

Die Demontage von ausgedienten Elektroautobatterien als Schlüssel der Kreislaufwirtschaft

Herausforderungen bei der Demontage von Traktionsbatterien

M. Rettenmeier, M. Möller, A. Sauer

ZUSAMMENFASSUNG Um die Transformation des Mobilitätssektors im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu gestalten, spielt das Recycling von Hochvoltspeichern aus Elektrofahrzeugen eine entscheidende Rolle. Die Demontage hat sich innerhalb des Recyclings der Hochvoltspeicher als Schlüsselprozess heraustraktionsbatterien. Als Basis für die künftige Technologieentwicklung werden deshalb in diesem Beitrag die Herausforderungen in der Demontage von ausgedienten Traktionsbatterien analysiert und systematisiert.

Challenges in disassembling traction batteries

ABSTRACT The recycling of high-voltage battery packs from electric vehicles plays a pivotal role in shaping the transformation towards e-mobility in line with the circular economy. Disassembly has emerged as a key process in recycling high-voltage batteries. As a basis for future technology development, this article analyzes and systematizes the challenges involved in disassembling end-of-life traction batteries.

STICHWÖRTER

Demontage, Lasertechnik, Produktionstechnik, Recycling

1 Einleitung

Der Klimawandel zählt zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts und erfordert enorme Anstrengungen auf globaler Ebene, um unumkehrbare Kippunkte zu vermeiden [1]. In 2022 waren Autos und Lieferfahrzeuge verantwortlich für mehr als 25 % des globalen Ölverbrauchs sowie etwa 10 % der globalen energiebezogenen CO₂-Emissionen [2]. Die Europäische Union entschied daher, ab 2035 nur noch emissionsneutrale Fahrzeuge zuzulassen [3]. Die Elektromobilität spielt dabei eine entscheidende Rolle, da batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) emissionsfrei im Betrieb sind. Andererseits sind die Produktionsemissionen von BEVs höher als die von Verbrennerfahrzeugen [4].

Eine Möglichkeit, um die initialen Emissionswerte eines BEVs zu senken, ist der Einsatz von Rezyklaten [5]. Damit sind Sekundärrohstoffe gemeint, die aus dem Recyclingprozess von ausgedienten (end of life = EOL) Traktionsbatterien gewonnen werden können. Vor allem Lithium, Nickel und Kobalt sind hier von wirtschaftlichem Interesse. Aus rohstoffstrategischer Sicht sind auch Mangan, Grafit, Aluminium und Kupfer von Interesse. Die Europäische Union hat in jüngster Vergangenheit Rohstoffklassifizierungen eingeführt, um die strategische Relevanz dieser Materialien einzuordnen [6]. Dabei wird zwischen strategischen Rohstoffen (Kupfer, Kobalt, Lithium, Nickel, Mangan, Grafit) und kritischen Rohstoffen (Aluminium, Kobalt, Lithium, Mangan, Grafit) unterschieden [6]. Die genannten Batteriematerialien sind mindestens einer der beiden Klassifizierungen zuzuordnen, weshalb Batterierecycling nicht nur aus Nachhaltigkeitssicht, sondern auch aus rohstoffstrategischer Sicht sinnvoll ist.

Die Europäische Union möchte die etablierte Automobilindustrie geografisch halten. Sie hat daher ein strategisches Interesse an der Ansiedlung von Batteriefabriken, da der Hochvoltspeicher zu

den wertschöpfungsintensivsten Komponenten des BEVs zählt. Deshalb sind stabile Lieferketten für Batteriematerialien im europäischen Automobilbau entscheidend, um die Elektromobilität einzuleiten. Da Rohstoffvorräte der Batteriematerialien in der Europäischen Union sehr limitiert sind, können Rezyklate einen zusätzlichen Rohstoffstrom eröffnen, um stabile Lieferketten für die Hochvoltspeicherproduktion zu unterstützen. Dies verdeutlicht die Relevanz des Batterierecyclings für die Nachhaltigkeit und lieferkettenstabile Produktion von Traktionsbatterien für BEVs. Entsprechend hat die Europäische Union im Jahr 2023 eine Regulatorkritik erlassen, welche das Batterierecycling von EOL-Lithium-Ionen-Batterien aus dem Automobilbereich erfordert [7].

