

Adaptive automatisierte Batteriedemontage durch mobile Großroboter für Kreislaufwirtschaft

Remanufacturing in der E-Mobilität

C. Weckendrup, A. Kluge-Wilkes, M. Kweider, A. Göppert, R. H. Schmitt

ZUSAMMENFASSUNG Für die Wiederverwendung gebrauchter Nutzfahrzeuggatterien sind aufgrund der vielfältigen Batteriesysteme und -zustände unterschiedlichste Herausforderungen im Remanufacturingprozess zu überwinden. Das Konzept der adaptiven, automatisierten Demontage mittels eines mobilen Großroboters für die größer dimensionierten Lkw-Batterien erweist sich als vielversprechender Ansatz, dessen Eignung anhand des Demontageschrittes der Modulentnahme in diesem Beitrag verdeutlicht wird.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Batterieherstellung,
Flexible Fertigungssysteme

1 Einleitung

1.2 Motivation

Die Elektrifizierung des Straßenverkehrs wird durch die Verschärfung der EU-CO₂-Emissionsverordnung 2019/1242 für neue, schwere Nutzfahrzeuge vorangetrieben. Lkw, Busse und Reisebusse sind für über ein Viertel der Treibhausgasemissionen im EU-Straßenverkehr verantwortlich. Ihr Anteil an den Gesamtmissionen der EU beträgt über 6%. Die EU-Verordnung sieht eine Reduktion dieser CO₂-Emissionen um 45% für den Zeitraum von 2030 bis 2034, 65% für den Zeitraum von 2035 bis 2039 und 90% ab dem Jahr 2040 vor. [1]

Es wird prognostiziert, dass Elektrofahrzeuge bis 2035 die Hälfte der weltweiten Autoverkäufe ausmachen werden [2]. Die Zunahme elektrischer Fahrzeuge resultiert in einer zunehmenden Nachfrage an Batterien, wodurch der Bedarf begrenzter Rohmaterialien wie Lithium, Kobalt, oder Mangan steigt. In Anbetracht der Ressourcenknappheit und der steigenden Rohstoffpreise gewinnen das Recycling und die Wiederverwendung insbesondere der Batterien nach ihrem ersten Lebenszyklus eine entscheidende Bedeutung. Der erste Lebenszyklus (End-of-first-life, EoFL) von Batterien beträgt fünf bis acht Jahre, wobei sie eine Restkapazität von etwa 75% aufweisen [3]. Um die Nachhaltigkeit der steigenden Elektromobilität zu gewährleisten, ist der Übergang von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft von wesentlicher Bedeutung [4]. Gemäß der Richtlinie 2006/66/EG sind OEMs (Original Equipment Manufacturers) für die Wiederverwendung oder Entsorgung von Batterierückläufern verantwortlich [5]. Es besteht die Notwendigkeit, die Demontage zu automatisieren und

Remanufacturing in e-mobility – Adaptive automated battery disassembly using large mobile robots for circular economy

ABSTRACT The broad range of battery systems and conditions presents a significant challenge to the remanufacturing and reuse of returned commercial vehicle batteries. Adaptive automated disassembly using a large mobile robot for truck batteries is a promising approach for overcoming these challenges. This article illustrates the suitability of this approach by examining the disassembly step of module removal.

die Adaptivität zu maximieren, um unterschiedliche Produktzuständen zu demontieren. Um der zukünftigen Menge an wiederzuverwertenden Batterierückläufern gerecht zu werden können, ist die Entwicklung eines flexiblen und automatisierten Remanufacturing-Prozesses erforderlich [6].

1.2 Zielstellung

Im Zuge des Projekts „Remanufacturing von variantenreichen Batteriemodulen mit automatisierten Montage- und Prüfungsprozessen“ (kurz „Revamp“, BMBF, Laufzeit 2023–2026) wird die erfolgreiche Integration der zunehmenden Anzahl an Batterierückläufern in die Kreislaufwirtschaft erforscht. Ziel ist es, die Rate der Second-Life- und Second-Use-Batterien zu erhöhen [7]. Dieser Beitrag präsentiert ein Konzept für die Demontage als Teil des Remanufacturing-Prozesses, siehe **Bild 1**. Der Fokus liegt auf der Entwicklung eines flexiblen Systems, das für eine Vielzahl an Batteriesystemen geeignet ist.

Die Umsetzung des Projekts erfolgt in Zusammenarbeit mit MAN Truck & Bus SE sowie weiteren wichtigen Partnern, wie dem Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe der RWTH Aachen, dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT), der Bertrand Technik GmbH, der Software AG, der IBG Automation GmbH, der BE-Power GmbH und Weidemann. Der Schwerpunkt des Forschungsprojekts liegt auf der Erforschung des Remanufacturings von Batterien aus schweren Nutzfahrzeugen, wobei MAN Truck & Bus SE eine Schlüsselrolle einnimmt. Diese Batterien unterscheiden sich vor allem in Größe und Gewicht von Batterien für herkömmliche Nutzfahrzeuge.

