

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



FORSCHUNGSBERICHTSBLATT

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

1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

- Das Forschungsprojekts DeMoBat hat gezeigt, dass die Demontage von Traktionsbatterien wirtschaftliche, aber auch ökologische Implikationen für die Kreislaufschließung und -führung hat. Die verschiedenen entwickelten quantitativen Modelle zeigen die potentielle Marktgröße für Demontageaktivitäten in Deutschland in den kommenden Jahrzehnten und geben beispielhaft Antworten auf mögliche Aktivitäten einzelner Marktteilnehmer. Aufgrund großer Unsicherheiten und Risiken, z. B. in Bezug auf zukünftige Preisentwicklungen für Sekundärmaterialien, kommt der Flexibilität und Anpassbarkeit von Lösungen eine besondere Bedeutung zu.
- Demontage Pack zu Modul: 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.
- Demontage Modul zu Zelle: Die Forschungsarbeiten erstreckten sich über mehrere Arbeitspakete, die jeweils spezifische Herausforderungen und Ziele der Batteriemodul-Demontage adressierten. In einem interdisziplinären Ansatz wurden Endeffektoren, Sensortechnologien und Steuerungskonzepte integriert, um eine effiziente und sichere Zerlegung von Batteriemodulen bis auf Zellpaar-Ebene zu ermöglichen. Wesentliche

Ergebnisse umfassen die Identifikation und Entwicklung von Schlüsseltechnologien wie hochflexiblen Endeffektoren, In-Line-Sensorik für Zustandsüberwachung und ein Konzept zur geometrischen Anpassung mittels kamerabasierten Abgleiches mit CAD-Modellen. Zunächst stand die Entwicklung hochflexibler Endeffektoren im Fokus. Diese Endeffektoren, darunter Kleinteilegreifer, Modulgreifer, Spannsysteme und Spindeln, wurden konzipiert, um eine präzise und effiziente Handhabung von verschiedenen Bauteilen während der Demontage zu ermöglichen. Der modulare Ansatz ermöglicht nicht nur die Anpassung an unterschiedliche Batteriemodule, sondern birgt auch das Potenzial für breitere Anwendungen in anderen industriellen Sektoren mit variabler Bauteilgeometrie und -handhabung. Darüber hinaus wurde eine Line-Sensorik zur kontinuierlichen Überwachung des Zustands der Batteriemodule während des Demontageprozesses. Dies schließt die Erkennung von Fehlern, Beschädigungen oder anderen sicherheitsrelevanten Aspekten ein. Ein innovatives Konzept für die Detektion des sogenannten Thermal Runaway wurde entwickelt. Dieses kritische Phänomen, das zu Bränden oder Explosionen führen kann, wurde durch den Einsatz externer Sensorik, insbesondere einer Thermographiekamera, analysiert und nachgebildet. Zusätzlich wurde die Identifikation und Analyse sicherheitskritischer Zustände während der Batteriemodul-Demontage fokussiert. Dies umfasste die systematische Analyse von Gefährdungspotenzialen, Ursache-Wirkungs-Prinzipien und die Ableitung von Anforderungen an die Überwachung von Li-Ionen-Batterien. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets bilden die Grundlage für ein durchgehendes Überwachungskonzept, um potenzielle Gefahren zu minimieren. Eine flexible Demontagezelle wurde entwickelt, die auf einer variablen Anlagenarchitektur basiert. Zwei 6-Achs-Knickarmroboter wurden integriert, um die Demontageprozesse zu automatisieren. Hochflexible Endeffektoren wurden in dieser Zelle eingesetzt, um eine effiziente und anpassungsfähige Handhabung der Batteriemodule sicherzustellen.

