bei Spindeln um marktreife Systeme handelt, wurde eine umfassende Marktrecherche durchgeführt und die passendste Spindel auf Basis von ausschlaggebenden Kriterien wie Kosten, Bauraum, autom. Werkzeugwechsel, max. Drehzahl sowie Leistung ausgewählt. Als passendste Spindel wurde die Spindel XLHA110-9/6-4-24-HSK F63-22-CC-3-EN der Firma PDS sowie die dazugehörigen Umrichter- und Kühlsysteme eingestuft.

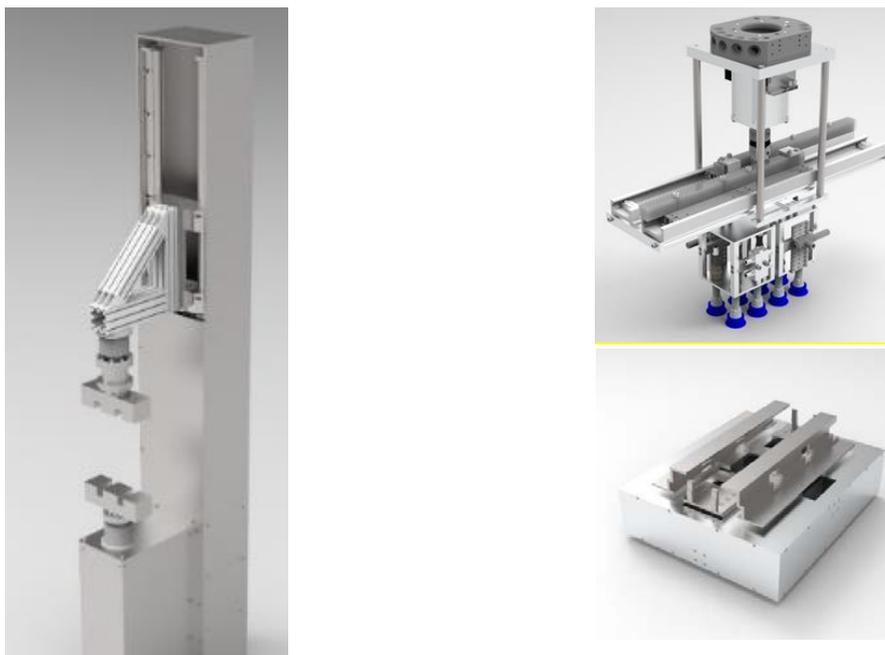


Abbildung 51: (links) Spannsystem, (rechts oben) Kleinteilegreifer, (rechts unten) Modulgreifer.

Tabelle 4: Funktionsbeschreibung der einzelnen Endeffektoren und Subsysteme.

Spannsystem	Batteriemodulgreifer	Kleinteile-/Plattengreifer
Positions- bzw. kraftgeregelte, vertikale Einspannung des Batteriemoduls durch Vertikalbewegung der oberen Pressbacke	Synchronisierte, horizontale Ausrichtebacken für Vorpositionierung des Batteriemoduls	Sauggreifer zur Handhabung von plattenförmigen Komponenten unterschiedlicher Größen, Topographien, Oberflächenbeschaffenheiten
Schnelle, manuelle Austauschbarkeit der beiden Pressbacken zur Einspannung unterschiedlicher Batteriemodulvarianten	Synchronisierte, vertikale Greifbacken zum Greifen des Batteriemoduls	Synchronisierte Breitenverstellung der beiden Ventilinseln (à 4 Ventile) mittels Ritzel-Zahnstangen-System
Drehbare Lagerung und gezielte Drehung des Batteriemoduls dank Servomotor für 360°-Zugänglichkeit zu allen Fügestellen und Komponenten	Backen in austauschbarer Ausführung zur Handhabung verschiedener Batteriemodulvarianten	Gezielte Erzeugung von Unterdruck an jeder Ventilinsel mittels eigenen Ejektors
		Sperrern unbenutzter Saugnäpfe durch Sperrventile an jeder Saugereinheit

4.2.3 In-Line-Sensorik

Die Demontage des Batteriemoduls stellt einen kritischen Schritt während der Demontage dar. Die Trennung von nicht lösbaren Verbindungen durch Zerspanungsprozesse kann einen reibungslosen Prozessablauf aufgrund der Möglichkeit, einen Thermal Runaway zu induzieren, gefährden. Ein Thermal Runaway bezeichnet einen selbstverstärkenden, Wärme produzierenden Prozess durch eine exotherme Reaktion, welcher häufig zu einem Brand oder einer Explosion führt. Weitere sicherheitskritische Zustände ergeben sich etwa auch durch Austritt giftiger Gase oder Flüssigkeiten. Während des gesamten Prozesses ist deshalb eine begleitende Erfassung des Zustandes des Batteriemoduls notwendig. Es ist erforderlich, dass zu jedem Zeitpunkt des Demontageprozesses die entsprechende Sequenz zur Ausschleusung eingeleitet werden kann.

Im Rahmen des Projektes wurden die Anforderungen an die Überwachung von Li-Ionen-Batterien während der Demontage für das Recycling ermittelt. Dazu wurden zunächst alle Gefährdungspotenziale und Zustände identifiziert, erfasst und deren Ursache-Wirkungs-Prinzipien modelliert, um die gesamten sicherheitsrelevanten Gefährdungen des

Demontageprozesses zu verstehen. In einem weiteren Schritt wurden sicherheitskritische Pfade identifiziert und mögliche Messparameter abgeleitet, um ein Konzept für ein durchgehendes Überwachungskonzept zu realisieren. Am Beispiel des Thermal Runaway wurde ein Demonstrator-Batteriemodul entwickelt. Dieses ermöglicht die Nachbildung des Thermal Runaway mittels erhitzbarer Zellen. Somit konnte die Detektion des Thermal Runaway, in diesem Vorhaben durch externe Sensorik in Form einer Thermographiekamera, experimentell überprüft werden.

Die Ergebnisse der systematischen Ableitung von Anforderungen an die Zustandsüberwachung während der Batteriemoduldemontage bis hin zum Vorschlag eines Überwachungskonzepts für den operativen Betrieb wurden in (Gerlitz et. al. 2022) vorgestellt. Es werden zunächst die vier wichtigsten Gefährdungspotenziale (thermisch, chemisch, elektrisch und mechanisch) identifiziert und deren Ursache-Wirkungs-Kette, bestehend aus externem Einflussfaktor (Ursache), gefolgt von internen und externen Effekten sowie den Folgen für Mensch und Umwelt, ermittelt. In einem weiteren Schritt werden relevante kritische Pfade der Demontage von Li-Ionen für das Recycling abgeleitet. Durch den Einsatz von Früherkennung könnte das Auftreten dieser kritischen Pfade verhindert werden. Das vorgestellte Konzept umfasst den Vorschlag des Einsatzes einer Thermographiekamera und einer hochpräzisen Waage zur Erkennung des Thermal Runaway und Stoffaustritt in Form von Gasen und Flüssigkeiten. Die dazugehörige Ursachen-Wirkungs-Kette ist in Abbildung 52 dargestellt.

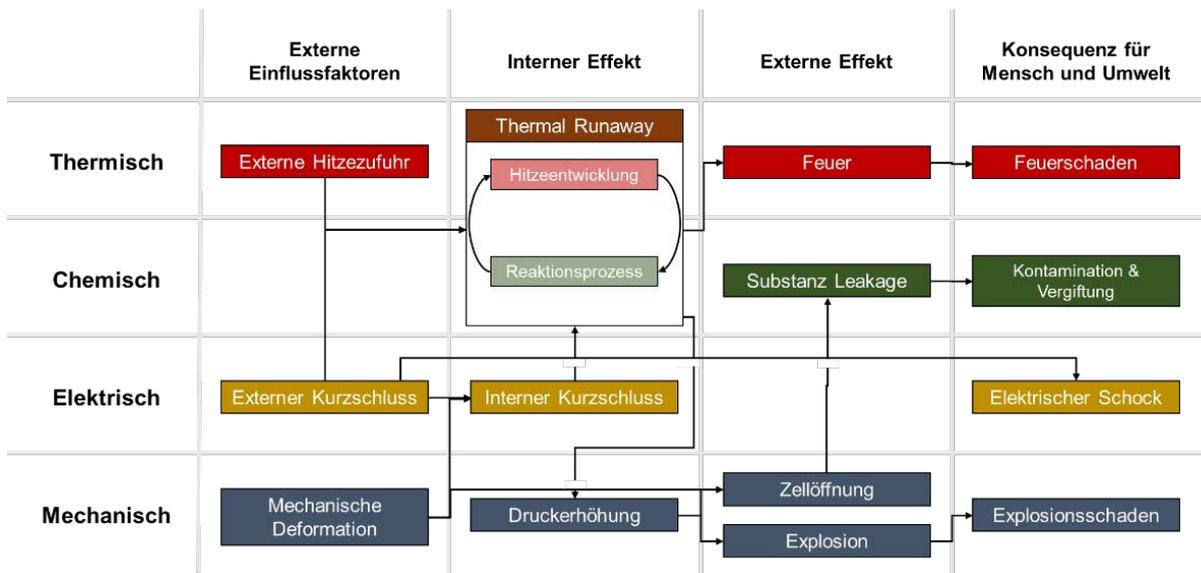


Abbildung 52: Ursachen-Wirkungs-Kette bei der Demontage von Li-Ionen Batteriemodulen auf die Zellebene.

Für die Erprobung eines Konzepts zur thermischen Zustandsüberwachung wurde zunächst ein Dummy-Batteriemodul konstruktiv ausgelegt und aufgebaut. Dies geschah in Anlehnung an verfügbare Konstruktionsdaten (CAD) vom MBAG Batteriemodul PB320. Die Integration von Heizpads und Temperatursensorik in zwei der insgesamt zehn Dummy-Zellverbände, welche jeweils aus zwei Einzelzellen, einer Kühlplatte und einem Zellrahmen bestehen, ermöglicht die Nachbildung eines Thermal Runaway. Jede Zelle der Dummy-Zellverbände besteht aus einem rechteckigen Aluminiumkörper, an dem Ableitertabs angebracht sind und der von Pouchfolie umschlossen ist. Der rechteckige Aluminiumkörper wird durch zwei aneinandergeschraubte Bleche gebildet. Sowohl die Dummy-Zellen mit als auch ohne innenliegendem Heizpad wurden so mit Hohlräumen versehen, sodass die Wärmekapazität der Dummy-Zellen der des realen Batteriemoduls entsprechen. Somit kann ein realitätsnaher Erwärmungsverlauf gewährleistet werden. Details sind Abbildung 53 zu entnehmen.

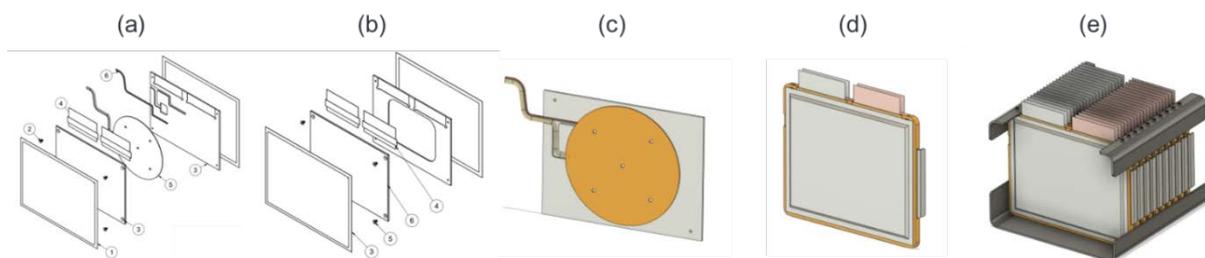


Abbildung 53: (a) Aufbau einer Dummy-Zelle mit innenliegendem Heizpad, (b) Aufbau einer Dummy-Zelle ohne innenliegendem Heizpad und Hohlräumen, (c) Aluminiumkörper mit innenliegendem Heizpad, (d) Dummy-Zellverbund, (e) Dummy-Batteriemodul.

Unter Nutzung der im Dummy-Batteriemodul integrierten Heizpads und Temperatursensorik konnte so ein Regelkreis aufgebaut werden, mittels dessen Hilfe dem Dummy-Batteriemodul ein beliebiger Temperaturverlauf beaufschlagt werden konnte. Die in den beheizbaren Zellen integrierten Temperatursensoren fungierten in diesem mittels PID-Regler realisierten Regelkreis als Messglied. Die Heizpads fungierten als Stellglied. Geregelt wurde über die Abweichung zwischen Sollwertverlauf der Zellinnentemperatur und Ist-Verlauf der Zellinnentemperatur der Dummy-Zellen. Die Festlegung des Sollverlaufs der Zellinnentemperatur geschah anhand gängiger im Stand der Forschung dokumentierter Verläufe von Thermal Runaways. Ein beispielhafter Verlauf ist in Abbildung 54 rechts visualisiert.

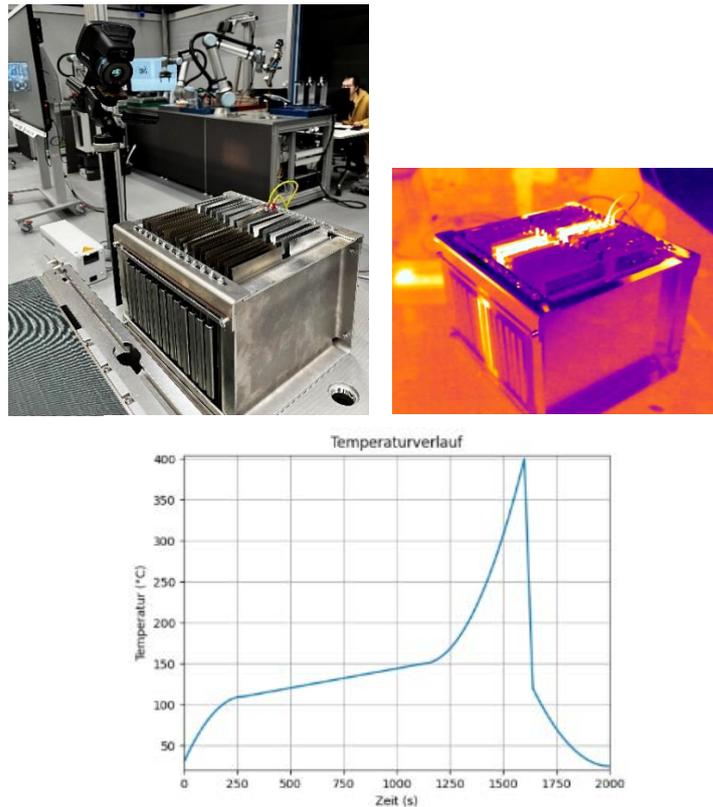


Abbildung 54: (links) Beispielaufbau von Thermographiekamera und Batteriemodul, (Mitte) Bild der Thermographiekamera mit sichtbar erhitzten Dummyzellen, (rechts) beispielhafter Temperaturverlauf.

Das Gesamtsystem, dargestellt in Abbildung 54 links, bestehend aus einem erhitzbaren Dummy-Modul (vgl. Abbildung 54 Mitte) und Thermographiekamera, erlaubte so die Analyse des internen Erwärmungsvorgangs bei gleichzeitiger Erfassung des Erwärmungszustands auf der Moduloberfläche. Als charakteristische Kenngrößen zur Beschreibung des Modulzustands wurden die Differenztemperatur und der Temperaturgradient von Komponenten zu einem externen Referenzpunkt (z. B. Δt_A des Referenzpunkts zu Kühlplatte) gewählt. Zusätzlich zur Kühlplatte zeigten Vorversuche die Eignung der Ableitertabs als vielversprechende Komponente. Analysiert wurde dann für verschiedene Versuche (z. B. langsamer und schneller Verlauf des Thermal Runaway, abgebildet in Abbildung 55), inwiefern ein Zeitverzug (Totzeit) zwischen innerem und äußerem Erwärmungszustand auftritt. Für jeden Verlauf wurden in Abbildung 14 die Verläufe der Zellinnen- und Außentemperatur an Ableitertab und Kühlplatte (oberes Schaubild), die Differenztemperatur von Ableitertab und Kühlplatte zum Referenzpunkt (mittleres Schaubild) sowie der Temperaturgradient von Ableitertab und Kühlplatte (unteres Schaubild) aufgezeichnet.

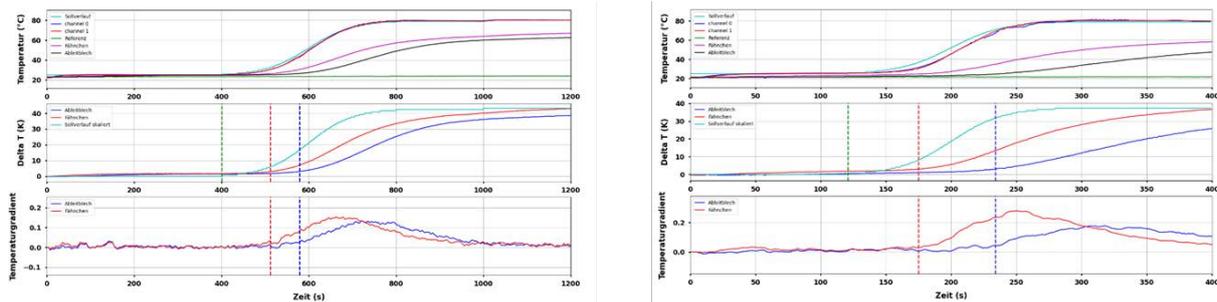


Abbildung 55: Beispielhafte Darstellung durchgeführter Analysedurchläufe mit $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ (links) langsamer, (rechts) schneller Erwärmungsvorgang.

Die Ergebnisse der Versuche haben gezeigt, dass sich die Ableitertabs der Batteriezellen gut zur Detektion eines stattfindenden Thermal Runways eignen. Diese wiesen im Vergleich zu den Kühlplatten hinsichtlich Differenztemperatur und dem Temperaturgradienten eine geringere Totzeit auf. Dies lässt sich damit begründen, dass die Ableitertabs direkten thermischen Kontakt mit dem Zellinneren aufweisen. Im Kontrast dazu liegt eine thermische Barriere gegeben durch die Pouchfolie zwischen Zellinnerem und Kühlplatte vor, was zu einer Verzögerung der Erwärmung der Kühlplatte führt. Über alle durchgeführten Versuche hinweg konnte ein Thermal Runaway auf den Ableitertabs im Schnitt 45% schneller als auf der Kühlplatte detektiert werden. Die Totzeit zur Erkennung eines Thermal Runways war dabei stets abhängig von der Erwärmungsgeschwindigkeit, bei schnellen Verläufen wurde der kritische Zustand auch schneller erkannt. Als Erkennungsgröße für die Detektion vom Thermal Runaway kann das Überschreiten eines Grenzwerts der Differenztemperatur zu einem Referenzpunkt bzw. der Temperaturgradient am Ableitertabs der Zellen herangezogen werden.

Im operativen Betrieb ist ein solches System nutzbar, wenn sich der Thermal Runaway über mehrere Minuten hinzieht. Im Falle einer rapiden Erhitzung im Bereich weniger Sekunden sind eine Detektion und das nachfolgende Einleiten von Abhilfemaßnahmen aufgrund des beschriebenen Sachverhaltes schwierig.

4.3 Systemintegration

Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt ist für eine variantenreiche Batteriemoduldemontage eine flexible Anlagenarchitektur auf Hardware und Softwareebene von großer Bedeutung. Flexibilität kann auf Anlagenebene durch Einsatz unterschiedlicher Werkzeuge und einem Werkzeugwechselsystem realisiert werden. Ansätze wie Modularisierung sowie Standardisierung der Schnittstellen ermöglichen einen reibungslosen Werkzeugwechsel bzw.

eine schnelle Integration neuer Werkzeuge zur Erweiterung der Anlagenflexibilität. Werkzeugflexibilität kann durch den Einsatz von (hoch-)flexiblen Werkzeugen mit stark erweitertem Prozessparameterraum ermöglicht werden.

Ein Konzept für eine flexible Demontagezelle wurde in (Fleischer et.al. 2021) vorgestellt. Es wurde eine Blaupause für die Entwicklung einer flexiblen automatisierten Demontagesystems auf Basis von erforderlichen übergeordneten Operationen wie Handhabung, Einspannen, Trennen sowie Zustandsüberwachung erarbeitet. Essentielle Teilsysteme stellen die Kinematik (z. B. Gantry-Portal oder Knickarmroboter), Werkzeuge, Werkstückeinspannung (z. B. pneumatische Einspannung) sowie das Sicherheitssystem (z. B. Sicherheitszaun) dar. Bei Werkzeugen kann zwischen Greifer (z. B. Sauggreifer), Bearbeitungswerkzeug (z. B. Schraubautomatik oder Lasercutter) und Messwerkzeug (z. B. Taktile Messspitze) unterschieden werden.

Ein Konzept für die Steuerungsarchitektur für hochflexible Produktionsanlagen wurde in (Mühlbeier et. al. 2022) präsentiert. Die vorgestellte Architektur ist hierarchisch in Cloud-, Shopfloor- sowie Zellebene unterteilt, welche jeweils direkt miteinander kommunizieren können. Für eine (Echtzeit-) Datenverarbeitung, Steuerung und Regelung mit jeweils unterschiedlichen Anforderungen sind die sog. Edge Units auf der Shopfloorebene verantwortlich, welche beispielsweise die Hauptsteuerung, Produktzustandsüberwachung oder die Datenverarbeitung für das maschinelle Sehen beinhalten können. Auf Cloudebene findet die Demontageplanung inkl. CAD-basierter Produktanalyse, Sequenz- und Prozessplanung mit anschließender Steuerungscodegenerierung statt. Als Schnittstelle zur Außenwelt dienen Aktoren und Sensoren auf Zellebene.

Eine große Herausforderung bei der Batteriemoduldemontage stellen geometrische Varianzen aufgrund von Bauteiltoleranzen sowie des Atmungseffekts der Li-Ionen-Zellen dar. Für ein prozesssicheres Trennen ist die Kenntnis über geometrische Offset-Parameter unabdingbar. Ein Ansatz im Kontext der CAD-basierten Demontageplanung stellt der kamerabasierte Abgleich zwischen idealem Modell (CAD-Datei) und realem Objekt dar. Im Rahmen des Projektes wurde eine Datenverarbeitungs-Pipeline zu diesem Zwecke aufgebaut und erfolgreich erprobt. Basis hierzu bildet eine 3D-Aufnahme der Objektoberfläche von acht Seiten mittels der stationären 3D-Kamera ZIVID Two. Als Drehteller dient das Spannsystem mit Servomotor. Die einzelnen Aufnahmen in Form einer 3D-Punktwolke werden bereinigt und unter Kenntnis der Drehachse zu einer Gesamtaufnahme zusammengefügt. Durch eine anschließende starre und nicht-starre Registrierung mit dem idealen CAD-Modell findet eine Punktlokalisierung statt, welche Punktkorrespondenzen zwischen idealem Modell und realem

Objekt aufzeigt. Das gezeigte Verfahren ermöglicht es, auf Basis der im Koordinatensystem des idealen CAD-Modells ermittelten Stützpunkte die Zielkoordinaten für die Roboterbewegung zu bestimmen.

Eine flexible Demontageanlage für die Batteriemodulzerlegung ist in Abbildung 56 abgebildet. Die Auslegung der Anlage fand insbesondere auf Basis des gegebenen MBAG Batteriemoduls PB320 und der gewonnenen Erkenntnisse aus den Trennversuchen im Bezug zu den identifizierten unlösbaren Fügeverbindungen statt (vgl. Kapitel 4.2.1).

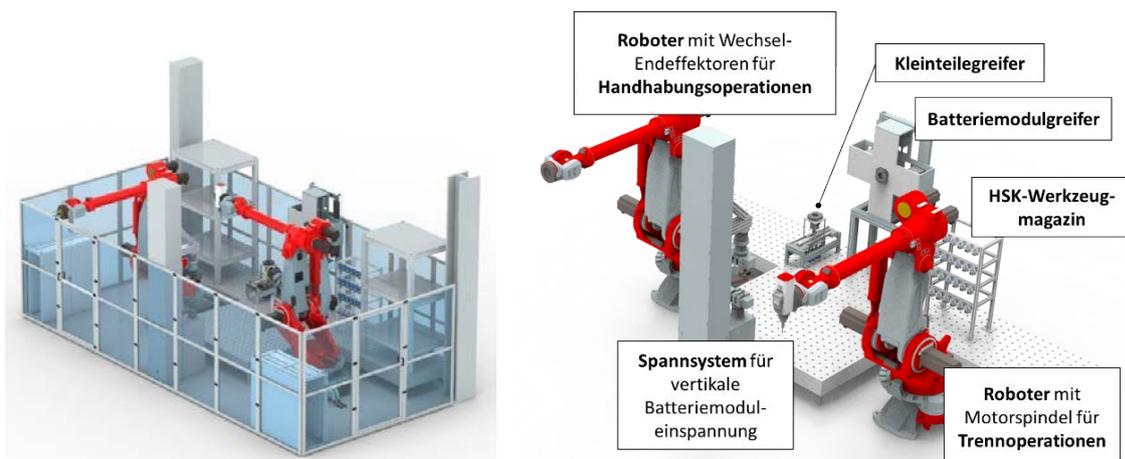


Abbildung 56: Gesamtanlage inkl. Roboter sowie Endeffektoren: (links) mit Zaun, (rechts) ohne Zaun.

Die Demontageanlage beinhaltet zwei 6-Achs-Knickarmroboter COMAU NJ290-3.0, am Roboterflansch sind jeweils Schnellwechselsysteme SCHUNK SWS160 mit Durchführmodulen für verschiedene Medien vorzufinden. Die Endeffektoren werden in Magazinen zwischengespeichert und können je nach erforderlichen Prozessen gekoppelt werden. Die Magazine sind für den geometrischen Toleranzausgleich beim Koppeln der Endeffektoren mittels Seilaufhängung schwimmend lagernd ausgeführt. Als Endeffektoren kommen die in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Endeffektoren zum Einsatz. Zusätzlich ist ein HSK-Werkzeugmagazin für die Speicherung von HSK63F-Aufnahmen mit unterschiedlichen Fräs- und Bohrwerkzeugen vorzufinden. Das Spannsystem ist am Rande der Roboterzelle mit gleichem Abstand zu beiden Robotern positioniert. Bei der Positionierung der Werkzeuge sowie des Spannsystems wurde darauf geachtet, dass diese im Arbeitsraum, vorgegeben durch den Roboterhersteller, liegen. Weiterhin ist mittig zwischen beiden Robotern eine Matrix-Lochrasterplatte der Fa. Sigmund platziert, die eine Platzierung und Repositionierung von weiteren Subsystemen mit einer hohen Genauigkeit im Sinne der Anlagenrekonfiguration ermöglicht. Ein geschlossenes Zaunsystem bestehend aus Makrolonscheiben schützt als passives Sicherheitssystem während der Bearbeitung vor unbefugtem Zugriff und sichert

zugleich den Schutz von Personen gegen fliegende Teile, insbesondere bei spanenden Operationen. Die aufgebaute Demontagezelle ist in Abbildung 57 dargestellt.

Eine konkrete Auslegung der Steuerungstechnik und die Auswahl der Steuerungskomponenten fanden auf Basis der Analyse der erforderlichen Prozessabfolge (z. B. Greifen der Batteriemodule, Fräsen der Schweißverbindungen) statt. Die ablaufenden Prozesse (sequentiell und parallel) wurden zunächst in Form eines Aktivitätsdiagramms modelliert. Daraus konnten erforderliche Funktionen für die jeweiligen Endeffektoren abgeleitet werden, welche in einem Klassendiagramm zusammengefasst wurden. Dies bildet die Grundlage für die Auswahl der erforderlichen steuerungstechnischen Komponenten wie z. B. dezentrale Peripherie, Pneumatikventilinsel oder Umrichtersysteme sowie deren topologische Verschaltung. Das zentrale Element der Gesamtanlagensteuerung bildet die SINUMERIK One (NC-Steuerung), welche zunächst eine Steuerung der beiden Roboter, unter Angaben von Zielpositionen und Geschwindigkeiten in Form eines NC-Codes, darstellt. Weitere steuerungstechnische Komponenten sind an die SINUMERIK ONE mittels Profinet angebunden und können direkt mit dieser kommunizieren. Durch die direkte Anbindung ist es möglich, die Zustände an den angebotenen Komponenten direkt durch die SINUMERIK One abzufragen bzw. zu schalten, was die Steuerung aller Komponenten innerhalb des NC-Codes ermöglicht. Die SINUMERIK One fungiert somit als zentrale Anlagensteuerung und ermöglicht zugleich durch Abarbeiten von generiertem NC-Code die schnelle Anlagenprogrammierung maßgeschneidert für die aktuelle Variante des Batteriemoduls.

Es fand eine erfolgreiche Demonstration einer vollautomatisierten Demontage von einem Dummy-Batteriemodul PB320 bis auf Zellpaar-Ebene (Verbund aus Zellrahmen, Kühlplatte sowie seitlichen geklebten zwei Zellen) statt. Die Demontagereihenfolge entspricht der Reihenfolge bei der händischen Demontage (vgl. Kapitel 4.1). Die Werkzeuge sowie Prozessparameter für die Trennoperation sind angelehnt an die Trennversuche aus Kapitel 4.2.1.



Abbildung 57: Aufgebaute Roboterzelle für die Demontage von Batteriemodule.

5 Batterietest und -analyse und Prognose der elektrischen Eignung

Die unterschiedlichen Alterungszustände von Rückläuferbatterien sind den Rücknahmestellen in der Regel nicht bekannt. Hierdurch ergeben sich, neben der Sicherheit, auch wirtschaftliche Fragestellungen hinsichtlich der weiteren Verwendung der Batterien. Für die zuverlässige Prognose der zukünftigen Zelldegradierung in Zweitanwendungen der Batterien ist daher ein Test und eine Analyse vor der Entscheidung der Demontagetiefe und eines möglichen Recyclings der Batterien durchzuführen. Daher wurde innerhalb des Projekts standardisierte Batteriezellen in verschiedenen Nutzungsszenarien gealtert und eine Diagnosesoftware für zukünftige Batteriealterung für verschiedenen Zweitanwendungen implementiert. Dies beinhaltet insbesondere die Anwendung verschiedener Testverfahren und Prognosemodelle, um die verschiedenen Batteriezustände und Informationsverfügbarkeiten von Rückläuferbatterien mit einzubeziehen.

Zur Entwicklung der Prognosesoftware werden im Rahmen dieses Arbeitspaketes Batteriezellen in verschiedenen Anwendungsszenarien künstlich gealtert. Die Anwendungsszenarien beziehen sich auf einen PKW als Primäranwendung und auf übliche Zweitanwendungen, wie Heimspeichersysteme, Netzstabilisatoren und den Einsatz in Flurförderfahrzeugen. Die Lastzyklen und End-of-Life Kriterien der verschiedenen Zweitanwendungen wurden anhand von Literatur, Produktdatenblättern und der MATLAB Simscape "EV Reference Application" erstellt. Das detaillierte Vorgehen wurde in Wanner et al. *Procedia CIRP*, 2023 publiziert. In regelmäßigen Abständen werden die Zellen mit einem Referenzzyklus mit einem Kapazitätstest, einer Stromsprungmethode, Temperaturüberwachung und Impedanzspektroskopie charakterisiert. Durch die verschiedenen Belastungszyklen entstehen unterschiedlich schnelle Batteriedegradationen und somit unterschiedliche Restlebensdauern der einzelnen Anwendungen. Diese sind in Abbildung 58 dargestellt:

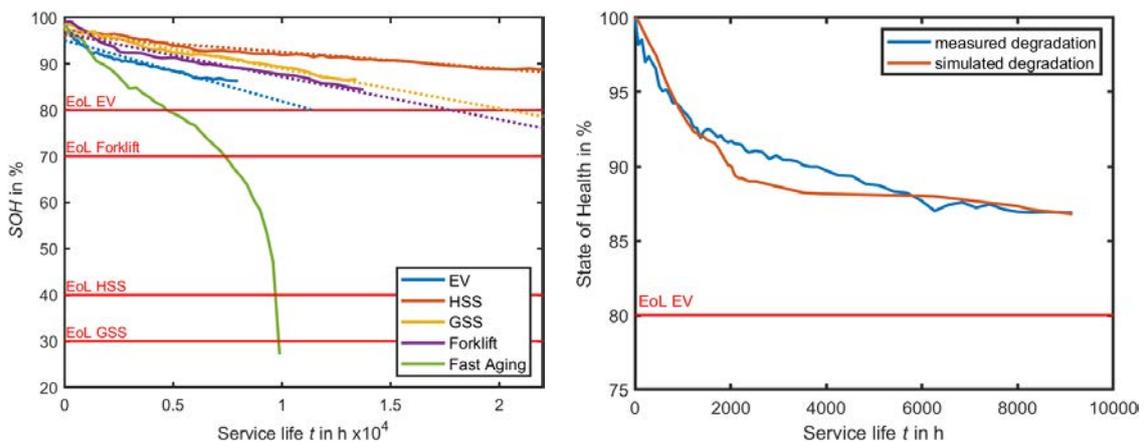


Abbildung 58: Links, SOH-Schätzung aller Lastzyklen mit unterschiedlichen EoL-Grenzwerten. Rechts, Schätzung des SOH anhand des DFN-Modells für die Belastungszyklen eines PKW.

Durch diese breite Datenbasis kann eine Prognosesoftware basierend auf einer klassischen linearen Regression, eines physikalischen Doyle-Fuller-Newmann Batteriemodells (DFN) und einer Prognose der Batterieimpedanzen durch Machine Learning Ansätze sowohl den aktuellen Batteriezustand einer Rückläuferbatterie als auch die verbleibende Restlebensdauer einer Batterie abschätzen.

Das Doyle-Fuller-Newman (DFN)-Modell ist ein weit verbreitetes elektrochemisches Batteriemodell, das die physikalischen Zusammenhänge auf der Makroebene mit Hilfe einer Reihe von partiellen Differentialgleichungen abbildet, die die internen Bedingungen der Batterie beschreiben. Um diese inneren Bedingungen genau zu beschreiben, müssen jedoch viele Parameter bestimmt werden, was eine Herausforderung darstellt, insbesondere da die Bestimmung einiger Parameterwerte komplexe experimentelle Techniken und einen hohen Zeitaufwand für das Messverfahren erfordert. Hier wird das Modell anhand der Messdaten, Daten aus dem Datenblatt und Literaturdaten aus relevanten Referenzen parametrisiert. Das Modell simuliert dann das Kapazitätsverhalten der Zelle für die Belastungszyklen der einzelnen Anwendungen. Die Prognose der Restlebensdauer und somit des Alterungsverhalten einer Batteriezelle in einer spezifischen Anwendung kann mittels der beschriebenen DFN-Methode nachgebildet werden. Hierbei liegt der mittlere Fehler 0,05% für eine Prognose für einen PKW-Zyklus. Da die meisten physikalischen Zellparameter auf Literaturangaben basieren, kann die Genauigkeit des Modells durch detaillierte Kenntnisse der physikalischen Zellparameter durch Post-Mortem-Analysen noch weiter verbessert werden.

Zudem werden Impedanzen verschiedener Frequenzen von Batteriekapazitäten verwendet, um den Alterungszustand der Batterie vorherzusagen. Dazu werden vier verschiedene Methoden des maschinellen Lernens (ML) verwendet und die resultierenden Ergebnisse

miteinander verglichen. Aufgrund einer geringen Menge an Trainingsinstanzen wurde zunächst ein Decision Tree, sowie ein Random Forest trainiert. Im Allgemeinen bieten künstliche neuronale Netze die präziseste Regression an, sind aber bei einem kleinen Datensatz häufig schwieriger zu trainieren. Um ein probabilistisches Modell als Vergleich hinzuzufügen, wurde zusätzlich ein Gaußprozessregressor trainiert. Beim Training aller Methoden werden die Real- und Imaginärwerte der Impedanzen als Eingang verwendet. Der Zielwert wird durch die Batteriezellenkapazität in Ah beschrieben. Es stehen 398 Messinstanzen zur Verfügung. Die verwendeten Impedanzen werden aus den verschiedenen Anwendungsszenarien des Referenzzyklus extrahiert. Sie enthalten Spektroskopien von Zellen zwischen 100% und 27% SOH. Beispielhafte Impedanzspektroskopien, wie auch die Ergebnisse der Abschätzung sind im folgenden dargestellt.

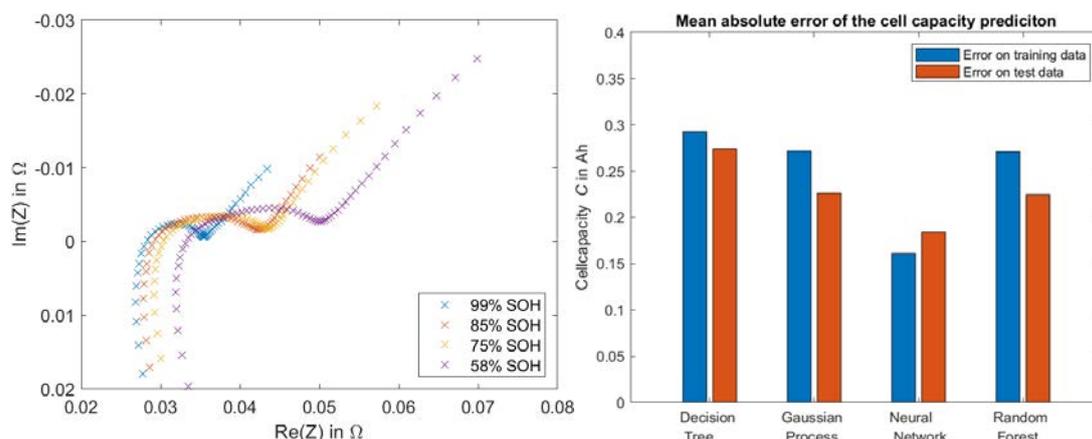


Abbildung 59: Links: Impedanzspektroskopiekurve verschiedener Altersstufen. Rechts: Mittlerer Fehler der Kapazitätsschätzung verschiedener ML-Modelle.

Mit zunehmender Batteriealterung steigen die Impedanzen sowohl im Real- als Imaginärteil an. Es ist zu erkennen, dass das neuronale Netz die beste Schätzung für die Kapazitätsabschätzung liefert. Es ist jedoch eine leichte Überanpassung zu beobachten, da der mittlere absolute Fehler der Trainingsdaten etwas kleiner ist. Die übrigen Methoden weisen keine Überanpassung auf, schneiden aber tendenziell schlechter ab, da sie höhere mittlere absolute Fehlerwerte aufweisen. Daher wird diese Methode für das weitere Vorgehen übernommen.

Diese Methoden wurden in eine Prognosesoftware integriert, welche für verschiedene Inputdaten einen Vergleich der Zweitanwendungen, als auch der Prognosemethoden bietet. Die Prognosesoftware ist in Abbildung 60 dargestellt.

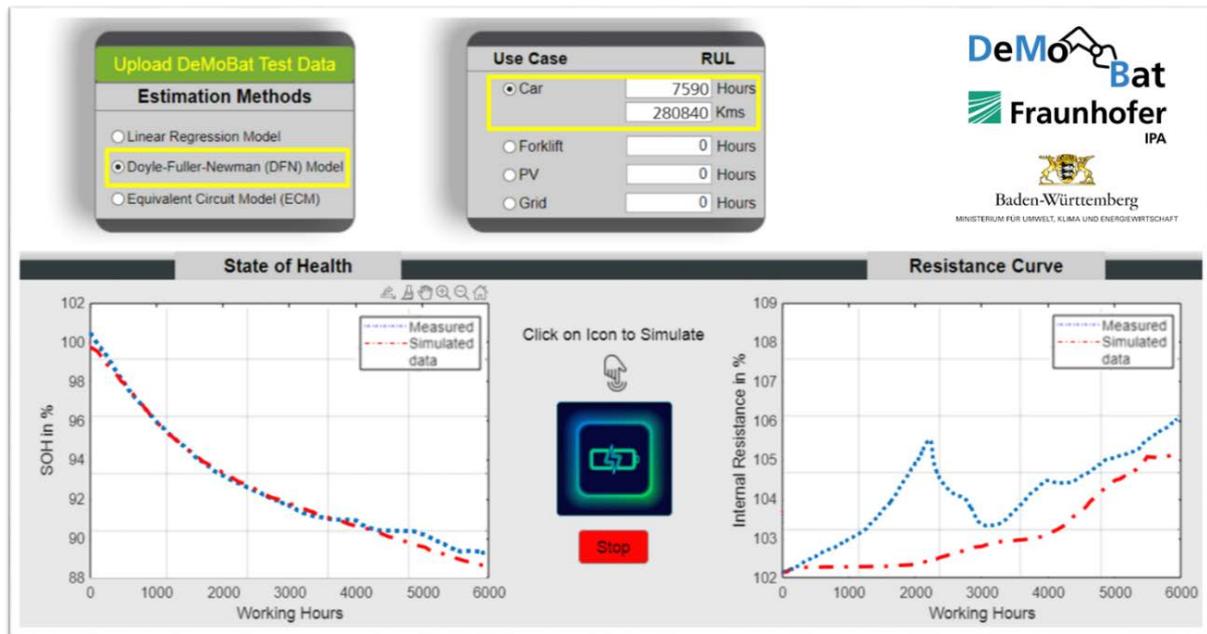


Abbildung 60: Prognosesoftware der Restlebensdauer von Rückläuferbatterien.

6 Zelldemontage und stoffliches Recycling

Ziel dieses Teilprojektes ist die erfolgreiche Demontage von NMC-basierten Lithium-Ionen-Batterien sowie die stoffliche Verwertung des Aktivmaterials mit Schwerpunkt auf der Gewinnung von NMC-Rezyklat. Des Weiteren soll das Recyclingverfahren durch umfassendes Monitoring und Charakterisierung der Rezyklate begleitet werden. In der anschließenden Nachhaltigkeitsbewertung soll die Verfahrensweise des stofflichen Verwertens der Kathodenaktivmaterialien nach ökologischen Kenngrößen quantifiziert und in einem anschließenden Vergleich zu einer alternativen Verfahrensweise bewertet werden. An das stoffliche Recycling anschließend, wird die Reintegration des Rezyklats in neu aufgebaute Zellen angestrebt.

Die Arbeitsinhalte sind dementsprechend untergliedert in die teil-automatisierte Zerlegung und Verfahren des stofflichen Recyclings (ERLOS GmbH / Silberland GmbH), dem Monitoring des Recyclingverfahrens (BTU Cottbus-Senftenberg / Hochschule Esslingen / ERLOS GmbH) und der Charakterisierung der Rezyklate, der Nachhaltigkeitsbewertung (Hochschule Esslingen / ERLOS GmbH) und der Rückführung des Rezyklats in den Kreislauf (Fraunhofer IPA).

6.1 Automatisierte Zerlegung und stoffliches Recycling

Dieses Arbeitspaket umfasst die Prozess- und Verfahrenstechnik zur Verwertung der Li-Ionen-Batterien sowie die (Teil-)Automatisierung der Batteriezellerlegung und finden beim Projektpartner ERLOS GmbH in Zusammenarbeit mit der Silberland GmbH statt.

Beginnend wird nochmals kurz das Grundkonzept der zu entwickelnden Verfahrenstechnik vorgestellt:

1. Annahme der Akkus, abfallrechtliche Kontrolle des Paperwork,
2. Zwischenspeicherung in einem Spezialcontainer,
3. Entladung,
4. Händische Demontage bis auf Zellebene,
5. (Partielle) automatisierte Demontage der Zellen,
6. Leaching der Kathoden- und Anodenfolien, Ziel: separate Gewinnung von Anoden- und Kathodenmaterial,
7. Rezyklattrocknung,

8. Materialspeicherung (Pulver in Bigbags, „Festkörper“ in speziellen Behältern etc.) und
9. Verfahrensbegleitung: Analytik.

Nach der Annahme der Akkus erfolgt deren gesetzeskonforme Zwischenlagerung in einem „Gelkoh-Container“. In einem äußerlich baugleichen Container findet der Anschluss der Akkus an die Entladeeinheit zur Tiefenentladung statt. Dieser ist aus sicherheitstechnischen Gründen räumlich vom Lagercontainer getrennt. Die Steuerung zur Entladung ist separat untergebracht (siehe Abbildung 61).



Abbildung 61: Gelkoh-Container auf dem Betriebsgelände der ERLOS, Links: geschlossener Container in Aussenansicht, Rechts: Akkus während der Entladung im gezeigten Container.

Um potentiell thermisches Durchgehen und Brände zu vermeiden, wird während des Entladens die Temperatur überwacht. Die aus den Akkus gewonnene elektrische Energie wird nach Wandlung und Zwischenspeicherung direkt dem Produktionsnetz des Unternehmens zugeführt. Erst nach Sicherstellung - inkl. der vollumfassenden Überprüfung - der Stromfreiheit der Akkus erfolgt deren weitere Verarbeitung.

Die Verarbeitung beginnt mit der händischen Demontage der Akkus bis auf Zellebene, welche mit Hilfe von Ablaufanalysen (REFA) optimiert wurden. In Abbildung 62 ist die Umsetzung der händischen Demontage dargestellt.



Abbildung 62: Grobe Gesamtübersicht der umgesetzten händischen Demontage bei ERLOS.

Die Effektivität der händischen Demontage konnte im Projektverlauf iterativ durch Definition und Nutzung einer Vielzahl von Vorrichtungen, Werkzeugen und Hilfsmitteln verbessert werden. Nach der Demontage bis auf Zellebene erfolgt die Zellzerlegung und Separation von Kathode, Anode und Separatorfolie, um die Elektroden zeitlich und räumlich separiert einschichten zu können. Diesen wesentlichen Projektschwerpunkt der Zellzerlegung bearbeitete ERLOS in Kooperation mit der Firma Silberland. Die Separatorfolien müssen auf Grund starker Kontamination mit Lösemittel einer Entsorgung zugeführt werden, eine weitere Aufbereitung ist wirtschaftlich nicht realisierbar.