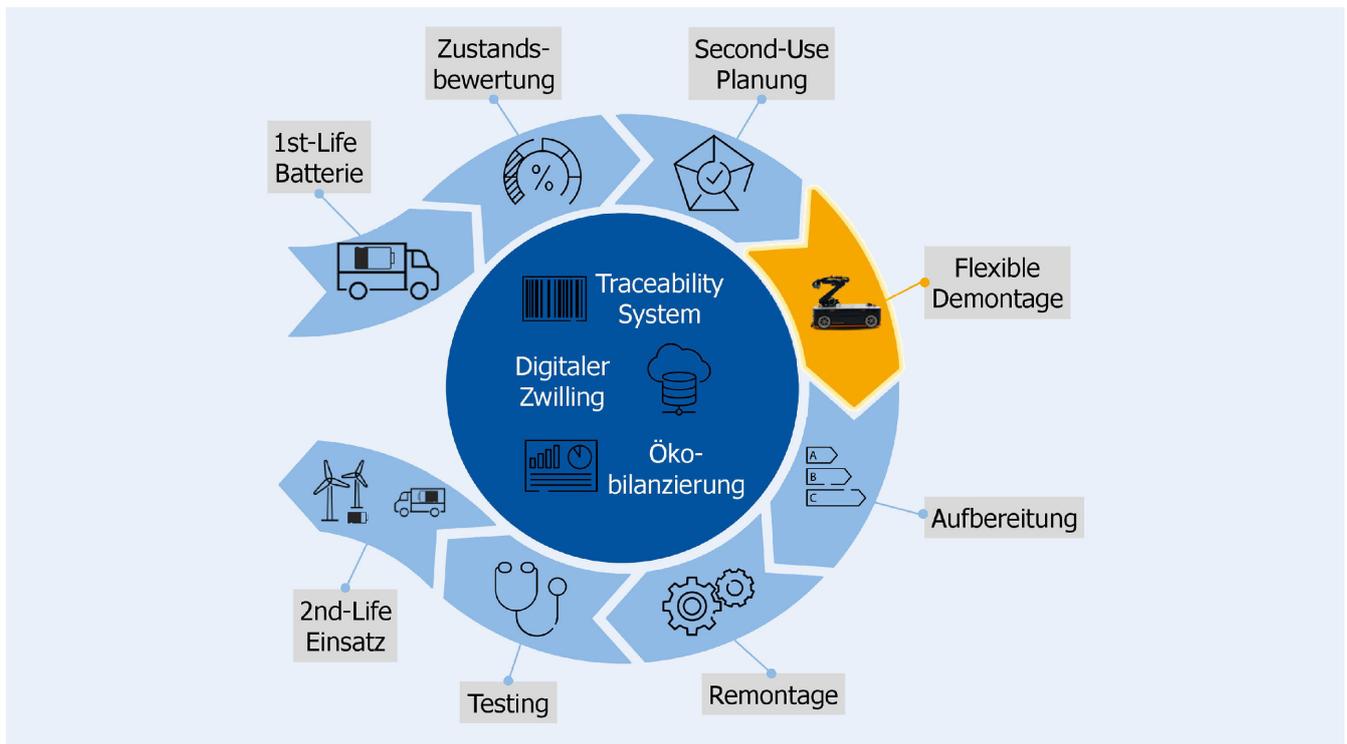


Bild 1. Batterie-Lebenszyklus im Forschungsprojekt „Revamp“. Grafik: WZL | RWTH Aachen University

Um eine Demontage von LKW-Batterien, unabhängig vom Hersteller, bis auf Modulebene mit einem hohen Automatisierungsgrad umzusetzen, sind adaptive Konzepte und mobile Großroboter notwendig. Hierzu analysiert dieser Beitrag zuerst den Stand der Technik der automatisierten Demontage von Batterien und identifiziert bestehende Herausforderungen.

2 Stand der Technik

Bislang erfolgt die industrielle Batteriedemontage primär manuell [8, 9]. Die manuelle Demontage ist limitiert skalierbar, kostenintensiv und gefährdend aufgrund verbleibender Restladung und hohem Gewicht der Batterien. Somit kann eine adäquate Handhabung der zukünftig weiter steigenden Anzahl an Rückläufern nicht gewährleistet werden [9]. Eine Automatisierung kann die Remanufacturing-Strategien durch Skalierbarkeit und erhöhte Kapazität wirtschaftlich rentabel machen. Die Überführung in eine zerstörungsfreie, automatisierte Demontage ist somit erstrebenswert. Für einen industriellen Einsatz automatisierter Demontagestationen müssen nachfolgend dargestellte Herausforderungen auf Produktebene sowie Prozessebene überwunden werden [10].

In diesem Kapitel werden zunächst die Herausforderungen auf der Produktebene erörtert, die sowohl bei der Entwicklung der Batteriesysteme als auch für den gesamten Demontageprozess berücksichtigt werden müssen. In Kapitel 3 erfolgt eine Analyse der einzelnen Demontageschritte auf Prozessebene. Dabei werden der aktuelle Stand der Technik sowie das Expertenwissen aus verschiedenen Forschungsprojekten, einschließlich Revamp, im Rahmen einer Analyse der automatisierten Demontage zusammengeführt, um die derzeit bestehenden Herausforderungen zu identifizieren.

Angesichts des kontinuierlichen technologischen Fortschritts, der sich wandelnden Marktanforderungen sowie individueller Herstellerpräferenzen ist eine erhebliche Variantenvielfalt von Batteriesystemen für Nutzfahrzeuge zu verzeichnen [11]. Geometrische Variationen bedingen eine Anpassung der Demontagerihenfolge und technischen Ausstattung, einschließlich der Werkzeuge. Die Vielzahl der Modellvarianten erfordert somit eine kontinuierliche Neubewertung der Demontierbarkeit und der erforderlichen Arbeitsschritte. Diese Anpassungen sind bereits bei unterschiedlichen Generationen desselben Batterieherstellers erforderlich [9, 12, 13]. Obwohl Batterien grundsätzlich einen ähnlichen funktionalen Aufbau aufweisen, variieren Details zwischen verschiedenen Herstellern, darunter die Anzahl, Größe, Form und Positionierung der einzelnen Komponenten [14].