Innerhalb des Batterierecyclingprozesses, der in Kapitel 2 näher ausgeführt wird, ist die Demontage ein wichtiger Prozessschritt. Der Batterierecyclingprozess ist prinzipiell gänzlich ohne vorherige Demontage durch direktes Schreddern ganzer Hochvoltspeicher auf Packebene möglich [8, 9]. Dieses Prozessderivat bringt jedoch substantielle Herausforderungen in den Folgeprozessen mit sich. Die hohe Unreinheit schlägt sich in hohen Prozessierungskosten für das zerkleinerte Material, die „Schwarze Masse“, nieder [8, 9]. Zahlreiche Studien greifen deshalb die Demontage als entscheidenden Prozessschritt für die wirtschaftliche Gestaltung und die nachhaltige Umsetzbarkeit einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft für EOL-Traktionsbatterien auf [8–11].

Um der Wissenschaft und Industrie den Prozessschritt der Demontage von EOL-Hochvoltspeichern zugänglich zu machen, ist das Ziel dieser Studie die systematische Aufschlüsselung, Kategorisierung und Erklärung von Herausforderungen. Hierdurch sollen Forscher und Entwickler befähigt werden, die anstehenden Herausforderungen in konkrete Entwicklungsvorhaben zu übersetzen. Weiterhin wird für Entscheidungsträger eine Matrix mit Lösungsstrategien für die entsprechenden Herausforderungen

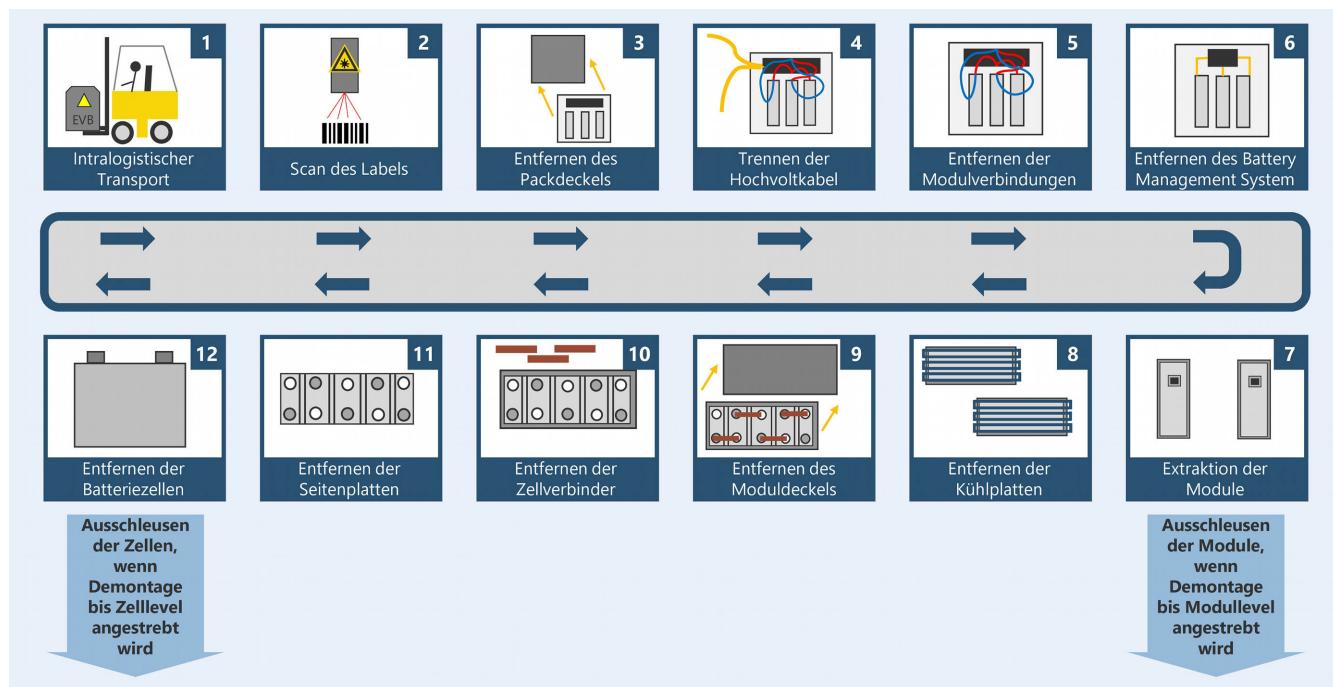


Bild 1. Prozesskette für die Demontage von EOL (End-of-Life)-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich. *Grafik: Eigene Darstellung in Anlehnung an [12]*

erarbeitet. Es sollen nicht nur die Demontage, sondern auch das Batterierecycling im Ganzen für die wirtschaftliche Realisierung und großskalige Umsetzung vorbereitet werden.