- Zelldemontage und stoffliches Recycling: Im Rahmen des Projekts „DeMoBat“ war das Ziel des Teilprojektes 2.4 (TP 2 .4) 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 sollte das Recyclingverfahren durch umfassendes Monitoring und Charakterisierung der Rezyklate begleitet werden. In der anschließenden Nachhaltigkeitsbewertung sollte 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, wurde die Reintegration des Rezyklats in neu aufgebaute Zellen angestrebt. Die Firmen Erlos GmbH und Silberland GmbH

konnten in Zusammenarbeit für die teil-automatisierten Demontage von Lithium-Ionen-Zellen einen Demonstrator aufbauen. Die Erlos GmbH realisierte die anschließende Separation der Elektroden und der Kathodenaktivmaterialien (Typ NMC111) mit Hilfe eines Hochdruckwasserstrahlverfahrens. Die Ökobilanzierung an der Hochschule Esslingen konnte zeigen, dass die Prozesskette auf Basis der wasserstrahl-basierten Separation des Kathodenmaterials gegenüber hydrometallurgischem Recycling vorteilhaft ist, da der Energie- und Ressourceneinsatz deutlich geringer ist als bei dem hydrometallurgischen Verfahren. An der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg und der Hochschule Esslingen wurden umfassendes prozessbegleitendes Monitoring und Charakterisierung für das zurückgewonnene NMC111-Rezyklat eingerichtet. Es konnte gezeigt werden, dass diese Rezyklate von akzeptabler Reinheit sind, jedoch Verunreinigungen aufweisen. Die Kristallstruktur des Frischmaterials bleibt bei wasserstrahl-basierter Rückgewinnung erhalten. Die Aluminiumkollektorfolie kann durch Einfluss von Luftfeuchtigkeit nach der Demontage korrodieren und so zu punktueller Zerstörung des NMC-Aktivmaterials führen. Der anschließende Aufbau von Laborzellen am Fraunhofer IPA zeigt, dass die Reintegration des nicht weiter behandelten Rezyklats bei 1:1-Substitution zu stark verminderter elektrochemischer Aktivität führt. Die Materialcharakterisierung ergibt, dass die reduzierte elektrochemische Aktivität primär nicht auf die Bulkeigenschaften zurückzuführen ist, sondern auf die Oberflächenbeschaffenheit und die Verunreinigungen. Zusammenfassend zeigt sich, dass für den sinnvollen Wiedereinsatz des Rezyklats aus dem wasserstrahl-basierten Recyclingverfahrens eine Nachbehandlung erforderlich ist.

- 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.
- Demontage von E-Antriebsaggregaten: Ziel war die Entwicklung und der Aufbau eines automatisierten Demontagemoduls für Antriebsaggregate der Elektromobilität zwecks Ermöglichung der Wiederverwendung von Bauteilen sowie des Materialrecyclings. Dazu wurde ein roboterbasiertes Demontagetechnikum eingerichtet, das zwei Arbeitsbereiche umfasst, um der Verarbeitung der hochintegrierten Aggregate, bestehend aus elektrischer Maschine, Getriebe sowie der Leistungselektronik, gerecht zu werden. Im zentralen Arbeitsbereich, bestehend aus einem Positionierer (2-Achs-Roboter) sowie drei 6-Achs-