Des Weiteren ist eine hohe Zustandsvariabilität festzustellen, in der sich die Batterie am Ende der ersten Nutzungsphase befindet. Physikalische Verformungen, Verschmutzung und Korrosion müssen detektiert und bewertet werden, um eine adaptive Demontagestrategie abzuleiten [8].

In zahlreichen Fällen wurde die Demontierbarkeit bei der Gestaltung von Batterien unzureichend berücksichtigt. Diese Gestaltungsmerkmale führen zu einer eingeschränkten Zugänglichkeit von Greif- und Schraubpunkten [10]. Außerdem werden nicht reversible Verbindungen wie Kleb- oder Schweißnähte eingesetzt. Biegeschlaffe Elemente und Steckverbindungen automatisiert und zerstörungsfrei zu lösen, ist nach wie vor Gegenstand der Forschung [15]. Zukünftig können „Design for Disassembly“ oder „Design for Remanufacturing“ eine einfachere und zerstörungsfreie Demontage ermöglichen [10].

Die Demontage der Batterie erfolgt zu Beginn im Hochvolt-Bereich und erfordert spezialisierte Arbeitskräfte. Neben der Reduzierung der Demontagezeit und der Senkung der Betriebskosten stellt der Schutz der Menschen vor der Hochspannung ein

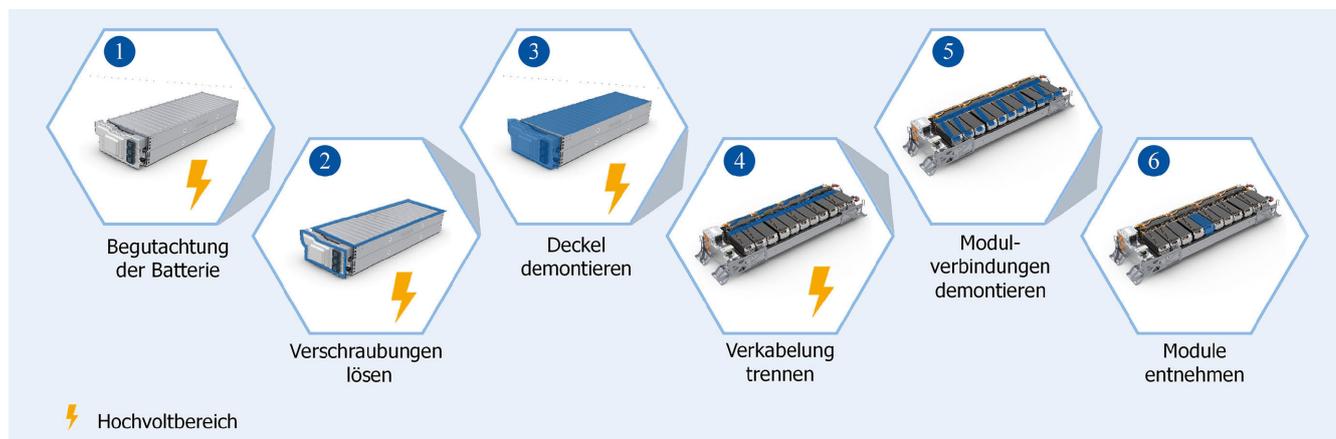


Bild 2. Generische Herangehensweise für die Batteriedemontage. Grafik: WZL | RWTH Aachen University

wesentliches Ziel dar. Gerade in diesem Zusammenhang erweist sich eine weitestgehend automatisierte Demontage als vorteilhaft, da sie das Risiko erheblich senkt [16].

3 Analyse der Automatisierbarkeit der Demontage von Batterien

Der Prozess der Batteriedemontage beinhaltet mehrere Schritte, welche je nach Batteriehersteller im Detail variieren können. Basierend auf den Darstellungen in der Literatur lassen sich sechs übergeordnete Demontageschritte identifizieren, die auf eine Vielzahl von Batteriearchitekturen übertragbar sind [17, 18]. Diese Schritte werden in **Bild 2** anhand einer LKW-Batterie veranschaulicht.

Die nachfolgende Darstellung der Herausforderungen orientiert sich an diesen Schritten und erfolgt auf Basis des aktuellen Stands der Technik [9, 10, 17], der Ergebnisse aus Forschungsprojekten wie „DeMoBot“ [19] und Diskussionen mit Experten aus der Industrie. Die Zusammenstellung des Expertenwissens erfolgt in Form einer Analyse der Automatisierbarkeit, welche in der **Tabelle** dargestellt wird.

Die oben genannten sechs Schritte der Demontage werden hierbei in Elementarschritte untergliedert. Die Bewertung der Automatisierbarkeit jedes Elementarschritts erfolgt nach fünf Faktoren in vier Stufen (0, 3, 6 und 9), wobei 9 eine sehr gute Automatisierbarkeit darstellt. Die Bewertungskriterien sind nachfolgend gelistet:

- **Eignung von mobilen Robotern:** Kann der Prozessschritt effektiv mit mobilen Robotersystemen durchgeführt werden, die den spezifischen Anforderungen gerecht werden?
- **Anpassungsaufwand an Flexibilitätsanforderungen:** Kann das System bei veränderten Prozessen oder übergeordneten Strukturen umgerüstet werden und welche Flexibilität und Anpassungsfähigkeit muss die Automatisierungstechnik dafür bieten?
- **Mensch-Maschine-Zusammenarbeit:** Erfordert der Prozess die Kooperation von Menschen und Maschine und ist diese Form der Zusammenarbeit für die Anwendung überhaupt möglich?
- **Skalierbarkeit:** Ist das System in der Lage bei zunehmender Belastung entsprechend skaliert zu werden und erfordert dies möglicherweise die Nachrüstung von Robotern oder Anlagen?
- **Zykluszeit:** Sind vergleichbare Zeiten wie bei der manuellen Demontage realisierbar?