Kapitel 2 stellt die Grundlagen und Kapitel 3 den relevanten Stand der Forschung vor, bevor Kapitel 4 auf die methodische Vorgehensweise eingeht. In Kapitel 5 werden die identifizierten Herausforderungen aufgeschlüsselt, kategorisiert und erklärt, bevor entsprechende Lösungsansätze und Handlungsalternativen in Kapitel 6 aufzeigt werden. In Kapitel 7 werden die gesammelten Erkenntnisse zusammengefasst und in einen Ausblick für Industrie und Wissenschaft transferiert.

2 Grundlagen der Traktionsbatteriedemontage

Eine Übersicht des gesamten Batterierecyclingprozesses ist zum Beispiel den Arbeiten von *Harper et al.* oder *Rettenmeier et al.* zu entnehmen [12, 13]. Die Demontage ist als erster mechanischer Prozessschritt einzurordnen, der meist nach dem Tiefenentladen erfolgt. Im Anschluss an die Demontage folgen entweder Wiederverwendung, was allerdings ein vorheriges Tiefenentladen ausschließt, oder Prozesse zur Materialrückgewinnung. Diese Prozesse sind in hydro- und pyrometallurgische Prozessderivate sowie direktes Recycling unterteilt. Abhängig von dem gewünschten Umfang der Materialrückgewinnung sowie den Standortfaktoren, wie etwa Umweltauflagen oder Energiekosten, wird die entsprechende Prozessroute gewählt. Details zu diesen Methoden zur Gewinnung der Sekundärrohstoffe sind beispielsweise in [13, 14] zu finden. Die Demontage wiederum hat weitere Subprozessschritte, welche in **Bild 1** illustriert sind.

Diese Prozessschritte wurden auf Basis der vorangegangenen Forschungen eruiert [12]. Das Ziel des Demontageprozesses ist es in der Regel, die wertvollen Batteriezellen zu extrahieren. Diese Studie konzentriert sich auf die Demontage bis zur Zellebene. Im Anschluss daran kann entweder eine weiterführende Demontage

erfolgen oder ein shredderbasierter Zerkleinerungsprozess eingeleitet werden. In Bild 1 wird dabei von einer Cell-to-Module-Architektur ausgegangen. Dabei sind die Zellen in Module zwischenaggregiert, bevor diese in eine Packeinheit integriert werden. Im Unterschied dazu entwickelt sich ein Trend zu Cell-to-Pack-Architekturen. Bei einer Cell-to-Pack-Architektur werden die Zellen nicht in Modulen zwischenaggregiert, sondern direkt als eine große Einheit im Batteriepack verbaut.

3 Stand der Forschung

In der Fachliteratur werden Herausforderungen in der Demontage von ausgedienten Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich in vielen Publikationen erwähnt und angrenzend thematisiert. **Tabelle 1** gibt einen Auszug aus der relevanten Fachliteratur basierend auf der systematischen Literaturanalyse von *Rettenmeier et al.* [12].

Viele Veröffentlichungen haben einen spezifischen Fokus (wie etwa auf Robotik oder Automatisierung) innerhalb des Demontageprozesses und thematisieren resultierende Herausforderungen innerhalb dieser Fokussierung. Deshalb ist in der Fachliteratur umfangreiches Wissen über die Herausforderungen vorhanden. Allerdings konnte keine holistische Betrachtung dieser Herausforderungen in aggregierter Form identifiziert werden. Um die unterschiedlichen Herausforderungen umfassend zu betrachten und den industriellen und politischen Entscheidungsträgern ein holistisches Bild der Situation zu bieten, thematisiert dieser Beitrag vor allem die umfassende Betrachtung bestehender Herausforderungen. Daraus wird eine Matrix mit Lösungsansätzen abgeleitet, welche Interessensvertretern aus Forschung, Politik und Industrie relevante Entscheidungsprozesse erleichtern soll.

Tabelle 1. Übersicht der existierenden Literatur.