In diesem Projektschwerpunkt kristallisierte sich eine Verfahrensentwicklung zur Öffnung der prismatischen Zellen als weit fortgeschritten heraus, so dass auf diesem Punkt vertieft eingegangen wird. Das Verfahren selbst basiert auf der rückseitigen Aufnahme der Module mit prismatischen Zellen in einem Transportschlitten, der Öffnung der Zellen im Gesamtmodul mittels Fräsung, der rückseitigen An- und Durchbohrung der Einzelzellen, wobei hier potenziell vorhandene Lösemittel entzogen werden, und den Ausstoß des eigentlichen Zellinnenlebens (Kathoden, Anoden, Separatorfolien). Diese Elektroden des Innenlebens, insbesondere die Kathoden, können dann manuell der sogenannten Leachinganlage zur Entschichtung zugeführt werden. Die Anlagentechnik zur Öffnung der prismatischen Zellmodule ist unter Abbildung 63 illustriert.



Abbildung 63: Links: Fräsanlage während der Installation, Rechts: Details zum Fräskopf, zur internen Transporteinheit und zum Ausdrückmechanismus.

Zum Anlagenbetriebes sind spezifische Förderschlitzen zur Aufnahme der Zellmodule notwendig, da sich die Module stark in ihren Geometrien unterscheiden. Diese Schlitten müssen die im Fräsprozess entstehenden Kräfte aufnehmen können (Deformationsvermeidung der Module während ihrer Bearbeitung), siehe Abbildung 64.

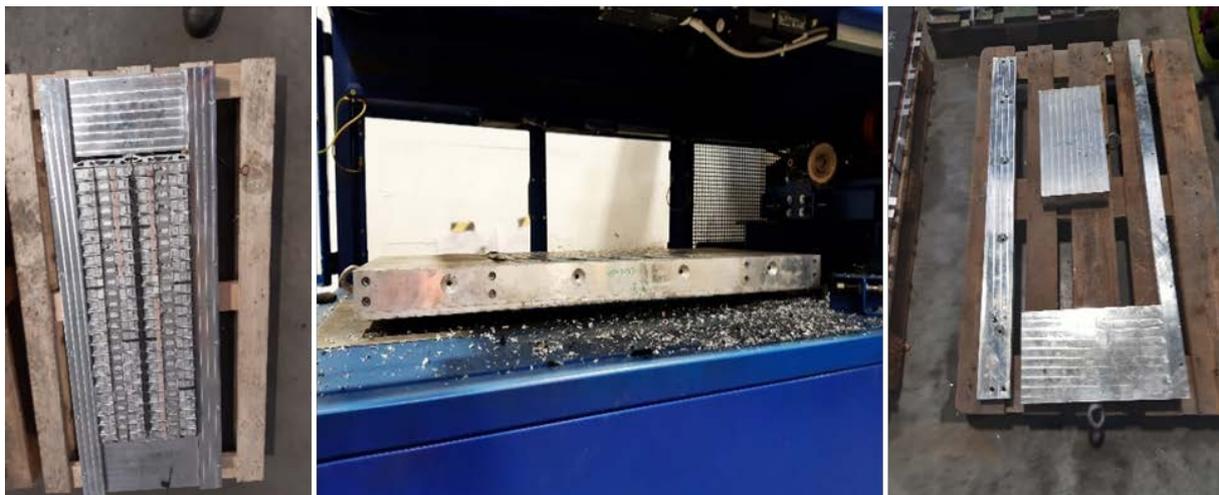


Abbildung 64: Links: Modul mit prismatischen Zellen im Transportschlitten, Mittig: Transportschlitten mit Modul im Durchlauf innerhalb der Fräsanlage, Rechts: Transportschlitten.

In Anhang A findet man die Ergebnisse zur Öffnung der prismatischen Module.

Zuzüglich zur hier etwas tiefer vorgestellten Automation der Zerlegung von prismatischen Zellen fanden noch weitere, umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Anlagen ähnlich einer „Kassettensäge“ und an „Aufwickelautomatationen“ statt. Auch hierzu wurden Prototypen beider Technologien entwickelt, aufgebaut und umfangreich iterativ praktisch erprobt.

Eine vollständige Automation der Öffnung und der Zerlegung von Pouchzellen konnte nicht gefunden werden. Der im Projekt untersuchte Ansatz der Stanzung des Zellpaketes bei einzelnen geschichteten Anoden, Kathoden und Separatorfolien zur Öffnung und nachfolgender

manueller Entnahme von Anoden, Kathoden und Separatorfolien hat sich bewährt. Bei gewickelten Elektroden in Pouchzellen erfolgte nach genannter Öffnung des Zellpaketes die Trennung des Zellinnenlebens durch Abwicklung der Separatorfolie auf eine Art „Wickelhülse“ („Aufwickelautomation“), wobei damit die Anoden, Kathoden und Separatorfolien getrennt werden.

Es wurde experimentell festgestellt, dass die Trennung von Anoden, Kathoden und Separatorfolien in Pouchzellen erst ab einem Lösemittelgehalt von min. 2 wt% wirtschaftlich erfolgen kann. Bei geringerem Lösemittelgehalt verkleben die Anoden, Kathoden und Separatorfolien stark miteinander, was eine zerstörungsfreie Trennung nicht mehr zulässt.

Der nachfolgende als „Leaching“ bezeichnete Prozessschritt stellt eine düsendeterminierte Entschichtung der Kathoden und Anoden ähnlich einer Wasserstrahlanlage im Durchlaufverfahren dar, wobei die Elektroden getrennt und manuell der Entschichtungsanlage zugeführt werden. Dies erhöht die Qualität der Rezyklate. Variable Prozessparameter sind der Düsendruck, der Düsenabstand zum Entschichtungstarget, der Düsenwinkel ebenso zum Entschichtungstarget, die Prozesstemperatur und die Verweilzeit der Entschichtungstargets in der Anlage. Für jeden neuen Akkutyp sind die genannten Entschichtungsparameter experimentell neu zu bestimmen. Die Verfahrenstechnik hat sich prinzipiell bewährt, so dass für alle prozessierten NMC-Kathoden (NMC111, NMC622, NMC433 und NMC811) und LFP-Systeme Entschichtungsgrade von minimal 95 Flächenprozent erzielt werden konnten.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Verfahrenstechnik und das Entschichtungsergebnis an einer zufällig ausgewählten Kathode (Abbildung 65).



Abbildung 65: Überblick über die zweistraßige Leachinganlage bei ERLOS (links), Kathode im Urzustand (rechts oben) und Kathode nach der Entschichtung (rechts unten).

Auch beim Leaching konnte festgestellt werden, dass mit abnehmendem Lösemittelgehalt Verschlechterung der Entschichtbarkeit der Elektroden einhergeht, dies gilt insbesondere für die Delamination von Kathoden. Es ist davon auszugehen, dass sich durch die Verringerung des Lösemittelgehaltes in der Aktivmasse deren Porosität verringert, was wiederum den Eintritt des Wasserstrahls in die Aktivmassenmatrix limitiert. Dieser Wasserstrahleintritt bzw. „-angriff“ in die Poren die Basis zur Delamination der Aktivmaterialien dar. Dieser Effekt kann durch Justieren des Düsenwinkels, der Scherrate, und durch die Entschichtungsverweilzeit partiell verringert werden, doch die Gefahr des „Zerschießens“ der Kathoden-Al-Grundfolie bleibt bestehen. In diesem Fall verbleiben Al-Fragmente im Rezyklat, was sich qualitätslimitierend auswirkt.

Das eigentliche Waschen der Rezyklate hat sich für die Qualitätsverbesserung als sehr zielführend erwiesen, da so übriges Lösemittel und andere Kontaminationen aus dem Rezyklat entfernen werden können. Die dann folgende Abtrennung der Schwarzmasse aus der wäßrigen Phase erfolgte via Filtration und Sedimentation.

Der letzte Prozess-Schritt ist die Ofentrocknung der Schwarzmasse. Hierzu wurden empirisch diverse Trocknungsprogramme erarbeitet.

Die Summe aller Kontaminations-Komponenten betrug immer max. 1 wt%, wobei auch die Restfeuchte als Störkomponente definiert wurde.

6.2 Monitoring des Recyclingverfahrens

Die Untersuchung des Recyclingverfahrens wird an der BTU und an der HSE durch chemische, spektroskopische, mikroskopische und elektrochemische Charakterisierung des rückgewonnenen Kathodenmaterials begleitet. Die an der HSE verfügbare Messmethode der Röntgen-Pulverdiffraktometrie XRPD (engl. X-Ray Powder Diffraction) stellt eine gute Ergänzung zu den spektroskopischen Verfahren, die an der BTU verwendet werden, dar. Mit der Rasterkraftmikroskopie (AFM) lassen sich mechanische und elektrische Materialeigenschaften untersuchen.

1. XRPD

Die Röntgendiffraktogramme, der in diesem Projekt favorisiert verwendeten Frischmaterialien und Rezyklate, sind in Abbildung 66 zusammengestellt.

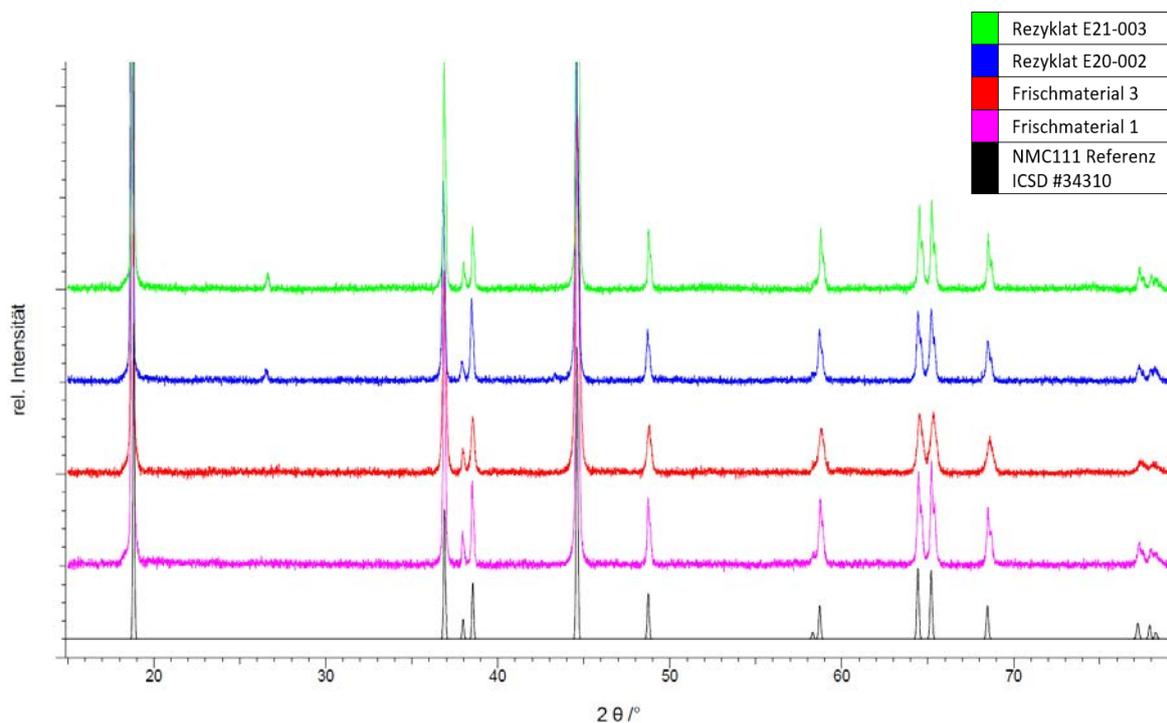


Abbildung 66: Röntgendiffraktogramme der im Projekt ausgewählten NMC-Materialien.

Die kristallographische Reinheit der beiden ausgewählten NMC111-Frischmaterialien (Frischmaterial 1 und 3) wurde anhand ihrer Röntgendiffraktogramme überprüft und mit der NMC111 Referenz aus der ICSD (Inorganic Crystal Structure Database, FIZ Karlsruhe) verglichen. Das ermittelte Beugungsmuster enthält die NMC-spezifischen Reflexe und kann, wie erwartet, dem \square -NaFeO₂-Strukturtyp zugeordnet werden. Fremdre reflexe liegen nicht vor, d. h. der Anteil an kristallinen Fremdphasen ist sehr gering.

Die beiden für die Zellfertigung am IPA verwendete Rezyklate aus dem Jahr 2020 (E20-002) und aus dem Jahr 2021 (E21-003) weisen eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung auf. Ein hoher Anteil an Fremdbestandteilen in Rezyklaten beeinflusst die Zellperformance auf negative Weise. Erstens steht eine geringere Menge an katalytisch aktivem Material zur Verfügung, wenn sich in der Mischung mehr Fremdbestandteile befinden. Zweitens können die Verunreinigungen die in der Testzelle ablaufenden Reaktionen beeinflussen. Das Rezyklat E20-002 enthält im Vergleich zu E21-003 große Mengen an Aluminium, sowie erhöhte Gehalte von Fluor, Kupfer und Schwefel. Die Graphitgehalte von 10% sind näherungsweise gleich (Graphit-Reflex bei $2\theta = 26,7^\circ$). Im Rezyklat E21-003 konnte kein Phosphor nachgewiesen werden.

Die geringe Performance des recycelten Kathodenmaterials kann vielfältige Ursachen haben. Eine in der Fachliteratur diskutierte Möglichkeit ist eine an der Oberfläche stattfindende Strukturänderung, die zu einer Barriere für die Interkalation der Lithium-Ionen führt. Im Zusammenhang damit könnte eine Verarmung an Lithium an der Oberfläche stehen, die insbesondere durch das Wasserstrahlverfahren bei der Rückgewinnung des Kathodenmaterials auftritt. In beiden Fällen könnte ein Temperprozess die Reaktivierung des Kathodenmaterials ermöglichen oder begünstigen. Durch die Temperatureinwirkung könnte die Barriere restrukturiert und die originale Basisstruktur im NaFeO₂-Typ wiederhergestellt werden. Geringe Mengen beider Rezyklate wurden daher versuchsweise bei verschiedenen Temperaturen gegläht und der Einfluss der Behandlung mit Hilfe von Röntgendiffraktogrammen untersucht. Dabei führte der hohe Aluminiumanteil im Rezyklat E20-002 zur Bildung von Aluminiumverbindungen. Besonders nachteilig für die elektrochemische Performance dürfte die Bindung des Lithiums in LiAlO₂ sein, welches bei Glühtemperaturen über 700 °C auftritt. Bei dem Rezyklat E21-003 bildeten sich selbst bei sehr hohen Temperaturen keine Aluminiumverbindungen. Da die Aufbereitung dieses Rezyklats durch einen Glühschritt eine erfolgversprechende Möglichkeit darstellt die elektrochemische Zellperformance zu verbessern, wurde das bei 800 °C für 3 h geglähte Rezyklat für eine neue Kathoden-Beschichtung mit 100 % Rezyklat eingesetzt. Erste Messungen beim Projektpartner IPA ergaben, dass die Kapazität sich erhöht und die gesamte elektrochemische Performance sich im Vergleich zum nicht geglähten Rezyklat wesentlich verbessert hat. In Folgeprojekten wird das direkte Recycling von NMC-Material mit Aufbereitung weiter untersucht. Bereits laufende Projekte sind ReKath und ReUpDirect, geplant ist ReLiBat.

Die Analyse der Breite der Reflexe in den Röntgendiffraktogrammen ergab, dass im NMC-Material Mikrospannungen bestehen. Vergleichsstudien zur Analyse der Unterschiede zwischen Frischmaterial und Recyclat sind Gegenstand laufender Untersuchungen.

1. AFM und REM

Die REM-Aufnahmen des Frischmaterials 1 in Abbildung 67 veranschaulichen den Unterschied zwischen den einzelnen kugelförmigen NMC-Aggregaten (links) und den Primärkristalliten (rechts). Die einzelnen Aggregate können eine Größe von über 10 μm erreichen. Sie bestehen aus einer Vielzahl kleinerer Kristallite mit durchschnittlich 1 μm Durchmesser.

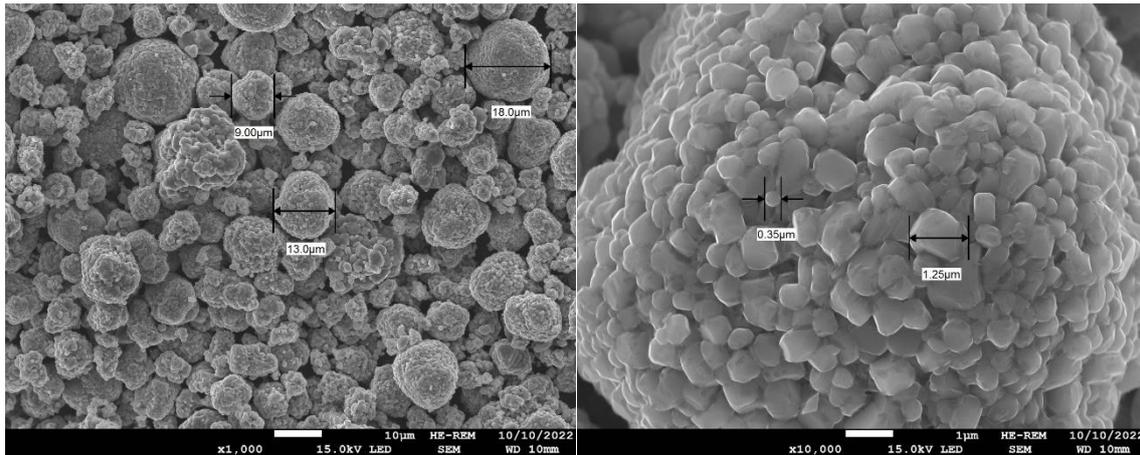


Abbildung 67: REM-Aufnahmen des NMC111 Frischmaterials 1.

Dieses Frischmaterial wurde beim Projektpartner IPA für die Herstellung neuer Kathodenfolien der Serie 5 verwendet. Dabei handelt es sich um eine präparierte Aluminiumfolie, die als Kathodenmaterial ausschließlich NMC-Frischmaterial 1 (zu 100 %, kein Rezyklatanteil) enthält. Als Dispersionsmedium diente Wasser, als Bindemittel wurde SBR (Styrol-Butadien-Kautschuk) verwendet. Zusätzlich wurde zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit Ruß hinzugegeben. Diese Leitruß-Partikel sind es, die in Abbildung 68 links unten mit einer durchschnittlichen Größe von ca. 100 nm zu sehen sind. Die letztgenannte Aufnahme ist von besonderem Interesse, da REM-Aufnahmen mit einer solch hohen Vergrößerung in der Nähe des AFM-Messbereichs liegen (rechts unten). Direkte Vergleiche von REM- und AFM-Bildern sind dann möglich.

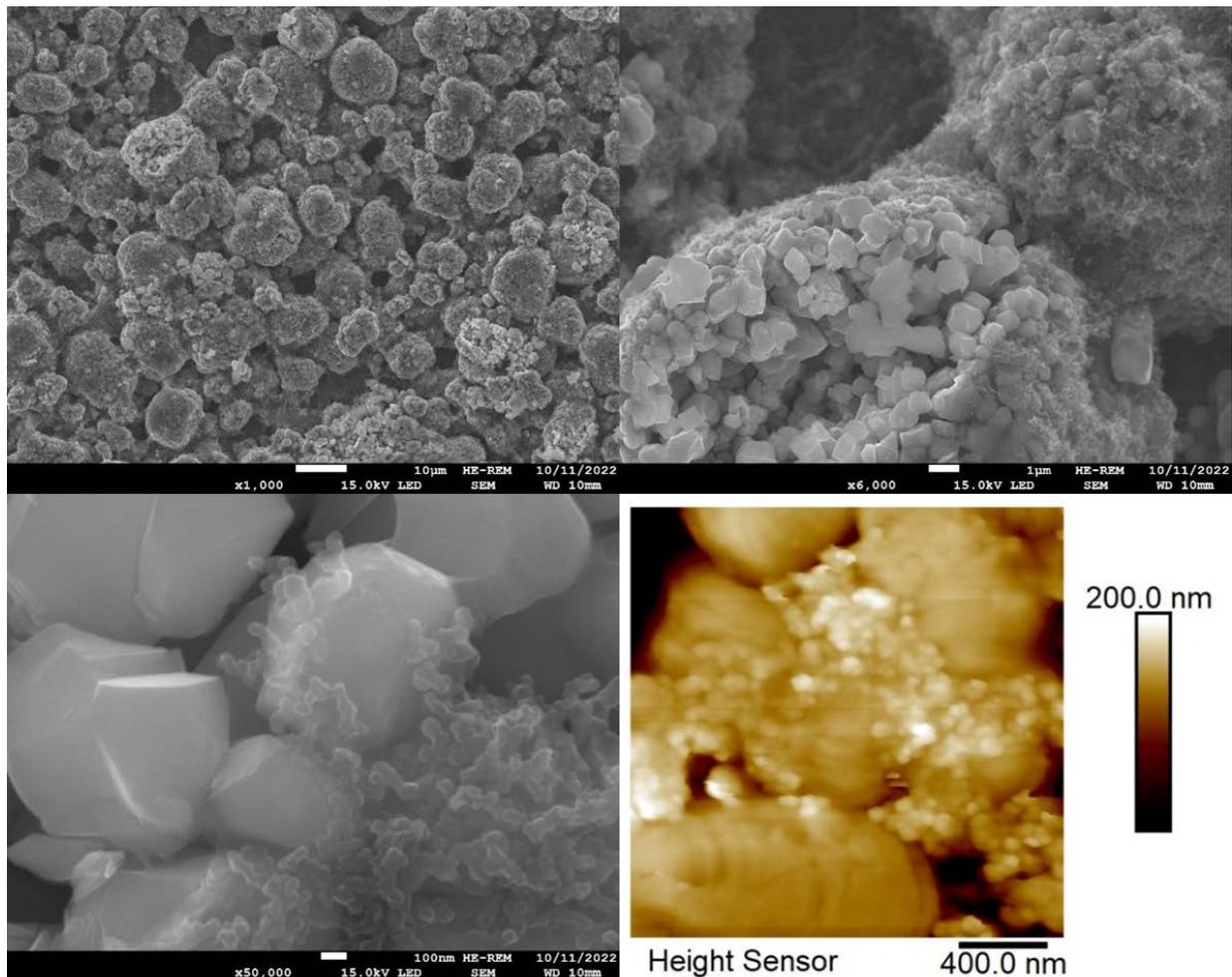


Abbildung 68: Aufnahmen der Kathodenfolie Serie 5 mit dem REM und dem AFM (rechts unten). Der dargestellte Bereich im linken unteren REM-Bild misst ca. 2,5 µm in der Länge und 1,8 µm in der Breite, im rechten unteren AFM-Bild 2 µm in Länge und Breite.

Der Scanbereich der AFM-Aufnahmen (Abbildung 69) misst ein quadratisches Feld mit je 2,5 µm in der Länge und in der Breite. Es wurde eine Messsonde mit elektrisch leitender Messspitze verwendet, die neben dem Höhenprofil auch die nanomechanischen Eigenschaften aus der Kraft-Abstands-Kurve ermitteln kann (NCHPt, Federkonstante ca. 42 N/m, Fa. Nanoworld). Die AFM-Datensätze der untersuchten Probe sind als Information zur Höhe, der elektrischen Leitfähigkeit, der logarithmischen Darstellung des DMT-Modulus (eine dem E-Modul verwandte Größe) und der Deformation graphisch dargestellt. Neben der sehr guten Korrelation zwischen den Leitruß-Partikeln und der elektrischen Leitfähigkeit ist es auch gelungen, Korrelationen über die nanomechanischen Eigenschaften abzuleiten. Die Leitruß-Partikel weisen einen hohen DMT-Modulus und eine geringe Deformation auf und lassen sich dadurch deutlich von den NMC-Primärkristalliten unterscheiden.

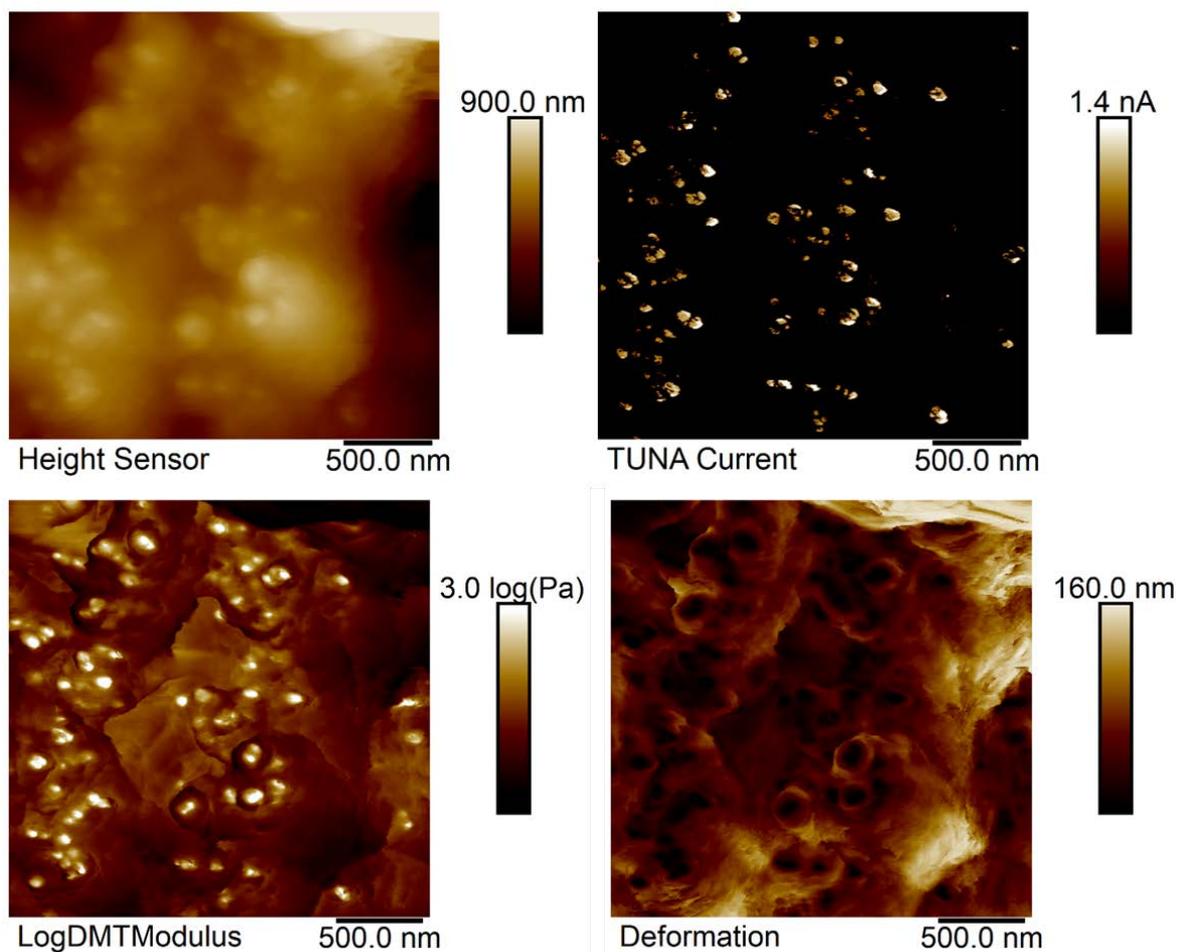


Abbildung 69: AFM-Aufnahmen der Kathodenfolie der Serie 5 von Höhe, elektrischer Leitfähigkeit, logarithmischer Darstellung des DMT-Modulus und der Deformation.

Ein wesentlicher Schwerpunkt im Teilprojekt der BTU Cottbus-Senftenberg ist die umfassende Materialcharakterisierung sowohl von Eingangsmaterialien (Frisch NMC), Rezyklaten und ausgewählten Materialfraktionen über den gesamten Projektverlauf hinweg. Im Vordergrund standen hier die präzise und für das Material repräsentative Analyse der Zusammensetzung. Dies betrifft einerseits die Bestimmung von Hauptkomponenten, aus denen die vorliegende NMC-Stöchiometrie berechnet wird, und andererseits die Bestimmung von Nebenkomponten und Spurenverunreinigungen. Hinzu kommt die Bestimmung des Binder- und Leitrußanteils. Tabelle 5 zeigt diese Ergebnisse exemplarisch für eine Auswahl von vier untersuchten Rezyklaten. Der Anteil an Kathodenaktivmaterial liegt für alle über das Entschichtungsverfahren der ERLOS gewonnenen Rezyklate zwischen 85% und 90%. Dominant war in diesen ausgewählten Rezyklatproben das Kathodenaktivmaterial NMC mit einem stöchiometrischen Verhältnis zwischen $n(\text{Ni}):n(\text{Mn}):n(\text{Co})$ von 1:1:1 (DMB 2: $\text{Li}_{1,10\pm0,02}(\text{Ni}_{0,34\pm0,01}\text{Mn}_{0,33\pm0,01}\text{Co}_{0,33\pm0,01})\text{O}_2$, DMB 4: $\text{Li}_{1,03\pm0,02}(\text{Ni}_{0,38\pm0,01}\text{Mn}_{0,30\pm0,01}\text{Co}_{0,31\pm0,01})\text{O}_2$, DMB 5:

$\text{Li}_{1,05\pm 0,02}(\text{Ni}_{0,34\pm 0,01}\text{Mn}_{0,33\pm 0,01}\text{Co}_{0,33\pm 0,01})\text{O}_2$). Aber auch Ni-reichere Zusammensetzung wie $n(\text{Ni}):n(\text{Mn}):n(\text{Co}) = 6:2:2$ und Mischungen verschiedener Kathodenaktivmaterialien wie $\text{Li}_{0,94\pm 0,07}(\text{Ni}_{0,60\pm 0,03}\text{Mn}_{0,20\pm 0,01}\text{Co}_{0,20\pm 0,01})\text{O}_2$ (NMC622) und $\text{Li}_{1,00\pm 0,02}\text{Fe}_{0,96\pm 0,02}\text{P}_{1,00\pm 0,02}\text{O}_4$ (LFP) waren unter den Recyclingfraktionen zu finden (DMB-1, Vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Elementgehalte und Zusammensetzungen vier ausgewählter Rezyklate, bestimmt mittels ICP-OES nach nasschemischem Aufschluss; kleiner als Bestimmungsgrenze (< BG), nicht nachweisbar (n.n.)

	DMB 1	DMB 2	DMB 4	DMB 5
Al / mg g⁻¹	3,63 ± 0,2	30,5 ± 0,5	1,52 ± 0,11	0,571 ± 0,098
Li / mg g⁻¹	56,4 ± 1	66,6 ± 0,5	66,3 ± 1,8	65,8 ± 0,9
Ni / mg g⁻¹	270 ± 2	175 ± 3	209 ± 8	182 ± 2
Mn / mg g⁻¹	86,5 ± 1,5	157 ± 2	154 ± 5	162 ± 3
Co / mg g⁻¹	91,4 ± 1,6	171 ± 1	170 ± 5	178 ± 3
Cu / mg g⁻¹	2,24 ± 0,03	8,18 ± 0,29	2,02 ± 0,26	5,45 ± 0,64
P / mg g⁻¹	26,2 ± 0,3	2,64 ± 0,07	1,33 ± 0,13	0,77 ± 0,07
Fe / mg g⁻¹	45,4 ± 0,5	0,861 ± 0,046	0,761 ± 0,169	< BG
Ti / mg g⁻¹	0,188 ± 0,004	0,562 ± 0,037	< BG	< BG
Zr / mg g⁻¹	3,59 ± 0,03	n.n.	0,283 ± 0,116	< BG
NMC [%]	(74,6 ± 0,5)%	(84,9 ± 0,5)%	(89,5 ± 2,6)%	(87,8 ± 1,1)%
LFP [%]	(13,2 ± 0,1)%			
Verunreinigungen [%]	(0,97 ± 0,02)%	(4,3 ± 0,1)%	(0,59 ± 0,04)%	(0,68 ± 0,07)%
<i>Binder & Ruß [%]</i>	(11,3 ± 0,5)%	(10,8 ± 0,5)%	(8,6 ± 0,2)%	(9,5 ± 0,2)%

Als Nebenkomponenten werden der organische Binder (meist PVDF) und das Leitadditiv betrachtet, deren Summe sich je nach Hersteller der Ausgangsmodule zwischen 8% und 12% bewegt. Von entscheidender Bedeutung sind vor allem die metallischen Verunreinigungen im Rezyklat. Mit dem durch die ERLOS optimierten Entschichtungsverfahren beträgt deren Summe zumeist $\leq 1\%$ (Vgl. Tab. 1). Hauptverunreinigungen sind Aluminium (Kollektor der Kathode) und Kupfer (Kollektor der Anode). Hinzu kommen Titan, das mitunter als Leitadditiv zugesetzt oder Bestandteil der Anode (LTO) ist, Komponenten aus keramischen Beschichtungen der Separatoren, wie Al_2O_3 und ZrO_2 , aber auch nichtmetallische Restverunreinigungen an Schwefel und Phosphor durch Hydrolyseprodukte der Leitsalze.

Während keramische Bestandteile elektrisch inaktiv sind und so zumindest in geringen Mengen dem direkten Wiedereinsatz der Rezyklate nicht widersprechen, sind insbesondere Verunreinigungen von Al und Cu bedeutende Ausschlusskriterien für einen erfolgreichen Wiedereinsatz, da bereits geringe Mengen erhebliche Kapazitätsverluste verursachen. Entlang der Prozessketten wurden daher für die in den Rezyklaten auftretenden

NebenkompONENTEN und Verunreinigungen gezielte Untersuchungen durchgeführt, um deren Quelle sowie die genauen Prozessbedingungen aufzuklären, die zu einem Übergang in das Recyclinggut führen.

In Vordergrund standen die zum Teil hohen Cu-Verunreinigungen von bis zu mehreren Massenprozenten in den Rezyklaten der Kathodenaktivmaterialien. Eine Querkontamination durch die Anodenfolien, die aus graphitbeschichteten Kupfersubstratfolien bestehen, war auszuschließen, da die Kathodenaktivmaterialien ausschließlich aus separierten Kathodenfolien gewonnen wurden. Als Ursache der Kontamination konnte der Schritt der Tiefenentladung der Fahrzeugbatterien identifiziert werden, der die Voraussetzung für ein sicheres Öffnen der Batterie und eine sichere Demontage und Zerlegung der Zellen in Kathoden, Anoden und Separatorfolien darstellt.

Als Folge der Tiefenentladung kann es zur partiellen Auflösung des Kupfer-Stromsammlers an der Anodenseite und schließlich zur Abscheidung von Kupfer auf der Oberfläche der Kathode kommen. Abbildung 70a zeigt eine Lichtbildaufnahme einer solchen Kathode mit deutlich sichtbaren, oberflächlichen Kupferabscheidungen. Anhand einer REM-EDX-Aufnahme (Abbildung 70b) kann zudem das den Al_2O_3 -enhaltenen Separator (rot, rechter und linker Rand der Beschichtung) durchdringende Kupfer (grün) verdeutlicht werden. In einer umfassenden Studie wurden die Bedingungen der Auflösung und Abscheidung von Kupfer untersucht. (Langner et al. 2021) Werden Zellen mit unterschiedlichen Ladezuständen (SOC) in Reihe geschaltet, so wie dies innerhalb der Batteriestacks von Elektrofahrzeugbatterien üblich ist, und gemeinsam tiefentladen, kommt es bevorzugt in der Zelle mit der niedrigeren Ladungskapazität zur Kupferabscheidung. Ursache ist der erzwungene Ladungstransport in dieser Zelle, der nach einsetzender Verarmung von Lithium in der Kathode und nach dem Zusammenbruch der SEI zu einer Umpolung führt, bei der der Kupferkollektor der Anode aufgelöst und Kupfer auf der Oberfläche des NMC abgeschieden wird. Anhand verschiedener analytischer Messgrößen, darunter die Cu-Konzentration im Elektrolyten, konnte der Punkt der Auflösung und die beginnende Abscheidung von Kupfer identifiziert und eine modellhafte Vorstellung über die Prozesse während der Tiefentladung entwickelt werden.

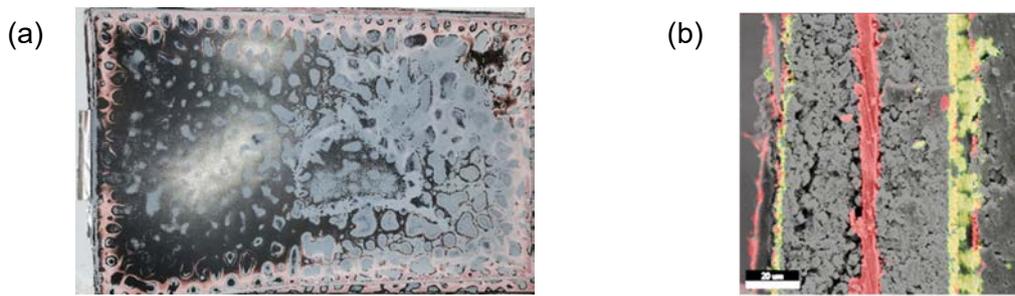


Abbildung 70: (a) Lichtbildaufnahme einer nach der Zellöffnung separierten Kathodenfolie mit oberflächlichen Kupferabscheidungen und (b) Überlagerung der REM-EDX Aufnahme eines Anschnitts einer Folienfolge Kathode-Separator-Anode mit deutlicher Kupfer-Durchdringung des Separators (rot: Al, grün: Cu).

Ein ebenfalls als kritisch einzustufender Anstieg der Rezyklatverunreinigung mit Aluminium konnte auf die Lagerungsbedingungen der Kathodenfolien nach dem Öffnen der Zellen und dem Separieren von Anode und Separator zurückgeführt werden. Eine zunehmende Lagerzeit bewirkt hier nicht allein eine Degradation des Aktivmaterials, sondern ruft auch einen Anstieg der Aluminiumverunreinigung im Rezyklat durch Degradation des Aluminiumkollektors hervor. Für den industriellen Recyclingprozess kommen zwei weitere Konsequenzen der Degradationsprozesse hinzu. Befindet sich die Degradation in einem frühen Stadium, führen die in die Beschichtung eingedrungenen Aluminiumsalze zu einer verstärkten Haftung der Beschichtung auf der Substratfolie, wodurch die Entschichtung unvollständig verläuft. Im Stadium fortgeschrittener Degradation der Aluminiumfolie verliert diese ihre mechanische Stabilität, wodurch die Kathoden während der Wasserstrahlentschichtung reißen und Aluminiumflitter in das Rezyklat gelangen. Umfassende Studien wurden daher der Degradation von Kathodenfolien unter Umgebungsbedingungen gewidmet. (Langner et al. 2023) Dabei konnte erstmalig die Phänomenologie des Degradationsprozesses und die Auswirkungen der verminderten Entschichtungseigenschaften umfassend beschrieben werden. Dabei führen die hygroskopischen Eigenschaften der anhaftenden Leitsalze zu punktuell stattfindenden Anlagerungen von Wasser an der gesamten Oberfläche der Kathodenfolien. Infolge der Degradation des NMC entsteht ein alkalisches Medium, welches die Aluminiumsubstratfolie auflöst und auf der Kathodenoberfläche salzartige Ausscheidungen ausbilden lässt (Abbildung 71).

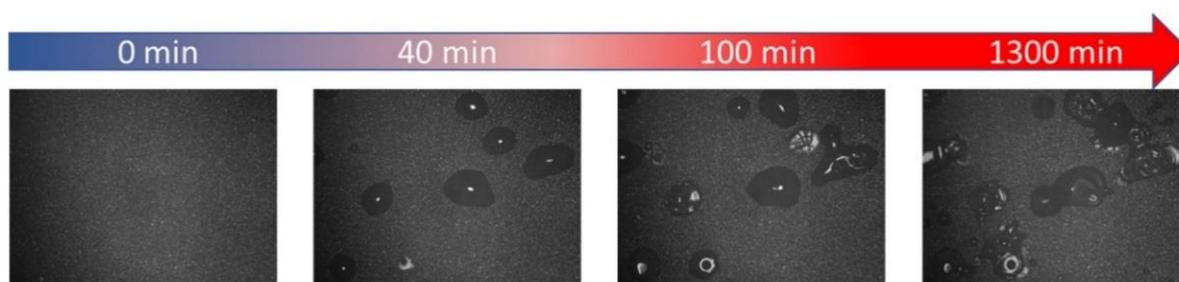


Abbildung 71: Zeitlicher Verlauf der Ansammlungen von Flüssigkeit auf einer Kathode; $\phi = 100\%$, 2.55 mm x 1.91 mm.

Diese Phänomene konnten in Abhängigkeit der Luftfeuchte und der Zeit anhand der Zunahme von Al-Verunreinigungen in der Kathodenbeschichtung bzw. der zurückzugewinnenden Schwarzmasse (vgl. Tabelle 5) und auch anhand der Zersetzung der Aluminiumsubstratfolie und der eintretenden Lochbildung quantifiziert werden (Abbildung 72a). Dabei setzt die Zunahme der Aluminiumverunreinigung im Rezyklat bereits deutlich früher ein, als die Degradation an der Oberfläche der Kathode visuell offensichtlich wird. Zudem konnte durch lokal hoch aufgelöste Messungen mittels Ramanspektroskopie und LIBS gezeigt werden, dass in der Umgebung der sichtbaren salzartigen Ausscheidungen trotz der weiterhin vorhandenen Übergangsmetalle die Molekülstruktur des NMC (Abbildung 72b) vollkommen zerstört wird.

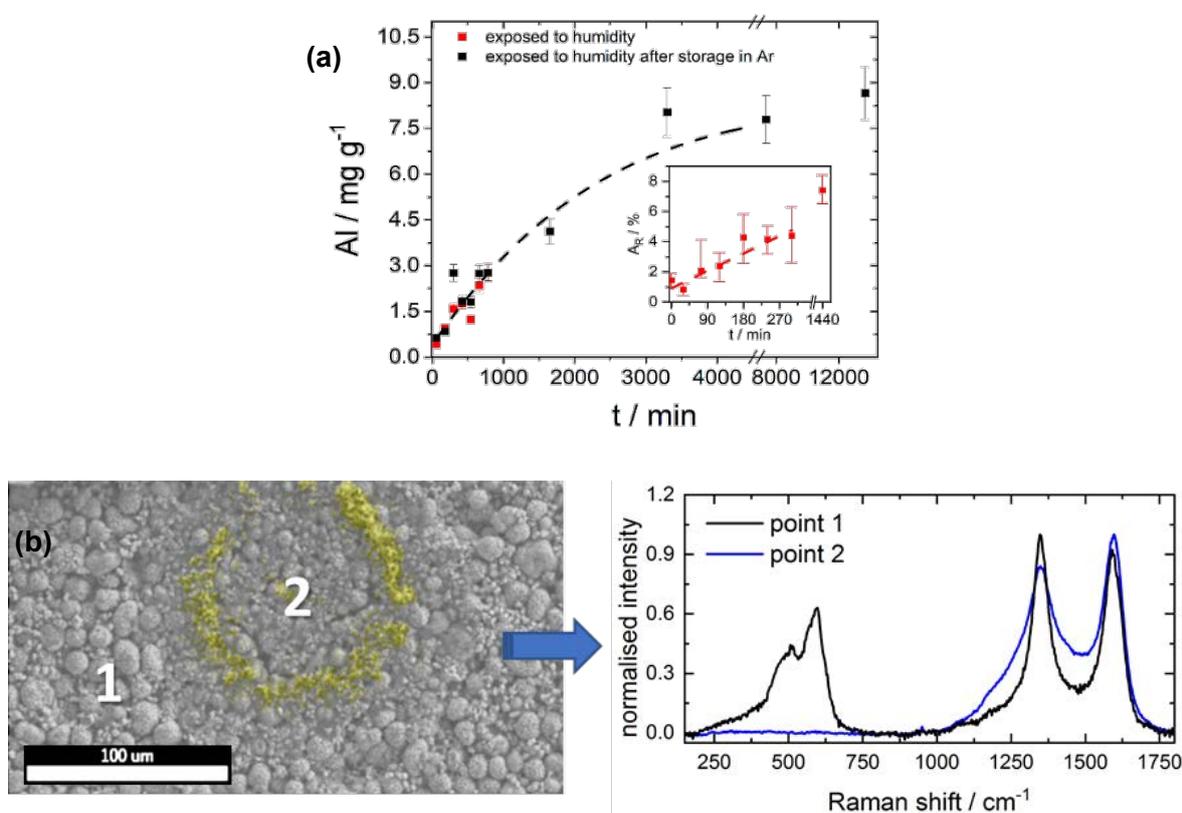


Abbildung 72: (a) Aluminiumgehalt in der vom Aluminiumkollektor getrennten Schwarzmasse als Funktion der Expositionsdauer bei $\phi \approx 55\%$, Inset: relative Fläche der Löcher in der Al-Folie während

der Lagerung bei einer Luftfeuchtigkeit von $\varphi \approx 55\%$ als Funktion der Zeit und (b) links: REM-Aufnahme einer lokal degradierten NMC-Rückseite (Kontaktfläche Al-NMC) mit 1: nicht degradiertes Bereich, 2: degradiertes Bereich überlagert mit dem REM-EDX Mapping für Al (grün) und rechts: Vergleich der Raman-Spektren der Bereiche 1 und 2, Signale zwischen 200 und 750 cm^{-1} Molekülschwingungen des NMC.