Der erste Schritt umfasst das Eintreffen des Batterierückläufers sowie das Identifizieren des Batterietyps und eine Bewertung des aktuellen Zustands [20]. In einer Vielzahl von Fällen ist das Managementsystem zur Zustandsbewertung von Batteriesystemen nicht zugänglich, sodass eine Messung der einzelnen Batteriemodule über die einzelnen Pole und Hauptstecker erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich ist [19].

Der Zugang zu den einzelnen Komponenten der Batterie erfordert zunächst die Entfernung des Batteriedeckels (Schritt 3). Dies bedingt den vorgelagerten Schritt des Lösen von Verschraubungen, die den Deckel an der Batterie fixieren (Schritt 2). Oft sind diese Schrauben durch äußere Verschmutzung und Korrosion beeinträchtigt, was die Erkennung durch Bildverarbeitungssysteme und Handhabung erschwert [9, 17]. Exemplarisch wurde das Deep-Learning-Objekterkennungsmodell „Yolo“ integriert, um die Zuverlässigkeit der Schraubenerkennung zu verbessern [21]. In der prototypischen Demontagestation des Projekts DeMoBot wurde die Problematik mithilfe einer 3D-Sensorpunktwolke gelöst [19].

Im dritten Schritt erfolgt die Abnahme des Deckels. Die Problematik der variierenden Geometrie sowie des Zustandes lässt sich mit einem formflexiblen Greifer lösen, der in der Lage ist, sich seinem Gegenstück für jeden Greifprozess anzupassen. [22]

Die zerstörungsfreie Demontage der Kabelverbindungen (Schritt 4) ist herausfordernd, da sowohl das Handling biegeschlaffer Kabel als auch das Lösen von Steckverbindungen bisher nicht vollautomatisiert gelöst wurden. Selbst das manuelle Lösen dieser Verbindungen ist mit einem hohen Beschädigungsrisiko verbunden [17]. Die Experten bewerteten diesen Schritt ebenfalls als sehr herausfordernd bezüglich der Automatisierbarkeit (siehe Tabelle). Aus den genannten Gründen wurde in bisherigen Ansätzen auf eine (halb-)zerstörende Demontagemethode zurückgegriffen, welche unter anderem das Durchschneiden der Kabel umfasst [9, 19].

Die Demontage der Modulverbinder (Schritt 5) stellt eine vergleichsweise einfache Pick-and-Place-Aufgabe dar, weshalb dieser Arbeitsschritt in der wissenschaftlichen Literatur wenig detailliert behandelt wird. Im Rahmen einer prototypischen Demontagestation wurde ein Greifer entwickelt, der in der Lage ist, kleine Bauteile zu handhaben [22].

Im letzten Schritt erfolgt die Entnahme der Batteriemodule. Dieser umfasst das Lösen der Schraubenverbindungen, das Auffinden der Greifpunkte sowie das Entnehmen trotz des stark

Tabelle. Bewertung der Automatisierbarkeit einer Batteriedemontage.

Prozessschritt	Aufgaben	Automatisierbarkeit - Kriterien					
		Eignung von mobilen Robotern	Anpassungsaufwand an Flexibilitätsanforderungen	Mensch- Maschine Zusammenarbeit	Skalierbarkeit	Zykluszeit	Durchschnitt
Begutachtung der Batterie	Wiegen der Batterie	3	3	3	3	9	4,2
	Entladen der Restenergie	6	0	0	3	6	3
	Verbindung zum BMS und Abrufen von Informationen über den Zustand der Batterien und Module						
	Platzieren zur Demontage	3	3	3	3	9	4,2
Verschraubungen lösen	Identifizieren der Schrauben	6	3	3	6	6	4,8
	Zustand der Schrauben feststellen (gerostet, nicht gerostet)	6	0	0	9	6	4,2
	Entscheiden, welche Schritte je nach Schraubenzustand zu unternehmen sind						
	Verfahren für korrodierte Schrauben						
	Schrauben herausdrehen	6	3	3	3	3	3,6
	Schrauben ablegen	6	3	6	6	6	5,4
Deckel demontieren	Deckel greifen	6	3	6	3	6	4,8
	Deckel mit Werkzeug anheben	6	9	3	3	6	5,4
	Deckel ablegen	6	3	6	6	6	5,4

adhäsiven Effektes der benötigten Wärmeleitpaste unter den Modulen. Eine fehlerhafte Entnahme birgt das Risiko, dass das Modul blockiert oder andere Elemente im Batterieinnenraum beschädigt werden. Aufgrund der heterogenen Umgebungsbedingungen und des Alterungsprozesses der Wärmeleitpaste variiert die aufzubringende Kraft zwischen den Modulen und sogar innerhalb der Kontaktfläche eines einzelnen Moduls. Dies kann etwa dazu führen, dass eine Seite leichter nachgibt als die andere. [17]

Laut Experten stellt dieser Schritt die größte Herausforderung dar (siehe Tabelle). Im Detail bezieht sich dies auf das initiale Lösen des Moduls mittels eines Lastaufnahmemittels, das in den meisten Fällen das Modul durch eine hebelnde Bewegung von der Wärmeleitpaste trennt. Die hierfür erforderliche Kraft ist stark abhängig von der Kontaktfläche zur Wärmeleitpaste und dem Gewicht des einzelnen Moduls.