Artikel / Veröffentlichung	Thematischer Fokus	Demontage Herausforderungen als Teilfokus der Publikation	Demontage Herausforderungen aus Hauptfokus der Publikation
<i>Gerlitz et al. (2021) [15]</i>	Herausforderungen in der Automatisierung		✓
<i>Schäfer et al. (2020) [16]</i>	Herausforderungen in der Automatisierung		✓
<i>Klohs et al. (2023) [17]</i>	Herausforderungen in der Automatisierung		✓
<i>Miloradović et al. (2023) [18]</i>	Herausforderungen in der Automatisierung		✓
<i>Hathaway et al. (2025) [19]</i>	Herausforderungen aus Robotik-Sicht		✓
<i>Zhou et al. (2021) [20]</i>	Herausforderungen aus Robotik-Sicht	✓	
<i>Rehmann et al. (2025) [21]</i>	Herausforderungen der Skalierung	✓	
<i>Windisch-Kern et al. (2022) [22]</i>	Allgemeine Herausforderungen und Prozessabhängigkeiten	✓	
<i>Fan et al. (2020) [23]</i>	Allgemeine Herausforderungen	✓	
<i>Elwert et al. (2016) [24]</i>	Allgemeine Herausforderungen	✓	
<i>Yu et al. (2022) [25]</i>	Allgemeine Herausforderungen	✓	
Dieser Artikel	Kategorisierte Herausforderungen		✓

4 Methoden

Methodisch stützt sich der Beitrag auf die von *Rettenmeier et al. [12]* beschriebene systematische Literaturrecherche. Die genauen methodischen Details inklusive Stichwortsuche, Datenbankenauswahl und Suchdokumentation können [12] entnommen werden.

In diesem Beitrag erfolgt eine granulare Analyse der Herausforderungen in der Demontage von EOL-Traktionsbatterien. Dies erlaubt eine Klassifizierung und damit Übersichtlichkeit und Systematik. Nachdem die Herausforderungen identifiziert und klassifiziert sind, werden diese detailreich erklärt. Diese Vorgehensweise soll sicherstellen, dass sowohl industrielle Forschungs- und Entwicklungsabteilungen als auch Forschungsinstitute den Beitrag als Basis für Entwicklungsplanungen heranziehen können. Dabei ist es wichtig, eine Klassifizierung, Systematisierung und detaillgetreue Analyse der Herausforderungen darzustellen, um Entscheidungsprozesse in diesen Bereichen zu ermöglichen.

Die inhaltlichen Details der Herausforderungen in der Demontage ausgedienter Traktionsbatterien in Kapitel 5 basieren zwar auf *Rettenmeier et al. [12]*, werden aber deutlich detailreicher ausgeführt. In Kapitel 6 werden daraus entsprechende Handlungsempfehlungen sowie eine Matrix mit Lösungsansätzen entwickelt. Diese Handlungsempfehlungen werden schließlich methodisch in einer Matrix organisiert, um diese für Entscheidungsträger aus Politik, Industrie und Forschung zugänglich zu machen und Entscheidungsprozesse zu erleichtern.

Die Matrix hat zum Ziel, die entsprechenden Lösungsansätze der Herausforderungen systematisiert über verschiedene Fokussierungen anzugehen. Die Lösungskategorien der Matrix werden auf Basis der „PESTEL“ (politische, ökonomische, soziale, technologische, ökologische, rechtliche)-Faktoren abgeleitet. Die PESTEL-Analyse wurde ursprünglich als Geschäftsumfeldanalyse

entwickelt, weshalb nicht alle Kategorien für diese Studie passen. Für die Matrix wurden politische, technologische und rechtliche Lösungskategorien berücksichtigt. Soziale, ökologische und ökonomische Lösungskategorien wurden nicht inkludiert, da diese Faktoren die Konsequenzen der Lösungen charakterisieren und daher nicht passend für Lösungskategorien sind. Dadurch wurden die Lösungskategorien der Matrix systematisch eruiert und basierend auf PESTEL begründet.

5 Herausforderungen in der Demontage von ausgedienten Traktionsbatterien

5.1 Übersicht

In diesem Beitrag werden die Herausforderungen bei der Demontage von EOL-Traktionsbatterien in produktorientierte und prozessorientierte Herausforderungen unterteilt (**Bild 2**).