Industrierobotern, werden zunächst die Leistungselektroniken von den Getriebe-Motor-Einheiten abgetrennt, bevor letztere hier weiter demontiert werden. Die Leistungselektroniken werden aufgrund der Notwendigkeit zur Kontaminationsfreiheit (Getriebeöl, Kühlflüssigkeit) in einem gesonderten Arbeitsbereich demontiert, welcher zudem mit Robotern verhältnismäßig geringerer Tragkraft ausgestattet ist. In einem ersten Schritt wurden manuelle Demontageversuche durchgeführt, um die Aggregatstrukturen zu erfassen und in der Datenbank zu hinterlegen. Die für die Automatisierung der Prozesse auf Basis von Industrierobotern benötigten Werkzeuge wurden daraufhin identifiziert. Dabei zeigte sich, dass insbesondere spezialisierte Werkzeuge zur Demontage nicht am Markt erhältlich sind, da die Herausforderungen einer automatisierten Demontage grundsätzlich andere sind als die einer Montage bzw. Produktion. Diese wurden daher im Projektverlauf selbst konstruiert und gefertigt. Dazu gehörten beispielsweise individuell angepasste Greifwerkzeuge, ein Spreizwerkzeug für die Öffnung verklebter Gehäuseteile, aber auch durch Industrieroboter geführte Schraubwerkzeuge zum Lösen und Entfernen verschiedener Schrauben mit unterschiedlichen Drehmomenten und -wegen. Als besondere Herausforderung wurde das Entfernen von Sicherungsringen sowie das Trennen kraftschlüssiger Verbindungen, wie etwa in Gehäuse ein- und auf Wellen aufgedrückte Bauteile, identifiziert. Von zentraler Wichtigkeit für das erstellte Demontagemodul ist die Informationsverarbeitung. Verschiedene RobotVision-Systeme und weitere kamerabasierte Verfahren zur Prozesssteuerung wurden eingebunden, um den speziellen Herausforderungen beim Umgang mit End-of-Life-Produkten begegnen zu können. Zudem wurden die benötigten Softwarekomponenten für die Prozesssteuerung sowie ein Prozessleitsystem entwickelt und implementiert. Im Ergebnis konnten bis zum Projektende wesentliche Demontageschritte inklusive der Bergung der stark werthaltigen Baugruppen Rotor und Stator umgesetzt werden. Für deren Demontage wurde eine vom Roboter-Arbeitsbereich getrennte Austreibereinheit entwickelt und integriert. Periphere Arbeiten im Rahmen des Projektes umfassten eine Spülvorrichtung zum Reinigen der Aggregate von Betriebsflüssigkeiten, Untersuchungen zur optischen Zustandsprüfung ausgewählter Bauteile sowie die Ableitung von Design-for-Disassembly-Strategien für zukünftige Modellgenerationen. Auf theoretischer Basis wurden begleitend Demontagesysteme hinsichtlich Fertigungsorganisation und -steuerung betrachtet. Der Demontageprozess wurde dabei 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.

2 Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

- Die gewonnenen Modellergebnisse sind spezifisch auf den deutschen Markt ausgelegt. Dies betrifft z. B. die Berechnung der manuellen Demontagekosten oder auch die Rücklaufmengen auf regionaler Ebene in Baden-Württemberg. Dies ist von besonderer Bedeutung, da die Kosten für Batterieeverwertungskonzepte stark zwischen verschiedenen Ländern variieren. Die meisten bisherigen Arbeiten betrachten den chinesischen Markt, der jedoch anderen rechtlichen Rahmenbedingungen und Kostenstrukturen folgt als der deutsche Markt. Die wenigen vorhandenen deutschen Vorarbeiten in anderen Forschungsprojekten fanden zu einer Zeit statt, als noch andere Rahmenbedingungen des E-Mobilitätswachstums und der Batterietechnologie vorlagen. Entsprechend bildeten sie den Status Quo nicht mehr angemessen ab.
- Die hochflexiblen Endeffektoren und die modularisierten Anlagenarchitekturen, die prototypisch in TP 2.1 und TP 2.3 entwickelt wurden, ermöglichen erstens eine variantenreiche Demontage, was besonders für die zunehmende Vielfalt von Batteriepacks und -modulen in Elektrofahrzeugen relevant ist. Zweitens stellt die In-Line-Sensorik, insbesondere das Konzept zur Zustandsüberwachung während der Demontage, einen Fortschritt dar, der nicht nur die Sicherheit, sondern auch die Effizienz des gesamten Prozesses verbessert. Die Endeffektoren tragen nicht nur wesentlich zur Steigerung des Automatisierungsgrades der Batteriemodul-Demontage bei, sondern eröffnen auch neue Perspektiven für die Flexibilisierung von Demontageprozessen in anderen Branchen. Die Übertragbarkeit dieser Endeffektoren auf unterschiedlichste Bauteile könnte die Anwendbarkeit in Industriezweigen, die eine hohe Individualität und Variantenvielfalt in ihren Produkten aufweisen (bspw. Automobil- und Elektronikindustrie) ermöglichen. Die In-Line-Sensorik und die Thermographiekamera-Detektion erhöhen die Sicherheitsstandards erheblich. Übertragbar ist dieser Ansatz auf andere industrielle Prozesse, bei denen eine kontinuierliche Zustandsüberwachung und Früherkennung von kritischen Ereignissen erforderlich ist, wie beispielsweise in der chemischen Industrie oder der Luft- und Raumfahrt. Der Einsatz von Thermographiekameras könnte auch in der Gebäudeüberwachung zur frühzeitigen Erkennung von Brandgefahren von Nutzen sein. AP 2.3 identifizierte sicherheitskritische Zustände und leitete Anforderungen für die Überwachung von Li-Ionen-Batterien ab. Diese systematische Analyse kann dazu