Ein weiterer Themenschwerpunkt der Arbeitspakete, der im umgekehrten Sinne auf die Vermeidung einer Degradation des Kathodenaktivmaterials abzielt, widmete sich der Auswahl und der Verfahrensparameter für die Entschichtung der Kathodenfolien in dem von der ERLOS angewandten Wasserstrahlverfahren. Ziel der Untersuchungen, war es das Medium und die Prozessbedingungen (Temperatur, pH-Wert, chemische Zusammensetzung) so zu gestalten, dass einerseits eine effektive und schnelle Entschichtung gewährleistet wird und andererseits Degradationsprozesse auf das NMC minimiert bzw. vermieden werden. Besonderes Augenmerk wurde auf die ablaufenden chemischen Veränderungen am NMC gelegt, d.h. Lithiumverlust und partielles Lösen von Ni, Mn und Co, sowie darauf aufbauende parasitäre Nebenreaktionen wie das partielle Auflösen des Al-Kollektors. Ebenso wurde der Einfluss von anhaftenden Hydrolyseprodukten des Leitsalzes betrachtet.

Abbildung 73 zeigt hier exemplarisch die zeitliche Abhängigkeit der aus dem Aktivmaterial gelösten Stoffe für zwei verschiedene pH-Werte. Dabei zeigt sich, dass für eine definierte Fläche an Kathodenaktivbeschichtung von 78 cm^2 , bei einem Flächengewicht von $(19,3 \pm 0,1) \text{ mg cm}^{-2}$, mit rund 90% Aktivmaterialanteil, der Angriff des Prozessmediums mit dem niedrigeren pH-Wert (Abbildung 73a) zu einem stärkeren Austritt von Lithium aus dem Aktivmaterial und auch zur partiellen Auflösung der Übergangsmetalle führt, während beim Prozessmedium mit höherem pH-Wert (Abbildung 73b) kaum ein Übertritt der Übergangsmetalle in das Prozessmedium verzeichnet werden kann und der Austritt von Lithium deutlich geringer ausfällt.

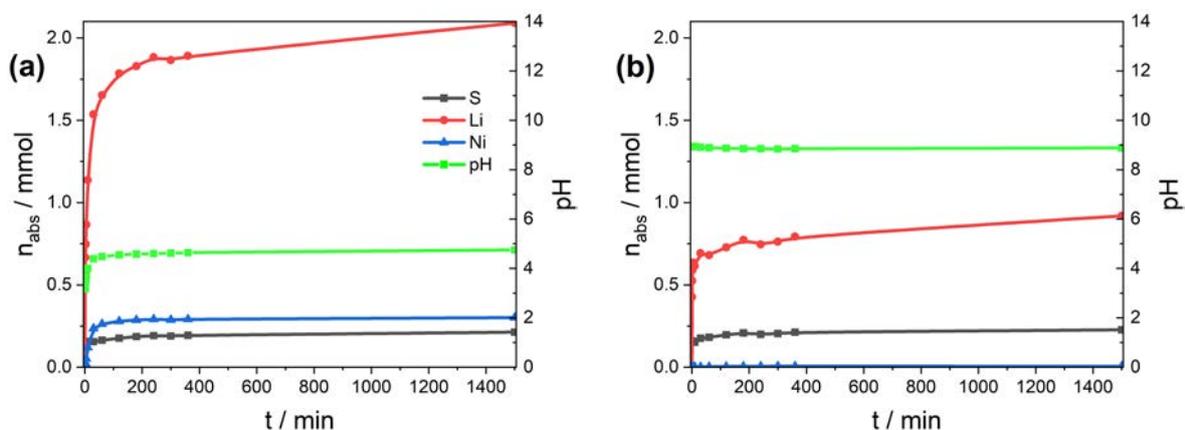


Abbildung 73: Zeitabhängiges Verhalten der in der Pufferlösung nachgewiesenen Lösungsspezies sowie des pH-Wertes, (a) pH-Wert 3 bei $t=0$; (b) pH-Wert 9 bei $t=0$.

In den Messreihen wurden Prozessfenster in der chemischen Behandlung identifiziert, in denen charakteristische Degradationsprozesse ablaufen. Im Umkehrschluss wurden die Prozessparameter dahingehend angepasst, Degradationen zu minimieren.

Neben der Elementanalytik wurde entlang der Prozessketten zudem die Auswirkungen auf die Struktur der Aktivmaterialien mithilfe der Ramanmikroskopie untersucht und auch die mittlere Oxidationsstufe der Übergangsmetalle als elektrochemische Eigenschaft überprüft. Dabei wurden insbesondere Einflüsse von Prozessstufen, wie Temperatur, Delithierung durch Kontakt des Materials mit wässrigen Phasen oder aufgrund der „Batteriegesundheit“ (SoH) untersucht. Begleitet wurden alle Studien zudem durch morphologische Begutachtungen mittels REM.

6.3 Nachhaltigkeitsuntersuchungen zum stofflichen Recycling

Für die Nachhaltigkeitsuntersuchungen zum Recyclingverfahren wird auf die Umweltmanagementmethode des Life Cycle Assessment (LCA) in Anlehnung an die Normen ISO 14040 (DIN 14040:2006-10)/ 14044 (DIN 14044:2006) zurückgegriffen. Zusätzlicher Teilaspekt ist die Analyse des Prozesswassers hinsichtlich dessen prozessbedingter Kontamination.

Als funktionelle Einheit für die Recyclingsysteme wird 1 kg Kathodenrezyklat ($\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$, NMC111) festgelegt. Die ökologische Zielkenngröße stellt die prozessbedingte Klimawirksamkeit dar, sodass nach der Wirkungskategorie des Treibhauspotentials, gemessen in kg CO_2 -Äquivalente, ausgewertet wird. Für die Modellierung und Berechnung wird die Ökobilanzierungssoftware Sphera LCAFE eingesetzt, als Methode für die Wirkungsabschätzung wird auf CML 2001 (Bruijn et al. 2004) zurückgegriffen. Die zu untersuchenden Produktsysteme sind das direkte wasserstrahl-basierte und ein mechanisch-hydrometallurgisches Referenzverfahren. Neben den Recyclingverfahren sind auch Downstream-Prozesse für die weitere Verwertung der Batterieperipherie berücksichtigt (Abfallbehandlung, Recycling von Aluminium, Kupfer und Stahl).

6.3.1 Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI)

Der wasserstrahl-basierte Prozess zur Rückgewinnung der Kathodenaktivmaterialien ist den direkten Recyclingverfahren zuzuordnen (vergleiche hierzu Harper et al. (Harper et al. 2019)). Die Sachbilanzdaten sind durch die ERLOS GmbH direkt bei der Produktionsumgebung erhoben (Primärdaten) und in Kurz et al. (Kurz et al. 2021) publiziert. Das Referenzverfahren

stellt ein mechanisch-hydrometallurgisches Recycling dar. Hier ist eine anschließende (Re-)Synthese erforderlich, um die o.g. funktionelle Einheit abbilden zu können. Die Sachbilanz-Datensätze für die mechanisch-hydrometallurgische Aufbereitung sind Mohr et al. (Mohr et al. 2020) und Peters et al. (Peters et al. 2021) entnommen. Die Sachbilanz-Datensätze für die anschließende Synthese NMC111 sind Dai et al. (Dai et al. 2019a) entnommen. Für das Recycling der Aluminiumfraktion aus den demontierten Batteriesystemen, -modulen und -zellen entstammen die Daten Wang et al. (Wang 2013). Für das Aufbereiten des gesammelten Kupfers sind LCI-Daten von Hong et al. (Hong et al. 2018) übernommen. Elektronik- und Plastikkomponenten werden der energetischen Verwertung zugeführt, hierfür ist auf generische Datensätze aus den LCI-Datenbanken zurückgegriffen worden. Wir haben auf die Batteriezusammensetzung von Dai et al. (Dai et al. 2019a) zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um eine Traktionsbatterie mit NMC111 als Kathodenaktivmaterial.

Die genutzten generischen Datensätze sind in Anhang B aufgelistet.

6.3.2 Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

Der Untersuchungsrahmen dieser LCA stellt die Verwertungsphase (End-of-Life, EoL) von LIB dar (gate-to-grave). Die EoL-Allokation findet entsprechend der Avoided burdens-Methodik (vgl. Frischknecht (Frischknecht 2010)) statt, so werden durch Recycling zurückgewonnene Materialien oder Energie entsprechend vergütet und dem Produktsystem gutgeschrieben.

Bei beiden Verfahren übersteigen die erzielten Gutschriften die mit dem Recycling verbundenen Lastschriften deutlich, siehe Abbildung 74. Damit bieten beide Verfahren große Potentiale in der Reduktion von THG-Emissionen der Lebenszyklen von LIB. Die Gutschriften unterscheiden sich im Wesentlichen durch die beim indirekten Recycling zurückgewonnenen Lösemittel und den Anodengraphit. Diese Fraktionen gehen beim direkten Recycling verloren. Bei den Lastschriften zeigen sich die Vorteile des direkten Recyclings. Durch Umgehen der hydrometallurgischen Zergliederung und anschließenden Re-Synthese hinzu den Kathodenaktivmaterialien lassen sich signifikante THG-Emissionen einsparen. Weitere Einsparpotentiale beim direkten Recycling ließen sich durch separater Prozessierung der Anoden und Rückgewinnung des Anodengraphits realisieren.

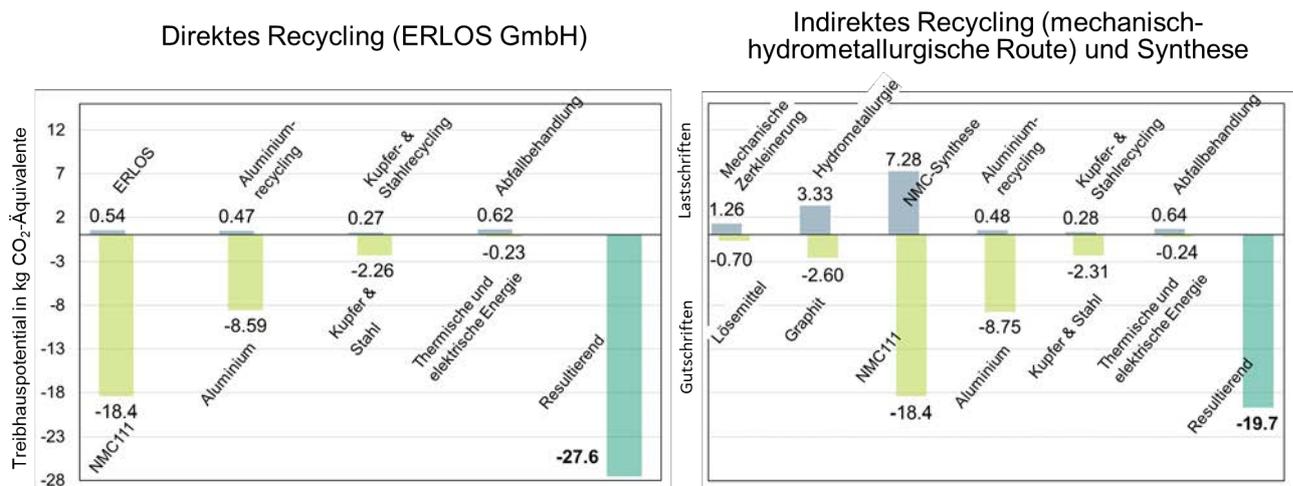


Abbildung 74: Wirkungsabschätzung für das Treibhauspotential für die Produktion von 1 kg Kathodenzyklat (NMC111) via direktem (links) und indirektem (rechts) Recycling.

6.3.3 Auswertung und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Sachbilanz zeigen vollständige Verwertungswege für EoL-Traktionsbatterien auf. Alle Komponenten sind berücksichtigt und entweder stofflich oder energetisch verwertet. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung beruhen auf der Annahme gleichwertiger Qualität von Rezyklaten und Primärmaterialien. Dies trifft für die Kathodenaktivmaterialien aus dem direkten Verfahren nicht zu. Folglich ist der oben dargestellte Vergleich zum System des indirekten Recyclings nicht vollständig konsistent. Der direkten Rückgewinnung muss eine Aufbereitung des Aktivmaterials nachgelagert werden, um batteriefähige Qualität zu erreichen. Dies ist beispielsweise durchgeführt in (Gao et al. 2020; Jiang et al. 2022; Xu et al. 2021; Wu et al. 2021). Eine solche Nachlagerung führt zu zusätzlichem ökologischem Aufwand und ist damit als signifikante Parameter zu bewerten. Gao et al. (Gao et al. 2020) und Xu et al. (Xu et al. 2021) demonstrieren ein hydrothermales Aufbereitungsverfahren, welche THG-Emissionen in Höhe von 1,28 – 1,54 kg CO₂-Äquivalente aufweisen. Durch Nachlagerung eines solchen Verfahrens würden sich folglich die Lastschriften erhöhen und die resultierenden ökologischen Vorteile auf 26,32 – 26,06 kg CO₂-Äquivalente (- 5,6 %) reduzieren. Das direkte Recycling reagiert damit leicht sensitiv auf eine nachgelagerte Aufbereitung. Schlussfolgernd bleiben die Vor- und Nachteile im Vergleich zur indirekten Route, wie sie in der Wirkungsabschätzung aufgezeigt wurden, bestehen. Das Umgehen der Zergliederung und der Re-Synthese heben bedeutsame ökologischen Potentiale. Zur Optimierung der Prozesskette, neben einer angegliederten Aufbereitung wird nahegelegt das Rückgewinnen des Anodengraphits ebenfalls zu erproben und gegebenenfalls in die Prozesskette zu integrieren.

6.3.4 Prozesswasseranalyse

Das zur Rezyklatrückgewinnung eingesetzte Prozesswasser wird zyklisch verwendet und alle 4–6 Monate ausgetauscht. Um zu klären, wie stark das Abwasser mit umweltschädlichen Stoffen belastet ist und im Extremfall belastet werden sein kann, sollen systematische Untersuchungen durchgeführt werden. Während der Projektlaufzeit wurden hierzu zu unterschiedlichen Zeitpunkten einzelne Stichproben des Prozesswassers entnommen und hinsichtlich der enthaltenen Stoffe sowie deren Konzentrationen analysiert.

Es zeigt sich, dass mit zunehmenden Zyklenanzahl des Prozesswassers auch die Schadstoffintensität deutlich zunimmt. Zum Zeitpunkt der Entsorgung (Abwasser) weist das Prozesswasser einen im Vergleich mit dem BSB₅ (Biologischer Sauerstoffbedarf über 5 Tage) um den Faktor 11 höheren CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf) auf. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass die organischen Inhaltsstoffe des Abwassers schwer biologisch abbaubar sind und als persistent bezeichnet werden können. Neben organischen Inhaltsstoffen werden in dem Prozesswasser auch zahlreiche anorganische Verunreinigungen detektiert. Besonders auffällig ist die hohe Fluoridbelastung des Abwassers. Maßgebliche Fluoridquelle im Recyclingprozess ist das Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆) aus dem Elektrolyten. Bei Kontakt des Elektrolyts mit Wasser zerfällt das Leitsalz, wodurch unter anderem Fluorwasserstoffsäure gebildet wird. Dem Prozesswasser wird Natronlauge hinzugegeben, wodurch der pH-Wert des Prozesswassers in den basischen Bereich angehoben wird. Dies hat eine Deprotonierung der Fluorwasserstoffsäure zur Folge, wodurch Fluor im Prozesswasser überwiegend als Fluorid (F⁻) vorliegt und analytisch erfasst werden kann. Neben der Bildung von Fluorwasserstoffsäure bringt der Zerfall des Leitsalzes bei Wasserkontakt die Verbindung POF₃ hervor, welche mit weiterem Wasser zu HPO₂F₂ weiterreagiert. Der Gesamt-Phosphor umfasst dabei alle organischen als auch anorganischen Phosphorverbindungen, die im Abwasser vorliegen.

Die Analyseergebnisse können dem Anhang C entnommen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Belastungen im zu entsorgenden Prozesswasser generell im niederschweligen Bereich liegen, allerdings für eine Entsorgung im kommunalen Abwassersystem zu hoch sind. Daher wird empfohlen, das Prozesswasser weiterhin regelmäßig durch eine spezialisierte Fremdfirma abholen und entsorgen zu lassen. Die Installation einer werkseigenen Abwasseraufbereitungsanlage wird für die ERLOS GmbH aufgrund der geringen Abwassermengen nicht wirtschaftlich sein.

6.4 Rückführung des Rezyklats in den Kreislauf

Zielstellung in diesem Arbeitspaket war die Entwicklung eines Rezeptes für eine stabile, weiterverarbeitbare Paste aus NMC-Material mit einem definierten Anteil an Rezyklatmaterial aus dem direkten Recycling. In einem weiteren Schritt sollte diese Paste zu neuen Elektrodenfolien verarbeitet werden und diese abschließend elektrochemisch charakterisiert werden. Nachfolgend wurden alle Teilschritte und Ergebnisse im Projekt chronologisch dargestellt.

6.4.1 Pastenherstellung/-entwicklung

Das durch die BTU/HSE vorevaluierten Rezyklat (Hauptanteil NMC 111) wurde anteilig mit Frischmaterial, ebenfalls NMC 111, versetzt und zu wasserbasierten Pasten mit nominellem Aktivmaterialanteil von 92 % verarbeitet. Die tatsächlichen NMC-Anteile in der Rezeptur wichen durch den Einsatz des Rezyklats ab, da dieses nur zu 85 Gew.-% NMC enthielt. Für die elektrochemische Charakterisierung zur Festlegung der C-Raten wurde daher ein Korrekturfaktor eingeführt.

In mehreren Iterationsschleifen wurden Pastenrezepturen für die Einarbeitung von einem gewissen Rezyklatanteil erarbeitet. Hierfür wurde eine Konzentrationsstudie mit dem rezyklierten NMC-Material durchgeführt. Der Anteil an rezykliertem Material betrug 5%, 10%, 15%, 50% sowie 100% am eingesetzten NMC. Bei Rezyklatanteilen ≥ 20 % traten Unverträglichkeiten bei der Schichtbildung auf (vgl. Abbildung 75a-c). Diese waren zum einen optisch - durch eine inhomogene Erscheinung - und zum anderen mechanisch - durch eine verminderte Haftung zum Untergrund - erkennbar. Die Pastenrezeptur und Beschichtungsparameter wurden im Laufe des Projektes optimiert (vgl. Abbildung 75d-f). Bei den Pasten mit Rezyklatanteil zeigte sich in der Verarbeitung zudem eine deutliche Viskositätserhöhung. Diese kann auf den Restanteil des PVDF-Bindesystems zurückzuführen sein oder auf die veränderten Oberflächeneigenschaften des Rezyklatmaterials.

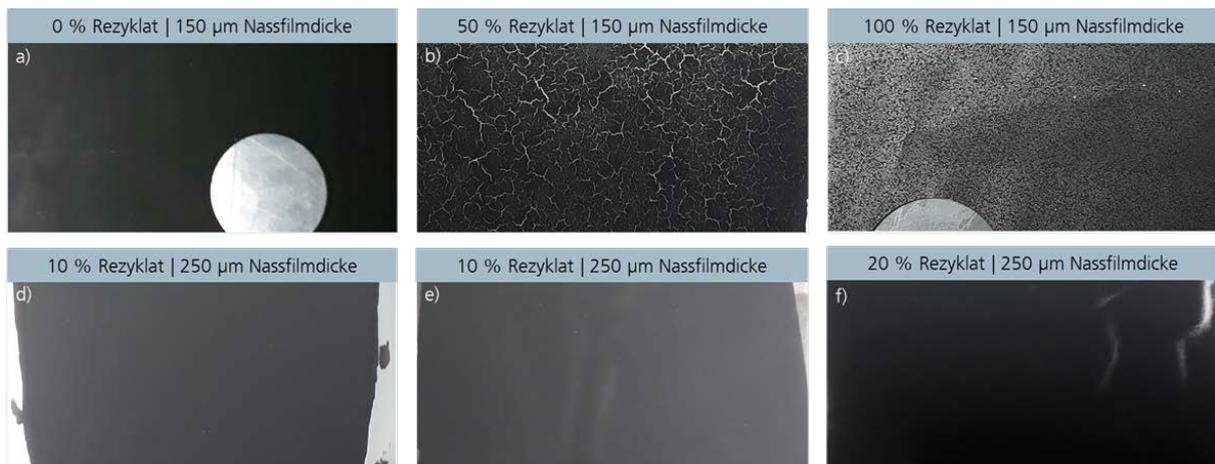


Abbildung 75: a-c) Erste Beschichtungsversuche ohne Beimengung von Binder; d-f) Optimierte Pastenrezeptur mit angepasster Nassfilmdicke für die spätere elektrochemische Charakterisierung.

6.4.2 Elektrochemische Charakterisierung

Die oben beschriebenen Elektroden wurden zu Testzellen aufgebaut (vgl. Abbildung 76) und einem C-Ratentest (0,2C – 5C) unterzogen.

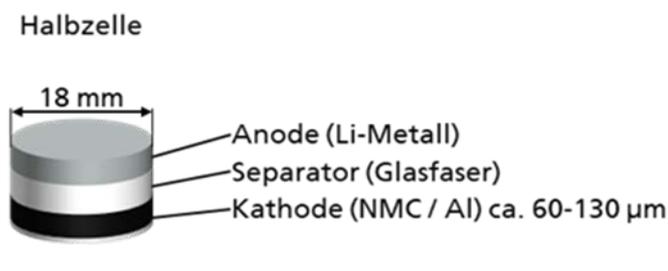


Abbildung 76: Aufbau der Halbzelle für EL-Cell-Testgehäuse (links); EC-Cell-Zelle (rechts).

Bei geringen C-Raten zeigten alle Elektroden eine elektrochemische Aktivität (siehe Abbildung 77), was darauf schließen lässt, dass das Material durch den Recyclingprozess nicht zerstört wurde. Jedoch lässt sich auch ableiten, dass bei erhöhtem Rezyklatanteil die Eigenschaften der EoL-Zelle einen erheblichen Einfluss auf die Performance bei der Rückführung hat. Eine gezielte Aufbereitung des Aktivmaterials könnte der Alterung entgegenwirken und die Performance deutlich steigern. Eine Untersuchung dieses Aspekts wurde im Projekt nicht vorgesehen.

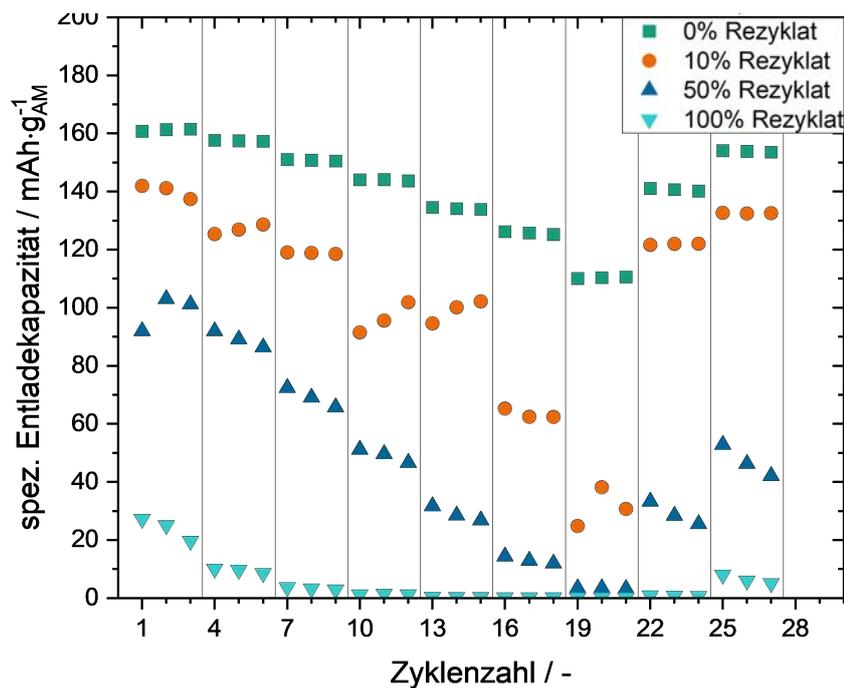


Abbildung 77: Untersuchung der elektrischen Performance anhand eine C-Ratentests (Auftragung der spez. Entladekapazität) bei ausgewählten Rezyklatanteilen.

Einige Zellen wurden direkt nach dem C-Ratentest einer Langzeitzyklisierung unterzogen (Abbildung 78). Es konnte gezeigt werden, dass auch bei einem anteiligen (10%) Wiedereinsatz des Rezyklats die Zelle mit zusätzlich 300 Zyklen belastet werden konnte.

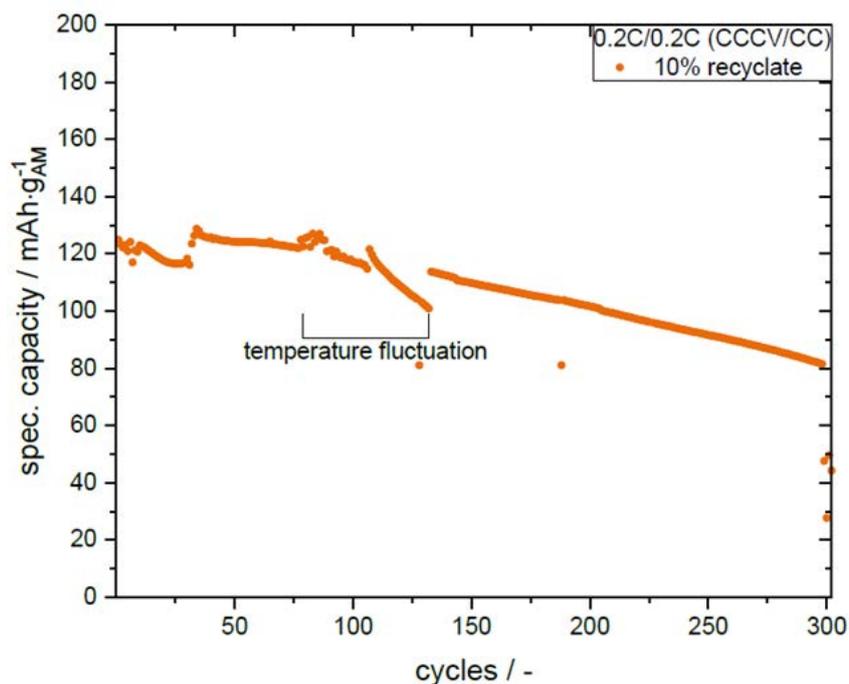


Abbildung 78: Untersuchung der Langzeitstabilität im Anschluss an den C-Ratentest mit 10 % Rezyklatanteil.

6.4.3 Zusammenfassung

Innerhalb der Projektlaufzeit konnten Elektrodenpasten mit bis zu 92 Gewichtsprozent NMC111 hergestellt und verarbeitet werden. Bei Rezyklatanteilen ≥ 20 Gew. % traten Beschichtungsfehler auf. Die beschichteten Elektroden wurden zu Laborzellen konfiguriert (Halbzelle vs. Li-Metall) und durch C-Ratentests (0,2C –5C) hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften evaluiert.

Es zeigte sich, dass ein direkter Austausch von NMC111-Frischmaterial durch NMC111-Rezyklat immer zu einer stark verringerten elektrochemischen Aktivität der Zelle führt. Weiterhin zeigten sich in einigen Chargen auch bei bereits geringen Rezyklatanteilen Einschränkungen in der elektrochemischen Performance. Rezyklat kann somit nicht 1:1 wie Frischmaterial eingesetzt werden. Es ist eine gezielte Vorbehandlung des NMC-Rezyklats, z. B. Reinigung notwendig.

Das Konsortium wird in Folgeprojekten untersuchen inwieweit einfache Aufbereitungs- und Refreshmentprozesse (beispielsweise Temperaturbehandlungen oder galvanische ReLithierung) genutzt werden können um die elektrochemische Aktivität des Rezyklats zu verbessern und somit eine kostengünstige Rückführung der Rezyklate in den Stoffkreislauf ermöglicht werden kann.

7 Demontagegerechte Batteriegestaltung

Batteriesysteme unterscheiden sich in Ihrem Aufbau sehr stark. Dies rührt einerseits durch ihre Anwendung als Antriebs-, Hybrid- oder auch NV-Batterie, aber auch in der unterschiedlichen Zellgeometrie wie Rund-, Pouchzellen und prismatische Zellen. Die Hersteller verfolgen hier unterschiedliche Architekturkonzepte, welche zu einer hohen Vielfalt bei den eingesetzten Batteriesystemen führt. Derzeitige Batteriesysteme orientieren sich im konstruktiven Aufbau an den individuellen Montageabläufen, und sind nicht standardisiert. Die Unterschiede entstehen nach Zellfabrikation beim Aufbau der Module sowie in ähnlicher Form auch bei der Integration der Module auf Systemebene. Damit ist eine Demontage heute noch individuell und unterschiedlich aufwendig. Gleichzeitig liegt der Fokus der Fahrzeughersteller wenig bei einer Erhöhung der Wiederverwendbarkeit der eingesetzten Komponenten oder Module. Das führt zu nicht lösbar verbundenen Komponenten und zu einer notwendigen grundstofflichen Zerlegung bzw. Trennung auch von nutzbaren gebrauchten Teilsystemen und Komponenten.

Ebenso ist das Handling von gebrauchten oder defekten Batteriesystemen mit Risiken verbunden, wie zum Beispiel einer - von außen betrachtet - spontanen Entstehung eines Brandes. Das thermische Durchgehen („thermal runaway“) von Lithium-Ionen-Batteriesystemen birgt die Gefahr des Übergreifens auf im selben Raum oder Transportfahrzeug befindliche Batteriesysteme, weshalb ein thermisches Durchgehen frühzeitig erkannt und das betreffende System separiert und gekühlt werden sollte.

7.1 Designleitfaden

Um einen ersten methodischen Ansatz einer demontagegerechten Batteriegestaltung zu entwickeln ist ein Designleitfaden erarbeitet worden. Dazu sind im ersten Schritt die typischen in einem Batteriesystem vorkommenden Verbindungen zwischen dem Gesamtsystem und den Modulen und zwischen den Modulen und den Einzelzellen analysiert und hinsichtlich der jeweiligen Anforderungen an die Verbindung bewertet worden. Zusätzlich sind die Fügeverfahren nach DIN 8593 mittels eines Bewertungsschlüssels auf die Erfüllung der im ersten Schritt festgestellten Anforderungen untersucht und so die für die Verbindungen theoretisch nutzbaren Verbindungsarten hergeleitet worden.

Im Mittelpunkt des methodischen Ansatzes steht die Bewertung der Verbindungsarten hinsichtlich der automatisierten Demontagegerechtheit und einer hohen Wiederverwendbarkeit. Dazu wird die Demontage mittels zerstörungsfreien Lösens der Verbindung, Abtrennen der Verbindungsstelle von dem Bauteil, Zerstören der Verbindung und der Verzicht auf die Demontage betrachtet.

Bei den Verbindungen innerhalb eines Batteriesystems wird unterschieden zwischen Verbindungen, die zwingend gelöst werden müssen, um das Modul aus dem Batteriegehäuse oder die Zelle aus dem Modul zu entnehmen und Verbindungen deren Demontage nicht zwingend notwendig ist. Der Leitfaden bewertet die Demontagemöglichkeiten unter der Prämisse, dass das Batteriesystem komplett zerlegt wird, um anschließend die Zellen weiterzuverwenden. Daher müssen Verbindungen, die für die Entnahme der Zelle nicht zwingend zu lösen sind, auch nicht demontagegerecht gestaltet werden. Jedoch bedingt dies, dass die nicht demontierbaren Bauteile nicht wiederverwendet werden können bzw. in einem nachträglichen Schritt aufbereitet werden müssen und eine Reparatur erschwert wird. Bei einem Fokus auf den Austausch einzelner Module, Zellen oder anderer Bauteile müssen die hinterlegten Werte in der Systematik angepasst werden. Durch die Erhöhung des Parameters „Wert bei Wiederverwendung“, fokussieren sich die empfohlenen Verbindungsarten stärker auf die zerstörungsfrei zu lösenden Verbindungen.

7.1.1 Ergebnisse mechanische Verbindungen

Aus dem erstellten Leitfaden ist ersichtlich, dass Verbindungen die auf dem Verschweißen oder dem Umformen von zu fügenden Blechen beruhen nicht demontagegerecht sind. Zum Lösen der Verbindung muss entweder die Verbindung zerstört werden (beispielsweise durch das Abfräsen der Verbindungsstelle oder Aufbiegen der Bleche) oder es muss eine Geometrie vorgesehen werden, die ein Abtrennen der Verbindung ermöglicht.

Die Verbindungsmöglichkeiten Ineinanderschieben, Federnd Einspreizen, Schrauben, Klemmen, Verspannen und Nieten werden mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen als demontagegerecht bewertet. Insbesondere werden folgende Verbindungen als gut bewertet:

- Ineinanderschieben
 - Gegen unbefugte Demontage und als Berührschutz ist eine zusätzliche Sicherung vorzusehen.

- Ineinandergeschobene Verbindungen sind leicht zu demontieren und die Bauteile lassen sich ohne Einschränkungen weiter nutzen.
- Greifpunkte zum Lösen der Verbindung sind zwischen verschiedenen Verbindungen zum Ineinanderschieben nicht einheitlich. Das erschwert eine flexible automatisierte Demontage verschiedener Batteriesysteme.
- Schrauben
 - Schraubverbindungen können sowohl zerstörungsfrei gelöst werden als auch durch Zerstörung der Schraube.
 - Eine Zerstörung der Verbindung wird als vorteilhaft hinsichtlich der Flexibilität bei verschiedenen Schraubverbindungen (unterschiedliche Schraubköpfe) bewertet. Bei einer großen Anzahl an Verbindungspunkten kann damit auch der Aufwand der Demontage verringert werden. Sollte das Schraubgewinde in einem der Bauteile realisiert sein, muss dieses Bauteil nach der Demontage jedoch aufbereitet oder nicht sortenrein stofflich recycelt werden.
- Verspannen
 - Ebenso wie Schraubverbindungen können Spannverbindungen je nach Spannmittel gut gelöst (beispielsweise verschraubte Zuganker) oder zerstört (beispielsweise Umreifungsbänder aber auch verschraubte Zuganker) werden.
- Nieten
 - Nieten müssen zur Demontage aufgebohrt werden. Da dabei jedoch nur der Niet zerstört wird wirkt sich dies nicht nachteilig auf die Wiederverwendung der Bauteile aus.
 - Der erhöhte Aufwand des Aufbohrens wird durch eine gute Standardisierbarkeit kompensiert, da das Aufbohren mit verschiedenen Bohrköpfen für unterschiedlichste Fügepunkte genutzt werden kann.

Für den bewerteten Fall der kompletten Demontage einer Batterie ist für die Demontage der Kabelbäume das Abtrennen der Kabel als am wenigsten aufwendig bewertet. Halterungen, Stecker oder Kabeldurchgänge in Gehäusen müssen so nicht demontiert werden. Beim Abtrennen von Kabeln ist auf eine Potentialfreiheit zu achten und ein Sicherheitskonzept zum Verhindern von Kurzschlüssen umzusetzen.

Soll zusätzlich zu den Zellen auch das Gehäuse oder BMS weiterverwendet werden, müssen die entsprechenden Bauteile in einem zweiten Arbeitsschritt aufbereitet werden. Sollten verschiedene Batteriesysteme in einer Demontageanlage verarbeitet werden, kann durch eine entsprechende Sortierung die nachgelagerte Aufbereitung auch sortenrein geschehen.

Ist ein zusätzlicher Aufbereitungsschritt nicht gewollt oder soll bei einer Reparatur der Kabelbaum weiter genutzt werden, sind Steck- oder Schraubverbindung vorzusehen. Schraubverbindungen wurden auf Grund der bereits vorhandenen Standardisierung von Schrauben im Gegensatz zu Steckverbindungen als in der Demontage weniger aufwendig bewertet. Durch die kleine Schraubengröße muss dies im Sonderfall „Stecker“ jedoch noch weiter verifiziert werden.

Zum Abdichten z. B. zwischen den verschiedenen Teilen des Batteriegehäuses wird der Einsatz von elastischen Dichtungen wie zum Beispiel Aufsteckdichtungen oder gespritzte Dichtungen empfohlen.

Eine demontagefähige Zellkontaktierung ist der anspruchsvollste Teil eines demontagegerechten Batteriemoduls. Auch hier sind lösbare Verbindungen zu empfehlen, doch ist dabei ein höherer elektrischer Widerstand durch die Kontaktierung in Kauf zu nehmen. Als mögliche lösbare Verbindungsarten sind Schrauben, Klemmen, Verspannen oder Bonding (Löten) zu nennen. Pouchzellen ermöglichen weitere Verbindungs-/ Demontagearten wie Nieten oder Durchsetzfügen. Ein weiterer Ansatz ist, Ableiterföhnchen länger auszuführen, um bei jedem Demontageprozess einen Teil abtrennen zu können. Doch keine dieser Verbindungsarten konnte sich aufgrund der Nachteile bei der elektrischen Leitfähigkeit oder des weiterhin bestehenden Forschungsbedarfs in der Industrie zu einer Alternative zur Zellkontaktierung durch Schweißverbindungen durchsetzen. Das am weitesten verbreitete alternative Kontaktierungskonzept ist das Verschrauben.

7.1.2 Ergebnisse Konditionierung / Kühlung

Folgend sind die Ergebnisse zur Demontage der Konditionierung des Batteriesystems erläutert. Zuerst werden die unterschiedlichen Konzepte zur Konditionierung bzw. Kühlung aufgelistet:

- Bei der direkten Konditionierung der Zellen wird ein Fluid vom Batteriegehäuse in das Modul geleitet. Die Zelle wird direkt durch die Umströmung des Fluids (Luft oder nichtleitende Kühlflüssigkeit) konditioniert.
- Bei der Konditionierung des Batteriemoduls werden die Zellen mit einem möglichst guten Wärmeübergang an das Modul angebunden.

- Bei der Konditionierung des Batteriegehäuses werden die Zellen an das Batteriemodul, dieses wiederum mit einem möglichst guten Wärmeübergang an das Batteriegehäuse angebunden.

Die Leitung eines Kühlmediums erfolgt entweder über Schläuche oder in das Batterie- bzw. Modulgehäuse integrierte Leitungen. Die Demontage dieser Leitungen kann nach der Entleerung des Kühlmediums analog zu der Verkabelung geschehen.

Für die gute thermische Anbindung der Zellen an das Modul beziehungsweise des Moduls an das Batteriegehäuse werden meist aushärtende Gap Filler genutzt. Durch ihre klebenden Eigenschaften erschweren sie die Demontage gravierend. Demontagegerechter ist die Verwendung von Thermal Pads. Diese besitzen keine klebenden Eigenschaften, angrenzende Bauteile können daher ohne zusätzlichen Arbeitsschritt entnommen werden.

7.1.3 Grundsätzliche Empfehlungen für demontagegerechte Gestaltung

Über die konkreten Ergebnisse des Designleitfadens hinaus sind grundsätzliche Empfehlungen für die Gestaltung von Traktionsbatterien erarbeitet und folgend dokumentiert worden.

Unabhängig der gewählten Verbindungs- und Trennmethode sollten für die automatisierte Demontage folgende Punkte bedacht werden:

1. Erkennung des Batteriesystems und der Demontagereihenfolge
z. B. über ein auslesbares Label, beispielsweise einen QR-Code
2. Verbindungsstellen reduzieren/ Multihalter zur Halterung mehrerer Bauteile nutzen
 - a. Beispielsweise Schrauben zum Befestigen eines Gehäusedeckels sind auf ein Minimum zu reduzieren, da jede zusätzliche Schraube den Demontageaufwand erhöht
 - b. Um möglichst viele Bauteile mit wenigen Arbeitsschritten zu demontieren können Multihalter genutzt werden. Beispielsweise können sämtliche Kabelhalter an einem zusätzlichen Bauteil befestigt werden, um nur dieses Bauteil statt sämtlicher Halter lösen zu müssen.
3. Erreichbarkeit der Verbindungspunkte
 - a. Lineare Bewegungen des Demontagewerkzeugs vorsehen, z. B. nur in z-Richtung verschrauben

- b. Verbindungspunkte auf einer Ebene konzipieren, so dass der Demontageroboter nur eine Höhe anfahren muss
 - c. Abdeckungen über Verbindungen, wie z. B. den Zellverbindern reduzieren oder zerstörbar gestalten, so dass kein zusätzlicher Arbeitsschritt zum Abnehmen der Abdeckungen notwendig wird.
 - d. Bauraumbedarf für Demontagewerkzeuge beachten.
4. Automatisierte Erkennbarkeit der Verbindungspunkte zur Erhöhung der Flexibilität der Demontageanlage
- a. Optische Bilderkennung durch farbliche Kontraste erleichtern
 - b. Ausweisen anfahrbarer Referenzpunkte
5. Greifmöglichkeiten vorsehen
- a. Stabile, ebene Flächen für Sauggreifer vorsehen. z. B. Moduldeckel ausreichend steif gestalten
 - b. Definierte Geometrien mit Hinterschnitten für Greifer vorsehen
6. Lagegenauigkeit der Bauteile beachten/ biegeschlaffe Bauteile vermeiden
7. Weitere Standardisierungen
- a. Vereinheitlichung der Demontagereihenfolge (z. B. Lösen des Batteriegehäuses – Lösen der Verkabelung bzw. Verschlauchung – Entnahme des Moduls – Öffnen des Moduls – Lösen der Verspannung – Lösen der Kontaktierung – Entnahme der Zellen)
 - b. Demontageschritte auf Taktzeiten abstimmen
 - c. Greifgeometrien standardisieren
 - d. Fügemitte standardisieren

7.2 Sicherheitsbetrachtung

7.2.1 Überwachung im ausgebauten Zustand

Das thermische Durchgehen einer einzelnen Zelle führt nach kürzester Zeit zu einem Brand weiterer Zellen und der gesamten Batterie. Sollte sich die betroffene Batterie zu diesem Zeitpunkt in der Nähe von weiteren Batterien befinden, besteht das Risiko eines Großbrands bei der Lagerung oder dem Transport. Um dieses Szenario zu verhindern, ist das frühzeitige Erkennen von ersten Anzeichen, welche auf ein thermisches Durchgehen hinweisen, notwendig. In diesem Zusammenhang ist das sogenannte Batteriediagnose- und

Kommunikationsmodul (BDK) entwickelt worden. Die Funktion dieses Moduls ist in Abbildung 79 dargestellt. Das BDK-Modul soll über bestehende Schnittstellen an Serien-Traktionsbatterien angeschlossen und an ausgebauten Batterien befestigt werden (Abbildung 80). Es nutzt das in der Batterie verbaute Batteriemanagementsystem (BMS), welches wiederum die batterieinterne Sensorik ausliest. So kann das BDK-Modul genutzt werden, um über Zellspannungen und Zelltemperaturen einen kritischen Temperaturanstieg auch im ausgebauten Zustand zu erkennen. Ein übergeordneter Router kann via enOcean-Funkstandard über eine Distanz von bis zu 50 m kabellos mit einer größeren Anzahl von BDK-Modulen kommunizieren und die Zustände der angeschlossenen Batterien überwachen. Die Bewertung der Informationen findet innerhalb des Routers statt, der einen kritischen Zustand dem Fahrer oder im Lager melden kann.

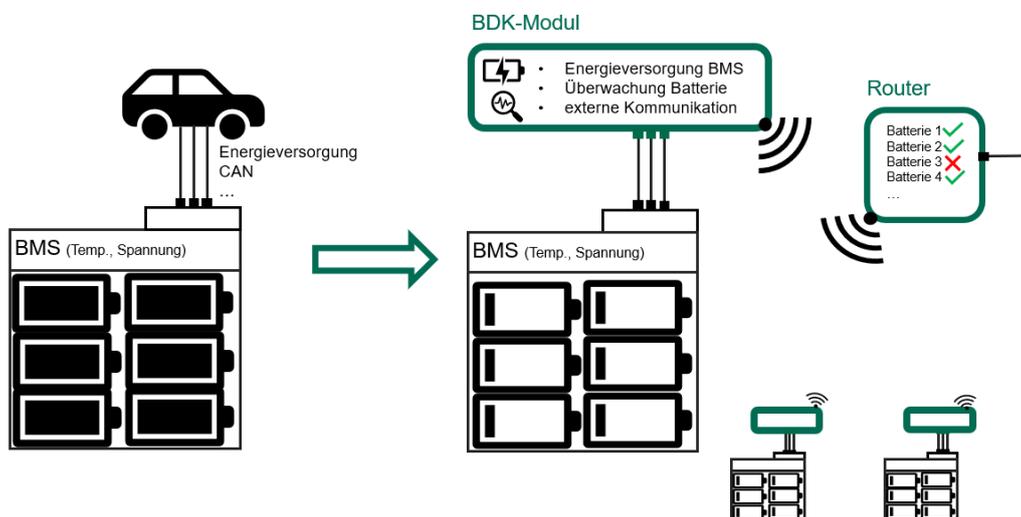


Abbildung 79: Konzept Batteriediagnose und Kommunikationsmodul (BDK).

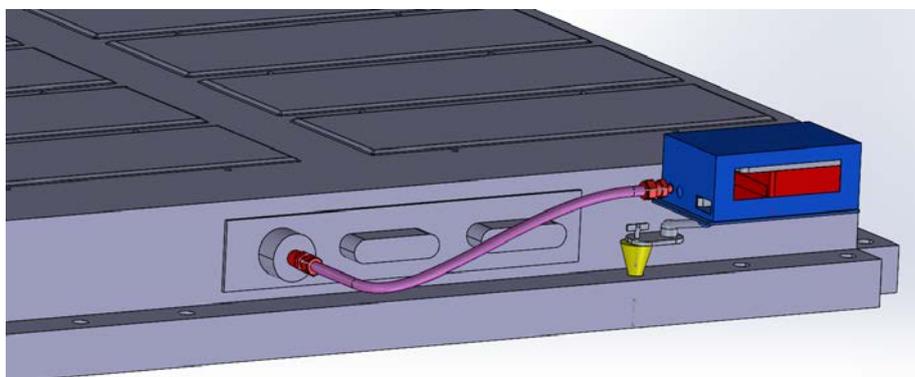


Abbildung 80: Batteriediagnose und Kommunikationsmodul (BDK).