Produktorientierte Herausforderungen haben Ihren Ursprung in der Beschaffenheit und den Charakteristika der Traktionsbatterien. Sie führen in der Folge zu Herausforderungen in der Demontage-Prozessierung (Kapitel 5.2). Prozessorientierte Herausforderungen entstehen zwar oft ebenfalls aus produktorientierten Herausforderungen, haben ihren Ursprung jedoch im Prozess selbst (Kapitel 5.3). Als Hybrid dieser beiden Ansätze werden in Kapitel 5.4 prozess- und produktorientierte Herausforderungen dargestellt, welche beiden Kategorien entsprechen.

5.2 Produktorientierte Herausforderungen

5.2.1 Varianz und Flexibilität

Moderne Hochvoltspeicher für den Automobilbereich unterliegen keiner globalen Standardisierung. Trotz zahlreicher Ansätze ist es bislang nicht gelungen, einen internationalen Designstan-

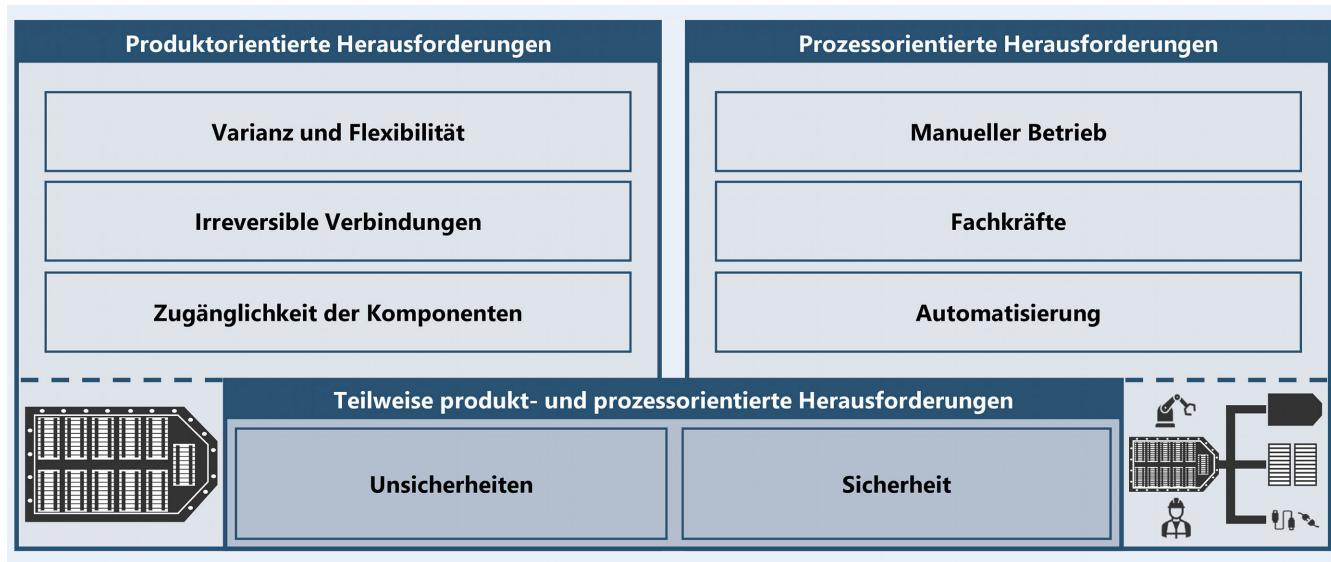


Bild 2. Übersicht der Herausforderungen in der Demontage von EOL-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich.

Grafik: Eigene Darstellung in Anlehnung an [12]

dard zu etablieren [22, 26, 27]. In der Forschung werden diverse Ansätze des „Design for Re-X“ diskutiert, wobei Re-X ein Überbegriff für verschiedene Ansätze der Kreislaufwirtschaft ist, wie etwa Recycling, Reuse oder Remanufacturing [16]. In die industrielle Anwendung konnten diese Standardisierungsgesuche bisher nicht transferiert werden [13, 28]. Die Gründe sind vielfältig und gehen letztlich auf die nicht existierende Regulatorik zurück, was allen Herstellern die entsprechende Designfreiheit in der Gestaltung der Hochvoltspeicherarchitekturen einräumt [29].