beitragen eine höhere Sicherheit bei der Batteriedemontage, auch unabhängig von ihrem Automatisierungsgrad, zu gewährleisten.

- Die Ergebnisse konnten bereits zur Laufzeit in wissenschaftlichen Journalen, durch Konferenzbeiträge und Vorträgen bei Weiterbildungsinstituten publiziert und damit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Die Primärdatensätze, welche für die Ökobilanz der Prozesskette erhoben wurden, sind frei zugänglich publiziert (Open Access). Mit Hilfe der Charakterisierungsmethoden konnte das Verständnis über das Kathodenrezyklat vom Typ NMC111 und die Einflüsse aus dem vorgelagerten wasserstrahl-basierten Recyclingverfahren weitgehend verbessert werden. Dies führte zu mehreren Konzepten zur Aufbereitung des NMC111-Rezyklats, um die Qualität für einen Wiedereinsatz entsprechend zu steigern. Die Umsetzung und Erprobung dieser Konzepte ist Kernelement von daran anknüpfenden Folgeprojekten.
- Das Projektziel der automatisierten, zerstörungsfreien Bauteilgewinnung aus elektrischen Antriebsaggregaten durch Demontage wurde erfolgreich umgesetzt. 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. Die Strategie einer zielgerichteten automatisierten Demontage erwies sich als zielführend und kann zukünftig auf weitere Produktgruppen ausgeweitet werden. Die detaillierte Betrachtung von Aspekten wie Demontagetiefe, Materialauswahl und Verbindungstypen bei relevanten Produkten auf wissenschaftlicher Basis mit hoher Anwendungsnähe erwies sich als erfolgversprechend. Insbesondere die entwickelten Werkzeuglösungen bieten eine hinreichende Flexibilität, um den Transfer der automatisierten Demontage auf weitere Produkte voranzutreiben.