7.2.2 Notkühlung

Um die Sicherheit von gebrauchten oder defekten Batterien zu erhöhen und einen Eingriff bei erkanntem thermischen Durchgehen zu ermöglichen, sind mehrere Notkühlungskonzepte betrachtet worden.

Ein vielversprechendes Konzept zur Notkühlung nutzt die vorhandenen Kühl- bzw. Konditionierkanäle, um diese im Falle einer Erkennung einer zu hohen Temperatur mit CO₂ zu fluten. Bei der Expansion auf Umgebungsdruck kann eine Kühltemperatur von bis zu -80 °C erreicht und damit die Batterie intern sehr effektiv gekühlt werden.

7.2.3 Intelligentes Zellmodul

Um den Anteil der Zellen, die dem stofflichen Recyclen zugeführt werden, zu verringern und gleichzeitig die Menge für den Re-Use Einsatz zu erhöhen, ist es notwendig Informationen über die Historie der Ladezyklen, die Restkapazität und den State-of-Health (SOH) jeder Zelle zu sammeln. Damit ist es möglich einen passenden Einsatzort nach der ersten Nutzung in einer Hochvoltbatterie eines Elektrofahrzeugs zu finden. Eine Sortierung nach Restkapazität und SOH ist notwendig, um eine sichere Nutzung und erwartbare Eigenschaften, auch als wiederaufbereitete Traktionsbatterie, zu gewährleisten.

Hierfür ist ein Konzept entwickelt worden, das ursprünglich „intelligente Zelle“ genannt wurde. Aus den Untersuchungen ergab sich aber, dass eine Umsetzung dieser „Intelligenz“ auf Zellebene zu hohen Aufwänden, Kosten und daher zu wenig Effizienz führen würde. Aus diesem Grund soll die Erfassung und Speicherung der Informationen auf Modulebene stattfinden und die Zuordnung dieser zu den Zellen über eine eindeutige Markierung auf den Zellen.

Wird die Traktionsbatterie nun demontiert, werden die gespeicherten Informationen aus dem Modul ausgelesen und in einer Datenbank gespeichert. Eine automatisierte Sortierung trennt die zum stofflichen Recyclen bestimmten Zellen von den Zellen für den Re-Use oder Re-Manufacturing Einsatz und sortiert gleichzeitig von den Eigenschaften zueinander passende Zellen für den Wiedereinsatz in einem zweiten Leben.

7.3 Konzeption und Modellierung

Aus den voraus gegangenen Arbeiten im Projekt ist ein Konzept einer demontagegerechten Batterie mittels modular erweiterbaren Batteriemodulen entwickelt worden. Dieses bietet eine Modulgröße von 12-16 prismatischen Zellen, wodurch verschiedenste Anwendungsbereiche abgedeckt werden können. Es bietet ebenfalls eine einfache Montage und Demontage der Zellen. Hierdurch können einzelne Teile des Moduls im Servicefall ausgetauscht und sortenrein recycelt werden, wodurch dieses Modul möglichst umweltfreundlich und nachhaltig ist.

Das hierbei entwickelte Rundzellenbatteriemodul ist in Abbildung 81 und Abbildung 82 zu sehen. Es handelt sich um ein skalierbares, demontierbares Modul für zylindrische Batteriezellen des Formats 21700.

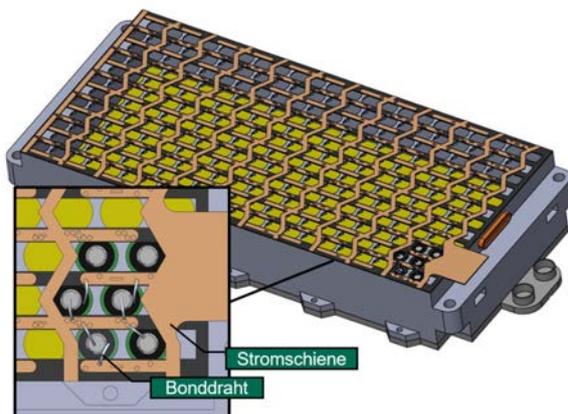


Abbildung 81: Darstellung des entwickelten Batteriemoduls mit Rundzellen.

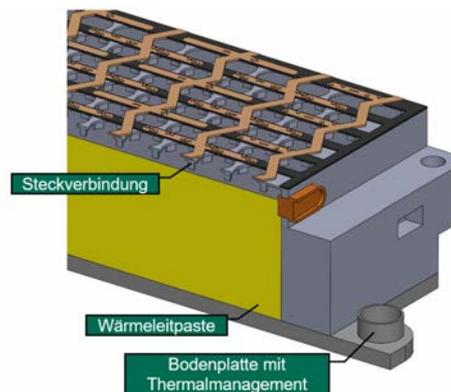


Abbildung 82: Rundzellenmodul in einer Schnittdarstellung.

Die Spannungsabgriffe von Plus- und Minuspol befinden sich jeweils am oberen Ende der Zelle. Somit besteht die Möglichkeit, die untere Stirnfläche der Rundzelle zur Temperierung der Zelle zu nutzen. Da die Wärmeübertragung einer Rundzelle an den Stirnflächen wesentlich höher ist als an der Mantelfläche, ist zudem ein effektives Heizen oder Kühlen der Batterie möglich. Um dies für das gesamte Batteriemodul zu realisieren, sind Kühlkanäle in die Bodenplatte unter den Rundzellen eingebracht. Um eine optimale Wärmeübertragung zwischen der Bodenplatte und den einzelnen Zellen zu gewährleisten, wird eine Wärmeleitpaste (gelb) aufgetragen.

Durch Entfernen der Bodenplatte sind die einzelnen Zellen direkt zugänglich, sodass einzelne Zellen nun ohne größeren Aufwand getauscht werden können.

Auch im Umfang einer vollständigen Demontage kann so das Batteriemodul von einer Seite zerlegt werden, ohne das Modul wenden zu müssen.

Ausgenommen sind hier die Spannungsabgriffe, welche sich auf der Oberseite des Moduls befinden. Die Stromschienen, mit welchen die einzelnen Zellpole über Bonddrähte verbunden werden, sind wiederum in einen Kunststoff (schwarz) eingebettet. Diese Kunststoffummantelung besitzt zum einen eine isolierende Funktion, zum anderen jedoch verbindet sie sämtliche Stromschienen zu einer festen Einheit, was den Aufwand bei der Montage sowie Demontage reduziert.

Angebracht werden die Bonddrähte mittels Laser- oder Ultraschallschweißen.

Gelöst werden kann die Verbindung durch Zerstören der Drahtanbindung, beispielsweise mit einem schneidenden Werkzeug oder auch einem Fräser. Wie in Abbildung 81 zu sehen, sind die Bonddrähte nicht direkt auf der blanken Stromschiene angebracht, sondern auf kleinen kreisförmigen Erhöhungen die sich auf den Stromschienen befinden. Diese Erhöhungen bieten die Möglichkeit, Bonddrähte mit zerstörenden Verfahren zu lösen, um beispielsweise einzelne Zellen tauschen zu können, ohne dabei die Stromschiene zu beschädigen.

Sämtliche Stromschienen sowie Bonddrähte bestehen aus Aluminium, da Aluminium einen guten Kompromiss aus geringem elektrischem Widerstand und Gewicht bietet.

Das aus Kunststoff (schwarz) sowie Aluminium bestehende Stromschienenmodul kann trotz unterschiedlicher Materialien ohne größere Probleme recycelt werden: entweder werden die Stromschienen mechanisch aus dem Kunststoff entfernt, oder das Stromschienenmodul wird vollständig zerkleinert und anschließend stofflich getrennt.

Da die restlichen Gehäusekomponenten ebenfalls aus Aluminium gefertigt sind, wird die Anzahl der insgesamt verwendeten Materialien reduziert, was die Komplexität des Recyclingprozesses reduziert.

Um auch die mit Kühlkanälen und Wärmeleitpaste beschichtete Bodenplatte recyceln zu können, muss hier eine Wärmeleitpaste gewählt werden, welche sich ohne größeren Aufwand und möglichst rückstandslos entfernen lässt. Unter keinen Umständen sollte die Wärmeleitpaste die einzelnen Batteriezellen fest mit der Bodenplatte verkleben.

Die Demontage erfolgt bei diesem Rundzellenmodul in folgenden Schritten:

1. Mitarbeiter führt Sichtprüfung durch und setzt das Modul in die Demontagevorrichtung ein
2. Automatisiertes Lösen der Verschraubung der Modulpole
3. Automatisiertes Trennen sämtlicher Bonddrähte, um somit die Zellen von oben zu lösen

4. Automatisiertes lösen der Schraubverbindungen, welche das Stromschienenmodul auf der Oberseite des Batteriemoduls fixieren
Das aus Kunststoff und Aluminium-Stromschienen bestehende Stromschienenmodul kann nun stofflich getrennt und verwertet werden
5. Automatisiertes rotieren des Batteriemoduls um 180° , sodass nun die Bodenplatte nach oben zeigt
6. Automatisiertes lösen der äußeren Gehäuseschrauben, welche die Bodenplatte mit dem restlichen Gehäuse des Moduls verbinden
7. Entnehmen der Bodenplatte
8. Automatisiertes entnehmen einzelner Batteriezellen, beispielsweise mittels Vakuumheber

In Abbildung 83 ist ein Konzept einer Hochvoltbatterie dargestellt, welche aus den beschriebenen Rundzellenmodulen besteht. Die einzelnen Module werden nebeneinander in einem Aluminiumgehäuse verschraubt. Sämtliche Leitungen für das Thermalmanagement, Batteriemanagement oder Hochvoltleitungen können mittig im Gesamtbatteriegehäuse geführt werden. Je nach benötigter Spannungslage oder benötigter Gesamtkapazität, kann das Gehäuse entsprechend vergrößert oder verkleinert werden um somit Platz für die optimale Anzahl an Modulen zu liefern.

Das Gehäuse der Gesamtbatterie besteht, wie auch die einzelnen Batteriemodule, aus Aluminium.

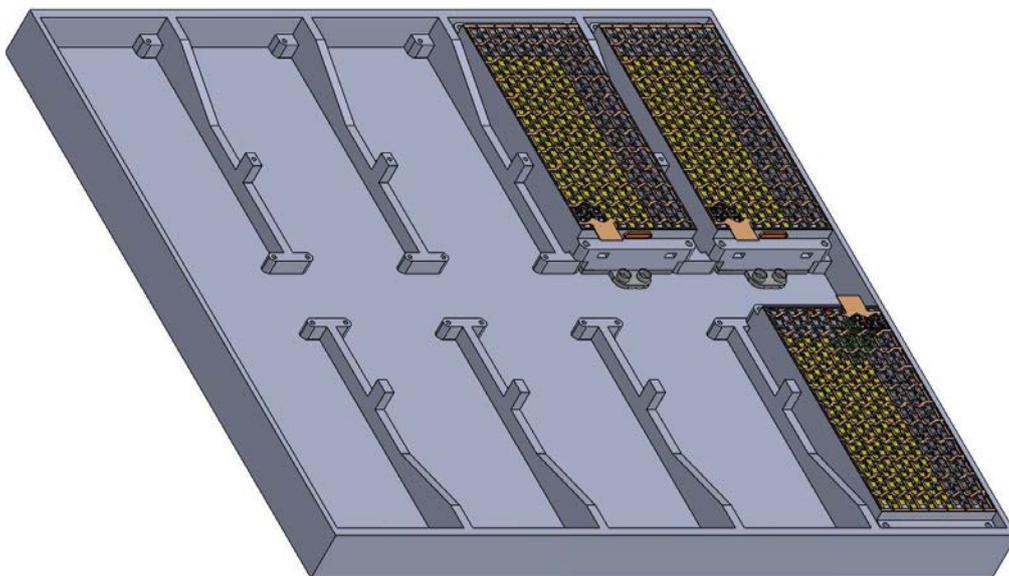


Abbildung 83: Hochvoltbatterie bestehend aus mehreren Rundzellen-Batteriemodulen.

Ein von GreenIng entwickeltes prismatisches Batteriemodul ist in Abbildung 84 zu sehen. Hierbei handelt es sich um ein bauraumoptimiertes, modular erweiterbares Batteriemodul, welches eine Anzahl von 12-16 Zellen beinhalten kann und somit für verschiedenste Anwendungsbereiche geeignet ist. Es bietet eine einfache Montage und Demontage der Zellen, da das gesamte Modulgehäuse durch Ineinanderschieben von Aluminiumblechen und Verspannen mittels Spannbändern gefertigt ist. Prismatische Zellen benötigen im gegensatz zu Rundzellen eine Verspannung der Seitenflächen. Die verschraubten Polverbinder sind ebenfalls geeignet um zerstörungsfrei demontiert zu werden. Hierdurch können einzelne Teile des Moduls im Servicefall ausgetauscht und sortenrein recycelt werden.

Für dieses Batteriemodul wird eine LFP-Zellchemie gewählt sowie als Randbedingung festgelegt, dass das Batteriemodul mit einer maximalen Geschwindigkeit von 1C geladen oder entladen wird. Unter diesen Bedingungen wird eine aktive Kühlung des Batteriemoduls nicht benötigt. Dies verringert die Anzahl von zu demontierenden Komponenten und vereinfacht die Demontage.

Für weitere Untersuchungen und Hardwaretests wurde ein Prototyp dieses Moduls angefertigt (siehe Abbildung 85). Hierdurch konnten konstruktive Probleme identifiziert werden, welche an Gehäuse und Kabelführung auftraten. So stellt sich heraus, dass die Zellen von oben nicht optimal geschützt sind, sollte das Modul herunterfallen.

Im Vergleich zu Version 1 sind die Seitenwände und die Druckplatten an Anfang und Ende des Moduls höher gestaltet worden, um den Batteriezellen mehr Schutz zu bieten. Des Weiteren sind an den Endplatten jeweils zwei Aluminiumrohre angebracht worden, welche neben einer versteifenden Funktion auch die Verschraubung von oben an das Gehäuse ermöglichen.

Das dazugehörige CAD-Modell ist in Abbildung 86 zu sehen. Auch für die zweite Variante ist ein Prototyp gefertigt worden, welcher in Abbildung 87 zu sehen ist.

Die Demontage erfolgt bei dem prismatischen Batteriemodul in folgenden Schritten:

1. Mitarbeiter führt mechanische Sichtprüfung durch und setzt das Modul in die Demontagevorrichtung ein
2. Automatisiertes lösen der Verschraubung der Polverbinder und Entnahme der Schrauben und der Polverbinder
3. Automatisierte Auftrennung der Spannbänder in Querrichtung
4. Automatisiertes Entnehmen des Kabelstranges
5. Automatisiertes Trennen der Spannbänder in Längsrichtung

6. Automatisiertes Entnehmen der Druckplatten an Anfang und Ende des Moduls
7. Manuelle Entnahme der Zellen, der Isolierplatten und der unteren Gehäuseteile aus der Demontagevorrichtung durch Mitarbeiter

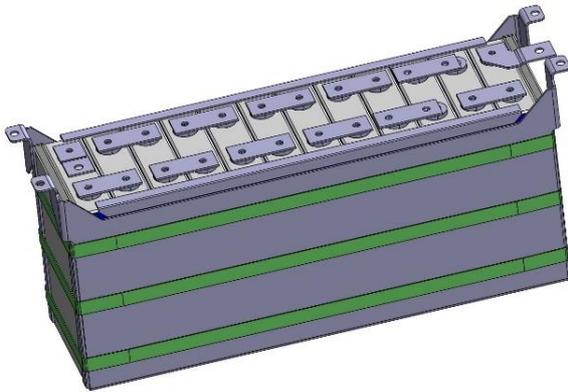


Abbildung 84: CAD-Modells des entwickelten Batteriemoduls bestehend aus prismatischen Zellen der ersten Generation.



Abbildung 85: Prototyp des prismatischen Batteriemoduls der ersten Generation.

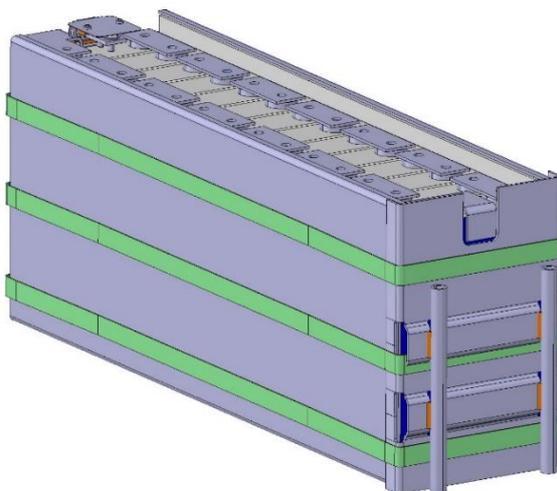


Abbildung 86: Darstellung des CAD-Modells der zweiten Version des prismatischen Batteriemoduls.



Abbildung 87: Prototyp der zweiten Version des prismatischen Batteriemoduls.

7.4 Fazit

Mit der EU Batterieverordnung ist eine gesetzliche Grundlage für die ressourcen-schonende Batteriegestaltung erstellt worden. Darin werden einige Punkte, welche hier im Teilprojekt 2.1 behandelt und erarbeitet worden sind, aufgegriffen. Dies wird in Zukunft dafür sorgen, dass mehr Informationen über die in Verkehr gebrachten Batteriesysteme dokumentiert und auch für die Wiederverwendung in second-life Anwendungen – auch als Traktionsbatterien – zur Verfügung stehen. Ebenso finden sich in der Verordnung Pflichten für die Rücknahme und den

Grad der Wiederverwendung der Komponenten. Dies validiert die Herangehensweise und die Ergebnisse dieses Teils des Projekts.

8 Industrielle Demontage von E-Antriebsaggregaten

Neben der Batterie ist das elektrische Antriebsaggregat (EAA) die zweite stark werthaltige Komponente in Elektrofahrzeugen. Die Elektromotoren bieten u.a. aufgrund ihrer gegenüber einem Verbrennungsmotor einfacheren Baustruktur das Potenzial, die in der Abfallhierarchie nach Kreislaufwirtschaftsgesetz vorgesehene Wiederverwendung von Bauteilen umzusetzen. Zudem werden in der Automobilindustrie heutzutage hochintegrierte Aggregate verbaut, welche mit der Leistungselektronik und dem Getriebe weitere für eine Wiederverwendung geeignete Baugruppen neben der elektrischen Maschine enthalten. Abgesehen von der Verwendung von End-of-Life Aggregaten besteht ein weiteres Anwendungsfeld der automatisierten Demontage in der Verarbeitung von End-of-Line Aggregaten. Diese werden aufgrund nicht bestandener Prüfverfahren am Produktionsende aussortiert, wobei eine Rückführung der darin verbauten neuwertigen Bauteile mehrheitlich nicht stattfindet. Begründet liegt dies in dem erheblichen Aufwand der manuellen Demontage, kombiniert mit einer unzureichenden Gewährleistung hoher, in der Automobilindustrie vorgegebener Qualitätsstandards. Ziel des Teilprojektes 3 im DeMoBat Vorhaben war es daher, im Zuge einer Automatisierung der Demontage elektrischer Antriebsaggregate einen Prozess mit hoher Wiederholgenauigkeit zu realisieren, welcher die sowohl wirtschaftlich effiziente als auch beschädigungsfreie Rückführung der Bauteile in den Produktionsprozess gewährleistet.

8.1 Demontagemodul für elektrische Antriebsaggregate

8.1.1 Demontagesysteme

Besondere Herausforderungen bei der Konzeptentwicklung von Demontagesystemen sind die Vorbereitung auf zukünftige Produktgenerationen durch Anpassungsfähigkeit bei gleichzeitiger Einhaltung ökonomischer Rahmenbedingungen.

Daher wurde das im Projekt entwickelte und erstellte Demontagemodul, als zentraler Baustein des Demontagesystems, stringent so ausgelegt, dass es zukünftig für die Verarbeitung weiterer Produkte oder Modelle angepasst werden kann. In TA 3.4 wurde die Verortung dieses Demontagemoduls im industriellen Umfeld unter Berücksichtigung einer zukünftigen Ausweitung der Produkt-/Modellpalette bearbeitet. Dies umfasst die Betrachtung des

industriellen Anwendungsfalls, bei dem mehrere dieser Module gemeinsam betrieben werden. Der Fokus lag dabei, wie schon in der Entwicklung und Einrichtung des Demontagemoduls, auf einer Ausgestaltung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des Demontageprozesses. Inhaltlich wurde aufgrund des konkreten Anwendungsfalls des assoziierten Partners ZF Friedrichshafen AG der Fokus auf eine in einem Industrieunternehmen verortete Demontageeinrichtung gesetzt, die in erster Linie der Rückgewinnung von Bauteilen zwecks Wiederverwendung dient.

Der Demontageprozess wird analog zu einem Fertigungsprozess als Input-Output-Transformationsprozess gesehen, sodass, ausgehend von der Möglichkeit der Erkenntnisübertragung, unterschiedliche Charakteristika von Produktionsprozessen auf Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall betrachtet wurden. Die Arbeiten zur Ausgestaltung von industriellen Demontagesystemen auf Standortebene umfassten daher in einem ersten Schritt die Erarbeitung einer Übersicht über Optionen der Fertigungsplanung und -steuerung sowie über die Typologie industrieller Produktions-/Fertigungssysteme. Der Fokus wurde bei der Betrachtung auf prozessbezogene Produktionstypen gelegt, da sich diese auf den internen Bereich des Produktionssystems beziehen. Im Gegensatz dazu werden einsatz- und ausbringungsbezogene Produktionstypen durch Einflussfaktoren charakterisiert, die sich auf die äußere Umgebung des Produktionssystems beziehen.

Betrachtungsebenen waren:

- Fertigungsorganisation und -steuerung
- Anordnungstypen
- Ablauftypen
- Steuerungstypen
- Automatisierte Fertigungssysteme
- Logistik
- Materialflusslogistik (fabrikintern)
- Beschaffungslogistik
- Distributionslogistik

Auf diesen Ebenen wurden die Optionen inhaltlich erarbeitet und zu Gesamtkonzepten vereint. Die vergleichende Bewertung wurde auf verschiedenen Betrachtungsebenen mit der Methode des analytischen Hierarchieprozesses (AHP) durchgeführt.

Die entscheidenden Kriterien hinsichtlich der Fertigungsorganisation und -steuerung sind die Anpassungsfähigkeit des Demontagesystems an die Einführung neuer Aggregattypen, die

Anzahl der Prozessausfälle und das Mengen-Zeit-Verhältnis. Im Sinne der Materialflusslogistik sind die entscheidenden Kriterien die Flexibilität der Materialflusssysteme für Änderungen der Demontageplanung und des Demontageprozesses, geringe Gesamtkosten sowie die platzsparende Einrichtung innerhalb der Fabrik. Die Beschaffungslogistik wird nach einer hohen Versorgungssicherheit sowie niedrigen Beschaffungszeiten und -kosten der Aggregate bewertet. Die für die Distributionslogistik gewählten Kriterien sind ein optimaler Servicegrad in Bezug auf die Lieferbereitschaft, geringe Fehlmengenkosten und die große Verfügbarkeit von Warenabnehmern.

Es zeigte sich, dass beim Scale-Up insbesondere die Verwendung eines Transportsystems auf Basis einer Transferstraße sinnvoll wäre, bei der die Antriebsaggregate an Industrierobotern vorbei durch den Demontageprozess geführt werden. Die Prüfung und Sortierung der demontierten Bauteile sollte kontinuierlich an jeder Demontagestation erfolgen und der anschließende Abtransport in ein zentrales Lager durch fahrerlose Transportsysteme (FTS) vorgenommen werden.

In einem weiteren Ansatz wurde anhand produktionswirtschaftlicher Kenngrößen (z. B. Produktionsrate, Auftragsdurchlaufzeit, Umlaufbestände) geprüft, welche Anordnungs- und Ablauftypen sich für das Demontagesystem eignen und welche Art von Fertigungssteuerungsverfahren Vorteile bieten. Dazu wurden Simulationsmodelle erstellt, welche sich in diesen Parametern unterscheiden und somit der Eignungsbewertung dienen. Betrachtete Kriterien waren die Häufigkeit der Herstellung des Produktes (Repetitionstyp), die Materialflusscharakteristik (Fertigungsstrukturtyp) und besonders die Anordnung der Betriebsmittel (Anordnungstyp). Die Fragestellung der standortübergreifenden Vernetzung wurde durch Integration trilokaler Demontagesysteme (Verteilung auf drei Standorte) in die der Simulation zugrundeliegenden Modelle untersucht. Eine Eignungsbewertung der unterschiedlichen Merkmalsausprägungen in den Simulationen wurde im Anschluss durch eine Nutzwertanalyse vollzogen. Bei der Simulation wurden Demontageschritte des Demontageprozesses als Greenfield-Konzeptionen mit ExtendSim-Simulationsmodellen abgebildet.

Die Simulationen ergaben, dass das Ziel möglichst kurzer Durchlaufzeiten am besten durch den Einsatz eines unilokalen Systems mit Push-Steuerung erreicht wird, da ein solches System auch bei erhöhter Nachfrage sehr kurze und stabile Durchlaufzeiten aufweist. Die weiteren Ziele, eine kurze und stabile Lieferzeit, ein hoher Servicegrad und stabile, planbare und dadurch geringe Lagerbestände, wurden hingegen besser durch das unilokale System mit Pull-Steuerung, hier vor allem mit der Kanban-Methode, erreicht.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Ausgestaltung eines spezifischen Demontagesystems stets unter Berücksichtigung der Produktstruktur sowie der mit dem Betrieb des Systems angestrebten Re-X-Optionen erfolgen muss, um eine angepasste Lösung für ein Zielszenario zu erhalten. Für die Verteilung der Demontagetätigkeiten auf unterschiedliche Standorte ist sowohl seitens der Produktstruktur eine Trennung in entsprechende Untereinheiten (Baugruppen) notwendig, als auch die Nähe zum Anlieferer und zum Abnehmer der demontierten Bauteile zu beachten.

8.1.2 Hardware

Automatisierungsgrad

Es wurde das Ziel einer möglichst weitreichenden Automatisierung der Demontage angestrebt, da im Hochlohnland Deutschland eine manuelle Demontage von End-of-Life-Produkten vermutlich nicht ökonomisch darstellbar ist. Ein hoher Automatisierungsgrad bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass dieser auch unter ökonomischen Gesichtspunkten immer tragbar ist. Da auch Robotertechnik und insbesondere die benötigte Sensorik und Greiftechnik mit erheblichen Kosten verbunden sind, kann es sinnvoll sein, einzelne Teilschritte manuell durchzuführen. Letztendlich gilt es, unter gegebenen Randbedingungen einen optimalen Automatisierungsgrad zu ermitteln.

Der für die Demontage des EAA mögliche Automatisierungsgrad liegt prozessbedingt unter 100 %. Dieser hängt stark davon ab, in welchem Zustand die Bauteile nach erfolgter Demontage vorliegen sollen – besonders herausfordernd ist dabei vor allem die zerstörungsfreie Demontage. Da die Anforderungen der OEMs an Bauteile, die einem ReUse zugeführt werden sollen, sehr hoch sind, werden Bauteile idealerweise in Neuteilqualität geborgen, sodass kostenintensive Nachbearbeitungsschritte reduziert werden können. Aus diesem Grund werden einige Bauteile wie beispielsweise der Stator ausschließlich mit Schonbacken gegriffen, die die Oberflächen vor Kratzern o.ä. schützen sollen. Zudem kann das Ziel der Zerstörungsfreiheit Einfluss auf die erreichbare Demontagegeschwindigkeit haben, da ein bauteilschonendes Prozessdesign tendenziell langsamere Robotergeschwindigkeiten, einen höheren Grad der Roboterkooperation sowie eine höhere Anzahl an Werkzeugwechseln bedingt.

Auch Bauteile, die in undefinierten Zuständen vorliegen, sind für die automatisierte Demontage besonders herausfordernd. Um dennoch eine Demontage vornehmen zu können, muss entschieden werden, ob ein manueller Eingriff oder alternativ eine zerstörende Demontage des Bauteils präferiert werden soll. Als Beispiele hierfür sind biegeschlaffe Bauteile zu nennen,

wie etwa das Hauptstromkabel, welches sich frei bewegen kann, aufgrund seiner Steifigkeit jedoch auch immer wieder aus festgeklemmten Zuständen zurückschlägt. An dieser Stelle stellt sich die Frage, ob unter Einflussnahme eines menschlichen Werkers das Hauptstromkabel demontiert wird, oder ob ein Demontageroboter das Kabel kurzerhand durchschneidet. Im EAA sind weitere, auf den ersten Blick nicht erkennbare, biegeschlaflfe Teile vorhanden, beispielsweise die Gummidichtung im Deckel der Leistungselektronik (LE). Sobald der Deckel gelöst wird, hängt diese in einem undefinierten Zustand, sodass keine ausreichende Prozesssicherheit mehr gegeben ist. An den genannten Stellen wird nach jetzigem Stand ein manuelles Eingreifen präferiert.

Weiterhin gibt es Bauteile, die selbst zerstörend nicht zu demontieren sind, wenn umliegende Bauteile nicht beschädigt werden sollen. Beispielhaft sind hier bestimmte Sicherungsringe zu nennen, die aus mehreren Gründen voraussichtlich nicht automatisiert demontiert werden können. Zunächst sind aufgrund teilweise schwerer Zugänglichkeit sowohl die Bauteilerkennung und damit einhergehend die Positionserkennung stark erschwert. Darüber hinaus weisen die vorhandenen Sicherungsringe maximal sehr kleine Ösen zum Greifen auf, können zudem stark verdreht sein und sind somit sehr schwer durch automatisierte Werkzeuge zu greifen.

Werden die beschriebenen Herausforderungen zusammengefasst, zeigt sich, dass der optimale Automatisierungsgrad der Demontage von EAA mindestens aus ökonomischer Sicht unter 100 % liegt. Bei Übertragung auf weitere Produktvarianten ist dies individuell zu beurteilen.

Arbeitssicherheit

Das im CUTEC Forschungszentrum aufgebaute Demontagemodul ist nach EG-Maschinenrichtlinie eine Verkettung von Industrierobotern, die hinsichtlich der Arbeitssicherheit in ihrer Gesamtheit betrachtet wird. Wesentliche Rechtsgrundlage dazu ist die DIN EN ISO 10218 (Teil 2 Robotersysteme).

Die wesentlichen Gefahrenquellen sind das Einquetschen zwischen festen und beweglichen Teilen sowie das Herausschleudern von Bauteilen. Die Kräfte, die durch die Roboterarme aufgebracht werden können, können zu schwersten Verletzungen bis hin zum Todesfall führen. Nicht zuletzt aus Sicht der Arbeitssicherheit wurde von einer Mensch-Roboter-Kollaboration bisher abgesehen, sodass ein paralleles Arbeiten von Mensch und Maschine auf das Teach-In von signifikanten Koordinaten für die Programmierung beschränkt wird.

Die Schutzeinrichtung der CUTEK Demontageanlage besteht aus einer Abzäunung, die das Herausschleudern von größeren Bauteilen konstruktiv verhindert. Der aktuelle Betriebszustand der Anlage ist für die Mitarbeiter durch eine Ampelanlage ersichtlich, magnetische Türverriegelungen verhindern im automatischen Betrieb den unerlaubten Zugang. Die Steuerung von Ampel und Tür erfolgt durch die zentrale Steuersoftware.

Nach DGUV Information 209-074 Industrieroboter wird zwischen drei Betriebsarten unterschieden:

1. Einrichten und Programmieren (z. B. Teach-In):
 - reduzierte Geschwindigkeit (T1)
 - Manuelle Schutzeinrichtungen dürfen geöffnet bzw. unwirksam sein
2. Testen mit Arbeitsgeschwindigkeit
 - Manuell hohe Geschwindigkeit (T2)
 - Schutzeinrichtungen dürfen geöffnet bzw. unwirksam sein
 - Geschützter Standort für den Einrichter
3. Automatischer Betrieb
 - Schutzeinrichtungen müssen geschlossen bzw. wirksam sein

Das Front-End der Steuerung hält für jeden Roboter eine übergeordnete Geschwindigkeitssteuerung bereit, mit der der gesamte programmierte Demontageprozess bzgl. der Ausführungs geschwindigkeit skaliert werden kann. Dies ist aus sicherheitstechnischen Aspekten nötig, um auch bei automatisierter Ausführung von Prozessen den Aufenthalt menschlichen Personals in dem Demontagemodul zu Entwicklungs- und Testzwecken zu ermöglichen. Auf Ethernetprotokollebene können durch Verwendung einer Application-Firewall für ein Perimeter-Netzwerk alle sicherheitsrelevanten Komponenten ohne wesentliche Leistungseinbußen geschützt werden, um das Projektnetzwerk gegenüber Angriffen von außen abzusichern.

Roboter

In der ersten Phase des Projektes wurde der Aufbau des Demontagemoduls im Hinblick auf die Positionen der benötigten Maschinen, Werkzeuge und Ablageflächen geplant und simuliert (Abbildung 88). Dabei wurden auch die Stoffströme der demontierten Bauteile bzw. der noch zu demontierenden Baugruppen des EAA berücksichtigt. Mit fortlaufender Konkretisierung und Umsetzung der Demontagekonzepte haben sich einzelne geänderte Anforderungen ergeben, die zu Umplanungen des Aufbaus geführt haben. Eine nennenswerte Änderung stellt hierbei der Abtransport der demontierten Bauteile und Baugruppen dar, der ursprünglich durch ein Ablagesystem geplant war. Da bei einer industrienahen Anwendung demontierte Bauteile

ohne in Lager abseits der Demontagemodule verbracht würden, wurde im Demontagemodul ebenfalls auf eine Transporteinrichtung als Schnittstelle zurückgegriffen. Die Transporteinrichtung wurde im erstellten Technikum durch ein Förderband realisiert, das groß genug ist, um sämtliche Bauteile des elektrischen Antriebsaggregats simultan zu tragen. Durch die Positionswahl befindet sich das Förderband in Reichweite der relevanten Roboter, sodass eine hohe Flexibilität bezüglich des Demontageprozesses gewährleistet werden kann. Zudem kontrolliert ein über dem Förderband angebrachtes 3D-Kamerasystem den erfolgreichen Prozessfortschritt anhand der abgelegten Bauteile.

Zum Einsatz kommen verschiedene 6-Achs-Roboter der Firma KUKA mit jeweils eigenen Werkzeugwechselstationen. Dabei ist das Technikum aufgrund der sehr unterschiedlichen Demontageanforderungen der Antriebsaggregate sowie nachfolgend der Leistungselektronik in drei Bereiche aufgeteilt – dem Demontagebereich für Getriebe und Motoren, dem Demontagebereich für Leistungselektroniken sowie einen Sonderdemontagebereich. Im Demontagebereich für Getriebe und Motoren dienen zunächst zwei Industrieroboter der Typen KR180 sowie KR70 zur Handhabung und Zerlegung der Aggregate, welche zentral auf einem 2-Achs-Positionierer vom Typ KUKA DKP400 verortet sind. Im Sonderdemontagebereich befindet sich eine Einrichtung zur Demontage von Rotor und Stator. Nach dem Entfernen der Leistungselektroniken werden diese von einem auf einer Lineareinheit (KUKA KL250) verbauten KR16-Roboter in den Demontagebereich für Leistungselektroniken überführt, welcher aus einem KR10-Roboter samt DKP400-Positionierer besteht. Der mobile Roboter wird zudem an beiden Positionierern zum Lösen von Schraubverbindungen verwendet.

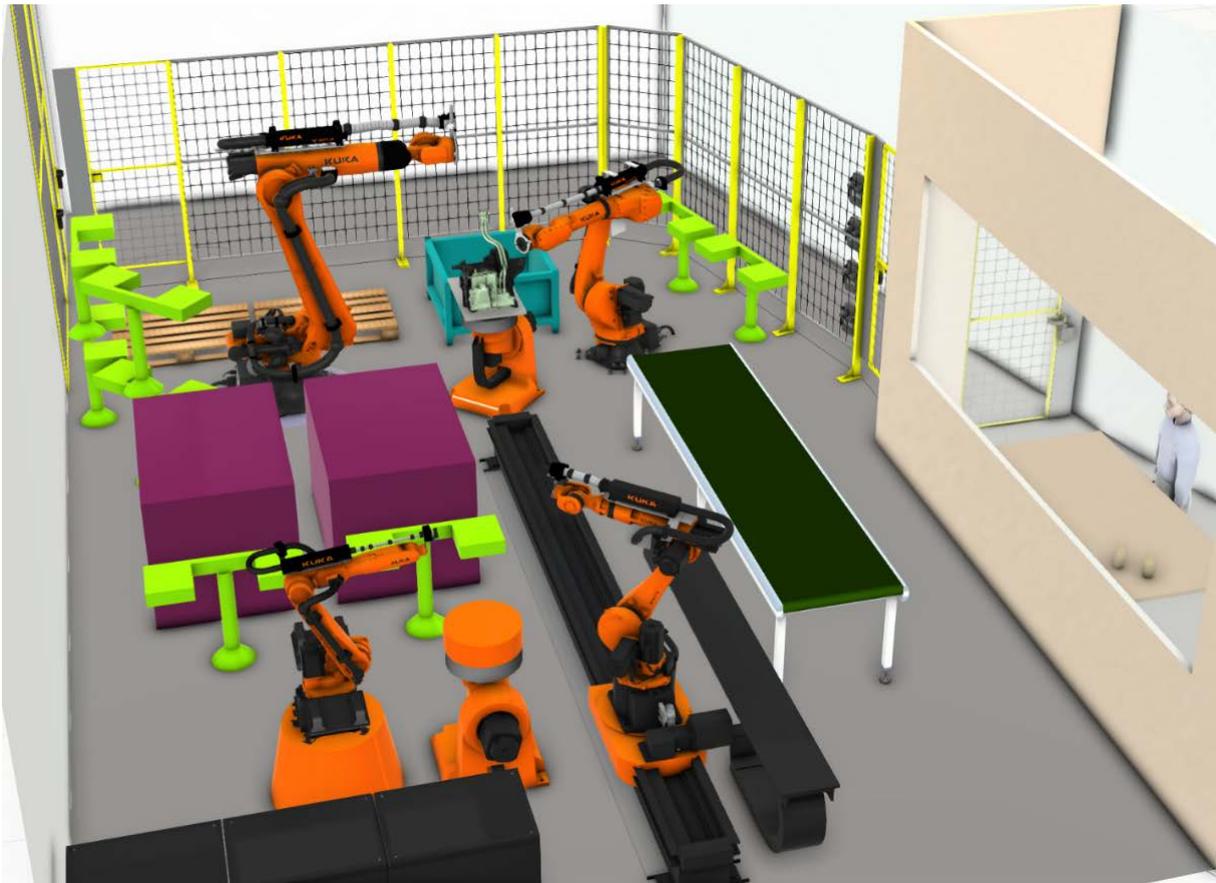


Abbildung 88: Virtuelles Modell des Demontagetechnikums für E-Antriebsaggregate aus der initialen Planung.

Werkzeuge

Für die automatisierte Demontage unterschiedlicher Bauteile werden entsprechend angepasste Werkzeuge benötigt. Für möglichst einfache Wechsel der Werkzeuge wurden mehrere Werkzeugbahnhöfe der Firma Schunk im Demontagemodul installiert, an denen, durch die Baugröße bedingt, mehrere Arten von Werkzeugaufnahmen vorhanden sind. Die besondere Herausforderung des Werkzeugbaus für die automatisierte Demontage besteht darin, Bauteile idealerweise zerstörungsfrei ohne Beschädigung peripherer Komponenten zu bergen. Gleichzeitig gilt es, Werkzeuge so universell wie möglich auszulegen, um zeitaufwändige Werkzeugwechsel zu vermeiden und damit die Demontagedauer zu minimieren. Ein Prinzip, das häufig berücksichtigt wurde, ist die Bevorzugung von Formschluss gegenüber Kraftschluss. Insbesondere durch Kraftschluss können durch hohe, häufig nicht typische Belastungen die zu demontierenden Bauteile verformt und damit für eine Wiederverwendung unbrauchbar werden. Die folgenden vorgestellten Werkzeuge wurden immer wieder in mehreren Iterationen konstruiert, prototypisch getestet und entsprechend modifiziert.

Das erste Werkzeug, welches im Demontageprozess eingesetzt wird, ist die Adapterplatte (Abbildung 89). Diese wird als Handschnittstelle für eine Vielzahl von Demontageschritten benötigt und verbindet das EAA mit dem zentralen Positionierer.

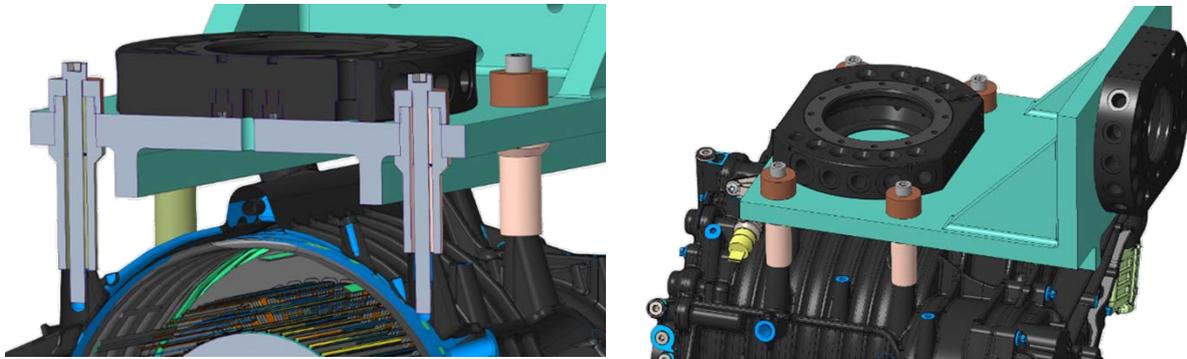


Abbildung 89: CAD-Modell der Adapterplatte zum automatisierten Aufspannen der Aggregate (links: Schnittansicht, rechts: Totale).

Die Adapterplatte wird in vier bereits am EAA vorhandene Gewinde eingeschraubt. In frühen Versionen wurde eine automatisierte Einschraubung der Adapterplatte am EAA geplant, jedoch ist der damit verbundene finanzielle Mehraufwand so hoch, dass zunächst ein manuelles Anschrauben vorgesehen wird.

Das vorliegende EAA weist ein Getriebe auf, das circa einen Liter Getriebeöl enthält. Um das Risiko potenzieller Kontaminationen des Demontagetechnikums mit Getriebeöl zu verringern, wird dieses früh im Demontageprozess ausgebracht. Da das Getriebeöl üblicherweise über die Lebensdauer eines EAA nicht getauscht wird, bestand die Vermutung, dass aus dem Zustand des Öls Rückschlüsse über die Laufleistung und die Restlebensdauer des EAA getroffen werden können [siehe Kapitel 6.3.2]. Aus diesem Grund wird das Getriebeöl zunächst abgelassen und für Analysezwecke aufgefangen.

Nach dem Ablassprozess kann der eigentliche Prozess der Getriebereinigung starten. Dazu sollte das Getriebe mit einem Lösungsmittel ausgespült werden. Im Vorhinein wurden im Hinblick auf unterschiedliche Kriterien (Gefahrenpotenzial, Kosten, ...) verschiedene Lösungsmittel getestet (Abbildung 90), wobei sich Terpentinersatz als am geeignetsten herausgestellt hat.



Abbildung 90: Löslichkeitsproben von Getriebeöl in verschiedenen Lösungsmitteln.

Die Anlage zur Reinigung des Getriebes ist vom eigentlichen Demontagetechnikum ausgelagert und kann parallel genutzt werden. Alle mit dem Terpentinersatz in Kontakt tretenden Teile der Anlage sind zudem lösungsmittelfest. Aus einem Tank wird das Lösungsmittel über eine Pumpe durch eine Leitung hin zu einer rotierenden Edelstahldüse (PicoWhirly der Firma Lechler) befördert, die durch eine Öffnung im Getriebe geführt wird. Das Lösungsmittel wird durch die rotierende Edelstahldüse im Getriebe verteilt und kann anschließend mitsamt den gelösten Getriebeölrückständen abgeführt werden. In einem Benetzungsversuch hat sich gezeigt, dass ein Großteil des Getriebes mit dem Lösungsmittel erreicht wird. Konkret konnte eine nahezu vollständige Reinigung nach drei Reinigungsvorgängen erzielt werden.

Da für die Demontage des Rotors und des Stators aus dem EAA sehr hohe Kräfte benötigt werden, wurde ein spezieller am Boden fixierter Austreibetisch (Abbildung 91) für diese Aufgabe entwickelt. Im Prozess wird das EAA zunächst auf den Austreibetisch aufgespannt und mit pneumatischen Schwenk-Hubzylindern fixiert. Diese ermöglichen im fixierten Zustand des EAA einen vergleichsweise barrierefreien Zugang für die Roboter von oben und können die auftretende Belastung beim Austreiben aufnehmen. Zum Austreiben des Rotors werden ein pneumatischer Zylinder mit einer maximalen Kraft von circa 2000 N und ein Vibrationsschlagwerk der Firma Netter Vibration unterhalb der Tischplatte angebracht und gekoppelt. Zusammen können der Druckzylinder und das Schlagwerk den Rotor aus dem entsprechenden Wälzlager treiben. Durch die an die Welle angepasste Form des im CUTEC gefertigten Schlagstutzens wird eine Verformung bzw. Aufpilzung der Welle vermieden. Für die beschädigungsfreie Entnahme des Rotors wurde ein Aufnahmewerkzeug entwickelt, welches in die hohle Rotorwelle greift (Abbildung 91).