Für diesen Schritt wurde bereits ein spezifisches Werkzeug konzipiert, um die Module der betrachteten Batterie durch einseitiges Ziehen von der Wärmeleitpaste zu lösen und dadurch das Entnehmen zu ermöglichen [22]. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse und der Variabilität in Geometrie und Gewicht der unterschiedlichen Module ist der Einsatz dieses Werkzeugs bei anderen Batteriesystemen nur sehr eingeschränkt möglich.

Die vollständige automatisierte Demontage wurde bisher nur für eine spezifische Batteriearchitektur realisiert. Aufgrund der hohen Variantenvielfalt von Batterien besteht noch Forschungsbedarf in der Entwicklung eines flexiblen Demontageprozesses, der sich für eine Vielzahl von Batteriearchitekturen eignet. Da im Projekt Revamp der Fokus auf Lkw-Batterien liegt, die sich in Größe und Gewicht erheblich von Pkw-Batterien unterscheiden, wird zusätzlich anhand dieses Anwendungsfalls der Einsatz und die Eignung eines mobilen Großroboters untersucht.

Prozessschritt	Aufgaben	Automatisierbarkeit - Kriterien					
Verkablung trennen	Entfernen des Isoliermaterials	6	3	3	6	3	4,2
	Kabelverbindung - Modul trennen	3	3	0	3	3	2,4
	Kabelverbindung - Controller trennen	3	3	0	3	3	2,4
	Kabel greifen	3	6	0	3	6	3,6
	Kabel entfernen	6	9	3	6	3	5,4
	Abschrauben des Controllers	3	3	3	3	3	3
	Ausbauen des Controllers	3	3	6	3	3	3,6
	Ablegen des Controllers	6	9	6	6	6	6,6
Modulverbindungen demontieren	Identifizieren der Schrauben	6	3	3	6	6	4,8
	Schrauben herausdrehen	6	3	3	3	3	3,6
	Schrauben entfernen	3	3	3	3	3	3
	Stromschienen greifen	6	3	3	6	6	4,8
	Stromschienen ablegen	6	6	6	3	6	5,4
Zustandsbewertung							
Modul entnehmen	Identifizieren der Schrauben	6	3	3	6	6	4,8
	Schrauben herausdrehen	6	3	9	6	6	6
	Schrauben ablegen	6	6	6	6	6	6
	Modul mit Lastaufnahme lösen	3	0	3	0	0	1,2
	Modul herausnehmen	6	3	3	3	3	3,6
	Modul ablegen	6	3	6	3	6	4,8

4 Lösungskonzept der adaptiven, automatisierten Demontage

Wie in den Herausforderungen dargelegt, ist die Demontage von Batterien durch eine hohe Variantenvielfalt und Produktkomplexität geprägt. Die herstellereigene Anforderungen an die Demontage erfordern eine kontinuierliche Anpassung bei wechselnden Demontagezeiten [10]. In diesem Zusammenhang bietet das Konzept der adaptiven, automatisierten Montage eine potenzielle Lösung. Es erlaubt eine flexible Montageabfolge, die weder zeitlich noch räumlich begrenzt ist. Dabei wird von der traditionellen Perlenkettenmontage zu einer freien Verkettung einzelner Arbeitsstationen übergegangen, was durch Routen- und Ressourcenflexibilität charakterisiert wird. [23]

Routenflexibilität beschreibt das Fehlen einer festgelegten Haupttransportrichtung. Um Produkte zwischen verschiedenen Ressourcen flexibel zu transportieren, ist eine anpassungsfähige

Transporttechnik, wie fahrerlose Transportsysteme, erforderlich. [24]

Neben der Routen- stellt auch die Ressourcenflexibilität eine effiziente Auslastung der Montageressourcen sicher. Notwendige Voraussetzung sind multifunktionale Ressourcen, die verschiedene Prozessschritte ausführen können. Als Instrument zur Planung der minimal erforderlichen Schritte und zur Optimierung der Ressourcennutzung eignen sich Vorranggraphen. [25]

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Aimfree“ hat das Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen erstmals ein adaptives, automatisiertes Montagesystem für die Batteriemontage in der Praxis erprobt. Das System zeichnet sich durch taktzeitunabhängige Produktrouten aus, die durch intelligente Planung und Steuerung etwa von fahrerlosen Transportsystemen eine rekonfigurierbare Montageumgebung erschaffen. Durch eine geeignete Softwarearchitektur und ein einheitliches Datenmodell konnte ein Montagesystem realisiert werden, das digitale Tools