3 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

- Die Ergebnisse und Methoden des Teilprojektes 1 wurden bereits erfolgreich in die universitäre Lehre integriert und auf verschiedenen wissenschaftlichen Konferenzen diskutiert. Außerdem wurden sie mit interessierten Stakeholdern der Batteriewertschöpfungskette geteilt, so dass diese sie zur internen Planung verwenden können.
- Die entwickelten Demontageanlagen ermöglichen eine vollautomatisierte und sichere Zerlegung von Batteriepacks und -modulen, wodurch wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen werden können. Der Einsatz von In-Line-Sensorik minimiert Risiken wie das Thermal Runaway und schafft die Voraussetzungen für einen sicheren und umweltfreundlichen Demontageprozess. Diese Fortschritte sind von großer Bedeutung für die Elektromobilitätsbranche, Recyclingunternehmen und Forschungseinrichtungen, die sich mit nachhaltigen Technologien beschäftigen. Die hochflexiblen Endeffektoren sind direkt in der Elektrofahrzeug- bzw. Recyclingindustrie anwendbar, um eine effiziente und kostengünstige Batteriedemontage zu gewährleisten. Die Übertragbarkeit dieser Technologie auf andere Branchen mit unterschiedlichen Anforderungen an die Handhabung von Bauteilen bietet vielfältige Möglichkeiten für die praxisnahe Anwendung. Die In-Line-Sensorik und die Thermographiekamera-Detektion tragen maßgeblich zur Sicherheit bei der Batteriedemontage bei. Die Übertragbarkeit dieser Sicherheitskonzepte auf andere industrielle Kontexte, insbesondere solche mit potenziell gefährlichen Prozessen, hebt den Nutzen über die Elektrofahrzeugindustrie hinaus. Die Implementierung in Anlagen zur Herstellung oder Handhabung von Chemikalien, heißen Materialien oder brennbaren Substanzen könnte das Risiko von Unfällen minimieren.
- Die Ergebnisse sind im Abschlussbericht des Projektes ausführlich dokumentiert. Das Teilprojekt 2.4 konnte einen nachweislich ökologisch vorteilhaften Prozess entwickeln, mit dessen Hilfe Kathodenmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterien (großformatige Zellen aus vorzugsweise automobiler Anwendung) zerstörungsfrei zurückgewonnen werden können. Dieser Prozess konnte in die vorindustrielle Anwendung überführt werden. Die installierte Pilotanlage ist in Betrieb genommen und prozessiert jährlich ca. 1.500 Tonnen Altbatterien.
- Mit der zunehmenden Verbreitung der Elektromobilität ergeben sich neue Herausforderungen für das Recycling im Hinblick auf die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft gemäß KrWG. Metalle erfahren beim Durchlaufen der etablierten

Recyclingrouten oftmals eine Reduktion ihres Einsatzspektrums (Downcycling). Bei der Demontage werden Produkte entlang von Materialgrenzen aufgetrennt. Dies erlaubt eine sortenreine Wiedergewinnung und damit ein gezielteres Recycling bei Erhalt des Einsatzspektrums der Materialien. Darüber hinaus wird durch Integration eines entsprechenden Condition Monitorings auch die Rückgewinnung wiederverwendbarer Bauteile aus Altprodukten ermöglicht, wie sie gemäß KrWG bzw. der untergesetzlichen Regelwerke prioritär zu erfolgen hat. Naheliegend ist die Übertragung und Weiterentwicklung der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse auf weitere elektrische Antriebsaggregate bereits marktverfügbarer sowie zukünftiger Modellgenerationen. Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist besonders in der industriellen Umsetzung der entwickelten Techniken und Strategien zu sehen. Darüber hinaus bieten besonders auch die im Projekt entwickelten Demontagestrategien und -werkzeuge Perspektiven für Werkzeug- und Systemanbieter/-hersteller zum Ausbau ihres Portfolios, da entsprechende Demontageaktivitäten realistisch absehbar einen Zukunftsmarkt ausbilden werden.