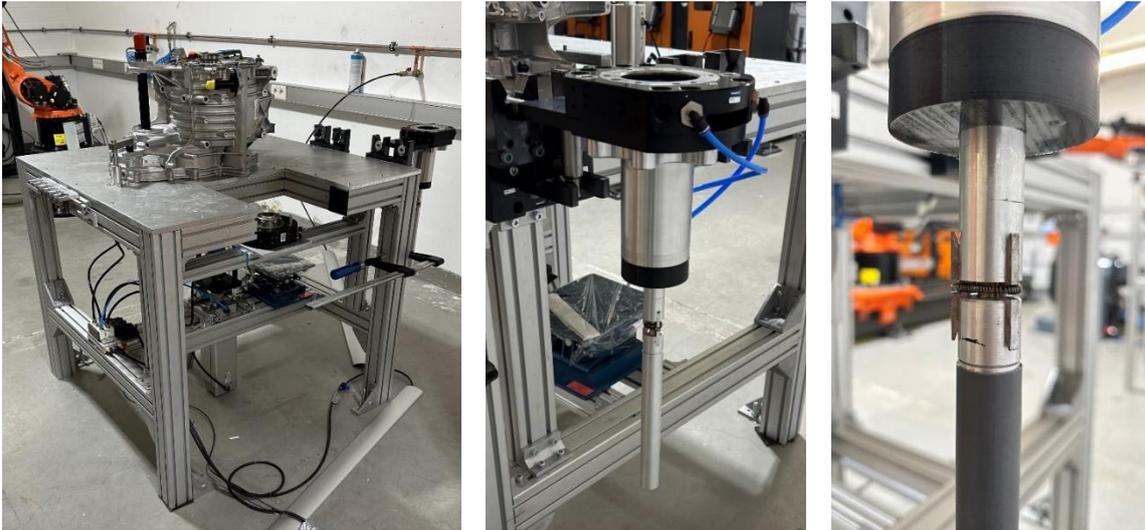


Abbildung 91: Austreibetisch für Rotor und Stator (links), Aufnahmewerkzeug für den Rotor (mitte) und Close-Up des Aufnahmewerkzeugs für den Rotor im greifenden Zustand (rechts).

Der Stator wird demontiert, indem zwei hintereinandergeschaltete Zentrischgreifer in den Stator fahren und diesen durch den KR180 herausziehen (Abbildung 92). Um den Kraftschluss zwischen Stator und Greifwerkzeug zu maximieren und gleichzeitig potenziellen Beschädigungen vorzubeugen, wurden die Greifbacken mit Gummi beschichtet.



Abbildung 92: Demontierter Stator am Statorgreifer.

Eine der wesentlichen Verbindungsarten im EAA sind Schraubverbindungen. Die Entwicklung eines geeigneten Schraubwerkzeugs war daher von besonderer Relevanz. Dabei stellt das zerstörungsfreie Lösen von Schraubverbindungen eine vieldimensionale Herausforderung dar:

- Ermittlung der exakten Position des Schraubenkopfs
- Aufbringen des benötigten Losmoments
- Ausgleich des Hubs des Schraubenkopfs
- Transport der Schraube aus dem Demontageraum
- Ablösen der Schraube vom Demontageschrauber
- Wechseln der Bitnüsse
- Überprüfung des erfolgreichen Ausschraubvorgangs

Um den genannten Herausforderungen zu begegnen, wurde ein Demontageschrauber (Abbildung 93) konstruiert, der mittels geeigneter peripherer Werkzeuge vollautomatisiert arbeitet.

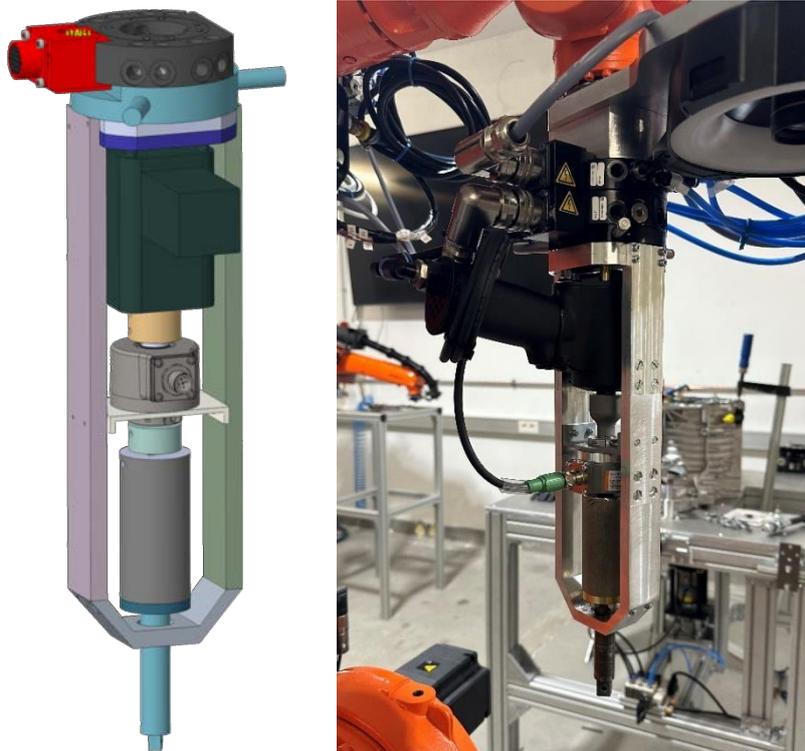


Abbildung 93: Demontageschrauber als CAD-Modell (links) sowie am Roboter montiert (rechts).

Der Demontageschrauber selbst setzt sich zusammen aus einem druckluftbetriebenen Schlagschrauber, der auf einer Aufnahme für die Werkzeugbahnhöfe montiert ist, welche wiederum an ein Schnellwechselsystem angeschraubt ist. Letzteres dient zur Aufnahme am

Roboter. Zusätzlich wurde ein Rahmen um den Schlagschrauber gebaut, der zur Erhöhung der Steifigkeit und somit zur präziseren Führung der Bitnüsse dient. Diese wiederum sind auf einem axialen Ausgleichsstück befestigt, das federnd einen Schraubenhub von 50 mm ausgleichen kann. Die Momentenübertragung erfolgt über eine innenliegende Sechskantführung. Zusätzlich ist auf dem Antrieb ein Inkrementalgeber verbaut, der zur Ermittlung der axialen Position des Demontageschraubers dient. Um Bitnüsse auswechseln zu können, wurde ein Bitnusswechselsystem konstruiert (Abbildung 94).



Abbildung 94: Bitnusswechselsystem für automatisierte Werkzeugwechsel.

In dem Wechselsystem können Bitnüsse über die eigens eingedrehte Umlaufnut abgelegt werden. Sobald die geeignete Bitnuss für den durchzuführenden Schraubvorgang ausgewählt wurde, kann der Roboter den Demontageschrauber in die Nähe der Schrauben verfahren. In der Folge führt das RobotVision-System der Firma Keyence eine exakte Positionsbestimmung des Schraubenkopfes durch. Danach fährt der Roboter den Schrauber an die ermittelte Position, wobei im Anschluss eine Schraubroutine ausgeführt wird. Demontierte Schrauben halten entweder kraftschlüssig mittels Pressung oder durch Magnetwirkung an den Bitnüssen. Nach dem erfolgten Ausschraubvorgang werden Schrauben in den Schraubenabstreifer geführt (Abbildung 95), der, je nach Kopfform der Schraube, diese mittels der Abstreifscharte oder mittels der synchronisierten, schwingenden Abstreifbacken von der Bitnuss ablösen kann. Die synchronisierten Abstreifbacken nutzen einen selbstverstärkenden Mechanismus, der es ermöglicht, alle im EAA auftretenden Schraubenarten, bei denen die Bitnuss den Schraubenkopf überragt, abzustreifen. Schrauben mit Schraubenköpfen, die einen größeren Durchmesser als den der Bitnuss aufweisen, können über die Abstreifscharte von der Bitnuss gelöst werden. Zur Kontrolle der Abstreifvorgänge wird der Demontageschrauber vor und nach jedem Abstreifvorgang an einem Induktionssensor vorbeigeführt.

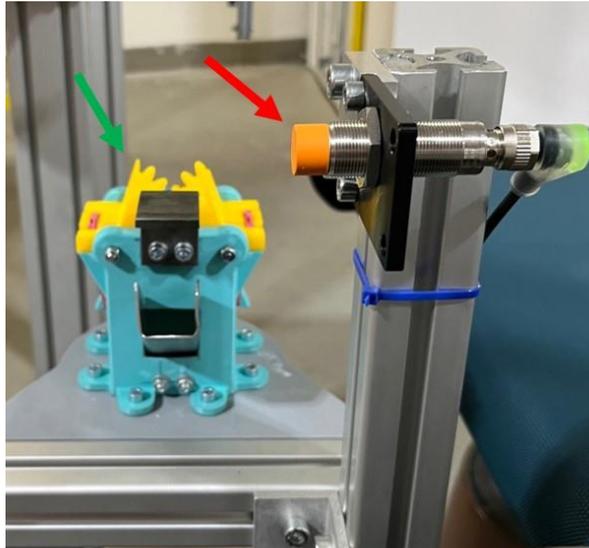


Abbildung 95: Schraubenabstreifer mit synchronisierten Abstreifbacken und Rohling für Abstreifscharte (grüner Pfeil) sowie Induktionssensor zur Erfolgskontrolle (roter Pfeil).

Im vorliegenden EAA war die Demontage des getriebeseitigen sowie des getriebeabgewandten Gehäusedeckels eine besondere Herausforderung, da jeweils beide mit einer stark klebenden Dichtmasse mit dem Hauptgehäuse verbunden sind. Für die Aufgabe des initialen Abtrennens der Deckel wurde ein robotergeführter Spreizer gebaut (Abbildung 96).



Abbildung 96: Spreizer zur Öffnung verklebter Gehäusedeckel.

Bei beiden Gehäusedeckeln waren keine dedizierten Konterpunkte für einen Hebel- oder Spreizvorgang vorgesehen. Daher wurde das EAA hinsichtlich weiterer, sich gegenüberliegender Flächen analysiert. Dabei wurden jeweils mehrere kleine Flächen gefunden, die nahezu parallel zueinanderstehen und damit eine Krafteinleitung zwischen Hauptgehäuse und Gehäusedeckel ermöglichen. Die in Abbildung Abbildung 96 gezeigte, abgestufte Form wurde gewählt, damit die unterschiedlichen Spreizpunkte, die jedoch unterschiedlich weit voneinander entfernt sind, mit nur einem Spreizer genutzt werden können. Da die Geschwindigkeit des Spreizvorgangs nicht bestimmbar und somit ein Nachführen des Roboters nicht möglich ist, wurde eine lineare Schiene zwischen Spreizer und Bahnhofaufnahme geschaltet. Der Spreizer ist federnd gelagert und erhält somit einen zusätzlichen Freiheitsgrad.

Weitere Werkzeuge, die für die Demontage des EAA benötigt werden, sind in der folgenden Abbildung 97 dargestellt.



Abbildung 97: Werkzeugbahnhof, bestückt mit unterschiedlichen Werkzeugen. a) Greifer für Gehäusedeckel, b) Werkzeug zur Entnahme von Schrägwälzlagerschalen, c) Werkzeug zur Entnahme von Kugellagerschalen.

Der Greifer für Gehäusedeckel weist eine erweiterte Spannweite auf, welche durch zwei jeweils links-rechts laufende Schrauben voreingestellt werden kann. Zudem sind die verfahrbaren Finger mit zwei Schienen versehen, auf denen unterschiedliche Backen aufgeschraubt werden können. Das Werkzeug zur Entnahme von Schrägwälzlagerschalen aus den Gehäuseteilen wurde auf Basis von Dauermagneten entwickelt. Es wurden mehrere Werkzeuge designt, die Lagerschalen aus den Gehäusen entfernen sollen, unter anderem auch ein elektromagnetisches Werkzeug, das mit einer angepassten Geometrie die Feldlinien durch die Lagerschalen leitet. In Experimenten hat sich jedoch gezeigt, dass das gezeigte Design die besten Demontageergebnisse liefern konnte. Dabei sind die Dauermagneten in die an die Lagerschalen angepasste Geometrie eingepresst und jeweils abwechselnd gepolt angeordnet. Um kleinste Unpräzisionen auszugleichen, die durch Roboter und Positionierer auftreten können und damit zu verhindern, dass die Lagerschalen bei der Entnahme aus den

besonders präzise angefertigten Lagersitzen verkanten, wurde ein Elastomerball als Ausgleichselement zentral im Werkzeug vorgesehen.

Nach der Erprobung der Werkzeuge in praktischen Versuchen hat sich gezeigt, dass vor allem die Erfolgsquote ein Gegenstand zukünftiger Forschung sein kann. Um manuelle Eingriffe so weit wie möglich zu vermeiden, ist es unerlässlich, hohe Erfolgsquoten der automatisiert durchgeführten Demontageschritte sicherzustellen. Ein weiterer Punkt, der im Rahmen des Projektes nicht erprobt, jedoch für eine Überführung in die industrielle Praxis besonders relevant ist, ist die Erprobung und gegebenenfalls die Erhöhung der Standzeiten der konstruierten Werkzeuge. Im Rahmen des Projektes wurde zunächst die Machbarkeit der Demontage dargestellt, jedoch sind insbesondere für die Wirtschaftlichkeit der Demontage eine hohe Standzeit sowie eine hohe Erfolgsquote von großer Bedeutung. Ebenso können weitere Optimierungspotenziale genutzt werden, indem Werkzeuge, die benachbarte Prozessschritte durchführen sollen, konstruktiv zusammengeführt und dadurch Werkzeugwechsel reduziert werden.

Netzwerktechnik

In dem Demontagemodul werden ebenso wie in Industrie 4.0 Produktionsumgebungen sicherheitskritische Prozesse über Netzwerke gesteuert. Ziel war es daher, eine entsprechende Absicherung für das Demontagemodul und die angebotenen Prozesse zu implementieren. In der Industrie wird die Anlagensteuerung häufig mittels speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) umgesetzt. Diese hat neben einigen Vorteilen wesentliche insbesondere für dieses Projekt relevante Nachteile.

Speicherprogrammierbare Steuerungen

In der aktuell etablierten industriellen Anlagensteuerung ist der Einsatz Speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) zur Anbindung von Aktoren und Sensoren an die steuernde und auswertende Infrastruktur zur elementaren Grundlage für eine Vielzahl automatisierter Prozesse etabliert. Hierbei wird grundsätzlich ein Aufbau genutzt, bei dem unterschiedliche Aktoren und Sensoren über ein Feldbus-System an die SPS angebinden sind (Abbildung 98). In der SPS werden die Signale für die weitere Verarbeitung modifiziert (z. B. digitalisiert). Auswertungen und Berechnungen zur Steuerung der Prozesse können entweder direkt in der SPS oder auf einem daran angeschlossenen Prozessrechner in der Leitstelle durchgeführt werden. Eine unmittelbare Ansteuerung der Aktoren bzw. eine Abfrage oder Kontrolle von Sensormesswerten ist von außerhalb (über eine Ethernetverbindung) somit nur unter Einbezug des Prozessrechners möglich. Für dezentrale Zugriffe wird zumeist durch

kommerziell erhältliche Remote-Steuerungs-Softwares, z.B. TeamViewer, über das Ethernet auf den Prozessrechner zugegriffen.

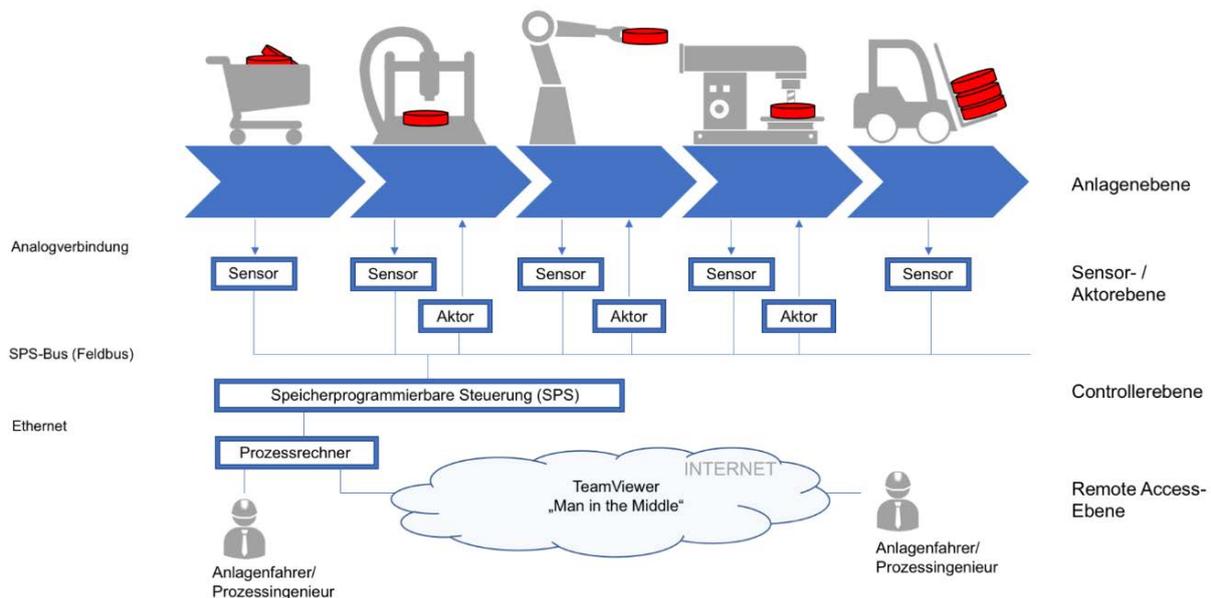


Abbildung 98: Schematischer Aufbau SPS-basierter Industrieanlagen.

SPS-Systeme bieten eine Vielzahl von Vorteilen, weswegen sie häufig in der Industrie eingesetzt werden. Beispielsweise sind sie robust gegen Umgebungsstörungen, flexibel in der Programmierung und besitzen häufig eigene Diagnosefunktionen, welche die Fehleranalyse vereinfachen. Im Hinblick auf die fortschreitende Vernetzung bedingen die genutzten SPS- und Feldbus-Systeme jedoch auch eine Vielzahl bislang ungelöster Probleme. Die primären Probleme der beschriebenen Systeme finden sich dabei vor allem in der Controller- sowie der Remote Access-Ebene.

Beispielsweise kann der verwendete Prozessrechner ein Sicherheitsrisiko bei bereits etablierten Anlagensteuerungen auf SPS-Basis darstellen. Der Rechner ist hier softwareseitig an die korrespondierende SPS angepasst. Oftmals ist diese allerdings für ein zum Installationszeitpunkt aktuelles, im Laufe des Anlagenbetriebs jedoch zunehmend veraltetes und sicherheitstechnisch nicht mehr aktuelles Betriebssystem ausgelegt. Zusammen mit weiterer, anbieterseitig nicht mehr unterstützter Software stellt dies ein potenzielles Sicherheitsrisiko dar, was speziell bei sicherheitskritischen Prozessen weitreichende Folgen haben kann.

Neben diesen rein innerhalb des Betriebs lokalisierten Problemen existieren auch einige Probleme bei der Anbindung an Netzwerke für die vielfach verwendete Fernwartung, bei der die Anlagen via Remote-Access-Steuerung kontrolliert werden. Hierzu werden in der Regel

unterschiedliche Softwarelösungen wie z. B. TeamViewer verwendet. Diese weisen eine sogenannte Man-in-the-Middle-Problematik auf. Diese entsteht dadurch, dass eine Verbindung durch Dritte zur Verfügung gestellt wird und darüber ein Zugriff auf die so übertragenen Datenströme stattfinden kann.

Ein weiteres Problem entsteht dadurch, dass der Markt für SPS-Systeme sehr vielfältig ist. Für eine gegebene Anwendung existiert meist eine Vielzahl nutzbarer SPS-Systeme, die sich sowohl in Bezug auf ihre Funktionalität, als auch in ihrer Bedienung unterscheiden. Dies macht personenseitig eine spezialisierte Einarbeitung der vorgesehenen Mitarbeiter für jedes System notwendig. Gleichzeitig werden die Steuerungen älterer Anlagen in der Regel nicht durch neuere Systeme ersetzt. Vor dem Hintergrund der Personalfluktuation bedingt dies die Notwendigkeit zum Managen des damit assoziierten, personengebundenen Wissens. Dies kann vor dem Hintergrund eines zunehmenden Mangels an Fachpersonal eine große Herausforderung für Unternehmen darstellen.

SPS-Systeme sind in der Regel proprietäre Systeme. Dies bedeutet, dass eine externe Prüfung der aufgebauten Infrastruktur auf mögliche Fehler, Probleme oder Sicherheitsrisiken nicht vollständig unabhängig vom jeweiligen Hersteller des Systems erfolgen kann, da lediglich dieser einen kompletten Einblick in sämtliche Ebenen der verwendeten Systeme hat.

Aufgrund der dargestellten Probleme wurde sich zu Beginn des Projektes gegen den Einsatz eines SPS-Systems für das Demontagemodul entschieden und stattdessen ein anderer Ansatz gewählt.

Modulare Netzwerkstruktur

Zur Steuerung der im Demontageprozess verwendeten Geräte und Infrastrukturen wurde eine modulare Netzwerkstruktur entworfen, in welcher alle relevanten Komponenten eingebunden sind. Die konzeptionellen Anforderungen an das Demontagemodul konnten aufgrund von Erfahrungen aus dem Betrieb ähnlicher Anlagen bereits sehr früh definiert und bei der Konzeptionierung des Netzwerks im Vorfeld berücksichtigt werden.

Wesentliche Anforderungen an das Netzwerk waren die Gewährleistung von:

- Leistungsfähigkeit
- Redundanz
- Internetstandards (RFCs¹)
- Sicherheitsstandards (BSI²)

Weiterhin standen im Vordergrund die Flexibilität, der Einsatz quelloffener Standards, die Absicherung vor externen Störungen, sowie eine erhöhte Skalierbarkeit in Bezug auf Geschwindigkeit und Ausfallsicherheit.

Das Netzwerk setzt sich aus einem zentralen Router der Firma Cisco Systems (Catalyst 4510+R_WS-X45-SUP7-E) zusammen, welcher über 100 Gbit-Leitungen mit Switches (Catalyst 9500_C9500-32C, C9500-24Y4C, 12X-36M_UPOE, ISE-3615, DNA-Center), ebenfalls von Cisco Systems, modular an die verschiedenen Subnetze mit separaten IP-Adressbereichen (Entwicklungslabor, Serverraum, Technikum) angebunden ist (Abbildung 99). Die Sicherung der relevanten Systemkomponenten, Geräte wie beispielsweise Roboter und Rechner, wird dabei durch die Segmentierung des Netzwerks realisiert, indem nach Standards des OSI-Schichtenmodells an den jeweiligen Übergängen Sicherheitsmechanismen installiert wurden. Dazu gehören beispielsweise die Sicherung der Robotersteuerungen sowie der Schutz der installierten Videoüberwachung im Technikum über Access-Listen auf Port- und IP-Ebene (OSI-Schicht 3). Zu jeder Zeit muss gewährleistet sein, dass unbefugter oder auch unbeabsichtigter Zugriff auf diese Systemkomponenten verhindert wird (siehe auch Kapitel 6.2.2).

¹ <https://www.ietf.org/standards/rfc>

² https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/IT-Grundschutz/BSI-Standards/bsi-standards_node.html

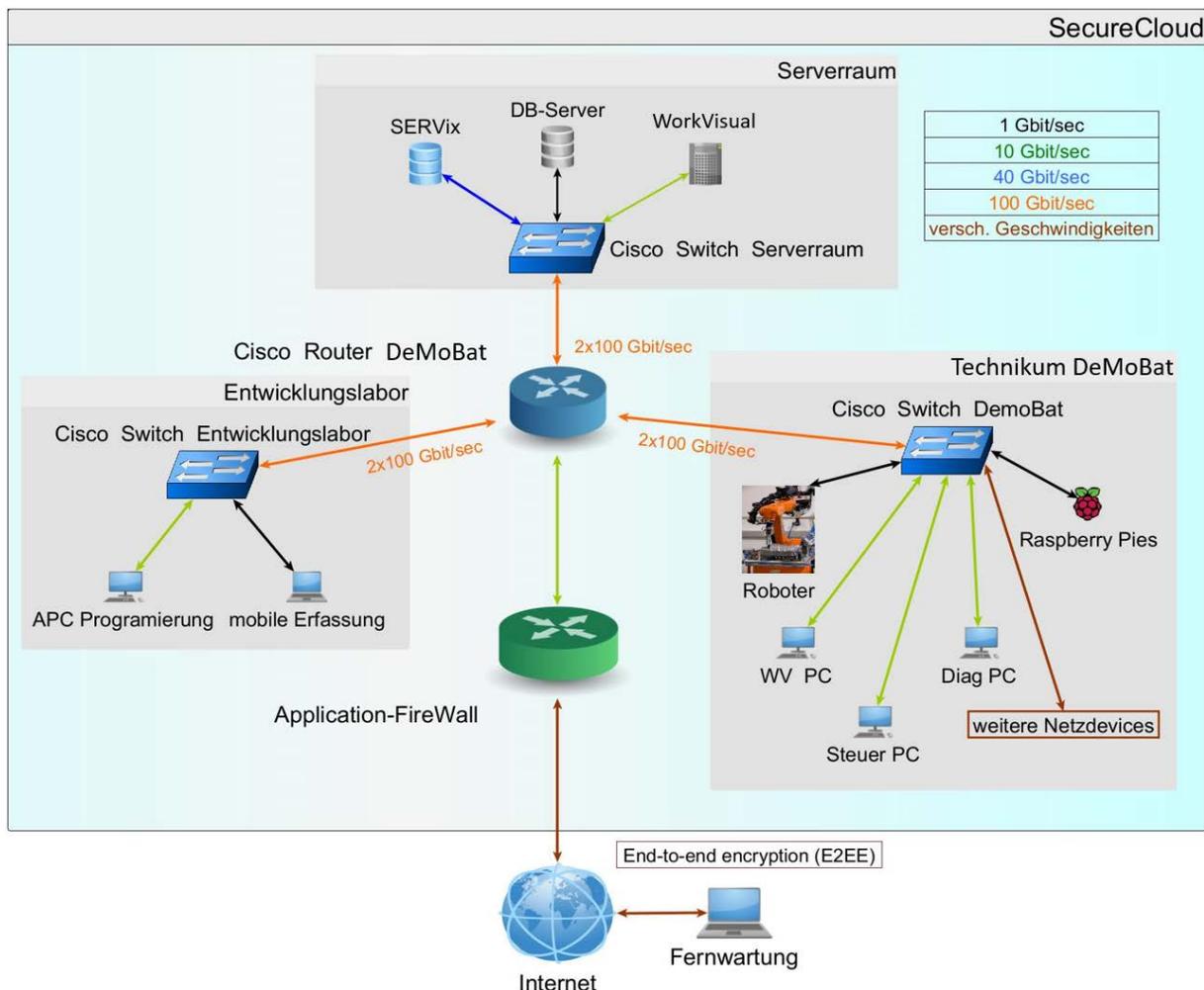


Abbildung 99: Schematischer Aufbau der modularen Netzwerkstruktur der Demontageanlage.

Die modulare Struktur ermöglichte es zudem, im Laufe der Projektlaufzeit angeschaffte Geräte, wie Kamerasysteme oder Einplatinencomputer, mit geringem Aufwand in das Demontagemodul zu integrieren, wobei diese als eigenständige Netzwerkteilnehmer des Demontagemoduls realisiert werden. Durch den konsequenten Einsatz Ethernet-basierter Kommunikationsprotokolle konnten neue Funktionen zudem zuverlässig implementiert werden. Dafür musste im Vorfeld der Beschaffung die entsprechende Schnittstelle berücksichtigt, bzw. bei der Einbindung von Hardware diese entsprechend nachgerüstet werden, was bei Einplatinencomputern häufig der Fall war.

Die geplante Anbindung des Demontagemoduls an einen internetfähigen Außenanschluss konnte vorbereitet sowie in Teilen installiert und getestet werden. Wie bereits in der Sicherheitsbetrachtung angedeutet, bleibt festzustellen, dass sich durch den Einsatz einer Layer7(Application)-FireWall (CISCO-FIREPOWER1100Series) (Abbildung 99) ein gesicherter Zugang realisieren lässt. Beispielsweise können dabei Änderungen an der

Steuerungssoftware der Roboter ausschließlich durch vollständig autorisierte Personen realisiert werden. Dabei wurde auch die besondere Schutzwürdigkeit einfacher Netzwerkgeräte in die Sicherheitsbetrachtung einbezogen. So sind beispielsweise Raspberry-Pies wegen ihres stark reduzierten Betriebssystems unzureichend gegen Manipulation geschützt. Das dazu erstellte Sicherheitskonzept wurde von dem für die TU Clausthal zuständigen Datenverarbeitungs-Beauftragten geprüft und freigegeben.

Als Ausblick für die Zukunft sollte bei der Planung von Industrieanlagen die netzwerktechnische Auslegung des zu installierenden Datenverarbeitungs-Netzwerks als eigenständige Teilaufgabe betrachtet werden. Im Rahmen der Arbeiten rund um das Demontagemodul ist deutlich geworden, dass für die Fabrik der Zukunft die Netzwerke skalierbar, abgesichert und flexibel sein sollten. Das gilt im besonderen Maße für die Komponenten, die sich später nur noch mit einem erheblichen Aufwand austauschen lassen. Damit ist nicht nur die passive Verkabelungsmethodik gemeint, es sollte vor allem der Einsatz proprietärer Systeme überdacht werden unter Einbeziehung quelloffener Produkte und Protokolle.

8.1.3 Software

Prozessleitsystem

Die Anforderung an das zentrale Prozessleitsystem (PLS) besteht in der zuverlässigen und sicheren Steuerung und Überwachung sämtlicher demontage- und sicherheitsrelevanten Komponenten des Demontagetechnikums. Diese umfassen einerseits die verschiedenen Roboter, die Positionierer, das Förderband und die externen Werkzeuge wie den Austreibetisch, andererseits die Kameras für das Robotvision-System und die Szenenanalyse sowie die Tür- und Ampelsteuerungen.

Zur Umsetzung dieser vielfältigen Aufgaben dient ein zentraler Prozessleitreechner mit einer in C++ unter Nutzung des Qt Frameworks entwickelten Steuerungssoftware samt Benutzerschnittstelle. Unterstützt wird dieses Front-End durch eine im Projekt entwickelte Datenbank, welche in einem eigenen Abschnitt ausführlicher beschrieben ist.

Grundsätzlich werden alle Ereignisse, die durch das Prozessleitsystem ausgelöst oder von den externen Steuerungen an dieses gemeldet werden, sei es im manuellen oder im automatisierten Betrieb, dem Benutzer in einem Informationsbereich angezeigt und darüber hinaus in die Datenbank geschrieben. Dadurch ist eine umfangreiche Situations- und Fehlerdiagnostik auch im Nachhinein möglich, was einerseits die Entwicklungsarbeiten bzgl.

des Debuggings erheblich erleichtert, andererseits aber auch bei Bedarf eine Prüfung des gesamten Demontageprozesses ermöglicht.

Robotersteuerung

Für die Steuerung der Roboter (und damit auch der Positionierer und der Lineareinheit) sind im Prozessleitsystem verschiedene Steuerungsebenen implementiert worden, auf die über das Benutzer-Front-End zugegriffen werden kann:

- Status und Fehlerdiagnostik (vgl. Abbildung 100)

In diesem Bereich der Benutzerschnittstelle kann die Kontrolle der Roboter durch das PLS aktiviert und die Fahrfreigabe erteilt werden, sofern die Betriebsart „Automatik Extern“ auf der Robotersteuerung aktiv ist. Sobald das PLS mit der Robotersteuerung verbunden ist, werden permanent sowohl die aktuellen Achspositionen (A1-A6 zzgl. Zusatzachsen wie Positionierer oder Lineareinheit) als auch die kartesischen Koordinaten des jeweiligen Roboters angezeigt. Letztere beziehen sich dabei auf den TCP (Tool Center Point) des gewählten Werkzeugs im aktuellen Basis-Koordinatensystem. Sowohl Werkzeug als auch Basis können in diesem Bereich für jeden Roboter gewählt werden.

Darüber hinaus stellt das Front-End für jeden Roboter eine übergeordnete Geschwindigkeitseinstellung (Programm-Override) bereit, mit der sowohl einzelne Bewegungen als auch der gesamte programmierte Demontageprozess bzgl. der Ausführungs-geschwindigkeit skaliert werden können. Dies ist aus sicherheitstechnischen Aspekten nötig, um auch bei automatisierter Ausführung von (Teil-)Prozessen mit entsprechend der Betriebsart T1 reduzierter Geschwindigkeit den Aufenthalt menschlichen Personals im Technikum zu Entwicklungs- und Testzwecken zu ermöglichen.

Verschiedene Statusanzeigen geben Auskunft über den aktuellen Zustand der Roboter sowie über eventuelle Fehler wie Arbeitsraumverletzungen oder Meldungen der KUKA.PLC mxAutomation-Schnittstelle.

- *Steuerung einzelner Grundfunktionen*

Es können sämtliche elementaren Steuermechanismen für die Roboter und die Peripherie ausgeführt werden, um während der Entwicklungs- und Testphase einen vollumfänglichen Zugriff auch im externen Betriebsmodus der Roboter zu ermöglichen. Dazu gehören Bewegungen (kartesisch und achsbezogen), das Schalten und Abfragen digitaler und analoger Ein- und Ausgänge (insbes. für die Funktionen der Werkzeuge und der Werkzeugwechselsysteme) sowie die Definition und Aktivierung von Arbeitsräumen und Interrupts auf der Robotersteuerung.

- *Externe Ansteuerung von Unterprogrammen*

Hiermit ist die direkte Ausführung der auf den Robotersteuerungen definierten KRL (KUKA Robot Language) Unterprogramme möglich, wodurch einzelne Prozessschritte (Schraubvorgänge, Bauteilmanipulationen, ...) oder andere komplexere Aufgaben wie Werkzeugwechsel modular gekapselt und mittels eines einzigen Befehls ausgeführt werden können.

- *Automatisierte Ausführung einer Demontagesequenz*

Die von den Robotern durchzuführenden Demontageschritte gemäß der auf Basis der manuellen Zerlegeversuche erstellten Demontageanleitungen werden über die Datenbank mit dem Prozessleitsystem verknüpft und können dort zu Sequenzen kombiniert werden, welche dann automatisiert abgearbeitet werden. Die Einzelschritte werden dabei als KRL-Module definiert, welche während der Ausführung direkt mit der Prozesssteuerung kommunizieren können. So zeigt z. B. jedes Modul dem Leitsystem mit einem *finished*-Signal an, wann die durchzuführenden Abläufe soweit abgearbeitet worden sind, dass der nächste Einzelschritt gestartet werden darf.

Bezüglich des Aufrufs der KRL-Module auf der Robotersteuerung ist auf Ebene des Prozessleitsystems eine Sicherheitsüberprüfung bzgl. der eingesetzten Werkzeuge implementiert worden, sodass ein Modul nur gestartet werden kann, wenn der entsprechende Roboter auch mit dem korrekten, in der Datenbank für diesen Schritt hinterlegten Werkzeug ausgerüstet ist. Dies gewährleistet insbesondere beim selektiven Testen von Teilprozessen, bei denen die aktuell verwendeten Werkzeuge nicht durch den Gesamtprozess sichergestellt sind, eine zusätzliche Systemsicherheit.

Die meisten Module starten und enden derzeit in der Home-Position des jeweiligen Roboters. Dies hat den Vorteil, dass in der Entwicklungsphase die Reihenfolge der Einzelschritte in der Gesamtsequenz noch problemlos geändert werden kann, ohne dadurch unvorhergesehene Bahnbewegungen und damit etwa Kollisionen auszulösen. Dieses Vorgehen führt jedoch auch zu einer längeren Prozesslaufzeit, da etwa bei einem Werkzeugwechsel zunächst wieder die Home-Position angefahren wird, bevor das neue Werkzeug angekoppelt wird. An dieser Stelle existiert mithin noch ein deutliches Optimierungspotential für den Demontageprozess, welches mit geringem Aufwand ausgeschöpft werden kann, sobald der Ablauf einer (Teil-)Sequenz finalisiert ist.

The screenshot displays four robot control panels. Robot 1 (Motor) is at 50% speed, Robot 2 (Greifer) is at 100% speed, and Robot 3 (Schrauber) is at 100% speed. Robot 4 (LE Greifer) is in 'Init Stopped' state. Each panel shows a set of status lights (green for ready, red for stop/init), control buttons (power, stop, start), and a table of coordinates. Robot 3's panel is highlighted with a green border.

Robot	Type	Speed	Status	A1	A2	A3	A4	A5	A6	E1	E2	X	Y	Z	Tool	Base	S	T
Robot 1	Motor	50 %	StandBy Ready	-0.000	-135.003	90.000	0.002	90.002	-0.002	-0.002	70.000	326.349	-0.005	2373.874	Adapterplatte	NULLFRAME	00010	100011
Robot 2	Greifer	100 %	StandBy Ready	-60.000	-129.997	80.005	0.000	90.002	0.000	334.079	578.639	1713.969	-120.000	-40.010	Spreizer	NULLFRAME	00010	000011
Robot 3	Schrauber	100 %	StandBy Ready	89.998	-120.002	119.999	0.003	90.000	89.996	0.022	-418.763	260.515	-949.132	86.139	Schrauber1	RobotVision Base	00010	000010
Robot 4	LE Greifer	50 %	Init Stopped	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x

Abbildung 100: Statusanzeige und Kontrollfunktionen für die Roboter in der Benutzeroberfläche.

Externe Steuerung

Für sämtliche Ebenen der Robotersteuerung wurde für den Benutzer eine optimale Kontrolle ermöglicht, indem zahlreiche Funktionen des Prozessleitsystems zusätzlich zur Eingabe über den Prozessleitrechner über einen drahtlosen Controller als mobiles Eingabegerät bereitgestellt wurden. Diese Herangehensweise bietet verschiedene Vorteile im Vergleich zur ausschließlichen Bedienung am Prozessleitrechner. Zum einen ist der Benutzer durch die so erreichte Mobilität in der Lage, direkt am Sicherheitszaun (bzw. mit entsprechend der Betriebsart T1 reduzierter Geschwindigkeit sogar im Demontagemodul) den Prozess mit optimalem Blick auf das aktuelle Geschehen zu steuern. Zum anderen ist die Reaktionszeit für eventuelle nutzerseitige Aktionen im Vergleich zu einer Eingabe durch Maus und Tastatur deutlich reduziert. Darüber hinaus erhält der Benutzer durch die Vibrationsfunktion des Controllers verschiedene Feedback-Informationen zum Prozessverlauf oder bei auftretenden Fehlern, ohne den Blick vom Prozessablauf abwenden zu müssen. Folgende Funktionalitäten sind für den Controller implementiert worden:

- Geschwindigkeitsanpassung zur Laufzeit (Programm-Override)

- Override der Freigabebedingungen für die Ausführung der einzelnen Demontageschritte
- Auswahl des aktuellen Prozessschrittes der Demontagesequenz
- Start / Stopp der Demontagesequenz
- Pausieren der Demontagesequenz bzw. der aktuellen Bewegung
- Not-Halt (sofortiger Halt sämtlicher Roboter, Werkzeuge und des Förderbandes)
- Bestätigung manueller Steuerbefehle
- Einzelschrittbestätigung im automatisierten Demontageprozess

Virtuelle Roboter

Um komplexe oder sicherheitskritische Abläufe zunächst simulativ erproben zu können, wurde im Benutzerinterface der Einsatz virtueller Roboter implementiert. Diese werden über KUKA.OfficeLite auf einer virtuellen Maschine (VMware) definiert und können über KUKA.Sim visualisiert werden. Bezüglich der Steuerung über das Front-End verhalten sich die virtuellen Roboter exakt wie die realen Roboter im Technikum und bieten somit die Möglichkeit, kritische Teilabläufe, insbesondere solche mit automatisiert berechneten kinematischen Parametern, ausgiebig simulieren zu können, bevor sie für den realen Einsatz im Technikum freigegeben werden. Im PLS kann bei Bedarf die Anzeige der virtuellen Roboter ausgewählt werden.

Konfiguration der Roboter

Für die Konfiguration der Roboter steht ein weiteres Dialogfenster zur Verfügung (Abbildung 101). Hier können grundsätzliche Einstellungen festgelegt werden, wie der in der Benutzeroberfläche angezeigte Name, eine optionale Beschreibung, die IP-Adresse für den Zugriff auf die Steuerung sowie die Home-Position. Weiterhin kann der Nutzer hier die für den Betrieb über das PLS benötigten Werkzeuge und Basis-Koordinatensysteme verwalten. Zudem dient dieses Fenster zur Verknüpfung des Prozessleitsystems mit den auf den Robotersteuerungen definierten KRL-Unterprogrammen. Die notwendigen Systemvariablen für die Steuerungen, die Namen der Module sowie die benötigten Werkzeuge werden hier definiert und stehen daraufhin dem System zur Verfügung. Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme wird vor dem Start geprüft, ob das aktuelle Werkzeug des Roboters dem des Unterprogramms entspricht. Meldet der Roboter z. B. Werkzeug Nummer 1 als aktiv, so können nur die Systemaufrufe ausgelöst werden, die genau dieses Werkzeug entweder verwenden oder ablegen. Insbesondere nach einem Nutzereingriff im Falle einer unterbrochenen Sequenz sorgt diese Maßnahme für ein konsistentes Systemverhalten.

Roboter-Einstellungen

Robot 3

Beschreibung: Schrauber

Typ: KR 16

IP Adresse: 172.16.35.122 EKI Port: 59154

Tools

0 - NULLFRAME
4 - Schrauber1
5 - Greifer1

Bases

0 - NULLFRAME
4 - RobotVision Base

Home-Position

A1 0 A4 0 E1 0 E4 0
A2 -120 A5 90 E2 0 E5 0
A3 120 A6 90 E3 0 E6 0

KRC Subroutines

SysVar	Name	Tool	Get	Deposit	Description
1	R3_GetDriver1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schraubwerkzeug 1 holen
2	R3_DepositDriver1	4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Schraubwerkzeug 1 ablegen
3	R3_GetGripper1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Greifer 1 holen (Lanze am Gehäusedeckel 1)
4	R3_DepositGripper1	5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Greifer 1 ablegen
10	R3_GS_0_P0_m25	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 Schraube (T45) an LE lösen
11	R3_GS_1_P0_70	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11 Schrauben (E10) an Gehäusedeckel (nicht getriebeseitig) lösen
12	R3_GS_2_P0_m110	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	15 Schrauben (E10) an Gehäusedeckel (getriebeseitig) lösen
13	R3_GS_0LE_P0_m25	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5 Schrauben an Leistungselektronik lösen
14	R3_KblSchr_P0_70	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4 Schrauben (Kabel LE vom Stator lösen)
20	R3_CreateBase	-1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	RobotVision Basis erzeugen (gemäß CreateBase_Name[] in config.dat)
21	R3_SetBaseName	-1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Setzt CreateBase_Name[] für R3_CreateBase()
35	R3_GetBit5_T45	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bit auf Position 5 holen (T45)
36	R3_GetBit6_E10	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bit auf Position 6 holen (E10)
45	R3_DepositBit5_T45	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bit auf Position 5 ablegen (T45)
46	R3_DepositBit6_E10	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bit auf Position 6 ablegen (E10)
50	R3_GetG1FromKR70	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Übernehme Gehäusedeckel 1 von KR70
51	R3_DropG1ToConveyor	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Lege Gehäusedeckel 1 auf Förderband ab

OK Cancel

Abbildung 101: Dialogfenster zur Konfiguration der Roboter und derer KRL-Module.

Prozesskommunikation

Neben der Steuerung der Roboter ist das Prozessleitsystem auch für die Kontrolle des Förderbandes, der Sicherheitstechnik (Ampel und Türverriegelung) sowie der verschiedenen Kamerasysteme (Robotvision und Szenenanalyse) zuständig. Diese unterschiedlichen Komponenten des Demontagetechnikums erfordern die Implementierung verschiedener Kommunikationsschnittstellen, um den Datenaustausch untereinander und mit dem Prozessleitsystem zu gewährleisten. Im Rahmen der Demontagesequenz wird die gesamte Prozesskommunikation automatisiert gesteuert. Insbesondere in der Entwicklungs- und Testphase ist jedoch häufig ein manueller Zugriff notwendig, welcher daher vollumfänglich in

das Benutzer-Front-End implementiert wurde. Die einzelnen Schnittstellen werden im Folgenden kurz erläutert.

Roboter

Die Steuerung der Roboter erfolgt aus dem Front-End heraus über die KUKA.PLC mxAutomation Schnittstelle und basiert auf der zyklischen Übertragung von User Datagram Protocol-Paketen (UDP) an die jeweiligen Steuerrechner. Eine zusätzliche SPS, wie sonst in industriellen Robotersteuerungen üblich, ist nicht notwendig, die bereitgestellten Funktionen werden vom Prozessleitsystem über das mxAutomation C++-Interface aufgerufen. Der Austausch der Datenpakete mit den verschiedenen Steuerrechnern (KRC4/KRC5) erfolgt zyklisch alle 4 ms. Dabei wird jede der vier Robotersteuerungen durch einen einzelnen Thread verwaltet, um die Systemstabilität zu erhöhen und eine Performancesteigerung durch Nebenläufigkeit zu erreichen. Allerdings erlauben die KUKA Steuerungen der Version KRC4 keine dynamische Vergabe von Kommunikations-Ports, sodass für die korrekte Zuordnung der empfangenen Daten zu den einzelnen Robotern zunächst ein UDP-Dispatcher entwickelt und implementiert wurde, welcher permanent in einem eigenen Thread auf Datenpakete von den Steuerrechnern wartet, diese auswertet und dann entsprechend an die für die einzelnen Roboter zuständigen Threads verteilt. Über die Benutzeroberfläche können alle relevanten Systemeinstellungen wie IP-Adressen für die Roboter oder die Zuordnungen für Systemaufrufe über die mxAutomation-Schnittstelle verwaltet und in der Datenbank abgelegt werden.