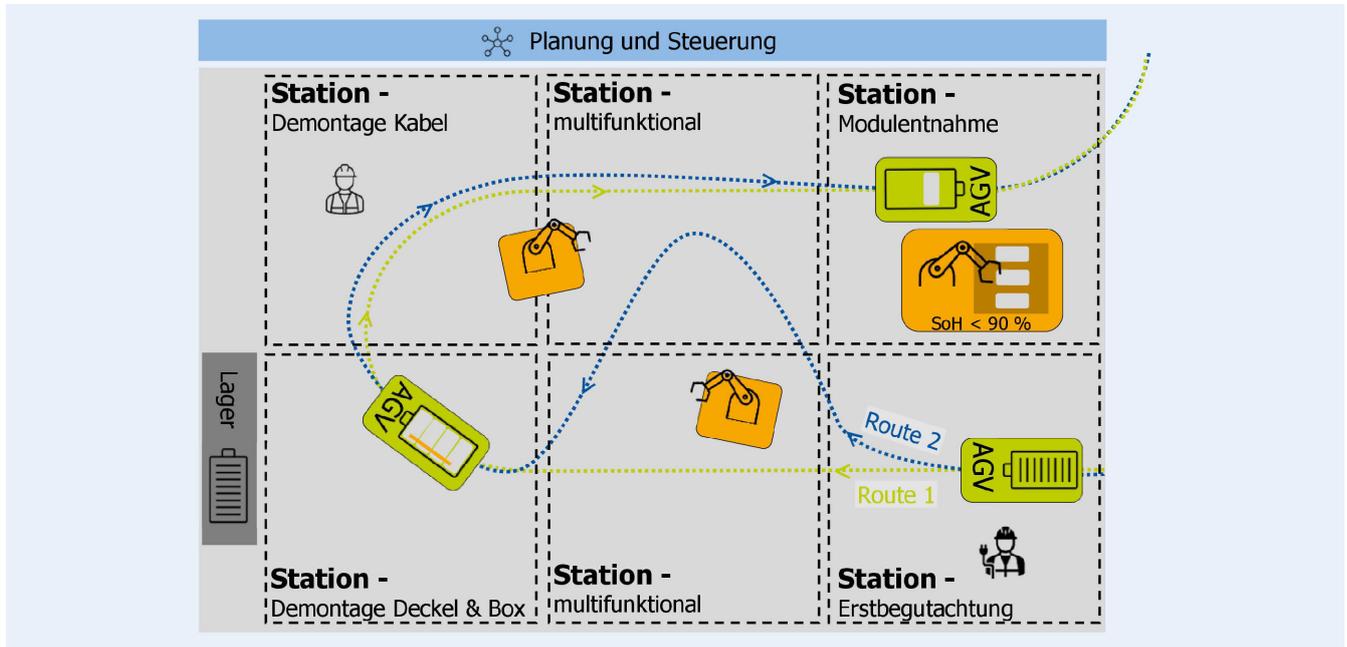


Bild 3. Flexibles Demontagesystem am Beispiel Revamp. Grafik: WZL | RWTH Aachen University

nutzt, um Planung, Steuerung und Visualisierung zu ermöglichen. [26]

Die grundlegenden Schritte der Demontage, wie in Bild 2 dargestellt, lassen sich für eine Vielzahl von Batteriesystemen identifizieren, wobei sie in ihren spezifischen Ausführungen variieren. Durch die Implementierung eines adaptiven Demontagesystems mit flexiblen Elementen besteht die Möglichkeit, auf diese Variabilität zu reagieren, da es keine Haupttransportrichtung gibt, und so die Demontage einer breiten Anzahl von Batterien verschiedener Hersteller an einem Ort zu erleichtern. Bild 3 zeigt eine vereinfachte schematische Darstellung des angestrebten Demontagesystems.

Neben den fahrerlosen Transportsystemen (AGV), welche die Ressourcenflexibilität durch den Transport der Batterien ermöglichen, werden auch mobile Roboter eingesetzt, um im System eine noch höhere Flexibilität zu erreichen. Durch den mobilen Transport der Batterien ist es möglich, Stationen bei Bedarf oder Überlastung vorübergehend zu umgehen, solange dies die Demontage-reihenfolge zulässt. Zwei Beispiele für die Routenplanung sind in Bild 3 dargestellt. Die zwei multifunktionalen Stationen umfassen alle Demontageschritte, die von einem Roboter durchgeführt werden können und somit weder auf menschliches Eingreifen noch auf zusätzliche Lagerkapazitäten angewiesen sind. In diesen Stationen können mobile Roboter mit den erforderlichen Werkzeugen flexibel um die Batterien agieren und Aufgaben wie das Lösen von Schrauben oder Modulverbindern gleichzeitig oder sequenziell durchführen.

5 Mobiler Großroboter am WZL: KMR Quantec in der Batteriedemontage

Mobile Roboter bieten eine Reihe von Vorteilen, darunter eine gesteigerte Flexibilität, die autonome Bewältigung wiederkehrender Aufgaben sowie eine verbesserte Prozessstabilität und Wirtschaftlichkeit [27]. Die Forschung im Projekt Revamp zielt darauf ab, dass mobile Roboter sich zukünftig nahtlos in das Konzept

der adaptiven automatisierten Demontage einfügen lassen. Dies beinhaltet die Fähigkeit zur selbstständigen Planung der Bewegung sowie eine flexible Reaktion auf ihre Umgebung. Dadurch entfällt die Notwendigkeit fester Stationen, da die Roboter die Bearbeitung ortsunabhängig durchführen können.

Im Rahmen der Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) wurde am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen der mobile Großroboter „KMR Quantec“ erworben. Dieser besteht aus einer omniMove-Plattform mit Mecanum-Rädern, welche eine hohe Manövrierfähigkeit auf der Stelle in Längs- und Querrichtung [28] ermöglicht und eine zusätzliche Last von bis zu 1500 kg aufnehmen und transportieren kann. Zudem ist ein 6-achsiger Industrieroboter mit einer Nenntaglast von 240 kg integriert. Die Synergie beider Komponenten zu einem Gesamtsystem ermöglicht eine flexible Handhabung von Großbauteilen [29].

Die Dimensionen der Batterien von schweren Nutzfahrzeugen sind eine besondere Herausforderung für die Umsetzung einer adaptiven, automatisierten Demontage. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits bestehende Konzepte, wie die prototypische Demontagezelle von DeMoBot, zunächst für deutlich kleinere Produktgrößen entwickelt und erprobt wurde. Daher müssen die fahrerlosen Transportsysteme und mobilen Roboter die erforderlichen Eigenschaften und Fähigkeiten in Bezug auf Nutzlast und Freiheitsgeraden besitzen, um die spezifischen Anforderungen an die Handhabung zu erfüllen.