4 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

- Obwohl die Modelle speziell für den Aspekt der Demontage als erste Verwertungsebene in der Abfall- und Rückführungsstufe ausgelegt sind, können sie auf andere Produkte übertragen werden. Dies kann genutzt werden, um zukünftig auch andere kreislaufwirtschaftliche Wertschöpfungsketten in Form von Forschungsprojekten zu bewerten (z. B. das wachsende Aufkommen an gebrauchten PV-Anlagen). Darüber hinaus wird angestrebt, insbesondere in Form von Promotionen, vorhandene Verbesserungspotenziale der entwickelten Modelle umzusetzen. Durch die zahlreichen Veröffentlichungen des Teilprojektes 1 in internationalen Fachjournals wurde der internationale Austausch mit anderen Forschungseinrichtungen gestärkt.
- Um die Forschungsergebnisse erfolgreich zu vermitteln und darüber hinaus in projektfremde Anwendungen und Branchen zu übertragen, wurden die in TP 2.2 und TP 2.3 angewandten Methoden, die entwickelten Konzepte sowie die Erkenntnisse aus Versuchsreihen und dem Prototypenaufbau und -test in Fachzeitschriften und auf Konferenzen veröffentlicht und damit einer breiten sowohl wissenschaftlichen als auch industrienahen Gemeinschaft zugänglich gemacht. Darüber hinaus sind in Zukunft gezielte Kooperationen mit Industriepartnern und Forschungseinrichtungen sowohl in öffentlich geförderten Verbundprojekten als auch bilateralen Direktkooperationen vorgesehen, um die im Projekt DeMoBat entworfenen Konzepte und Prototypen in einen höheren Technologiereifegrad zu überführen und die entwickelten Technologien in realen Produktionsumgebungen zu implementieren. Die Transferansätze sollen darauf abzielen, die Forschungsergebnisse nachhaltig in praxisrelevante Anwendungen zu überführen und einen breiten Mehrwert für Industrie und Umwelt zu schaffen.
- Das Konsortium um das DeMoBat-Teilprojekt 2.4 konnten auf den Ergebnissen aufbauend weitere praxisnahe Forschungsvorhaben initiieren. Hierfür konnten auch große Industrieunternehmen gewonnen werden, deren Geschäftsfelder und Kernkompetenzen in der Herstellung von Batteriezellen liegen. Auf diese Weise soll der Transfer in die Industrie beschleunigt und die Wertschöpfungskette geschlossen werden. Darüber hinaus wurde das Interesse von Unternehmen aus der Branche der Elektromobilität geweckt, ein direktes und damit umweltfreundlicheres Recycling aufwendigen indirekten Verfahren für ihre Produkte zu bevorzugen. Zu den Folgeprojekten gehören die Projekt „ReUpDirekt“ (gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus in Baden-

Württemberg), das Projekt „ReKath“ (gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) 'Otto von Guericke' e.V.) und das Projekt „ReLiBat“ (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung), welche alle zu großen Teilen auf den Ergebnissen des Projekts „DeMoBat“ fußen.

- Für interessierte Kreise steht ein funktionsfähiger realer Demonstrator für die automatisierte Demontage elektrischer Antriebsaggregate zur Verfügung. Für die Außendarstellung der Forschungsarbeiten des Verbindprojektes wurde zudem ein virtuelles Fabrikmodell erstellt. Dieses umfasst neben einem virtuell erlebbaren Funktionsmodell des Demontagemoduls für Antriebsaggregate (CUTEC) ebenfalls virtuelle Abbilder der real erstellten Demonstratoren aus den weiteren Teilprojekten. Diese umfassen die verschiedenen Prozessstufen der Demontage von Elektrofahrzeugbatterien: (1) Demontage bis auf Modulebene (IPA), (2) Zerlegung der gewonnenen Module bis auf Zellebene (WBK) und (3) Zerlegung der Zellen, Entnahme der Schwarzmasse (WBK). Die erzielten Fortschritte im Bereich der automatisierten Demontage wurden und werden seitens CUTEC derzeit im Rahmen verschiedener Projekte (Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität – Eine Studie zur Optimierung der Demontage, Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. des VDA, Laufzeit: 09/2022–08/2023; Kreislauffähigkeit des Elektro-Antriebsstrangs durch intelligente Demontage und Nachverfolgung (ZirkulEA), Förderkennzeichen 02J21E139, Laufzeit: 10/2022–09/2025) weiter ausgebaut und in diesem Rahmen potenziellen Anwendern aus der Industrie regelmäßig online sowie vor Ort im CUTEC präsentiert. Weitere, auf den Erkenntnissen aufbauende Projekte unter starker Beteiligung der Industrie, befinden sich in der Antragsphase. Des Weiteren flossen die Ergebnisse in zwei am CUTEC Forschungszentrum durchgeführte Promotionen ein. Die im Vorhaben entwickelten Methoden und Ergebnisse fließen zudem direkt in die universitäre Ausbildung von Fachkräften ein – sowohl über die forschungsnahe Lehre, als auch in der Beschäftigung von Nachwuchswissenschaftler:innen. Damit wird vorhandene fachliche Kompetenz weiter ausgebaut und dem sich bereits abzeichnenden Fachkräftemangel entgegengewirkt.