Die auf den Steuerungen definierten KRL-Module für die einzelnen Prozessschritte können zur Laufzeit mit dem Prozessleitsystem kommunizieren, um etwa Variationen der Bewegungsbefehle zu ermöglichen oder auf Ereignisse reagieren zu können, die situativ durch die Szenenanalyse oder das Robotvision-System ausgelöst werden. Hierfür wurde die KUKA.Ethernet KRL Schnittstelle implementiert, welche einen umfangreichen Datenaustausch zwischen den KRL-Modulen und dem PLS ermöglicht. Die Kommunikation erfolgt bidirektional und erlaubt sowohl die Übertragung binärer Streams als auch den Transfer komplexerer Datenstrukturen im XML-Format. Der Datenempfang erfolgt KRL-seitig Interrupt-gesteuert. Vollständig übertragene Daten werden auf der Steuerung durch das Setzen von Flags oder digitalen Ausgängen angezeigt.

Diese Kommunikation ermöglicht es auch, unterschiedliche Prozessschritte mit demselben KRL-Modul durchzuführen. So sendet etwa das für die Bewegung eines Positionierers zuständige Modul eine Anfrage an das PLS, um die anzufahrenden Koordinaten zu erhalten. In der Betriebsart „Automatik Extern“ werden daraufhin automatisch die im aktuellen

Prozessschritt definierten Koordinaten übertragen, in allen anderen Betriebsarten öffnet sich ein Dialogfenster, in dem der Benutzer die gewünschte Position eintragen kann. Bei erfolgreichem Datenaustausch wird die Ausführung des Moduls fortgesetzt und der Positionierer an die Zielkoordinaten bewegt. Auch für andere wiederkehrende Prozessschritte wie das Lösen von Schrauben wird diese Methode eingesetzt, sodass auch hier nur ein einziges Modul sämtliche Schraubvorgänge steuern kann, indem die aktuellen Positionen zur Laufzeit angefragt und vom PLS übermittelt werden.

Die KUKA.Ethernet KRL Schnittstelle wird weiterhin verwendet, um Informationen wie Status- oder Fehlermeldungen zum aktuellen Prozessgeschehen an das PLS zu senden, wo diese dem Benutzer im Info-Bereich angezeigt und darüber hinaus in der Datenbank gespeichert werden.

Robotvision

Die Kommunikation mit dem Keyence Controller XG-X2900, welcher für die Steuerung der robotergeführten Kameras und Beleuchtungssysteme zuständig ist, wird ebenfalls über das Technologiepaket KUKA.Ethernet KRL realisiert, wobei der Datenaustausch auf dem Versand binärer Streams basiert. Das Robotvision-System kommt hauptsächlich bei Schraubvorgängen zum Einsatz, aber auch für Prozessschritte, die an unzugänglichen Stellen eine hohe Präzision erfordern, wie etwa bei der Handhabung von Steckerverbindungen. Das System arbeitet auf 2D-Bilddaten, auf denen definierte Muster erkannt und deren Positionen in Werkzeugkoordinaten der Roboter umgerechnet werden. Zunächst wird aus einem KRL-Modul heraus das Programm auf dem Controller angewählt und gestartet, welches für die Erkennung der aktuell zu demontierenden Bauteile zuständig ist. Das Basis-Koordinatensystem des Roboters und die Anfahrpositionen für die Kamera werden dabei automatisch aus den CAD-Daten des Aggregats und der für diesen Prozessschritt definierten Positionierer-Stellung berechnet und in der Datenbank hinterlegt. Diese Berechnung wird detailliert im Abschnitt Szenenanalyse beschrieben. Das Prozessleitsystem liest dann alle für einen Prozessschritt benötigten Bauteilkoordinaten aus und überträgt diese an den Controller. Bei erfolgreicher Erkennung sendet der Controller die entsprechenden Koordinaten für die Anfahrpositionen des robotergeführten Werkzeugs an das KRL-Modul zurück, welches daraufhin die Demontage bzw. die Entschraubvorgänge einleitet. Schlägt die Erkennung fehl, etwa weil an einer erwarteten Position keine oder eine falsche Schraube detektiert wurde, wird der Prozess pausiert und ein Benutzereingriff angefordert.

Szenenanalyse

Die kamerabasierten Verfahren zur Szenenanalyse sind, wie in einem eigenen Abschnitt beschrieben, modularisiert als externe Dienste realisiert worden, welche über die Datenbank mit dem Prozessleitsystem kommunizieren können. Sobald in der Demontagesequenz ein Bauteil entfernt worden ist, fordert das PLS über einen entsprechenden Eintrag in der Datenbank die Szenenanalyse für den aktuellen Demontagezustand an, woraufhin der Dienst gestartet wird. Das Ergebnis wird durch eine von PostgreSQL bereitgestellte asynchrone *notification* an das PLS zurückgemeldet. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass das PLS nicht aktiv auf die Antwort warten muss und in diesem Fall für andere Aufgaben blockiert wäre. Sobald die Meldung für die erfolgreiche Bauteilablage vorliegt, kann der nächste Demontageschritt ordnungsgemäß ausgeführt werden. Falls hingegen das zuletzt behandelte Bauteil als nicht oder unvollständig entfernt identifiziert und gemeldet wird, wird eine automatische Unterbrechung der Sequenz ausgelöst sowie eine Meldung in der Benutzeroberfläche angezeigt.

Peripherie

Der Betrieb des Förderbandes erfolgt aus dem Prozessleitsystem heraus über die Ansteuerung eines Frequenzumrichters per Modbus TCP. Dies ist ein Protokoll, das auf der TCP/IP-Netzwerkstruktur aufbaut und die Nutzdaten innerhalb des TCP-Paketes spezifiziert. Mittels definierter Codewörter und entsprechender Nutzdaten wird über ein Programm, welches für den Frequenzumrichter entwickelt wurde, der Motor des Förderbandes angesteuert und so die gewünschte Bewegung (Richtung und Distanz) realisiert.

Die Sicherheitsampel und die Türsteuerung kommunizieren über TCP/IP durch definierte Befehlssätze mit dem Prozessleitsystem, wobei die Ampel durch einen Arduino gesteuert wird, während bei der Türsteuerung ein Raspberry Pi zum Einsatz kommt. Beide werden während des Prozesses gemäß dem aktuellen Anlagenzustand fortlaufend aktualisiert, um die Sicherheit im Technikum zu gewährleisten. So wird beispielsweise ein Warnsignal durch die Ampel realisiert, sobald die Roboter durch das PLS aktiviert wurden. Wird zusätzlich die Fahrfreigabe erteilt, was nur möglich ist, wenn eine entsprechende Quittierung an den Türen erfolgt ist, werden diese verriegelt und die Ampel leuchtet rot. Das manuelle Öffnen der Türen hat eine sofortige Unterbrechung der automatisierten Bewegungen der Roboter und Werkzeuge zur Folge.

Datenbank

Im Rahmen der automatisierten Demontage besteht der Bedarf an umfassenden Ablage- und Verwaltungsmöglichkeiten sowohl für Stammdaten (zeitlich stabile Daten wie z. B. Netzwerk- und Robotereinstellungen, bauteilbezogene Demontageinformationen oder verfügbare Werkzeuge) als auch für dynamische Daten (z. B. aus den CAD-Daten zur Laufzeit berechnete Positionen für das Robotvision-System oder während des Prozesses generierte Meldungen).

Für die Datenverwaltung wird ein PostgreSQL Datenbankserver mit einer eigens für das Projekt entwickelten Datenbank verwendet. Bei PostgreSQL handelt es sich um ein bewährtes objektrelationales Datenbanksystem mit großer Funktionsmächtigkeit und Zuverlässigkeit, welches das Konzept ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) umsetzt und damit hohe Sicherheit sowie Konsistenz der Daten sicherstellt. Da das PostgreSQL Datenbanksystem auch alle benötigten Fähigkeiten für eine sichere, zuverlässige und rückwirkungsfreie Kommunikation mit sich bringt, wurde dies auch über die Funktionalität des Datenbankservers implementiert. Das Datenbanksystem erfüllt folgende zu Projektbeginn definierte Anforderungen:

- ACID konform, inkl. der Data Definition Language
- Objektrelational
- Konform zum SQL-Standard
- Industriestandard
- Open Source

Bei der Verwaltung der verschiedenen anfallenden Daten mussten die speziellen Anforderungen berücksichtigt werden, die sich aus einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt ergeben. Dazu zählte insbesondere der dynamische Charakter zur flexiblen Anpassung der gesamten Struktur. So musste gewährleistet werden, dass im Projektverlauf immer wieder neue, nicht von vornherein planbare Daten und Informationen konsistent in die Datenbankstruktur integriert werden konnten. Da weiterhin in einem Projekt dieser Komplexität eine Aufteilung der Aufgaben in einzelne, möglichst gut abgekapselte Komponenten (Abbildung 102) unerlässlich ist, musste auch eine robuste und verlässliche Kommunikation zwischen diesen einzelnen Komponenten garantiert werden.

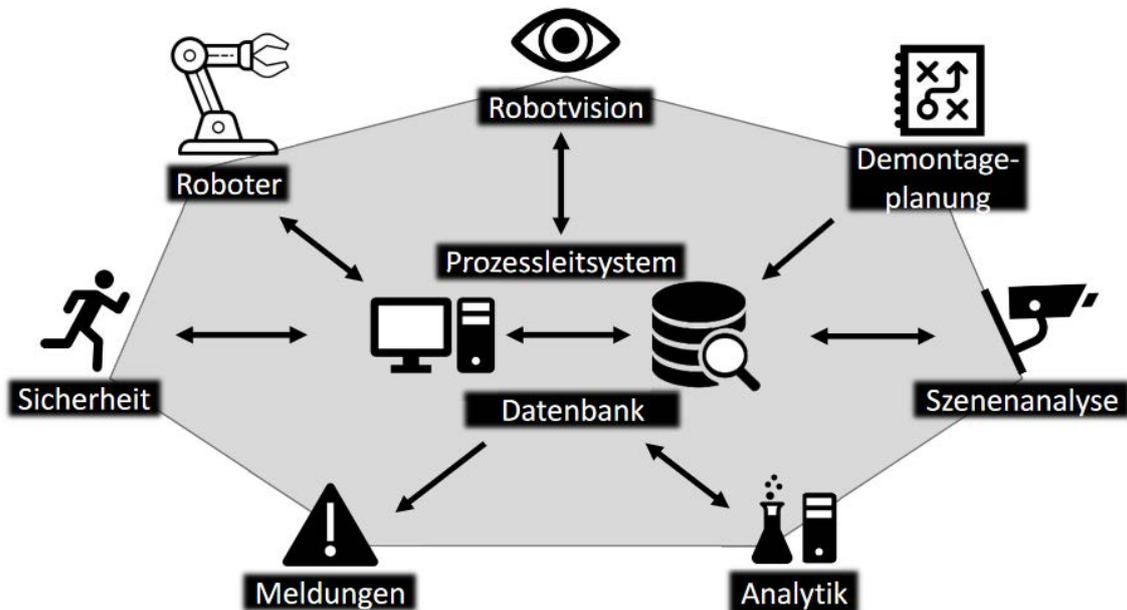


Abbildung 102: Datenbank als zentrale Kommunikationsplattform der Demontageanlage.

Neben einer zuverlässigen Datensicherung während des gesamten Projektzeitraumes, war ein zentrales Logging zwecks vereinfachter Fehlersuche erforderlich. Das erstellte System erfüllt folgende Aufgaben und Anforderungen:

- Ablage der Projektdaten
- Gute Dokumentation der Daten
- Zuverlässige Datensicherung bei gleichzeitiger Erhaltung leichter und schneller Anpassbarkeit
- Zentrales Logging für Kontrolle und Debugging
- Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten des Systems

Im Folgenden sollen einige Aufgaben beschrieben werden. Insbesondere die Zusammenarbeit der Komponenten Prozessleitsystem, Szenenanalyse und Robotvision mit der Datenbank wird in den jeweiligen Kapiteln verdeutlicht.

Ablage und Dokumentation der Projektdaten

Bei den verwalteten Daten handelt es sich z. B. um aus den CAD-Daten der Antriebsaggregate bzw. Baugruppen generierte Bauteilinformationen, aus der manuellen Demontage abgeleitete detaillierte Zustandsbeschreibungen für die Definition der Demontagesequenzen, Konfigurationsdetails für die Roboter, diverse Daten der verwendeten Sensoren sowie die Logs. Die Daten der einzelnen Komponenten des Antriebsaggregates können hierarchisch abgelegt werden, um eine Parallelisierung des gesamten Demontagevorgangs zu

ermöglichen. Dabei erhält jede Komponente ihr eigenes lokales Koordinatensystem, damit diese losgelöst von der Hauptkomponente betrachtet und beispielsweise auf einem eigenen Spanntisch weiter zerlegt werden kann. Es besteht weiterhin die Möglichkeit zum Eintragen der jeweiligen Materialtypen und Bauteilgewichte der Komponenten, sodass über eine Datenbankabfrage die jeweiligen Materialgewichte einer Menge von Komponenten leicht ermittelbar ist, um Wirtschaftlichkeitsanalysen auch für Teilprozesse durchführen zu können.

Beim Design des Datenbankschemas wurde darauf geachtet, möglichst viele Details vor dem Benutzer zu verbergen, um die Programmierschnittstelle (API) einfach zu halten und damit die Fehleranfälligkeit zu verringern. Um dies zu erreichen, wurde ein spezielles Schema API geschaffen, welches von den einzelnen Komponenten ausschließlich benutzt wird. Weiterhin wurden bevorzugt Funktionen verwendet, um die Bedienung durch die API noch weiter zu vereinfachen und damit etwaige Fehler zu vermeiden.

Zur besseren Dokumentation und Verständlichkeit existieren spezielle Spalten mit dem einheitlichen Namen „description“, in denen optional detaillierte Beschreibungen der betreffenden Entität hinterlegt werden können. Weiterhin wurde von der nur bei PostgreSQL vorhandenen Möglichkeit Gebrauch gemacht, die einzelnen Tabellen, Sichten und Spalten zu kommentieren.

Datensicherung

Bei der notwendigen Datensicherung musste besonders berücksichtigt werden, dass bei einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt jeder Teilaspekt eine gewisse Flexibilität erfordert. Aus diesem Grund schieden normale Datenbankdumps zur regelmäßigen Sicherung aus, denn diese setzen immer voraus, dass das Datenbankschema erhalten bleibt, was aber während des Entwicklungsprozesses praktisch nie garantiert werden kann. Deswegen wurde ein dynamischerer Ansatz gewählt, bei dem die Daten im JSON-Format und damit flexibel handhabbar gesichert werden und somit leicht auch in ein den Anforderungen besser angepasstes Datenbankschema importiert werden konnten. Dieser Ansatz verbessert auch die Möglichkeiten des Debuggings.

Zentrales Logging

Um einen guten Überblick über alle ablaufenden Prozesse zu haben und ggf. Fehler schneller finden und beheben zu können, wurde ein zentrales Logging für alle Komponenten des Systems geschaffen. Jede einzelne Komponente des Gesamtsystems erhält so die Möglichkeit, gegebenenfalls anfallende Loggingdaten zentral und damit leicht zugänglich

abzulegen. Dabei werden die IP Adresse, der Zeitstempel und der User mitgeloggt, um die einzelnen Nachrichten besser gruppieren und sortieren zu können.

Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten

Auch für die rückwirkungsfreie Entkoppelung der einzelnen Systemkomponenten (z. B. Robotersteuerung, Szenenanalyse) eignet sich eine Kommunikation dieser ausschließlich über den zentralen Datenbankserver, welcher alle dafür benötigten Eigenschaften automatisch mit sich bringt. Dabei wurden auch spezielle Features des PostgreSQL Datenbankservers verwendet, mit denen asynchron Signale zwischen den Komponenten ausgetauscht werden können. Wo diese Art der Kommunikation nicht benötigt wird, findet einfaches Polling Anwendung, ein für diesen Zweck ausreichendes und robustes Verfahren.

Szenenanalyse

Eine robotergestützte Demontage erfordert die Identifikation und Lokalisierung der Bauteile, um präzise Greif-, Schraub- sowie weitere Manipulationsvorgänge am elektrischen Antriebsaggregat zu koordinieren. Dies wird in dem Demontagemodul über den Einsatz von Eye-in-Hand 2D-Kamerasystemen realisiert.

Eine am Ende eines Prozessschrittes durchgeführte Erfolgskontrolle verhindert weiterhin, dass nicht oder nur teilweise demontierte Bauteile zu Kollisionen in nachfolgenden Prozessschritten und damit zu Beschädigungen am Demontagemodul führen. Diese Erfolgskontrolle wird mit einem 3D Kamerasystem sowie einem Induktionssensor für die Schraubendemontage durchgeführt.

Die Szenenanalyse als integraler Bestandteil des Demontagemoduls gewährleistet einerseits die Durchführbarkeit des eigentlichen Prozesses, andererseits die Sicherheit von Personen und Anlage. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen technischen Umsetzungen bezüglich der Szenenanalyse erläutert.

Identifikation und Lokalisierung

Zum Einsatz kommt ein RobotVision-System der Firma Keyence, bestehend aus einem Controller (XG-X2900), welcher mit den Robotern und dem Prozessleitsystem per Ethernet/TCP kommuniziert, sowie roboterseitig jeweils aus einer Kamera (CA-HF2100M) mit Beleuchtungsring (CA-DRM10X). Das System ermöglicht die präzise Lokalisierung von Bauteilen mittels Bilderkennungsalgorithmen und die korrekte Überführung der Position in das Roboter-Koordinatensystem. Die Kameras inklusive der Beleuchtung wurden jeweils an die Achse 6 der Kuka Roboter montiert (Abbildung 103). Dabei war zu berücksichtigen, dass die Halterungen möglichst starr konstruiert sind, damit die jeweilige Kamera nach einer Bewegung

des Roboters möglichst wenig nachschwingt sowie positionsgetreu bleibt. Andernfalls könnten daraus fehlerhafte Positionsangaben resultieren und den Prozessablauf stören.

Jeder Prozessschritt, bei dem eine Bauteilidentifikation notwendig ist, läuft dabei wie folgt ab: Der jeweilige Roboter fährt die Kamera über das zu identifizierende Bauteil und gleicht die Bildszene mit einem vorher erstellten Musterbild des Bauteils mittels Bilderkennungsalgorithmen ab (Abbildung 103). Für die Bauteillokalisierung werden die Bildkoordinaten des erkannten Musters in das Koordinatensystem des Roboters umgerechnet, welche wiederum verwendet werden, um werkzeugseitige Aktionen, beispielsweise das Lösen von Schrauben, durchzuführen.

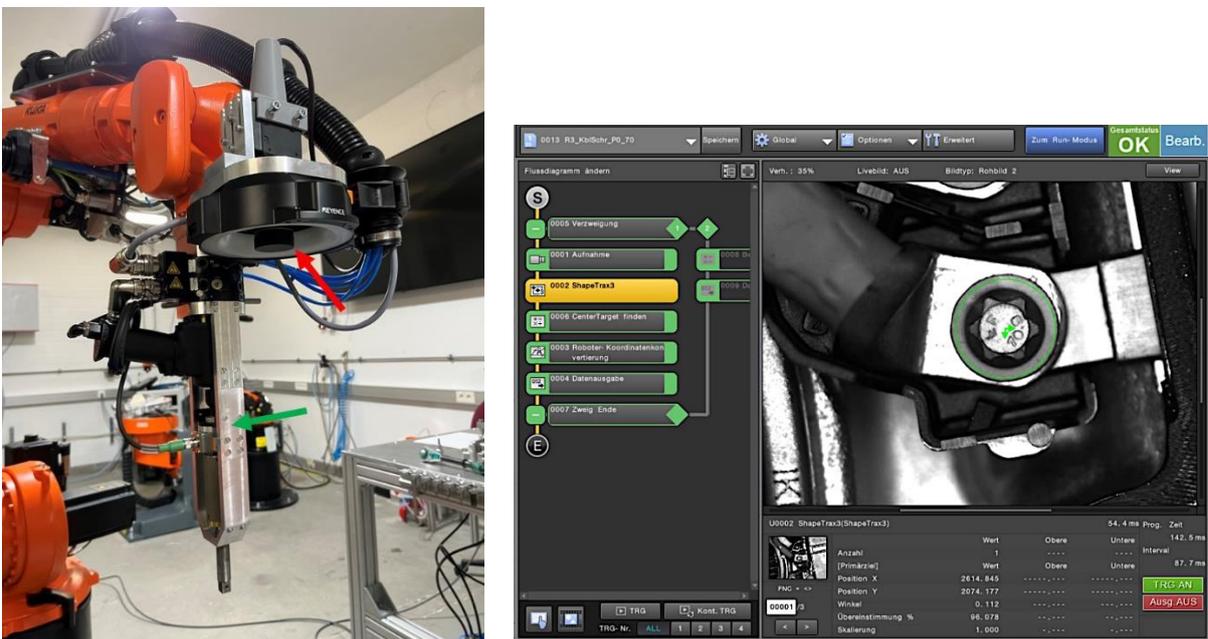


Abbildung 103: Im linken Bild zu sehen ist die Keyence Kamera mit Beleuchtungsring (roter Pfeil) und Schraubwerkzeug (grüner Pfeil) montiert an Achse 6 des Kuka KR16. Im rechten Bild ist die Bedienoberfläche des Keyence-Controllers dargestellt. Der grüne Kreis in der Bildszene markiert das erkannte Referenzmuster.

Der RobotVision-Prozess arbeitet für jedes zu lokalisierende Bauteil auf einer 2D-Bildebene, welche ein korrespondierendes Basis-Koordinatensystem für den jeweiligen Roboter erfordert. Für die 208 zu demontierenden Bauteile ergeben sich 92 solcher Ebenen, für die das Einmessen einer Basis erforderlich wäre. Diese hohe Zahl bedeutet einen erheblichen Zeitaufwand, zudem können für viele Bauteile keine geeigneten Punkte am Aggregat vermessen werden. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine Methode entwickelt, bei der die Koordinaten, welche notwendig sind, um die RobotVision-Bases und die Bauteilpositionen zu berechnen, aus dem herstellerseitig bereitgestelltem CAD-Modell ausgelesen und anschließend in das Roboter-Koordinatensystem umgerechnet werden. Im Folgenden wird das hier als Koordinatentransformation bezeichnete Verfahren erläutert.

Koordinatentransformation

Das Grundproblem bei der Koordinatentransformation besteht darin, Punkte aus einem Referenzkoordinatensystem in ein Zielkoordinatensystem zu projizieren. Dabei sind beide Koordinatensysteme zueinander rigide, d.h. die euklidischen Distanzen zwischen gleichen Punkten sind identisch. Eine rigide Transformation wird definiert als

$$p'_i = R \times p_i + t,$$

wobei p_i ein Punkt im Referenz- (CAD) und p'_i den entsprechenden Punkt im Zielkoordinatensystem (Roboter) darstellt. Die unbekannte 3x3 Rotationsmatrix R sowie der unbekannte Transformationsvektor t können ermittelt werden, wenn zwei zueinander analoge Punktwolken mit mindestens drei Punkten aus beiden Koordinatensystemen bekannt sind. Dafür wurden verschiedene Punkte einerseits im CAD-Modell mit der Open-Source-Software CloudCompare und andererseits im Roboter-Koordinatensystem mit Hilfe einer Messspitze (Abbildung 104) direkt an dem auf dem Positionierer fixierten Aggregat vermessen. Da es sich bei den Punktwolken um Messwerte handelt, basiert der hier verwendete Algorithmus für die Koordinatentransformation auf einem „least-square“ Schätzverfahren¹.

Die so geschätzten Transformationsparameter R und t beziehen sich dabei allerdings nur auf die genaue Position des Aggregats, welches vermessen wurde. Für ein anderes Aggregat sollten die berechneten Koordinaten zwar ebenfalls theoretisch stimmen. In der Praxis zeigte sich allerdings, dass bei einer leichten Verschiebung auf dem Arbeitstisch beispielsweise durch kleine Variationen bei der Montage der Adapterplatte die Transformation nicht mehr exakt die Punkte analog zum CAD-Modell liefern.

¹ Arun, K. S., Huang, T. S., & Blostein, S. D. (1987). Least-squares fitting of two 3-D point sets. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, (5), 698-700.

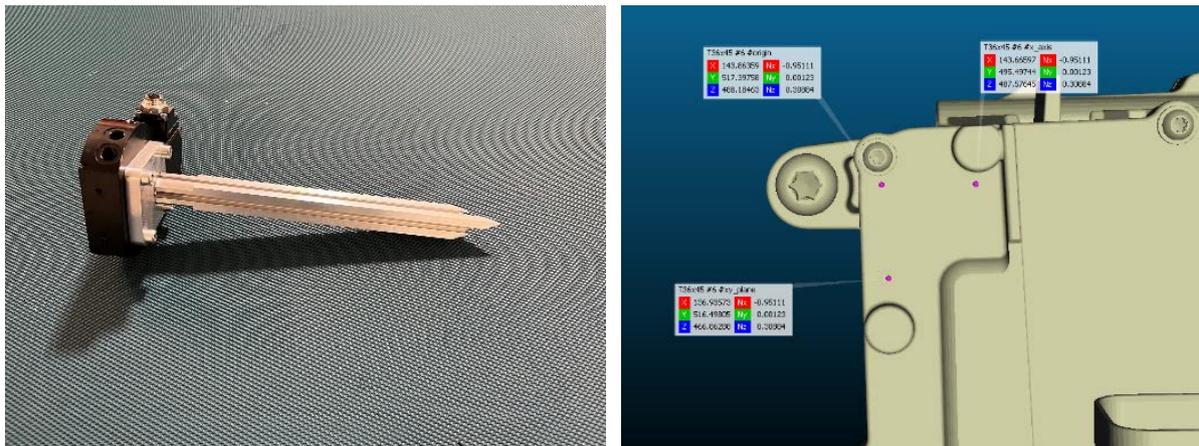


Abbildung 104: Messspitze (links) sowie das CAD-Modell (rechts) zur Erfassung der Punktwolken.

Um dieses Problem zu lösen, wurde ein Verfahren entwickelt, bei welchem die Position jedes neu auf dem Arbeitstisch fixierten Motors mittels eines zentral darüber montierten 3D-Kamerasystem (Ensenso X36 der Firma Optonic) erfasst wird. Dabei wird ein sogenanntes Surface-Matching (HALCON Version 20.11 der Firma MVTec) durchgeführt, bei dem das CAD-Modell des Motors in die Bildszene eingepasst wird. Dieser Schritt liefert die Transformation vom CAD- in das Kamera-Koordinatensystem. Da das Surface-Matching ein stochastischer Prozess ist, wurden mehrere Durchläufe vorgenommen, um eine möglichst präzise Schätzung der Parameter zu erreichen. Die anschließende Transformation vom Kamera- in das Roboter-Koordinatensystem wurde mit dem bereits genannten auf zwei Punktwolken basierenden Verfahren von Arun et al. (1987) durchgeführt. Beim Start eines neuen Demontageprozesses wird nun einmalig die Transformation vom CAD-Modell in das Kamera-Koordinatensystem über das Surface Matching dynamisch berechnet und im Anschluss die Koordinaten für die RobotVision-Bases sowie aller Bauteilkoordinaten mittels der fixen Transformationsparameter vom Kamera- zu Roboter-Koordinatensystem. Die Kommunikation mit dem PLS findet dabei über die Datenbank statt.

Um die Koordinatentransformation zu vervollständigen, blieb ein weiteres Problem zu lösen. Das Aggregat ist auf einem 2-Achs-Positionierer (Kuka DKP400) fixiert, welcher es erlaubt, den Motor je nach Prozessschritt von verschiedenen Orientierungen aus mit den Manipulatoren zu erreichen. Dabei sind die beiden Drehwinkel des Positionierers bekannt, da sie vom Prozess gesteuert werden. Somit bestand die Aufgabe darin, die Koordinaten im Raum in Abhängigkeit vom Winkel der beiden kreisförmigen Rotationen zu berechnen. Die Formel, mit welcher ein Punkt p resultierend aus der Drehung eines Punktes p' um den Winkel $\Delta\phi$ berechnet wird, lautet

$$p(\phi) = r \cos(\Delta\phi) p' + r \sin(\Delta\phi) (n \times p') + m, \text{ mit } 0 \leq \Delta\phi \leq 2\pi.$$

Der Normalenvektor der Kreisebene n , der Radius r und der Mittelpunktvektor m des Kreises (Abbildung 105) waren dabei die zu ermittelnden unbekannt Parameter.

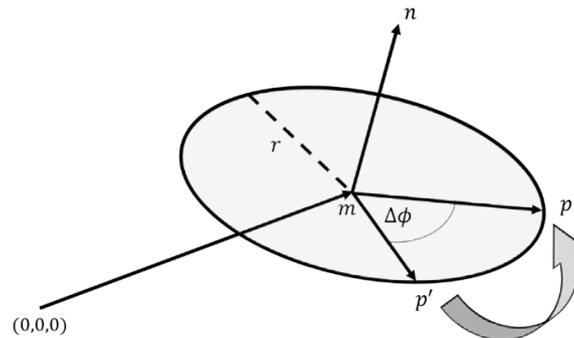


Abbildung 105: Kreisbewegung im Raum zur Veranschaulichung der Parameter.

Da sich ein Kreis mittels mindestens dreier Punkte definieren lässt, wurde der Motor auf dem 2-Achs-Positionierer in verschiedene Winkelstellungen gebracht und jeweils ein Surface-Matching durchgeführt. Die verschiedenen Positionen des eingepassten CAD-Modells beschreiben dabei eine Kreisbahn, welche analog zur Rotation des Positionierers ist. Mit dieser Methode wurden mehrere Messpunkte für jede der beiden Kreisbahnen ermittelt, wobei eine höhere Anzahl von Punkten auch eine genauere Schätzung der Kreisparameter bedeutet. Zudem wurden für jede Winkelstellung mehrere Surface-Matchings durchgeführt und jeweils der Mittelwert genommen, um eine robustere Messung zu erhalten. Mit Methoden der linearen Algebra, der analytischen Geometrie sowie „least-square“ Schätzungen wurden die Kreisparameter ermittelt und an die Datenbank übergeben. Mittels der Kreisparameter und weiteren Verfahren der analytischen Geometrie kann so jeder Punkt im Roboter-Koordinatensystem um die Drehwinkel des Positionierers rotiert werden. Je nach Prozessschritt wurden so die im vorherigen Abschnitt berechneten Koordinaten für eine spezifische Winkelstellung mit der Kreisformel berechnet und in der Datenbank hinterlegt.

Eine eigene Software mit Bedienoberfläche wurde programmiert, um die Algorithmus-gestützte Parametersuche für die Koordinatentransformation und die Punktberechnung zu erleichtern. Ebenfalls wurde eine Software in Form eines Service entwickelt, welche vom Prozessleitsystem (PLS) über die Datenbank angestoßen werden kann und die kameragestützte Koordinatentransformation durchführt (Abbildung 106). Die Programmierung erfolgte in Python 3.10.

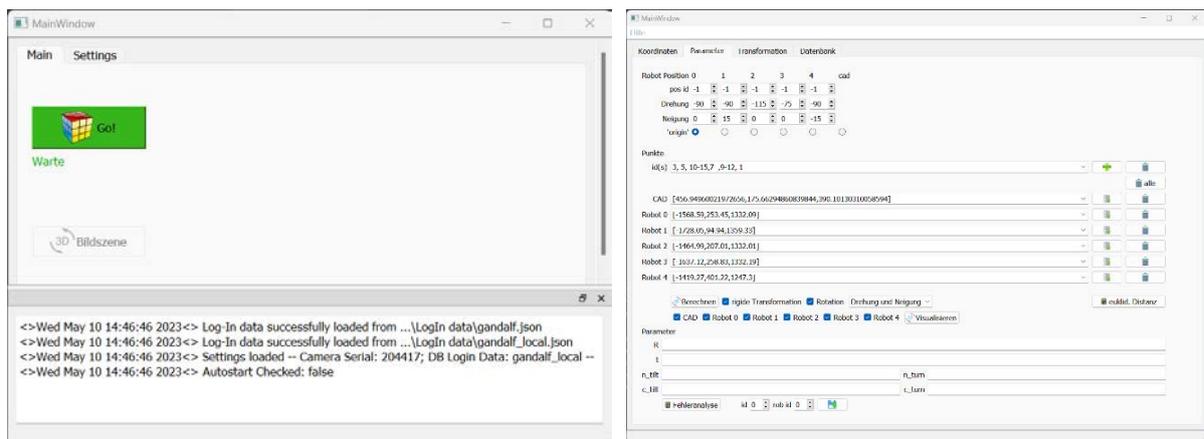


Abbildung 106: Bedienoberflächen des Service (links) und des Setups (rechts) für die Koordinatentransformation.

Erfolgskontrolle

Bei der Erfolgskontrolle wird nach jedem Prozessschritt überprüft, ob ein Bauteil vollständig demontiert wurde. Die Überprüfung kann dabei einerseits direkt am Produkt stattfinden, andererseits während oder nach dem Prozess des Ablegens. Ersteres würde den Einsatz der robotergeführten Kameras des RobotVision-Systems erfordern, was nicht nur zusätzliche Bewegungen, sondern vor allem auch die Entwicklung einer Vielzahl von Prüfprogrammen auf dem Keyence-Controller nach sich ziehen würde. Daher wurde entschieden, die Erfolgskontrolle während bzw. nach dem Prozess des Ablegens durchzuführen. Zwei unterschiedliche Systeme für die Erfolgskontrolle, wovon eines für Schrauben und eines für weitere Bauteile eingesetzt wurde, sind im Projektzeitraum entwickelt und erfolgreich eingesetzt worden.

Schrauben

Zur Erfolgskontrolle der Schraubendemontage ist direkt vor dem Schraubenabstreifer ein induktiver Näherungssensor (Schunk) angebracht (Abbildung 107). Der Sensor ist über eine I/O Schnittstelle mit dem Roboter verbunden und liefert bei Erregung ein Eingangssignal über die KRL an das PLS. Für den Abstreifprozess der Schraube ist die roboterseitige Bahnbewegung so programmiert, dass diese sowohl beim Hin- als auch beim Rückweg das Schraubwerkzeug am Sensor vorbeiführt. Das erste Signal wird dann als TRUE-Signal für die erfolgreiche Demontage interpretiert, da sich eine Schraube im Schraubwerkzeug befindet. Das Ausbleiben einer zweiten Erregung wird ebenfalls als TRUE-Signal für den erfolgreichen Abstreifvorgang interpretiert, da sich nun keine Schraube mehr im Schraubwerkzeug befinden sollte. Bei einem FALSE-Signal auf dem Hin- oder Rückweg wird der Operator informiert und kann entsprechend eingreifen, wie etwa den Schraub- oder Abstreif-Vorgang wiederholen.

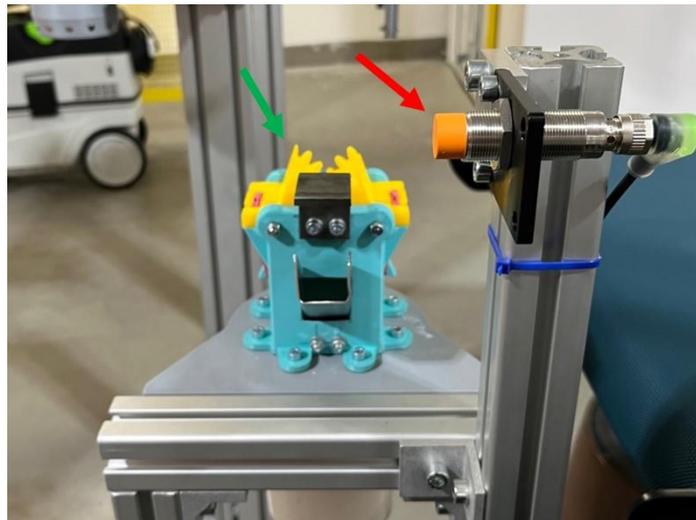


Abbildung 107: Ein induktiver Näherungssensor (roter Pfeil) sendet ein Signal an die KRL sobald eine Schraube auf dem Weg zum Schraubenabstreifer (grüner Pfeil) in einem Mindestabstand vorbeigeführt wurde.

Weitere Bauteile

Eine weitere Erfolgskontrolle erfolgt über ein 3D-Kamerasystem (X36), welches über dem Förderband, auf dem die Bauteile nach erfolgreicher Demontage abgelegt werden, montiert ist. Nach der robotergeführten Ablage des Bauteils wird ein Bild von dem Ausschnitt des Förderbandes, auf dem sich das Bauteil befinden sollte, aufgenommen. Der Ausschnitt wird nun einer weiteren Analyse unterzogen, welche aus zwei Methoden besteht: Für große Bauteile wird das Tiefenbild ausgewertet, für kleine Bauteile das Grauwertbild (Abbildung 108). Beim Tiefenbild wird das unterste Quartil der Tiefenwerte (Abstand zur Kamera) der einzelnen Bildpixel betrachtet. Befindet sich ein Bauteil auf dem Förderband, ist dieser Wert im Vergleich zum leeren Förderband kleiner. Übersteigt die Differenz einen vordefinierten Schwellenwert, wird dies als erfolgreiche Demontage des Bauteils interpretiert. Dabei wird nur das unterste Quartil der Tiefenwerte ausgewertet, da einige Bauteile aufgrund ihrer Geometrie nur einen Teil des Bildausschnittes ausfüllen und somit beispielsweise die mittlere Tiefe über den gesamten Bildausschnitt weniger eindeutig wäre. Für sehr kleine Bauteile, wie beispielsweise Sicherungsringe, müsste der Schwellenwert allerdings so klein gewählt werden, dass dieser dann innerhalb statistischer Fehlergrößen liegt und somit zu falsch-positiven Ergebnissen führen kann. Aus diesem Grund wurde für die Erfolgskontrolle kleiner Bauteile ein Verfahren entwickelt, welches die Anzahl der Kanten des Grauwertbildes analysiert. Dabei werden die Kanten mittels Canny-Algorithmus berechnet. Die Parameter des Canny-Algorithmus werden dabei so gewählt, dass im Bild des leeren Förderbandes möglichst keine oder sehr wenig Kanten detektiert werden, jedoch bei der Anwesenheit eines Bauteils im Bildausschnitt ein unterer Schwellenwert eindeutig überschritten wird. Ein TRUE-Signal

wird bei einer erfolgreichen Demontage über die Datenbank an das PLS gesendet. Bei einem FALSE-Signal ist ein manuelles Eingreifen erforderlich.

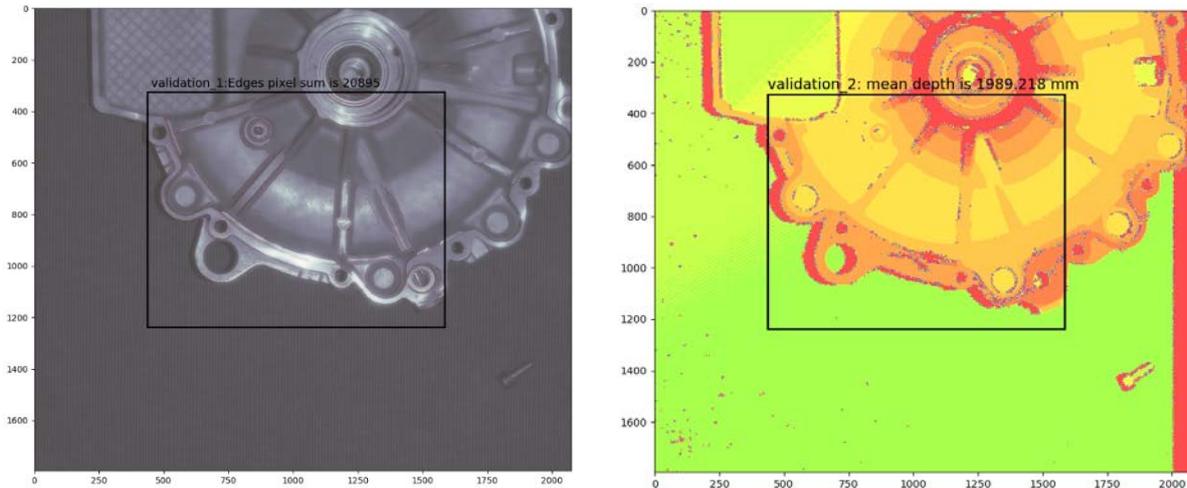


Abbildung 108: Szenenanalyse bei der Erfolgskontrolle nach der Bauteildemontage am Beispiel des nicht-getriebeseitigen Gehäusedeckels. Zu sehen sind links das Grauwertbild für die Kantendetektion und die Pixelsumme erkannter Kanten, rechts das Tiefenbild mit dem unteren Quartil der Tiefenwerte pro Bildpixel.

Die Erfolgskontrolle mittels Tiefenkamera wurde als Service programmiert, welcher bei Start des PLS automatisch ausgeführt werden kann (RoboEyeService). Unterstützend zum RoboEyeService wurde ein Entwicklertool (RoboEyeSetup) mit Benutzeroberfläche programmiert, um Parameter, Schwellenwerte und Bildausschnitte für die Szenenanalyse festzulegen (Abbildung 109). Die Werte werden in der Datenbank hinterlegt und können so vom RoboEyeService für jeden Prozessschritt individuell abgerufen werden. Die Programmierung erfolgte in Python 3.10.

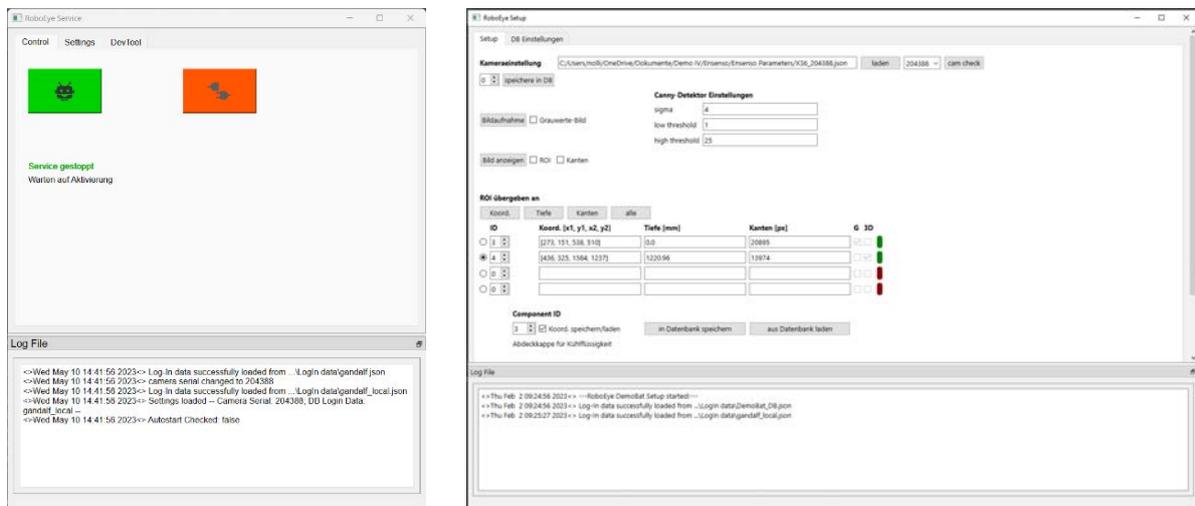


Abbildung 109: Benutzeroberflächen für die Erfolgskontrolle: RoboEyeService (links) läuft als Service für die Erfolgskontrolle, sobald das PLS gestartet wird. Mit RoboEyeSetup (rechts) werden Parameter für den Service getestet und festgelegt.

Ausblick

Das Verfahren der Koordinatentransformation bietet enormes Entwicklungspotential, gerade im Hinblick auf die Vereinfachung der Prozessplanung. So könnten Bauteile im CAD-Modell mittels KI-gestützter Algorithmen erkannt und Koordinaten und Ausrichtung automatisch berechnet werden. Dies würde darüber hinaus die Flexibilität des Prozesses erhöhen, da Veränderungen im Produktdesign eine schnellere und einfacherer Anpassung erlauben. Dieser Ansatz würde allerdings eine Bereitstellung von CAD-Modellen seitens der Hersteller voraussetzen, hier wäre eine zentrale Datenbank mit Bezahl-Option als Anreizmodell denkbar.

Auch die Identifikation von Bauteilen im Online-Prozess wäre über den Einsatz neuronaler Netze erweiterbar. Hier könnten beispielsweise automatisiert in einem ersten Schritt Schrauben erkannt und das entsprechende Werkzeug automatisch gewählt werden. Studien in diesem Bereich haben bereits die prinzipielle Machbarkeit der KI-gestützten Erkennung von Schraubentyp und -größe gezeigt¹. Hier müssten allerdings Daten über Schrauben erfasst oder herstellerseitig bereitgestellt werden, um die neuronalen Netze gezielt trainieren zu können.