Der im Rahmen der Analyse identifizierte Schritt der Modulentnahme sowie die Abnahme des Batteriedeckels sind aufgrund der Anforderungen an die Handhabung von Größe und Gewicht besonders für den Einsatz mobiler Großroboter geeignet. In Abhängigkeit von der spezifischen Batteriegeneration können die Dimensionen des Batteriedeckels beispielsweise 2 m x 0,7 m betragen, während das Gewicht der Module über 15 kg liegt.

Da der Demontageschritt der Modulentnahme, welcher das Lösen und die Entnahme umfasst, als Forschungslücke mit einem hohen Bedarf an Automatisierung identifiziert wurde, wird dieser

Schritt im Folgenden detailliert untersucht. Es wird ein Konzept für den Einsatz des mobilen Großroboters präsentiert.

Im Vorfeld der Modulentnahme wurde die Verwendung eines Vakuumgreifers zur Sicherstellung einer homogenen Kraftverteilung über das Modul in Betracht gezogen. Dieser Ansatz wurde aber aufgrund der heterogenen Materialeigenschaften der Moduloberfläche verworfen, da beispielsweise eine Vielzahl an Modulen eine Kunststoffplatte haben, die nicht die gesamte Last des Moduls tragen kann. Als Alternative wurde in der aktuellen Forschung ein Werkzeug entwickelt. Dieses Werkzeug wird mithilfe von Bohrungen in jeder Ecke des Moduls, die auch zur Fixierung im Batterierahmen dienen, angebracht. Derzeit wird dieser Prototyp noch manuell an den Modulen befestigt, wie in **Bild 4** ersichtlich ist.

Im Rahmen des ersten Testlaufs wurde der Großroboter gemäß Bild 4 eingesetzt, was eine vertikale und kraftvolle Entnahme der Module ermöglichte. Die Skalierung des KMR Quantecs gewährleistete eine ausreichende Steifigkeit und Stabilität, sodass trotz des ungleichmäßigen Löseprozesses der Module eine Entnahme möglich war. Des Weiteren bot die freie Fläche auf der omniMove-Plattform die Möglichkeit, die demontierten Module zu transportieren [29]. Dies eliminierte die Notwendigkeit eines separaten Transportsystems und trug somit zur Effizienz und Agilität des Demontageprozesses bei.

6 Fazit und Ausblick

Die Integration von Batterien aus Nutzfahrzeugen in die Kreislaufwirtschaft nach ihrem Ersteinsatz wird durch die Herausforderungen bei der Handhabung verschiedener Varianten mit spezifischen Anforderungen erschwert. Aufgrund der ökonomischen Ineffizienz muss der Demontageprozess derzeit manuelle erfolgen, da eine spezifische automatisierte Demontage für jede Variante nicht realisierbar ist. Um diese Herausforderung zu überwinden, muss der Prozess weiter flexibilisiert werden. Im Rahmen des Projekts Revamp wird der Lösungsansatz der adaptiven, automatisierten Montage für die Demontage erforscht und durch die Integration eines mobilen Großroboters erweitert. Die Integration des Großroboters zielt darauf ab, die effektive Handhabung von Batterien aus Nutzfahrzeugen mit erheblichem Gewicht und voluminösen Abmessungen zu ermöglichen.

In diesem Beitrag wurden am Beispiel der Modulentnahme ein erstes Konzept für das Vorgehen dargestellt. In kommenden Untersuchungen werden mittels eines Kraft-Momenten-Sensor Messungen während der Modulentnahme durchgeführt, um den Kraftverlauf sowie die Varianz zwischen unterschiedlichen Modulen zu erfassen. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgt die iterative Weiterentwicklung des prototypischen Werkzeugs mit dem Ziel, eine vollautomatisierte Entnahme einer Vielzahl an Modulen zu realisieren. Darüber hinaus sind weitere Herausforderungen bei der Automatisierung der zerstörungsfreien Demontage zu bewältigen, beispielsweise das Lösen von Steckverbindungen und anschließende Entfernen von den Kabeln.

Aktuell wird ein Demonstrator am WZL der RWTH Aachen aufgebaut, der den Demontageprozess von Batterien, beginnend mit dem Ende ihres ersten Lebenszyklus bis hin zur Demontage auf Modulebene, darstellen wird. Auf dieser Grundlage werden Ansätze wie Second-Life-Nutzung, Second-Use oder Recycling zur Schließung des Batterie-Lebenszyklus erforscht und entwickelt.



Bild 4. Umsetzung Modulentnahmen am WZL der RWTH Aachen.
Grafik: WZL | RWTH Aachen University

FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit ist Teil des Forschungsprojekts „Revamp“ (Projektnummer 16BZF311), das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und vom Projekträger VDI/VDE-IT unterstützt wird.

Literatur

- [1] Europäische Kommission: Kommission begrüßt Einigung über ambitionierte EU-Ziele zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Lkw und Stadtbusse. Stand: 18.01.2024. Internet: lucembourg.representati.on.ec.europa.eu/actualites-et-evenements/actualites/kommission-be-grusst-einigung-uber-ambitionierte-eu-ziele-zur-verringering-der-co2-emissionen-neuer-2024-01-18_de. Zugriff am 13.08.2024
- [2] Goldman Sachs: Electric vehicles are forecast to be half of global car sales by 2035. Stand: 10.01.2023. Internet: www.goldmansachs.com/intelligence/pages/electric-vehicles-are-forecast-to-be-half-of-global-car-sales-by-2035.html. Zugriff am 13.08.2024
- [3] Yun, L.; Linh, D.; Shui, L. et al.: Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling* 136 (2018), pp. 198–208
- [4] Li, W.; Peng, Y.; Zhu, Y. et al.: End-of-life electric vehicle battery disassembly enabled by intelligent and human-robot collaboration technologies: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 89 (2024), #102758
- [5] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union: Richtlinie über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG. 2006/66/EG. 2006, data.europa.eu/eli/dir/2006/66/oj
- [6] Heimes, H. H.; Kampker, A.; Offermanns, C. et al.: Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien. In: Kampker, A., Heimes, H.H. (Hrsg.) *Elektromobilität*. Heidelberg Springer Vieweg 2023, doi: [10.1007/978-3-662-65812-3_42](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_42), pp. 679–686
- [7] Schmitt, R. H.; Göppert, A.; Sohnius, F. et al.: Schließen des Kreislaufs mit adaptiver automatisierter Demontage. Tagungsband Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2023. Aachen: Apprimus Verlag 2023
- [8] Blankemeyer, S.; Wiens, D.; Wiese, T. et al.: Investigation of the potential for an automated disassembly process of BEV batteries. *Procedia CIRP* 98 (2021), pp. 559–564
- [9] Rettenmeier, M.; Möller, M.; Sauer, A.: Disassembly technologies of end-of-life automotive battery packs as the cornerstone for a circular battery value chain: A process-oriented analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 209 (2024), #107786