Demontageprozess

Die Grundlage für einen effizienten automatisierten Demontageprozess ist die korrekte Definition der einzelnen Prozessschritte und deren Verknüpfung. Die Herausforderung ist dabei die ständige Kontrolle der Abläufe im Sinne der Systemsicherheit. Auch und gerade bei einem hohen Grad der Systemoptimierung können unvorhersehbare Betriebszustände auftreten, in denen der automatisierte Prozess keinen Lösungsansatz bietet. Insbesondere bei End-of-Life-Produkten mit einer langen Nutzungsdauer ist mit vielfältigen Herausforderungen aufgrund der per se sehr heterogenen Produktqualität zu rechnen. Beispiele hierfür sind festsitzende Lager, korrosionsbedingt nicht mehr handhabbare Schraubverbindungen, Verformungen durch Schäden, aber auch Modifikationen durch ersetzte Bauteile oder Baugruppen, die nicht der erwarteten Spezifikation entsprechen. Um solchen Situationen

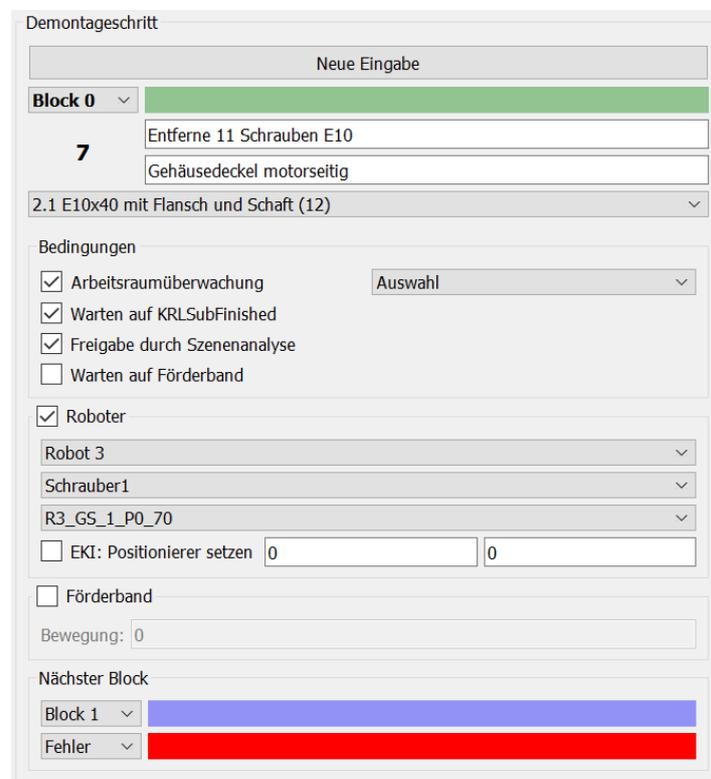
¹ Yildiz, E., & Wörgötter, F. (2020). DCNN-based Screw Classification in Automated Disassembly Processes. Proceedings of the International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems (ROBOVIS 2020), 61-68

begegnen zu können, müssen diese zunächst durch einen Abgleich mit den werkseitigen Produktspezifikationen detektiert werden. Nur dann kann der Prozess koordiniert und sicher unterbrochen werden, um ein menschliches Eingreifen durch das Betriebspersonal zu ermöglichen. Sofern die Informationsverarbeitung für individuelle Produkte im zukünftigen Industrie 4.0-Umfeld die Pflege produktbezogener Informationen über die Nutzungsphase hinweg ermöglicht, wäre dies auch anhand des digitalen Zwillings aus der Produktion durchführbar. Im Rahmen des Projektes wurden für die kritischen Stellen wie Schraubverbindungen optische Verfahren eingesetzt, um den aktuellen Zustand zu bewerten. Das primäre Ziel während der Entwicklung war es, die Robustheit des Systems zu gewährleisten, dem nachgeordnet stand die Optimierung hinsichtlich der Demontagezeiten.

Basierend auf den Erkenntnissen der manuellen Vorversuche wurden Demontageanleitungen definiert, welche die einzelnen Prozesszustände und die exakte Abfolge der Demontageschritte für die roboterseitigen Greif- und Schraubwerkzeuge sowie für weitere Hilfsmittel (Positionierer, Austreibeeinheit für Rotor und Stator, Förderband) beinhalten. Die von den Robotern durchzuführenden Demontageschritte wurden als modulare KRL-Unterprogramme auf den jeweiligen Steuerungen definiert und über die Datenbank mit dem Prozessleitsystem verknüpft. Neben diesen reinen Arbeitsanweisungen werden darüber hinaus verschiedene prozess- und sicherheitstechnische Bedingungen, welche für die sichere Verknüpfung der Demontageschritte zu einer Demontagesequenz benötigt werden, im PLS definiert und einzelnen Prozesszuständen zugeordnet. Hierfür wurde ein streng modularer Ansatz gewählt, um eine bestmögliche Editier- und Wartbarkeit der Sequenz zu erreichen, so dass bei auftretenden Produktvariationen möglichst schnell reagiert und das System auf diese angepasst werden kann.

Die einzelnen Prozessschritte können zu thematischen Blöcken zusammengefasst werden, welche in der Sequenz farbig markiert sind. Dies erhöht einerseits die Übersichtlichkeit und Wartbarkeit des Prozesses, da zusammengehörende Schritte besser erfasst werden können. Andererseits dienen die Blöcke auch als Einstiegspunkte, um Verzweigungen und damit Nichtlinearitäten im Prozess realisieren zu können. Beispielsweise kann bei der Demontage eines Bauteils ein Lager entweder in der Lagerschale oder aber an der Welle des Bauteils verbleiben, so dass infolgedessen der Prozess auf verschiedene Art fortgesetzt werden muss. Solche Verzweigungen werden durch die Szenenanalyse ermöglicht, die je nach Ergebnis den Ablauf entsprechend steuern oder aber einen Fehler auslösen kann. Für die Definition der einzelnen Demontageschritte der Sequenz ist im PLS ein separates Dialogfenster implementiert worden, in welchem folgende Informationen verwaltet werden können (Abbildung 110):

- Name des Schrittes, wie er in der Sequenz angezeigt wird
- Weiterführende Beschreibung (optional)
- Blockzugehörigkeit
- Bauteilbezogener Demontagezustand
- Aktivierung der Ausführungsbedingungen
- Auszuführendes KRL-Modul auf der Robotersteuerung
 - Roboternummer
 - Werkzeugnummer
 - Name des Moduls auf der Steuerung
 - Positioniererkoordinaten übermitteln (optional)
- Alternativ: Steuerung des Förderbandes
- Blocknummer des Folgezustandes
- Folgezustand im Fall eines negativen Resultats der Szenenanalyse



Demontageschritt

Neue Eingabe

Block 0

7

Entferne 11 Schrauben E10

Gehäusedeckel motorseitig

2.1 E10x40 mit Flansch und Schaft (12)

Bedingungen

Arbeitsraumüberwachung Auswahl

Warten auf KRLSubFinished

Freigabe durch Szenenanalyse

Warten auf Förderband

Roboter

Robot 3

Schrauber1

R3_GS_1_P0_70

EKI: Positionierer setzen 0 0

Förderband

Bewegung: 0

Nächster Block

Block 1

Fehler

Abbildung 110: Dialogfenster zur Definition einzelner Demontageschritte.

Die Verknüpfung der Prozessschritte zu einer Demontagesequenz sowie die Umsetzung der in der Datenbank definierten Zustandsbeschreibungen in konkrete automatisierte Steuerbefehle erfolgt unter Einsatz eines deterministischen endlichen Automaten (DEA). Die Steuerung des Prozesses basiert also auf Zustandsübergängen in Abhängigkeit einer Eingabe. In diesem Fall kann ein Folgezustand nur erreicht und damit der nächste Demontageschritt abgearbeitet werden, wenn verschiedene Voraussetzungen erfüllt sind, andernfalls gelangt das System entweder in einen Fehler- oder einen Wartezustand und der Prozess wird angehalten bzw. pausiert. Je nach Art des zuletzt ausgeführten Demontageschrittes müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- *Arbeitsraumüberwachung*

Es kann für jeden Schritt festgelegt werden, für welche Roboter eine Arbeitsraumüberwachung notwendig ist, um Kollisionen im nächsten Schritt zu vermeiden. Es gibt Situationen, in denen mehrere Roboter im selben Arbeitsraum aktiv sein müssen, in diesen Fällen wird die Überwachung explizit deaktiviert.

- *Szenenanalyse*

Nach jedem Schritt, bei dem ein Bauteil entfernt worden ist, wird die kamerabasierte Szenenanalyse für die Erfolgskontrolle gestartet. Ist das Bauteil erwartungsgemäß demontiert worden, erfolgt die Freigabe für diese Bedingung, andernfalls wird in den meisten Fällen die Ausführung der Sequenz gestoppt und eine Fehlermeldung generiert.

- *Programmausführung Roboter*

Ist beim aktuell ausgeführten Schritt ein KRL-Modul auf einem der Roboter gestartet worden, wird zyklisch ein digitaler Ausgang (*finished*-Signal) auf der Steuerung ausgewertet, der dessen Beendigung signalisiert bzw. den Zeitpunkt, ab dem der nächste Schritt gestartet werden darf. Wird diese Bedingung deaktiviert, kann Parallelität erzeugt werden, sofern sicher ist, dass keine Kollisionen auftreten können. So ist es z. B. möglich, Bewegungen der Roboter oder des Förderbandes gleichzeitig auszuführen, um die Demontagezeit zu reduzieren.

- *Bewegung Förderband*

Werden Befehle an das Förderband gesendet, antwortet dieses nach Ende der Bewegung mit einer Meldung, auf die das PLS entsprechend warten muss. Auch hier kann explizit Parallelität erreicht werden, sofern der Demontageablauf dies erlaubt. Sendet das Förderband eine Fehlermeldung, wird der Benutzer informiert und der Prozess unterbrochen.

Abbildung 111 zeigt den für die Demontagesequenz zuständigen Ausschnitt der Benutzeroberfläche des Prozessleitsystems, wie er während des laufenden Prozesses

dargestellt wird. Auf der linken Seite ist die Blockstruktur der Prozessschritte zu sehen, rechts u. a. der aktuell ausgeführte sowie der nächste geplante Prozessschritt. Die aktuellen Zustände der für diesen folgenden Schritt zu erfüllenden Bedingungen werden dem Benutzer durch farbige Steuerelemente visualisiert.

Demontageablauf

000 Positionierer 0 -25
 001 Hole Schrauber 1
 002 Hole Bit 5 (T45)
 003 Entferne LE Schraube T45 #1
 004 Lege Bit 5 ab
 005 Hole Bit 6 (E10)
 006 Positionierer 0 70
 007 Entferne 11 Schrauben E10
 008 Lege Schrauber 1 ab
 009 Hole Greifer 1
 010 Hole Spreizer
 011 Positionierer 20 12
 012 Spreize Gehäusedeckel Pos 1
 013 Positionierer 10 90
 014 Spreize Gehäusedeckel Pos 2
 015 Lege Spreizer ab
 016 Hole Greifer G1
 017 Entferne Gehäusedeckel
 018 Übernehme Gehäusedeckel
 019 Übergebe Gehäusedeckel 1
 020 Lege Gehäusedeckel 1 ab
 021 Förderband 50cm
 022 Lege Greifer 1 ab
 023 Lege Greifer G1 ab
 024 Hole Schrauber 1
 025 Entferne 4 Kabelschrauben E10
 026 Lege Bit 6 ab
 027 Hole Bit 5 (T45)
 028 Positionierer 0 -25
 029 Entferne 5 Schrauben T45 LE
 030 Hole Greifer LE
 031 Entferne Leistungselektronik
 032 Lege Greifer LE ab
 033 Förderband 50cm
 034 Lege Bit 5 ab
 035 Hole Bit 6 (E10)
 036 Positionierer 0 -110

Demontagesequenz
 Complete
 Einzelschritte bestätigen

1 Positionierer 20 12
 3 Robot 1
 R1_SetPositioner E1: 20 E2: 12
 WS Cam Rob Fbd

1 Spreize Gehäusedeckel Pos 1
 4 Robot 2
 R2_Spread_G1a_P20_12

Abbildung 111: Darstellung von Teilen der Demontagesequenz im Prozessleitsystem zur Laufzeit.

Ist der Demontageprozess aufgrund eines ungeplanten Zustandes nach der Szenenanalyse oder durch Nutzereingriff unterbrochen worden, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, mit der Situation umzugehen. Ist der Grund für die Unterbrechung ein nicht oder unvollständig entferntes Bauteil, kann dies manuell entfernt und der Prozess fortgesetzt werden. Erfordert die Situation die erneute Ausführung zurückliegender Schritte, kann die entsprechende Stelle der Sequenz per Mausklick oder mittels des externen Controllers ausgewählt und gestartet werden. Eventuelle Wartebedingungen werden dann mit dem Controller manuell quittiert. Ist zunächst die Bewegung (z. B. Freifahren) eines Roboters oder eine Neupositionierung des Förderbandes notwendig, kann dies durch die manuellen Steuerbefehle geschehen und die Sequenz anschließend fortgesetzt werden.

Erfordert eine unerwartete Situation eine Anpassung oder Änderung der Sequenz, kann diese, sofern sie gestoppt ist, sehr einfach editiert werden. Es können Einzelschritte verändert,

hinzugefügt oder gelöscht werden, wobei die Änderungen entweder gespeichert oder auch nur temporär für diesen Durchlauf gültig sein können. Die geänderte Sequenz kann dann augenblicklich wieder an beliebiger Stelle gestartet werden. Durch diese Eingriffs- und Kontrollfunktionen ist es möglich, auf die meisten zu einer Unterbrechung führenden Szenarien mit minimalem Zeitverlust zu reagieren. Im Falle einer editierten Sequenz können die Szenarien bei erneutem Eintreten in Zukunft automatisch überwunden werden.

8.2 Re-X Optionen

Die Demontage von Kfz-Antriebsaggregaten kann aus unterschiedlichen Motivationen heraus und mit dementsprechend unterschiedlichen Zielstellungen erfolgen. Hochwertiges Materialrecycling ist dabei eine Option, welche nicht das maximal mögliche Potenzial der Demontage ausschöpft, bestehende Recyclingverfahren jedoch durch die Möglichkeit einer sehr hochwertigen Materialtrennung mit reinen Materialfraktionen versorgen kann. Durch die Demontage können weitere sogenannte Re-X-Optionen bedient werden, welche sowohl hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen als auch der Ökonomie hochwertigere Handlungsoptionen darstellen. Zu diesen zählen die Wiederverwendung (Reuse), die Wiederaufbereitung (Refurbishment), der Wiederaufbau aus Einzelteilen (Remanufacturing), die Rückgewinnung von Einzelbauteilen (Part Recovery) und die Rückgewinnung von Materialien (Material Recovery). Diese sind als Zielstellung nicht vollständig getrennt voneinander zu betrachten, vielmehr wird eine Mischform dieser Zielstellungen präsent sein, in der in Abhängigkeit vom Zustand die für die Antriebsaggregate bzw. deren Bauteile hochwertigste Handlungsoption angestrebt wird. Angepasst werden können dabei einerseits die Demontagetiefe und andererseits die Vorgehensweise. Beispielsweise kann mit dem Ziel des Materialrecyclings ein Prozessschritt dementsprechend ohne Rücksicht auf die Unversehrtheit eines Bauteils gestaltet werden, was tendenziell eine beschleunigte Vorgehensweise zur Folge hat, die ökonomisch vorteilhafter sein kann.

Im Projekt DeMoBat lag der Schwerpunkt nicht auf der Bestimmung der durch eine Demontage anzustrebenden Handlungsoptionen. Vielmehr war das Ziel die Entwicklung und Umsetzung einer Vollautomatisierung der Demontage des als Beispiel herangezogenen Aggregates unter Realisierung einer zerstörungsfreien Prozessabfolge. Das ausgehend von dieser Zielstellung im Projekt erstellte Demontagemodul kann in Zukunft bei Bedarf an beschleunigten, nicht zerstörungsfreien Prozessschritten dementsprechend hard- und softwareseitig angepasst werden. Notwendig ist das zerstörungsfreie Vorgehen einerseits, wenn eine Wiederverwendung von Bauteilen/Baugruppen angestrebt wird, der Zustand des jeweils

vorliegenden Aggregates und der enthaltenen Bauteile jedoch nicht bekannt ist, andererseits auch im Fall einer vorhergehenden Zustandsanalyse, die auf die Unversehrtheit enthaltener Bauteile schließen lässt.

8.2.1 Bauteil-/Baugruppenprüfung

Eine Zustandsbewertung des Bauteils/ der Baugruppe ist unerlässlich zur Einschätzung des Potenzials für eine der Re-X-Optionen. Dabei ist je nach Schadensart zu evaluieren, ob beispielsweise ein ReUse oder Refurbishment in Frage kommt. Bei Schadensarten, welche mit einer funktionalen Einschränkung einhergehen, muss eine Reparatur oder ein stoffliches Recycling des Bauteils erwogen werden. Im Fall, dass das Bauteil funktional nicht beeinträchtigt ist, beispielsweise lediglich eine optische Veränderung vorliegt, müssen herstellerseitige Vorgaben beachtet werden, in dem Sinne, ob sichtbare Schäden kundenseitig akzeptiert werden oder inwieweit eine optische Aufbereitung, z. B. Polieren, eine Möglichkeit für ein ReUse darstellt.

Unabhängig von den Überlegungen der Nachnutzung müssen in einem ersten Schritt mögliche Schadensarten identifiziert werden. Schäden werden durch verschiedene Prozesse verursacht, beispielsweise durch mechanische und/oder thermische Beanspruchung, was vor allem auf Zahnräder, Lager und Wellen zutrifft, aber auch auf elektronische Komponenten der Leistungselektronik. Dies kann eine Veränderung der Materialeigenschaften oder auch Mikrorisse verursachen, welche (sofern überhaupt) erst im fortgeschrittenen Zustand mit dem bloßen Auge sichtbar werden. Weiterhin kann es an Kontaktflächen oder unter großer mechanischer Spannung zu Abrasion, Adhäsion und Deformation kommen. Abbrüche und Kratzer können dann eine spätere Manifestation dieser Prozesse sein. Auch bei der eigentlichen Demontage können Schäden durch Zug- und Scherkräfte auftreten.

Weiterhin müssen die Anforderungen an eine Schadensdetektion formuliert werden. Im Sinne des Re-X Gedankens sind die Bauteile möglichst zerstörungsfrei zu prüfen. Weiterhin soll das Verfahren mit möglichst wenig Aufwand in Zeit und Ressourcen stattfinden, damit es hochskaliert und automatisiert werden kann. Eine Kategorie von Verfahren, welche diese Bedingung erfüllen, basiert dabei auf optischen Systemen für die Detektion von Kratzern, Absplitterungen und Deformationen. Auch die Kombination mit künstlichen neuronalen Netzen wurde im Projektzeitraum betrachtet.

Des Weiteren wurde die mögliche Prüfung mittels einer Getriebeölanalyse evaluiert. Dabei wurde das Getriebeöl auf mögliche Spuren abgeriebenen Materials untersucht, welches

Rückschlüsse auf den Verschleiß der verbauten Komponenten und somit den Gesamtzustand des eAggregats liefert. Die Verfahren werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Optische Bauteilprüfung

Bei der optischen Bauteilprüfung wurden Verfahren entwickelt, bei denen die Bauteile auf Kratzer oder Deformationen untersucht werden. Dabei ging es vor allem darum, zu untersuchen, welche Verfahren zu robusten Ergebnissen in der Schadensdetektion führen und darüber hinaus automatisierbar wären. Als Testobjekte wurden am Gehäusedeckel des Motors künstliche Schadensfälle verursacht (Abbildung 112). Die im Folgenden vorgestellten optischen Prüfverfahren sind eine Auswahl von im Projektzeitraum getesteten technischen Umsetzungen, welche sich im Sinne der formulierten Anforderungen als am geeignetsten herausgestellt haben.



Abbildung 112: Schadenszustände am Gehäusedeckel. a) unbeschädigt. b) mit Kratzern. c) Verschlusskappe fehlt.

Anomaliedetektion in 2D-Bildern

Die Software XG-X Vision-Editor der Firma Keyence bietet einen Anomaliedetektions-Algorithmus an. Dabei wird ein Referenzbild in die Bildszene eingepasst und Bildbereiche aufgrund von Grauwerteunterschieden nach Defektlevel bewertet (Abbildung 113). Durch den Einsatz sehr hochauflösender Kameras kombiniert mit dem shape-from-shading Verfahren ist es möglich, sehr kleine Anomalien zu detektieren. Das shape-from-shading Verfahren basiert auf einem Beleuchtungsring (siehe Kapitel Szenenanalyse), mit dem die Kamera ein Objekt unter verschiedenen Beleuchtungswinkeln aufnehmen kann. Die Einzelbilder werden im Anschluss zusammengesetzt, wobei störende Lichteinflüsse herausgefiltert und detaillierte Strukturen betont werden.

Die Methode zeigte vielversprechende Ergebnisse, da zumindest grobe Kratzer erfolgreich detektiert wurden. Prinzipiell ist eine Automatisierung des Verfahrens möglich, allerdings muss weitere Forschung mit verschiedenen Bauteil- sowie Schadenstypen erfolgen, um eine letztendliche Beurteilung abgeben zu können.

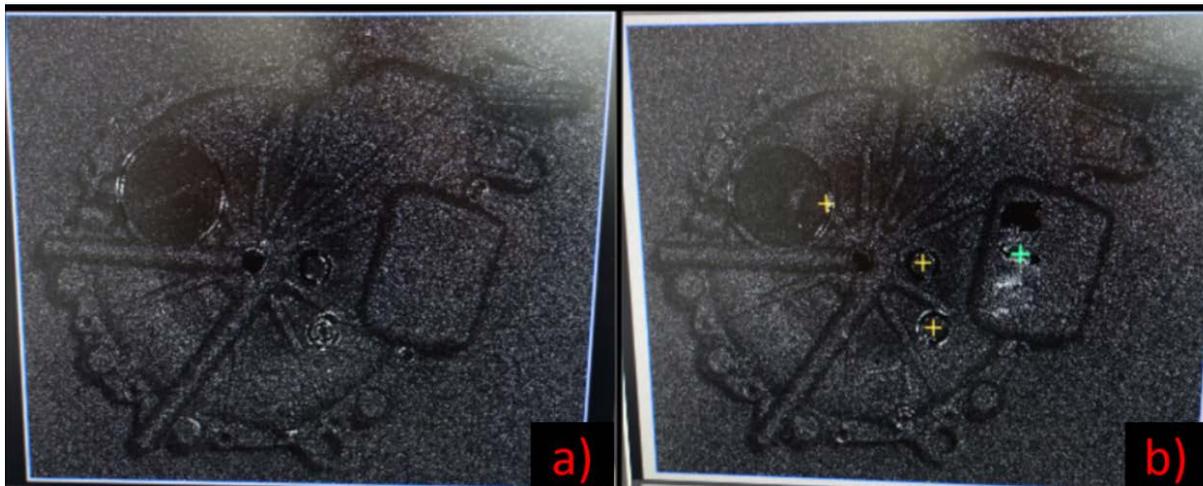


Abbildung 113: Strukturbild des Gehäusedeckels. a) unbeschädigt, b) mit Kratzern, wobei die Kreuze Defekte zeigen und das grüne Kreuz das maximale Defektlevel kennzeichnet.

Deep Learning zur Anomaliedetektion in 2D-Bildern

Künstliche neuronale Netze finden auch im industriellen Einsatz immer weitere Verbreitung. Sogenannte CNNs (Convolutional Neural Networks) sind dadurch charakterisiert, dass Schichten von verschiedenen Bildverarbeitungsoperatoren (Kanten-, Glättungsfilter und Bildreduktion) im Zusammenspiel mit künstlichen Neuronen charakteristische Bildinformationen (Features) extrahieren und auf dieser Basis Klassifizierungen vornehmen (Abbildung 114).

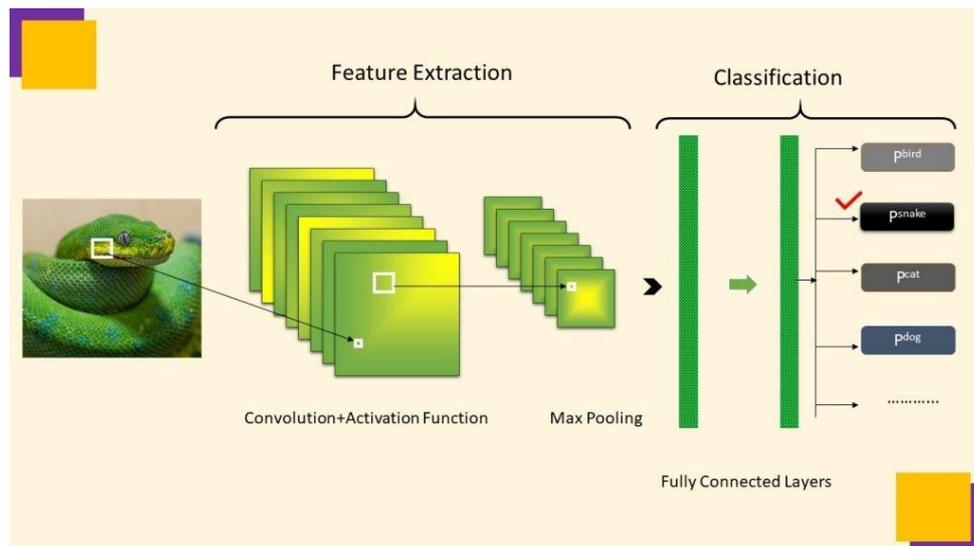


Abbildung 114: Stark vereinfachter Aufbau eines Convolutional Neural Network (CNN)¹. Im „Feature Extraction Layer“ werden mittels verschiedener Kernel-Filter Feature Maps erzeugt. Diese werden dann im „Classification Layer“ von den künstlichen Neuronen bewertet und auf dieser Grundlage das Bild einer Klasse zugeordnet.

Die Software HALCON (MVTec GmbH) bietet dazu ein CNN, welches speziell für die Anomaliedetektion in Bildern entwickelt wurde. Das CNN wurde mit gelabelten Bildern zerkratzter und nicht vollständiger Gehäusedeckel sowie Gehäusedeckeln im Sollzustand trainiert (siehe Abbildung 112). Für den Testlauf wurden verschiedene Eingangsvariablen wie die Komplexität des CNN, die Anzahl der Trainingsdurchläufe und die Auflösung der Trainingsbilder variiert. Die optimale Variation lieferte eine Klassifizierungsgenauigkeit von 96,1%.

Trotz der augenscheinlich hohen Klassifizierungsgüte ist das Modell noch weit von einer praktikablen Anwendung entfernt. Denn selbst wenige fälschlicherweise als schadensfrei klassifizierte Bauteile stellen ein erhebliches Sicherheitsrisiko in eingebauten Fahrzeugen dar. Ein weiterer Nachteil ist die große Menge an Trainingsdaten, welche theoretisch für jedes zu untersuchende Bauteil erzeugt werden muss.

¹ connectjaya.com

3D-Punktwolkenvergleich mit einer Referenzgeometrie

Beim Punktwolkenvergleich wurde ein Referenzmodell in eine 3D-Bildszene mittels Surface-Matching Algorithmus (HALCON) eingepasst. Anschließend wurden Distanzwerte zwischen Szene und Modell miteinander verglichen. In Abbildung 115 ist gut zu erkennen, dass Verformungen und fehlende Strukturen sehr gut vom Referenzmodell unterschieden werden können, wohingegen Kratzer vom Rauschen kaum zu unterscheiden sind.

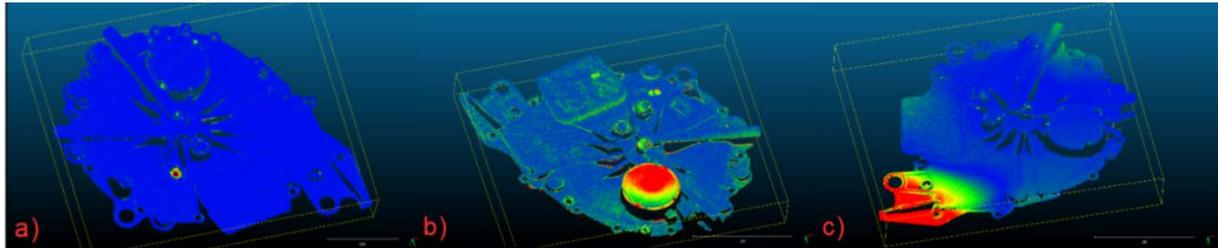


Abbildung 115: Schadensfälle am Gehäusedeckel. a) fehlende Verschlusskappe, b) Kratzer, c) Verformung. Blaue Bereiche entsprechen geringen, rote Bereiche hohen Unterschieden im Vergleich zum Referenzmodell auf.

Prinzipiell ist das Verfahren geeignet, um Verformungen und unvollständige Bauteile zu detektieren. Allerdings muss der Detailgrad der Kamera (hier eine Ensensio X36 der Firma Optonic) entsprechend hoch sein. Sollte kein herstellereitig bereitgestelltes Referenzmodell vorliegen, müsste ein Bauteil im Sollzustand eingescannt und dann das 3D-Modell aufwändig nachbearbeitet werden.

Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Verfahren für eine potenzielle Automatisierung der optischen Bauteilprüfung existieren. Zukünftige Forschungsprojekte sollten neben der Optimierung der Prüfverfahren vor allem die Herausforderungen einer enormen Bauteilvariation komplexer Produkte sowie die Vielzahl möglicher Schadensarten adressieren. Eine Strategie, welche ökonomische Anreize setzt, könnte hier den Datenaustausch zwischen Herstellern und Verwertern verbessern. So wären Bezahlmodelle mit herstellereitig bereitgestellten Trainings- und 3D-Daten eine vorstellbare Lösung. Um die Bauteile auf verschiedenen Schadensarten zu prüfen, könnten mehrstufige Verfahren mit einer Kombination aus klassischer und KI-gestützter Schadensdetektion eingesetzt werden.

Getriebeölanalyse

Für den wirtschaftlichen Erfolg einer automatisierten Demontage im industriellen Maßstab wird eine individuell auf das jeweils vorliegende Antriebsaggregat abgestimmte Demontagetiefe und Prozessfolge zielführend. Die Beurteilung des Zustandes der einzelnen Rückläufer dient

dabei der Strategieabstimmung im Vorfeld der Demontage. Neben eventuell vorhandenen Betriebsdaten sowie optischen und akustischen Verfahren wurde die Analyse des Getriebeöls als eine Möglichkeit erachtet, um Hinweise auf die Wiederverwendbarkeit verschiedener Bauteile zu erhalten.

Eine Messeinrichtung zur Analyse des entnommenen Getriebeöls sollte im Projekt entworfen und praktisch umgesetzt werden. Auf Grundlage der erhobenen Daten können Informationen über das Alter und den Verschleißzustand des jeweils vorliegenden elektrischen Antriebsaggregats abgeleitet werden. Die Umsetzung basiert auf der Idee, aus dem während der Demontage abgelassenen Getriebeöl mittels verschiedener Sensoren einen Zusammenhang zwischen dem Zustand des Öls und dem Zustand des Getriebes und damit verbunden dem gesamten Aggregat herzustellen.

Während der Vorbereitungsphase wurden mittels Laboruntersuchungen und Literaturrecherche zur Charakterisierung der Ölproben die Größen elektrische Leitfähigkeit und dynamische Viskosität ausgewählt. Die Leitfähigkeit wird standardgemäß zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung verschiedener Öle und Treibstoffe verwendet und soll die Brandgefahr minimieren. Der zu erwartende Wertebereich sollte vergleichsweise niedrig sein, da die Leitfähigkeit ohne vorhandene metallische Partikel als eher gering einzuschätzen ist. Die Viskosität ist ein geeignetes Maß zur Feststellung von Veränderungen in der chemischen Struktur des Öls sowie der Additive, wobei detaillierte Informationen über die Struktur und Zusammensetzung abgeleitet werden.

Durch eine Marktanalyse innerhalb Deutschlands wurden Unternehmen ermittelt, bei denen für die geplante Automatisierung geeignete Sensoren verfügbar sind. Da die Messungen in Öl vorgenommen werden sollen, müssen die Sensoren und speziell die Dichtungen spezifische Materialanforderungen erfüllen. Weiterhin sollen die Sensoren in einer abgedichteten Messzelle verbaut und für die kontinuierliche Messwerterfassung und eine Automatisierung geeignet sein. Dies schränkte die Auswahl stark ein. Für die Messeinrichtung wurden die Sensoren OilQSens OQ 3000 der Firma cmc Instruments GmbH zur Messung der Leitfähigkeit und VA 100 Visco Scope C-LT der Firma Marimex Industries GmbH & Co. KG zur Messung der Viskosität beschafft. Die beiden Sensoren werden jeweils mit einer speziell abgestimmten Messzelle und einem Transmitter zur Datenübertragung geliefert.

Für den Aufbau der Messeinrichtung (siehe Abbildung 116) wurden die beiden Sensoren zu einem geschlossenen Kreislauf verbunden. Dazu wurde aus Aluminiumprofilen ein Gerüst aufgebaut und beide Sensoren so positioniert, dass das Getriebeöl bei gleichzeitiger Verdrängung der Luft in die Messzellen gefüllt werden kann. Die Messzellen wurden mit Steck-

Adaptern und Kunststoffschläuchen des Unternehmens Landefeld Druckluft und Hydraulik GmbH verbunden. Für die Bewegung des Öls wurde eine Schlauchpumpe verbaut. Die automatisierte Steuerung der Messeinrichtung erfolgt über einen Raspberry Pi.

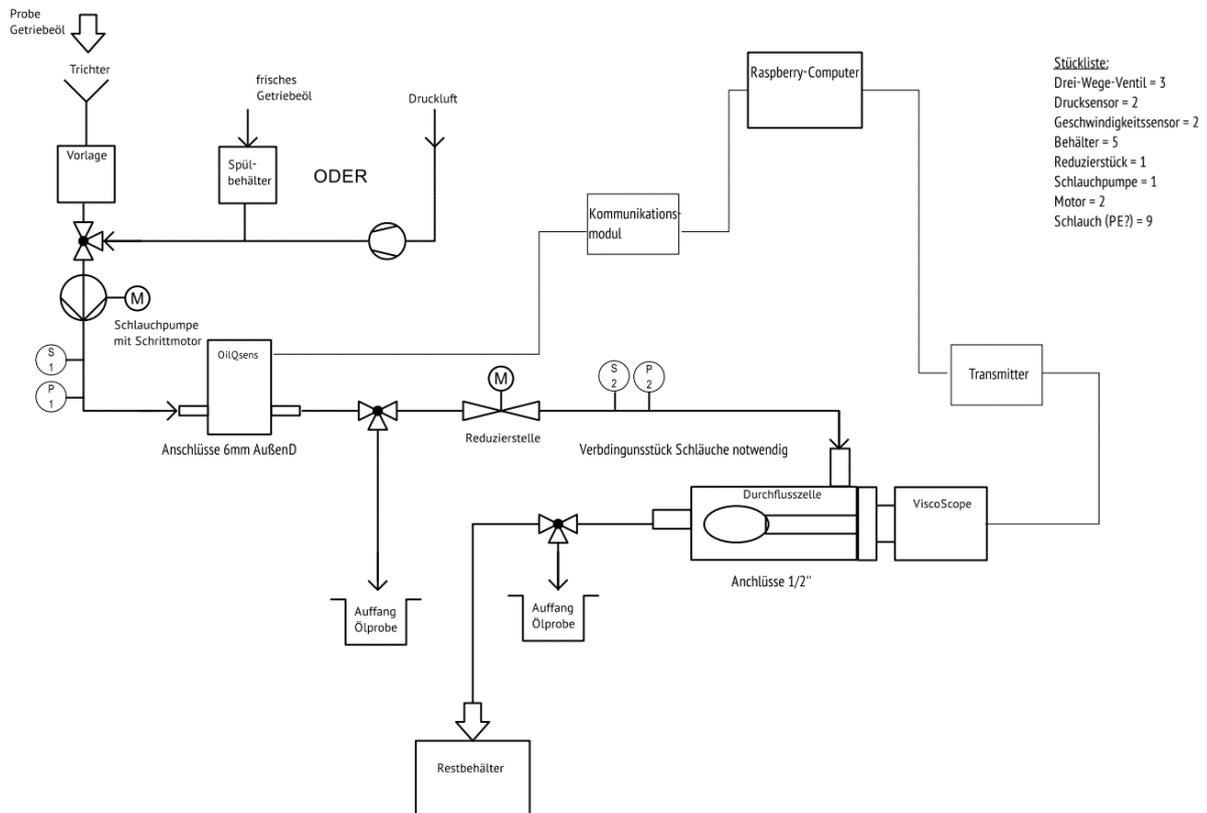


Abbildung 116: RI-Fließbild der automatisierten Messeinrichtung zur Getriebeöl-Analyse.

Eine Zielstellung für die Erstellung des Systems war die automatisierte Arbeitsweise der Messeinrichtung im fertig gestellten Zustand zwecks Integration in die automatisierten Prozessabfolgen des Demontagemoduls. Die Steuerung des nachfolgenden Ablaufs der Messwertaufnahme erfolgt durch den bereits erwähnten Raspberry Pi, an den alle elektrisch zu steuernden Komponenten angeschlossen sind. Nach der Zugabe der Ölprobe wird die Pumpe angeschaltet. Diese transportiert das Öl in die beiden Messzellen. Das Füllvolumen des gesamten Kreislaufs beträgt etwa 300 ml, das Volumen einer Ölprobe zwischen 500 ml und 1000 ml. Die Schlauchpumpe erreicht bei voller Drehzahl eine Förderleistung von 500 ml/min. Die Messzellen sind so installiert, dass die Befüllung von unten nach oben erfolgt und dabei die enthaltene Luft langsam nach oben in Richtung Auslass verdrängt wird. Luftblasen beeinflussen das Messergebnis, weshalb alle Verbindungsstellen abgedichtet wurden. Die Messzellen werden vor dem Betrieb vollständig entlüftet. Die Messwertaufnahme erfolgt nach 30 Sekunden und dauert je nach erforderlicher Genauigkeit 1–3 Minuten. Anschließend wird das Ventil vor dem unteren Sensor geöffnet, sodass die Ölprobe

gravitationsgetrieben entweichen kann. Das gemessene Öl wird in einen Sammelbehälter abgelassen. Gegen Verunreinigungen steht der gesamte Aufbau in einer Kunststoffwanne, in der unvorhergesehene Leckagen aufgefangen werden können.

Die Ölproben wurden zur Charakterisierung mit unterschiedlichen Methoden analysiert. Dazu gehörten die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, der Permittivität und der dynamischen Viskosität mittels der zugekauften Sensorik sowie zusätzlich die Messung des optischen Extinktionskoeffizienten mit Hilfe einer im Projekt eigens gebauten Messstation.

Ziel der statistischen Versuchsauswertung war die Ermittlung einer Regression, mit deren Hilfe zukünftig vermessene Ölproben unbekannter Laufleistung durch die Aufnahme der genannten Messwerte hinsichtlich ihrer Laufleistung eingeordnet werden können. Dafür wurden die Korrelationskoeffizienten zwischen den vier Messwerten und der Laufleistung ermittelt.

Bei der Überprüfung einer möglichen Abhängigkeit der Messwerte der Laufleistung der jeweiligen Ölproben mittels statistischer Regressionsanalyse konnte festgestellt werden, dass kein linearer Zusammenhang vorliegt, da die Korrelationskoeffizienten zu nah am Nullwert liegen. Weiterhin konnte durch die Überprüfung mit Regressionen der 2., 3. und 4. Potenz für die Datenreihen Leitfähigkeit und Extinktionskoeffizient kein statistisch signifikanter Zusammenhang ermittelt werden. Für die Datenreihe dynamische Viskosität liegen die Werte einer kubischen Regression innerhalb des Toleranzbereichs, jedoch beträgt das Bestimmtheitsmaß lediglich 45 %. Für die Datenreihe Dielektrizitätszahl konnte im Zuge der kubischen Regressionsanalyse eine statistisch signifikante Gleichung mit einem Bestimmtheitsmaß von 80 % aufgestellt werden. Zur Überprüfung der gewonnenen Ergebnisse und zur Erhöhung der Aussagekraft der gemessenen Werte wurde eine zweite Messreihe durchgeführt. Bei dieser konnte jedoch kein statistisch signifikanter Zusammenhang festgestellt werden, auch nicht in Bezug auf die Dielektrizitätszahl.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die automatisierte Ölanalyse tendenziell eher weniger geeignet ist, um verlässlich auf die Laufleistung und damit verbunden auf die Restlaufleistung eines EAA zu schließen. Vielmehr kann es sinnvoll sein, die tatsächliche Laufleistung aus der Leistungselektronik auszulesen, was jedoch bisher bedingt, dass das EAA beim Hersteller demontiert werden muss.

8.2.2 Materialanalytik

Als Beitrag zur Untersuchung der Möglichkeiten eines stofflichen Recyclings wurden materialspezifische Untersuchungen einzelner Komponenten des elektrischen

Antriebsaggregats durchgeführt. Hierzu wurde das mobile Röntgenfluoreszenzanalyse-Handspektrometer (RFA) vom Typ Niton XL2 plus vom Hersteller Analyticon verwendet, welches eine schnelle, einfache und zerstörungsfreie Analyse der Materialzusammensetzungen für metallische Komponenten ermöglicht. Zur Vorbereitung der Einzelkomponenten auf die Analysen wurden bereits durch manuelle Zerlegung gewonnene Bauteile gereinigt, um den Fehler durch eventuelle Verunreinigungen oder Korrosion der Oberfläche zu minimieren. Um statistisch repräsentative Ergebnisse zu erzielen, wurden 112 Einzelanalysen an 16 unterschiedlichen Bauteilen des E-Motors durchgeführt.

Insgesamt ergab die Auswertung der Analytik der Einzelkomponenten drei verschiedene Materialgruppen: aluminiumreiche Legierungen, eisenreiche Legierungen und kupferreiche Zusammensetzungen. In Abbildung 117 sind beispielhaft die Zusammensetzungen von Bauteilen der drei Materialgruppen dargestellt.

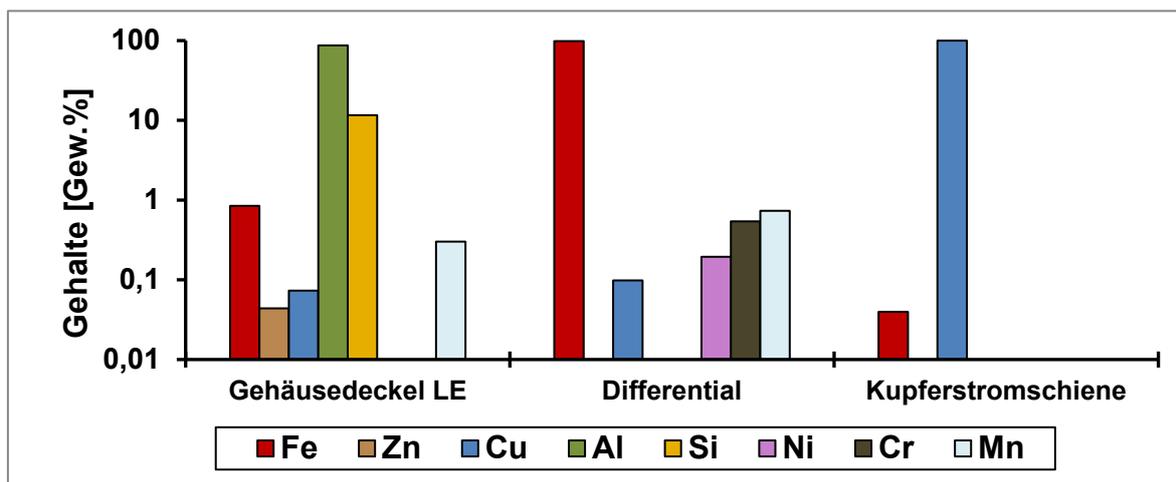


Abbildung 117: Zusammensetzungen von beispielhaften Bauteilen des untersuchten elektrischen Antriebsaggregats.

Bei den aluminiumreichen Bauteilen handelt es sich hauptsächlich um Aluminium-Silizium-Legierungen mit unterschiedlichen Beimengungen an Eisen, Mangan und Kupfer. Beispielhafte Legierungen z. B. beim Gehäusedeckel der Leistungselektronik sind die mit den Werkstoffnummern AC230 und AC420. Die verbauten Komponenten mit eisenreichen Legierungen enthalten als Nebenbestandteile Mangan, Chrom, Nickel und Kupfer. Dabei konnten u.a. der Werkstoff 1.7147 (20MnCr5, z. B. Differential) und 1.7218 (25CrMo4) sowie diverse Eisen-Kohlenstoff-Stahllegierungen identifiziert werden. Die Kupferstromschiene zeichnet sich durch seine hohe Reinheit an Kupfer aus und besteht laut Analytik aus sogenanntem E-Kupfer mit der Werkstoffnummer 2.0060.

Zusammenfassend enthalten die verwendeten Bauteile des untersuchten elektrischen Antriebsaggregats diverse auch wirtschaftlich interessante Legierungselemente, was die Anwendung der Demontage auch im Fall der Zielstellung eines Materialrecyclings sinnvoll erscheinen lässt.

8.2.3 Design-for-Disassembly

Die in den Antriebsaggregaten vorhandenen Bauteile und Bauteilverbindungen variieren deutlich in Bezug auf ihre Demontageeignung. Vor dem Hintergrund der Zielstellung eines möglichst hohen Automatisierungsgrades lag daher eine wesentliche Herausforderung darin, am EAA die für die automatisierte Demontage besonders herausfordernden Bauteile und -verbindungen zu identifizieren, um in einem zweiten Schritt Optionen zu deren Umgestaltung im Sinne eines verbesserten Design-for-Disassembly bzw. -Recycling (DfD/DfR) zu erarbeiten.

Für die Identifikation von Bauteilen, die sich besonders für die Umgestaltung eignen, wurde ein Demontagealgorithmus entwickelt, der unter Einbezug unterschiedlicher Parameter, wie dem Bauteilwert oder der geschätzten Demontageskosten, optimale Demontagetiefen errechnen kann. Es wird angenommen, dass Bauteile, die gerade nicht Teil der Menge optimal zu demontierender Bauteile sind, besonders für DfD/DfR-Ansätze geeignet sind. Eine Modifikation dieser Bauteile kann zu einer höheren Demontagetiefe und damit verbunden zu ökologischen und ökonomischen Vorteilen führen. Darüber hinaus wurden anhand einer Fehlerdokumentation von Feldrückläufern elektrischer Antriebsaggregate kategorische Fehlerursachen identifiziert. Es gilt, Bauteile und Baugruppen, die auf den Demontepfaden zu häufig fehlerhaften Bauteilen liegen, ebenfalls besonders beim DfR zu berücksichtigen.

Als mögliche Alternative für Schraubverbindungen, deren Lösen im Demontageprozess einen beträchtlichen Anteil der Prozesszeit und -kosten verursacht, wurden Vierteldrehverschlüsse identifiziert. Prototypisch wurden an Vierteldrehverschlüssen Demontageversuche durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass diese sowohl manuell als auch robotergestützt leichter zu demontieren sind als vergleichbare Schraubverbindungen.

Eine Umsetzung der identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten wird als problematisch eingestuft, da nach wie vor eine Senkung der Produktionskosten in den Lastenheften der Konstrukteure als deutlich wichtiger angesehen wird als die konstruktive Ausrichtung auf eine derzeit noch hypothetische automatisierte Demontage am Ende der Nutzungsphase. Aufgrund der ungleich höheren Anschaffungskosten von Vierteldrehverschlüssen im Vergleich zu Schrauben wird vermutet, dass diese tendenziell nur an ausgewählten Verbindungsstellen eingesetzt werden können. Eine Einzelfallbetrachtung für den tatsächlichen Anwendungsfall,

unter Berücksichtigung der im Demontageprozess zu erwirtschaftenden monetären Vorteile, wird hier als notwendig erachtet.

8.3 Virtualisierung

Zweck der Virtualisierung der im Projekt entstandenen Anlagen ist die Außendarstellung der Forschungsarbeiten des Projektes. Zielgruppe hierbei sind Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft sowie allgemein an der Forschungsthematik interessierte Personengruppen.

Durch Social-Media-Plattformen wie Horizon (Meta Platforms) und vor allem der wachsenden Auswahl an VR-Spielen kann ein für technische Neuerungen aufgeschlossenes Publikum adressiert werden. Diese allgemeine Neugier für Technik gilt es in die Offenheit für das Zukunftsthema E-Mobilität sowie automatisierte Demontage zu übertragen.

In einer Frühphase des Projektes war es vorgesehen, im Rahmen der Teilaufgabe 3.5 alleinig das Demontagemodul des Teilprojekts 3 in einer virtuellen Umgebung darzustellen. Aufgrund der Entscheidung des Projektkonsortiums, die zum Projektstart geplante Virtualisierung der Demontagestation für elektrische Antriebsaggregate um die batteriebezogenen Anlagen des Teilprojektes 2 zu erweitern, wurde das Konzept entsprechend angepasst.

Die Realisierung erfolgte nach Ausschreibung durch den Dienstleister CMC Engineers. Die Umsetzung der Arbeiten erfolgte in Unity, einer der bekanntesten 3D-Engines. Unity, originär eine Software zur Entwicklung grafisch anspruchsvoller Computerspiele, wird seit längerem anbieterseitig erweitert, um die Zielgruppe industrieller Anwender zu erschließen.

Die Modelle wurden für 3D-Brillen optimiert, da hier die Immersion, also das gefühlte Erleben der virtuellen Umgebung, am stärksten ist. Da die nötige Hardware im Consumer-Bereich noch nicht weit verbreitet ist, wurde es ebenso ermöglicht, die Demontageanlagen aus der Ich-Perspektive am Monitor zu erleben, wie sie aus PC-Spielen bekannt ist.

In der Virtualisierung sind folgende Anlagen dargestellt (Abbildung 118 bis Abbildung 121)

1. Demontage bis auf Modulebene (IPA)
2. Zerlegung der gewonnenen Module bis auf Zellebene (WBK)
3. Zerlegung der Zellen, Entnahme der Schwarzmasse (WBK)
4. Zerlegung eines Antriebsaggregates (CUTEC)

Ergänzt werden die Demontagestationen um das auf Demontagefreundlichkeit hin optimierte Batteriemodul des Projektpartners GreenIng. Auf Monitoren sind weitere Inhalte als Film

eingebettet. Die Logos der Projektpartner, des Projektträgers sowie des finanzierenden Ministeriums wurden als virtuelle Poster an den Hallenwänden platziert.



Abbildung 118: Virtuelle Anlage zur Demontage der Batteriemodule (IPA).

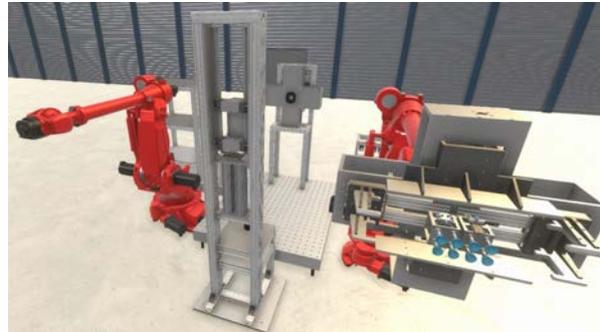


Abbildung 119: Virtuelle Anlage zur Demontage der Batteriepacks (wbk).



Abbildung 120: Virtuelle Anlage des Seilschneiders (wbk).



Abbildung 121: Virtuelle Anlage zur Demontage von E-Motoren (CUTEC).

Im Rahmen der Abschlussveranstaltung wurden die virtuellen Anlagen auf einem 3D-System, bestehend aus Beamer und Shutter-Brillen, vorgeführt. Die Virtualisierung der Batteriedemontage wurde vom Projektpartner Fraunhofer IPA bereits genutzt, um einen um Real-Bilder der Anlage ergänzten Kurzfilm zu erzeugen. Die Virtualisierung wird den Projektpartnern zur Verfügung gestellt, um sie auf den jeweiligen eigenen Homepages zu präsentieren.

8.4 Weiterführende Erkenntnisse und Ausblick

Hemmnisse und Lösungen für die Light-out-Factory

Ein in den letzten Jahren häufig diskutiertes Konzept ist die sogenannte Light-out-Factory (LoF) – eine Fabrik, die so weit automatisiert betrieben werden kann, dass menschliche Mitarbeit nicht länger erforderlich ist und in der Folge sogar das Licht ausgeschaltet werden kann. Im Projektzeitraum war vorgesehen, das Konzept der LoF zu untersuchen, was unter

Durchführung einer Umfrage unter Mitgliedsunternehmen des VDA erfolgt ist. Folgende Erkenntnisse wurden auf Basis der Rückmeldungen erarbeitet:

Die Umfrageergebnisse lassen grundsätzlich darauf schließen, dass vor der Realisierung einer LoF noch verschiedene Hindernisse überwunden werden müssen. Als wichtigste Enabler können die Verbreitung von BestPractice-Beispielen und die Entwicklung der Konkurrenzstruktur betrachtet werden. Für beide Strategien liegt die Verantwortung in erster Linie jedoch auf der Seite der Produkthersteller und eine Umsetzung kann somit nur indirekt extern motiviert werden. Zugleich werden die größten Hemmnisse für eine Steigerung des Automatisierungsgrades ebenfalls unternehmensseitig eingeordnet (Unternehmensstruktur, Schnittstellenproblematik). Die Teilnehmenden der Umfrage sehen staatliche Finanzierungshilfen als aus Unternehmersicht externe Steuerungsmöglichkeit eher als sekundär wichtigen Enabler für eine Steigerung des Automatisierungsgrades an. Daher sollten Möglichkeiten gefunden werden, Unternehmen auch anderweitig zu motivieren, den Weg zur LoF zu finden. Da größere Unternehmen tendenziell einen höheren Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad aufweisen, dürften diese eher befähigt sein, LoFs zu realisieren. Ob staatliche Unterstützungen daher verstärkt an größere Unternehmen gehen sollten, sodass zeitnah LoFs gebaut werden können, oder ob staatliche Unterstützung eher an KMUs gerichtet sein sollten, sodass alle Unternehmen die Chance bekommen, eine LoF zu bauen, gilt es zu diskutieren. Die Nutzung des bereits bestehenden, jedoch noch nicht ausgeschöpften Potenzials in der Digitalisierung und Automatisierung kann eine erste Lösungsmöglichkeit sein. Je mehr Unternehmen das derzeitige Maximum der Automatisierung und Digitalisierung bereits erreicht haben, desto höher ist die Chance, dass ein Unternehmen den Schritt hin zu einer LoF realisiert. Forschungseinrichtungen können im Rahmen kooperativer Forschungsprojekte mit starker Industriebeteiligung praxisrelevante Lösungen schaffen, um Material- und Informationsströme hinsichtlich der Vollautomatisierung zu optimieren sowie Best-Practice-Beispiele für eine vertikale Verbreitung zu formulieren. Auch beim Light-out-Disassembly stellen die Kosten eines der Haupthindernisse dar. Hier bietet sich die Chance, durch Einbeziehen eines Design-for-Disassembly zwecks Wiederverwendung oder Recycling bereits in der Produktentstehungsphase auf eine Kostenreduktion bzw. die Möglichkeit zur Implementierung einer LoF für Recyclingaktivitäten hinzuarbeiten. Essenziell ist dabei die konsequente Fokussierung auf eine Reduktion der Komplexität von (De-) Montageprozessen. Es bedarf zusätzlich entsprechender Anreize, die einen niedrighschweligen Einstieg in das Light-out-Disassembly für die Industrie ermöglichen.

9 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens sind vier Demonstratoren. Drei Demonstratoren dienen der Validierung und Veranschaulichung der Machbarkeit industrieller und automatisierter Demontage von Batteriemodulen aus Batteriesystemen (Demonstrator 1) sowie von Batteriezellen aus Batteriemodulen (Demonstrator 2). Darüber hinaus veranschaulicht Demonstrator 3 die Demontage einzelner Batteriezellen, ihre stoffliche Fraktionierung und validiert die Eignung der zurückgewonnenen Aktivmaterialien hinsichtlich ihrer Wiedereinsatzmöglichkeiten bei der Herstellung neuer Batteriezellen. Der vierte Demonstrator dient der Validierung und Machbarkeit der industriellen und automatisierten Demontage von E-Antriebsaggregaten. Darüber hinaus beleuchtet Teilprojekt 1 sowohl rechtliche als auch ökonomische Perspektiven der industriellen Demontage.

Es wurden innovative Roboterkonzepte entwickelt, um die effiziente Demontage von Traktionsbatterien bis auf Modulebene zu ermöglichen. Der Fokus lag dabei auf dem Öffnen der Batteriesysteme und der Demontage der internen Komponenten, insbesondere der Extraktion der Batteriemodule. Ein zentrales Ziel des Ansatzes bestand darin, technologieunabhängige Lösungen zu entwickeln, die für verschiedene Batterievarianten geeignet sind. Die entwickelten Konzepte zeichnen sich durch ihre Flexibilität aus und bieten Industrieunternehmen die Möglichkeit, maßgeschneiderte Teilkonzepte für ihre individuellen Herausforderungen auszuwählen und in ihre Produktionsprozesse zu integrieren. Um die Umsetzung zu demonstrieren, wurde ein vielseitiges Robotersystem aufgebaut, das verschiedene relevante Technologien erproben und vorführen kann. Eine Vielzahl von grundlegenden Technologien wurde im Rahmen des Projekts verfolgt, untersucht und erprobt. Diese Technologien lassen sich in sechs Überkategorien einteilen: Planen, Steuern, Trennen, Lösen, Handhaben und Optimieren. Die Ergebnisse des Projekts bieten vielversprechende Perspektiven für die industrielle Demontage von Traktionsbatterien und leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Förderung der nachhaltigen Kreislaufführung elektromobiler Komponenten.

Darüber hinaus wurde ein automatisiertes Anlagenkonzept für die Entnahme der Zellen aus den Batteriemodulen entwickelt, anschließend aufgebaut und demonstriert. Zum einen wurden erforderliche Trennprozesse wie Fräsen oder Seilschneiden für das Trennen von unterschiedlichsten, unlösbaren Fügeverbindungen qualifiziert und charakterisiert. Dabei

wurde unter anderem eine Anlage für das Seilschneiden von geklebten Pouchzellen abgeleitet und erfolgreich getestet. Flexible Endeffektoren und Subsysteme, die als Funktionsträger für unterschiedliche Demontageoperationen dienen, wurden entwickelt und erfolgreich erprobt. Ein In-Line-Sensorik-Konzept für die durchgehende Überwachung des Produktzustandes wurde erarbeitet und an einem Prototyp getestet. Das Gesamtergebnis stellt ein flexibles Demontagesystem für Batteriemodule dar, bestehend aus zwei industriellen Robotern mit unterschiedlichsten Endeffektoren und Funktionalitäten sowie einer flexiblen Steuerungsarchitektur.

Hinzukommend wurde im DeMoBat-Projekt eine Verfahrenstechnik zur stofflichen Verwertung von End-of-Life Lithium-Ionen-Batterien entwickelt. Der Gesamtprozess umfasst die sichere Entladung, manuelle und teilautomatisierte Demontage zur Separation der Elektroden, der Wasserstrahlentschichtung zur Rückgewinnung der Elektrodenaktivmaterialien, der Separation und Trocknung der zurückgewonnenen Rezyklate. Die Verfahrenstechnik wurde mit Hilfe von XRPD, AFM, REM und ICP-OES analytisch begleitet. Dadurch konnten die elementare Zusammensetzung, morphologische Charakteristika oder Verunreinigungen der Kathodenrezyklate ausgewertet werden. Die Verfahrenstechnik wurde mit Hilfe der Umweltmanagementmethode der Lebenszyklusanalyse bewertet und es konnte gezeigt werden, dass der Gesamtprozess im Vergleich zu konventionellem Batterierecycling, z. B. der Hydrometallurgie und anschließender Synthese, insgesamt ökologisch vorteilhaft ist. Zur Schließung des Materialkreislaufs wurde eine Slurryrezeptur mit unterschiedlichen Anteilen von Rezyklat zu Primärkathodenmaterialien entwickelt und erprobt. Anschließend wurden Testzellen mit unterschiedlichen Rezyklatanteilen gefertigt und umfangreich charakterisiert.

Im Projekt wurde an weiteren Schlüsseltechnologien geforscht, wie beispielsweise Batterietest und -analyse, Prognose der elektrischen Eignung für Kreislaufwirtschaftsstrategien und demontagegerechte Batteriegestaltung. Durch gezielte Alterung von Batteriezellen in verschiedenen Anwendungsfällen wurden diverse Testingmethoden evaluiert und eine Prognosesoftware zur Batteriealterung entwickelt und validiert. Somit kann eine Diagnose und Prognose der Restlebensdauer von Rückläuferbatterien durchgeführt und diesen Second Life Anwendungen zugeordnet werden. Ein Designleitfaden für demontagefreundliches Design wurde erarbeitet und anhand von Prototypen erprobt.

Die prinzipielle Machbarkeit der automatisierten Demontage des E-Antriebsaggregats konnte in DeMoBat durch die Umsetzung vielfältiger Demontageschritte im aufgebauten Demontagetechnikum gezeigt werden. Eine Flexibilisierung des Prozesses zwecks zukünftiger Ausweitung auf weitere Produkttypen stellt aufgrund der derzeit bestehenden

Notwendigkeit zur Verwendung spezialisierter Lösungen für eine Vielzahl von Demontageschritten eine besondere Herausforderung dar. Das erstellte Demontagemodul ist aufgrund der gewählten Konstruktionsweise auf Basis von Industrierobotern und Werkzeugwechselsystemen grundsätzlich leicht umrüstbar, sodass zu entwickelnde flexibilisierte Lösungen in der Anwendung getestet werden können. Daher besteht mit dem erstellten Demontagemodul für E-Antriebsaggregate eine optimale Ausgangsbasis für zukünftige Forschungsarbeiten.

Bei der Umsetzung automatisierter Demontageprozesse ist zu beachten, dass bei der Entwicklung der adressierten Produkte deren Demontierbarkeit in den Lastenheften keine vorrangige Rolle spielte. Einige Demontageschritte sind daher nur mit erhöhtem Aufwand automatisiert umsetzbar. So wurden beispielsweise Einbaupositionen von Bauteilen, die eine erschwerte Zugänglichkeit für robotergeführte Werkzeuge und Robotvision-Systeme aufweisen, Verklebungen, die nur unter erheblichem Kraftaufwand zu lösen sind, oder Kabelenden, die frei beweglich in undefiniertem Zustand vorliegen, identifiziert.

Im Rahmen der Begleitforschung wurden wirtschaftliche, aber auch ökologische und rechtliche Fragestellungen in Bezug auf Demontage betrachtet. Die Themen lassen sich in die Bereiche Marktanalyse, Analyse der Demontageprozesse und Geschäftsmodelle in Kombination mit Informationsmanagement unterteilen. Das methodische Spektrum der Bearbeitung umfasst sowohl Simulations- und Optimierungstechniken als auch qualitative Fragestellungen. Die Themen der Marktanalyse beinhalteten die Problematik der Rücklaufmengenplanung für Traktionsbatterien und elektrische Antriebsaggregate, die Entwicklung eines Rohstoffmarktmodells für die wichtigsten Batterierohstoffe und eine Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen, welche in Europa den Batteriemarkt zukünftig regulieren wird. Die Fragestellungen der Demontageanalyse wurden genutzt, um Grundlagen für die Bewertung der Geschäftsmodelle zu legen und aufzuzeigen, wie automatisierte Demontage ökonomische Vorteilhaftigkeit und kreislaufwirtschaftliches Denken vereinen kann. Für die Bewertung der Geschäftsmodelle wurde ein Entscheidungsunterstützungstool zur Geschäftsmodellwahl entwickelt. Darüber hinaus erfolgte eine ökonomische Bewertung dynamischer Demontage- und Recyclingnetzwerke. Abgerundet werden die Arbeiten durch eine Konzepterstellung für das Informationsmanagement von Lifecycle-Batteriedaten.

10 Literaturverzeichnis

- Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) (2022): United Nations.
- Ai, Ning; Zheng, Junjun; Chen, Wei-Qiang (2019): U.S. end-of-life electric vehicle batteries: Dynamic inventory modeling and spatial analysis for regional solutions. In: *Resources, Conservation and Recycling* 145, S. 208–219. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.021.
- Al Assadi, Anwar; Holtz, David; Nägele, Frank; Nitsche, Christof; Kraus, Werner; Huber, Marco F. (2022): Machine learning based screw drive state detection for unfastening screw connections. In: *Journal of Manufacturing Systems* 65, S. 19–32. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.07.013.
- Baazouzi, Sabri; Rist, Felix Paul; Weeber, Max; Birke, Kai Peter (2021): Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries. In: *Batteries* 7 (4), S. 74. DOI: 10.3390/batteries7040074.
- Becker, Jörg; Beverungen, Daniel; Winter, Martin; Menne, Sebastian (Hg.) (2019): Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bekel, Kai; Pauliuk, Stefan (2019): Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany. In: *Int J Life Cycle Assess* 24 (12), S. 2220–2237. DOI: 10.1007/s11367-019-01640-8.
- Bruijn, Hans; Duin, Robbert; Huijbregts, Mark A. J.; Guinee, Jeroen B.; Gorree, Marieke; Heijungs, Reinout et al. (Hg.) (2004): Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers (Eco-Efficiency in Industry and Science, 7).
- Busch, Jonathan; Steinberger, Julia K.; Dawson, David A.; Purnell, Phil; Roelich, Katy (2014): Managing critical materials with a technology-specific stocks and flows model. In: *Environmental science & technology* 48 (2), S. 1298–1305. DOI: 10.1021/es404877u.
- Clottey, Toyin; Benton, W. C. (2014): Determining core acquisition quantities when products have long return lags. In: *IIE Transactions* 46 (9), S. 880–893. DOI: 10.1080/0740817X.2014.882531.
- Dai, Qiang; Kelly, Jarod C.; Gaines, Linda; Wang, Michael (2019a): Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. In: *Batteries* 5 (2), S. 48. DOI: 10.3390/batteries5020048.
- Dai, Qiang; Spangenberg, Jeffrey; Ahmed, Shabbir; Gaines, Linda; Kelly, Jarod C.; Wang, Michael (2019b): EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental

- Impacts Model. Hg. v. Argonne National Laboratory. Online verfügbar unter <https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/07/153050.pdf>, zuletzt geprüft am 12.07.2023.
- Deloitte (2020): Elektromobilität in Deutschland. Marktenwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen. Online verfügbar unter <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/consumer-industrial-products/articles/elektromobilitaet-in-deutschland.html>, zuletzt geprüft am 10.02.2021.
- DIN EN 45553:2020-11,, 2020: DIN EN 45553:2020-11, Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Wiederaufarbeitbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte; Deutsche Fassung EN_45553:2020.
- DIN SPEC 91472:2023-06: DIN SPEC 91472:2023-06, Remanufacturing (Reman)_-Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse.
- Drabik, Eleanor; Rizos, Vasileios (2018): Prospects for electric vehicle batteries in a circular economy. CEPS Research Report. CEPS Energy Climate House. Brüssel. Online verfügbar unter https://www.ceps.eu/download/publication/?id=10660&pdf=RR%202018_05_Circular%20Impacts_batteries.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2020.
- European Parliament and the European Council: DIRECTIVE 2006/66/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC. In: *OJ L 266*, 26.9.2006,, S. 1–14. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32006L0066>, zuletzt geprüft am 31.05.2023.
- European Parliament and the European Council (2008): Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Hg. v. European Parliament. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>, zuletzt geprüft am 10.01.2022.
- Frischknecht, Rolf (2010): LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. In: *Int J Life Cycle Assess* 15 (7), S. 666–671. DOI: 10.1007/s11367-010-0201-6.
- Gao, Hongpeng; Yan, Qizhang; Xu, Panpan; Liu, Haodong; Li, Mingqian; Liu, Ping et al. (2020): Efficient Direct Recycling of Degraded LiMn2O4 Cathodes by One-Step Hydrothermal Relithiation. In: *ACS applied materials & interfaces* 12 (46), S. 51546–51554. DOI: 10.1021/acsami.0c15704.
- Georgiadis, P.; Vlachos, D.; Tagaras, G. (2006): The impact of product lifecycle on capacity

- planning of closed-loop supply chains with remanufacturing. In: *Production and Operations Management* 15 (4), S. 514–527.
- Glöser-Chahoud, Simon; Huster, Sandra; Rosenberg, Sonja; Baazouzi, Sabri; Kiemel, Steffen; Singh, Soumya et al. (2021): Industrial disassembling as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems. In: *Resources, Conservation and Recycling* 174, S. 105735. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105735.
- Guenther, Clemens; Schott, Benjamin; Hennings, Wilfried; Waldowski, Paul; Danzer, Michael A. (2013): Model-based investigation of electric vehicle battery aging by means of vehicle-to-grid scenario simulations. In: *Journal of Power Sources* 239, S. 604–610. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.02.041.
- Hao, Han; Geng, Yong; Sarkis, Joseph (2016): Carbon footprint of global passenger cars: Scenarios through 2050. In: *Energy* 101, S. 121–131. DOI: 10.1016/j.energy.2016.01.089.
- Harper, Gavin; Sommerville, Roberto; Kendrick, Emma; Driscoll, Laura; Slater, Peter; Stolkin, Rustam et al. (2019): Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. In: *Nature* 575 (7781), S. 75–86. DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- Heimes, Heiner; Kampker, Achim; Kwade, Arno; Doose, Stefan; Michaelis, Sarah, et al. (2021): Recycling von Lithium-Ionen Batterien. Hg. v. VDMA RWTH Aachen (978-3-947920-11-2).
- Hernandez, Maria; Messagie, Maarten; Hegazy, Omar; Marengo, Luca; Winter, Oliver; van Mierlo, Joeri (2017): Environmental impact of traction electric motors for electric vehicles applications. In: *Int J Life Cycle Assess* 22 (1), S. 54–65. DOI: 10.1007/s11367-015-0973-9.
- Hill, Nikolas; Amaral, Sofia; Morgan-Price, Samantha; Nokes, Tom; Bates, Judith; Helms, Hinrich et al. (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Final report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1>, zuletzt geprüft am 28.05.2021.
- Hong, Jinglan; Chen, Yilu; Liu, Juan; Ma, Xiaotian; Qi, Congcong; Ye, Liping (2018): Life cycle assessment of copper production: a case study in China. In: *Int J Life Cycle Assess* 23 (9), S. 1814–1824. DOI: 10.1007/s11367-017-1405-9.
- Huster, Sandra; Glöser-Chahoud, Simon; Rosenberg, Sonja; Schultmann, Frank (2022): A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts. In: *Journal of Cleaner Production* 363, S. 132225. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132225.

- Huster, Sandra; Rosenberg, Sonja; Glöser-Chahoud, Simon; Schultmann, Frank (2023): Remanufacturing Capacity Planning in New Markets. Effects of Different Forecasting Assumptions on Remanufacturing Capacity Planning for Electric Vehicle Batteries. Manuskript eingereicht zur Publikation im Journal of Remanufacturing.
- ISO 8887-1:2017, 2017: ISO 8887-1:2017: Technical product documentation — Design for manufacturing, assembling, disassembling and end-of-life processing — Part 1: General concepts and requirements.
- Jiang, Zhenyu; Sun, Jing; Jia, Pingshan; Wang, Wenlong; Song, Zhanlong; Zhao, Xiqiang; Mao, Yanpeng (2022): A sustainable strategy for spent Li-ion battery regeneration: microwave-hydrothermal relithiation complemented with anode-revived graphene to construct a LiFePO₄/MWrGO cathode material. In: *Sustainable Energy Fuels* 6 (9), S. 2207–2222. DOI: 10.1039/D1SE01750K.
- Kadner, Susanne; Kobus, Jörn; Hansen, Erik G.; Akinci, Seda; Elsner, Peter; Hagelüken, Christian et al. (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland. Unter Mitarbeit von acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, SYSTEMIQ Ltd. und Circular Economy Initiative Deutschland.
- Kiemel, Steffen; Glöser-Chahoud, Simon; Waltersmann, Lara; Schutzbach, Maximilian; Sauer, Alexander; Miehe, Robert (2021): Assessing the Application-Specific Substitutability of Lithium-Ion Battery Cathode Chemistries Based on Material Criticality, Performance, and Price. In: *Resources* 10 (9), S. 87. DOI: 10.3390/resources10090087.
- Klör, Benjamin; Monhof, Markus (2019): Modellgetriebene Entscheidungsunterstützung für die Umwidmung gebrauchter Traktionsbatterien. In: Jörg Becker, Daniel Beverungen, Martin Winter und Sebastian Menne (Hg.): Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 259–285.
- Krafftahrt-Bundesamt (KBA) (2022): Fahrzeugzulassungen (FZ 14). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2021. Flensburg. Online verfügbar unter https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ14/fz14_2021_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 10.11.2022.
- Kurz, Leonard; Faryadras, Mojtaba; Klugius, Ines; Reichert, Frederik; Scheibe, Andreas; Schmidt, Matthias; Wörner, Ralf (2021): Global Warming Potential of a New Waterjet-Based Recycling Process for Cathode Materials of Lithium-Ion Batteries. In: *Batteries* 7 (2), S. 29. DOI: 10.3390/batteries7020029.
- Langner, Thomas; Sieber, Tim; Acker, Jörg (2021): Studies on the deposition of copper in lithium-ion batteries during the deep discharge process. In: *Scientific reports* 11 (1), S. 6316. DOI: 10.1038/s41598-021-85575-x.

- Langner, Thomas; Sieber, Tim; Rietig, Anja; Merk, Virginia; Pfeifer, Lutz; Acker, Jörg (2023): A phenomenological and quantitative view on the degradation of positive electrodes from spent lithium-ion batteries in humid atmosphere. In: *Scientific reports* 13 (1), S. 5671. DOI: 10.1038/s41598-023-32688-0.
- Liao, Zhenghai; Zhang, Shen; Li, Kang; Zhang, Guoqiang; Habetler, Thomas G. (2019): A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 436, S. 226879. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.226879.
- Lipman, Timothy E.; Maier, Petra (2021): Advanced materials supply considerations for electric vehicle applications. In: *MRS Bulletin* 46 (12), S. 1164–1175. DOI: 10.1557/s43577-022-00263-z.
- Maisel, Franziska; Neef, Christoph; Marscheider-Weidemann, Frank; Nissen, Nils F. (2023): A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles. In: *Resources, Conservation and Recycling* 192, S. 106920. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106920.
- Mandel, J.; Schließmann, U.; Lentjes J.; Stender, S. (2016): Fraunhofer Institut: Abschlussbericht: Die Ultraeffizienzfabrik (UltraEff-UP) - Ressourcenschonende Produktionstechnologien ohne Emissionen im urbanen Umfeld. Hg. v. Fraunhofer Institut IPA, Fraunhofer Institut IGB und Fraunhofer Institut IAO. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/160610_Abschlussbericht_Ultraeffizienzfabrik.pdf, zuletzt geprüft am 31.05.2023.
- Masias, Alvaro (2018): Lithium-Ion Battery Design for Transportation. In: Gianfranco Pistoia und Boryann Liaw (Hg.): *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*. Cham: Springer International Publishing (Green Energy and Technology), S. 1–33.
- Mohr, Marit; Peters, Jens F.; Baumann, Manuel; Weil, Marcel (2020): Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. In: *Journal of Industrial Ecology* 24 (6), S. 1310–1322. DOI: 10.1111/jiec.13021.
- Mueller, Daniel B.; Cao, Jing; Kongar, Elif; Altonji, Matthew; Weiner, Paul-Harvey; Graedel, T. E. (2007): Service Lifetimes of Mineral End Uses. Final Report. U.S. Geological Survey (USGS) [Final Report, Minerals Resources External Research Program, Award Number: 06HQGR0174] (06HQGR0174).
- Oguchi, Masahiro; Fuse, Masaaki (2015): Regional and longitudinal estimation of product lifespan distribution: a case study for automobiles and a simplified estimation method. In: *Environmental science & technology* 49 (3), S. 1738–1743. DOI: 10.1021/es505245q.
- Olivetti, Elsa A.; Ceder, Gerbrand; Gaustad, Gabrielle G.; Fu, Xinkai (2017): Lithium-Ion

- Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. In: *Joule* 1 (2), S. 229–243. DOI: 10.1016/j.joule.2017.08.019.
- Peters, Jens F.; Baumann, Manuel; Binder, Joachim R.; Weil, Marcel (2021): On the environmental competitiveness of sodium-ion batteries under a full life cycle perspective – a cell-chemistry specific modelling approach. In: *Sustainable Energy Fuels* 5 (24), S. 6414–6429. DOI: 10.1039/D1SE01292D.
- Rassõlkin, A.; Belahcen, A.; Kallaste, A.; Vaimann, T.; Lukichev, D. V.; Orlova, S. et al. (2020): Life cycle analysis of electrical motor-drive system based on electrical machine type. In: *Proc. Estonian Acad. Sci.* 69 (2), S. 162. DOI: 10.3176/proc.2020.2.07.
- Rosenberg, Sonja; Glöser-Chahoud, Simon; Huster, Sandra; Schultmann, Frank (2023a): A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling - A case study of an OEM in Germany. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 160, S. 12–22. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.01.029.
- Rosenberg, Sonja; Huster, Sandra; Baazouzi, Sabri; Glöser-Chahoud, Simon; Al Assadi, Anwar; Schultmann, Frank (2022): Field Study and Multimethod Analysis of an EV Battery System Disassembly. In: *Energies* 15 (15), S. 5324. DOI: 10.3390/en15155324.
- Rosenberg, Sonja; Kurz, Leonard; Huster, Sandra; Wehrstein, Steven; Kiemel, Steffen; Schultmann, Frank et al. (2023b): Combining dynamic material flow analysis and life cycle assessment to evaluate environmental benefits of recycling – a case study for direct and hydrometallurgical closed-loop recycling of electric vehicle battery systems. Manuskript eingereicht zur Publikation bei Resources, Conservation & Recycling.
- Schlesinger, Linda; Koller, Jan; Oechsle, Oliver; Molenda, Paul (2021): Remanufacturing of E-mobility Components - Five-Step Implementation Strategy to increase Sustainability within Circular Economy. In: IEEE (Hg.): 2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Erlangen, Germany, 07.12.2021 - 09.12.2021: IEEE, S. 1–8.
- Schoch, Jennifer (2018): Battery Life Optimal Operation of Electric Vehicles. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000083119>, zuletzt geprüft am 26.01.2021.
- Schultmann, Frank (2003): Stoffstrombasiertes Produktionsmanagement. Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Habil.-Schr., 2003. 1. Aufl. Berlin: Erich Schmidt (Technological economics, 58).
- Schulz-Mönninghoff, Magnus (2022): Finding new purpose: Electric vehicle battery repurposing as a case for implementing a circular economy in automotive industry.

- Slattery, Margaret; Dunn, Jessica; Kendall, Alissa (2021): Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: A literature review. In: *Resources, Conservation and Recycling* 174, S. 105755. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105755.
- Thielemann, Axel; Sauer, Andreas; Wietschel, Martin (2015): Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/PRM-ESEM.pdf>, zuletzt geprüft am 10.02.2021.
- Toktay, Beril; van der Laan, Erwin A.; Brito, Marisa P. de (2003): Managing Product Returns: The Role of Forecasting. Rotterdam (ERIM Report Series Research in Management, ERS-2003-023-LIS).
- Umweltbundesamt: Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren, BattG, vom 2020. In: BGBl. I S. 2280. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/battg/BattG.pdf>, zuletzt geprüft am 31.05.2023.
- DIN 14044:2006, Oktober 2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- DIN 14040:2006-10, November 2019: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- Vanegas, Paul; Peeters, Jef R.; Cattrysse, Dirk; Tecchio, Paolo; Ardente, Fulvio; Mathieux, Fabrice et al. (2018): Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. In: *Resources, Conservation and Recycling* 135, S. 323–334. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.022.
- Wang, Jinlong (2013): The Environmental Footprint of Semi-Finished Aluminum Products in North America. A Life Cycle Assessment Report. Hg. v. The Aluminium Association.
- Wang, Minxi; Tian, Yuhang; Liu, Wei; Zhang, Rui; Chen, Lu; Luo, Yinda; Li, Xin (2020): A moving urban mine: The spent batteries of electric passenger vehicles. In: *Journal of Cleaner Production* 265, S. 121769. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121769.
- Wang, Xue; Gaustad, Gabrielle; Babbitt, Callie W.; Richa, Kirti (2014): Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. In: *Resources, Conservation and Recycling* 83, S. 53–62. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.11.009.
- Wu, Jiawei; Lin, Jiao; Fan, Ersha; Chen, Renjie; Wu, Feng; Li, Li (2021): Sustainable Regeneration of High-Performance Li_{1-x}Na_xCoO₂ from Cathode Materials in Spent Lithium-Ion Batteries. In: *ACS Appl. Energy Mater.* 4 (3), S. 2607–2615. DOI: 10.1021/acsaem.0c03192.

- Wu, Shubiao; Kaden, Nicolaj; Dröder, Klaus (2023): A Systematic Review on Lithium-Ion Battery Disassembly Processes for Efficient Recycling. In: *Batteries* 9 (6), S. 297. DOI: 10.3390/batteries9060297.
- Xiao, Jinhua; Jiang, Chengran; Wang, Bo (2023): A Review on Dynamic Recycling of Electric Vehicle Battery: Disassembly and Echelon Utilization. In: *Batteries* 9 (1), S. 57. DOI: 10.3390/batteries9010057.
- Xu, Chengjian; Dai, Qiang; Gaines, Linda; Hu, Mingming; Tukker, Arnold; Steubing, Bernhard (2020): Future material demand for automotive lithium-based batteries. In: *Commun Mater* 1 (1). DOI: 10.1038/s43246-020-00095-x.
- Xu, Panpan; Yang, Zhenzhen; Yu, Xiaolu; Holoubek, John; Gao, Hongpeng; Li, Mingqian et al. (2021): Design and Optimization of the Direct Recycling of Spent Li-Ion Battery Cathode Materials. In: *ACS Sustainable Chem. Eng.* 9 (12), S. 4543–4553. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c09017.

11 Anhang

11.1 Anhang A – Öffnung verschiedener Module mit prismatischen Zellen

Zeitaufnahme Akkublockfräse (Zerlegung von Akkublocken)							
Anfahr- prozess	TP 0 – Prozess: Aufgabe Rahmen mit Modul, teilautomatisiert mit Hebehilfe				TP 6 – Prozess: Entnahme d. Rahmens mit ausgedrücktem Modul, teil- automatisiert mit Hebehilfe		
Anlagen- prozesse	Prozess: Module fräsen, vollautomatisiert		Prozess: Zellen Ausdrücken, vollautomatisiert				
	TP 1 – Einspannen des Rahmens mit Modul in den Frässchlitzen	TP 4 – Fahrt Frässchlitzen zur Korneposition + Parallelfahrt d. Hydraulikschlittens zur Ausdrückposition					
	TP 2 – Fräsen	TP 5 – Ausdrücken der Zellen					
	TP 3 – Ablage Rahmen mit gefrästem Modul auf Ausdrückposition	TP 6 – Fahrt d. Hydraulikschlittens Homeposition					
Parallel- prozesse	TP 0 – ab 2 Modulen	TP 0 – Prozess: Aufgabe Rahmen mit Modul ab Ende d. Teilprozesses, teil- automatisiert mit Hebehilfe					
Gesamt-Taktzeit GT [s und min] / je Modul (ab Modul 2 ohne Anfahrprozess)							
	Einzel-Taktzeiten [s]	Einzel-Taktzeiten [s]	Einzel-Taktzeiten [s]	Einzel-Taktzeiten [s]	GT [s]	GT [min]	
Ø Modulyp T2	120	415	190	110	715	11,92	
Ø Modulyp T3	115	384	196	125	705	11,75	
Ø Modulyp T4	120	316	163	115	594	9,90	

11.2 Anhang B – Genutze generische Datensätze

Energy sources	<p>DE: Electricity grid mix 1kV-60kV Sphera</p> <p>DE: Thermal energy from natural gas Sphera</p> <p>DE: Hard coal mix Sphera</p> <p>DE: Crude oil mix Sphera</p> <p>DE: Drinking water mix Sphera</p>
Upstream Processes	<p>DE: Water (desalinated; deionised) Sphera</p> <p>GLO: Cotton fiber (bales after ginning) CottonInc</p> <p>GLO: Textile Manufacturing - Woven Fabric CottonInc</p> <p>GLO: Textile Manufacturing- Knit Fabric CottonInc</p> <p>DE: Activated carbon Sphera</p> <p>EU-27: Hydrated Lime EuLa</p> <p>DE: Hydrogen fluoride by-product gypsum highly pure Sphera</p> <p>DE: Oxygen (liquid) Sphera</p> <p>DE: Oxygen (gaseous) Sphera</p> <p>DE: Sulphuric acid mix (96%) Sphera</p> <p>DE: Sodium hydroxide mix (50%) Sphera</p> <p>DE: Soda (Na₂CO₃) Sphera</p> <p>DE: Silica sand (Excavation and processing) Sphera</p> <p>DE: Nitrogen (liquid) Sphera</p> <p>DE: Stainless steel sheet (EN15804 A1-A3) Sphera</p> <p>DE: Ammonia (NH₃) without CO₂ recovery (carbon dioxide emissions to air) Sphera</p> <p>DE: Argon (gaseous) Sphera</p> <p>DE: Lubricants at refinery Sphera</p> <p>DE: Sodium hydroxide (caustic soda) mix (100%) Sphera</p> <p>EU-27: Quicklime EuLa</p> <p>EU-28: Potassium chloride (KCl/MOP, 60% K₂O) Fertilizers Europe</p> <p>DE: Sodium chloride (rock salt) Sphera</p>
Downstream Processes	<p>DE: Polyethylene (PE) in waste incineration plant Sphera</p> <p>DE: Polypropylene (PP) in waste incineration plant Sphera</p> <p>DE: Commercial waste in municipal waste incineration plant Sphera</p> <p>DE: PET in waste incineration plant Sphera</p> <p>DE: Plastics (unspecified) in waste incineration plant Sphera</p> <p>DE: Municipal waste water treatment (mix) Sphera</p> <p>DE: Populated printed wiring board (before RoHS) in waste incineration plant Sphera</p> <p>DE: Hazardous waste (no C, incl. landfilling) Sphera</p>
Processes for Crediting	<p>DE: Copper mix (99,999% from electrolysis) Sphera</p> <p>DE: Aluminium ingot mix Sphera</p> <p>DE: Recycling potential stainless steel sheet (EN15804 D) Sphera</p> <p>GLO: lithium carbonate production, from concentrated brine ecoinvent v3.9</p> <p>GLO: lithium hydroxide production ecoinvent v3.9</p> <p>GLO: nickel sulfate production ecoinvent v3.9</p> <p>GLO: cobalt sulfate production ecoinvent v3.9</p> <p>GLO: manganese sulfate production ecoinvent v3.9</p> <p>RoW: synthetic graphite production, battery grade ecoinvent v3.9</p> <p>DE: Dimethyl carbonate (DMC) liquid phase by-product</p>

	Dimethylenoxalate Sphera RoW: ethylene carbonate production ecoinvent v3.9
--	---

11.3 Anhang C – Ergebnisse der Prozesswasseranalysen

Stichprobe vom Juni 2020 (durchgeführt an der HS Esslingen)

Parameter	Messwert	Einheit
pH-Wert	6,3	-
Leitfähigkeit	2580	$\mu\text{S cm}^{-1}$
Fluorid (F^-)	100	mg L^{-1}
Chlorid (Cl^-)	35	mg L^{-1}
Sulfat (SO_4^{2-})	250	mg L^{-1}
Phosphat (PO_4^{3-})	28	mg L^{-1}
Zink (Zn^{2+})	< 5	$\mu\text{g L}^{-1}$
Cadmium (Cd^{2+})	< 5	$\mu\text{g L}^{-1}$
Blei (Pb^{2+})	< 5	$\mu\text{g L}^{-1}$
Kupfer (Cu^{2+})	605	$\mu\text{g L}^{-1}$

Externe Analyse einer Probe des zur Entsorgung anstehenden Prozesswassers

Parameter	Messwert	Einheit
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	19,862	g L^{-1}
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB)	1,775	g L^{-1}
Total Organic Carbon (TOC)	7,232	g L^{-1}
Fluorid (F^-)	1,117	g L^{-1}
Gesamt-Phosphor (P)	118,343	mg L^{-1}
Chlorid (Cl^-)	118,343	mg L^{-1}
absetzbare Stoffe	1,315	mL L^{-1}
abfiltrierbare Stoffe	44,707	mg L^{-1}
Sulfat (SO_4^{2-})	2,17	g L^{-1}
Kobalt (Co^{2+})	15,122	mg L^{-1}
Kupfer (Cu^{2+})	6,575	mg L^{-1}
Mangan (Mn^{2+})	20,381	mg L^{-1}
Nickel (Ni^{2+})	16,305	mg L^{-1}

Analyse einer Stichprobe vom Dezember 2020 (durchgeführt an der HS Esslingen)

	Probe 1: Wasserprobe aus dem Abwassertank (WPT), 12.12.2020	Probe 2: Prozesswasserprobe aus der Anlage (WPA_1) 17.12.2020	
Parameter	Messwert	Messwert	Einheit
pH-Wert	6,71	9,72	bei 21,7 °C
Fluorid	71,3 ± 2,9	540 ± 20	mg·L ⁻¹
Chlorid	33,4 ± 2,1	160,5 ± 9,3	mg·L ⁻¹
Sulfat	266,2 ± 1,6	1643 ± 15	mg·L ⁻¹
Cobalt	4492 ± 200	38,5 ± 2,4	µg·L ⁻¹
Nickel	4356 ± 200	29,7 ± 2,6	µg·L ⁻¹
Mangan	4425 ± 200	79,5 ± 1,5	µg·L ⁻¹
CSB	3770 ± 50	18190 ± 200	mg·L ⁻¹

Analyse der Stichprobe vom März und April 2021 (durchgeführt an der HS Esslingen)

	Probe 1: WPA_2, 22.03.2021	Probe 2: WPA_1, 21.04.2021	
Parameter	Messwert	Messwert	Einheit
pH-Wert	8,06	9,43	bei 23 °C
Fluorid	28 ± 3	103 ± 5	mg·L ⁻¹
Chlorid	29 ± 3	50 ± 3	mg·L ⁻¹
Nitrat	< 5	39 ± 2	mg·L ⁻¹
Sulfat	100 ± 5	410 ± 5	mg·L ⁻¹
CSB	215	4200	mg·L ⁻¹
Arsen	< 0,02	< 0,02	mg·L ⁻¹
Blei	< 0,02	< 0,02	mg·L ⁻¹
Cadmium	< 0,002	< 0,002	mg·L ⁻¹
Chrom	< 0,01	< 0,01	mg·L ⁻¹
Zink	< 0,2	< 0,2	mg·L ⁻¹
Kobalt	0,1	0,05	mg·L ⁻¹
Eisen	0,1	0,03	mg·L ⁻¹
Kupfer	0,22	0,12	mg·L ⁻¹
Mangan	0,26	0,23	mg·L ⁻¹
Nickel	0,12	0,05	mg·L ⁻¹
Phosphor	72,0	392	mg·L ⁻¹