- [10] Kaarlela, T.; Villagrossi, E.; Rastegarpanah, A. et al.: Robotised disassembly of electric vehicle batteries: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems* 74 (2024), pp. 901–921
- [11] Hellmuth, J. F.; DiFilippo, N. M.; Jouaneh, M. K.: Assessment of the automation potential of electric vehicle battery disassembly. *Journal of Manufacturing Systems* 59 (2021), pp. 398–412
- [12] Parsa, S.; Saadat, M.: Intelligent selective disassembly planning based on disassemblability characteristics of product components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019) 5–8, pp. 1769–1783
- [13] Beghi, M.; Braghin, F.; Roveda, L.: Enhancing Disassembly Practices for Electric Vehicle Battery Packs: A Narrative Comprehensive Review. *Designs* 7 (2023) 5, #109
- [14] Xiao, J.; Jiang, C.; Wang, B.: A Review on Dynamic Recycling of Electric Vehicle Battery: Disassembly and Echelon Utilization. *Batteries* 9 (2023) 1, p. 57
- [15] Heimes, H. H.; Kampker, A.; Offermanns, C. et al.: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. In: Kampker, A.; Heimes, H. H. (Hrsg.): *Elektromobilität. Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*. Heidelberg: Springer Nature 2024, pp. 687–704
- [16] Wu, S.; Kaden, N.; Dröder, K.: A Systematic Review on Lithium-Ion Battery Disassembly Processes for Efficient Recycling. *Batteries* 9 (2023) 6, p. 297
- [17] Klohs, D.; Offermanns, C.; Heimes, H. et al.: Automated Battery Disassembly—Examination of the Product- and Process-Related Challenges for Automotive Traction Batteries. *Recycling* 8 (2023) 6, p.89
- [18] Zorn, M.; Ionescu, C.; Klohs, D. et al.: An Approach for Automated Disassembly of Lithium-Ion Battery Packs and High-Quality Recycling Using Computer Vision, Labeling, and Material Characterization. *Recycling* 7 (2022) 4, p. 48
- [19] Assadi, A. A.; Götz, T.; Gebhardt, A. et al.: Automated Disassembly of Battery Systems to Battery Modules. *Procedia CIRP* 122 (2024), pp. 25–30
- [20] Hertel, D.; Bräunig, G.; Thürer, M.: Towards a green electromobility transition: A systematic review of the state of the art on electric vehicle battery systems disassembly. *Journal of Manufacturing Systems* 74 (2024), pp. 387–396
- [21] Deng, W.; Liu, Q.; Pham, D. T. et al.: Predictive exposure control for vision-based robotic disassembly using deep learning and predictive learning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 85 (2024), #102619
- [22] Fraunhofer IPA: Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für die E-Mobilität – DeMoBat. Abschlussbericht. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2023
- [23] Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. et al. (Hrsg.): *Internet of Production für agile Unternehmen*. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 2017. Aachen: Apprimus Verlag 2017
- [24] Schönemann, M.; Herrmann, C.; Greschke, P. et al.: Simulation of matrix-structured manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015), pp. 104–112
- [25] Bornewasser, M.: *Montage und Komplexität*. In: Bornewasser, M.; Hinrichsen, S. (Hrsg.): *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage*. Heidelberg: Springer Vieweg 2020, S. 43–64
- [26] Rachner, J.; Wang, S.; Mathews, J. et al.: Agile, frei verkettete Montage real erleben. *wt Werkstattstechnik online* 113 (2023) 04, S. 165–170. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [27] Unger, H.; Markert, T.; Müller, E.: Evaluation of use cases of autonomous mobile robots in factory environments. *Procedia Manufacturing* 17 (2018), pp. 254–261
- [28] Li, Y.; Dai, S.; Zhao, L. et al.: Topological Design Methods for Mecanum Wheel Configurations of an Omnidirectional Mobile Robot. *Symmetry* 11 (2019) 10, #1268
- [29] Bock, M.; Kleineberg, M.: *Assembly 4.0 – Flexibly Picked Up, Precisely Mounted*. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility 1 (2019) 2, pp. 352–356



Carolin Weckendrup, M.Sc. 
 carolin.weckendrup@wzl-iqs.rwth-aachen.de
 Tel. +49 241 / 80-25877
 Foto: WZL | RWTH Aachen University

Aline Kluge-Wilkes, M.Sc. 

Dr.-Ing. Amon Göppert 

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt 

WZL | RWTH Aachen University
 Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.wzl.rwth-aachen.de

Manar Kweider, B.Sc.
 MAN Truck & Bus SE
 Vogelweiherstr. 33, 90441 Nürnberg

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)