Der Hochvoltspeicher ist integraler Bestandteil moderner Fahrzeugarchitekturen und -plattformen und übernimmt neben der Energiespeicherung auch Strukturfunktionen [30]. Daher ist das Design des Hochvoltspeichers Gegenstand von strukturellen Entwicklungsarbeiten am BEV und damit signifikanter Dynamik unterworfen. So variiert das Hochvoltspeicherdesign nicht nur zwischen den Herstellern, sondern auch innerhalb der Hersteller werden für unterschiedliche Produktklassen entsprechend unterschiedliche Fahrzeugplattformen und letztlich Hochvoltspeicherdesigns etabliert.

Die stetige Weiterentwicklung dieser Fahrzeugplattformen und Hochvoltspeicherdesigns erhöht die Varianz im Zeitverlauf weiter. Diese Faktoren bringen eine enorme Menge an Hochvoltspeicher-varianten hervor, die sich im Designdetail stark unterscheiden und im Gegenzug eine enorme Anlagenflexibilität in der Demontage dieser Systeme erfordern [31, 32]. Im Detail kann beispielsweise die Verwendung unterschiedlicher Schraubverbindungen bereits das Vorhalten von diversen Schraubwerkzeugen mit sich bringen [27, 33]. Im Betrieb führt dies zu langen Rüstzeiten durch die zahlreichen Werkzeugwechsel [34–36]. Auch die Verwendung unterschiedlicher Materialien kann zu Werkzeugwechseln oder Parameteranpassungen in semi-destruktiven Demontageprozessen, wie etwa Frä- oder Laserdemontage, führen [35, 37, 38].

Allgemein führt jede strukturelle oder materielle Varianz im Design der Hochvoltspeicher zu entsprechenden Flexibilitätsanforderungen in der Anlagentechnik für die Demontage. Diese Herausforderungen werden durch die extensive und weiter steigende Anzahl an Varianzen potenziert.

5.2.2 Irreversible Verbindungen

In der Hochvoltspeicherfertigung werden zahlreiche irreversible Fügetechniken verwendet. Beispielsweise werden die Zellverbinder, sogenannte Busbars, in der Regel geschweißt [16, 27]. Dies ist im Fertigungsprozess ein großer Produktivitätsvorteil und führt während der Nutzungsphase der Hochvoltspeicher zu einem elektrisch zuverlässigen Betrieb. Daher sind geschweißte Verbindungen vor allem bei elektrisch leitenden Komponenten eine beliebte Wahl und werden auch häufig in der Hochvoltspeicherproduktion angewandt. In der Demontage führen diese materialschlüssigen Verbindungen zu Herausforderungen, weil die Demontage dieser Verbindungen nur destruktiv gelöst werden kann [28, 39, 40]. Somit werden die geschweißten Komponenten bei der Demontage unweigerlich beschädigt, was eine potenzielle Wiederverwendung erschwert.

Zudem können einige Demontageverfahren, wie etwa das Entschrauben, bei diesen Verbindungen nicht angewandt werden, was den Bedarf nach zumindest teilweise zerstörenden Demontageverfahren begründet. Neben geschweißten Verbindungen sind auch geklebte und geschäumte Verbindungen vermehrt in Hochvoltspeichern zu finden [9, 10, 27, 28, 39–41]. Beispielsweise wird der Deckel des Hochvoltspeichers oftmals nicht nur angeschraubt, sondern zusätzlich verklebt, was in der Demontage einen einfachen Entschraubprozess ineffektiv macht [39]. Zusätzliche Demontageprozesse, oftmals zerstörender Natur, müssen angewandt werden.

Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung von Strukturschäumen. Diese sind vor allem in Cell-to-Pack-Architekturen ein probates Mittel, um die strukturelle Festigkeit des Gesamtsystems nachhaltig sicherzustellen [42]. Dies ist produktionstechnisch effizient und führt zu einem zuverlässigen Betrieb der Hochvoltspeicher. Bei der Demontage gibt es aber noch ungelöste Herausforderungen. Verschäumte Hochvoltspeicher finden zunehmend ihren Weg in gänzlich zerstörende Ansätze der Demontage, wie beispielsweise das Schreddern ganzer Module oder Packs. Dies schließt jegliche Wiederverwendung aus und führt zu hohen

Unreinheiten und folglich hohen Kosten bei der weiteren Prozessierung der zerkleinerten Materialderivate [8, 9].

5.2.3 Zugänglichkeit der Komponenten

Verschäumte Hochvoltspeicherarchitekturen sind nicht nur irreversibel verbunden, sondern erschweren auch den Zugang zu entscheidenden Komponenten [39, 43]. Beispielsweise sind bei Cell-to-pack-Architekturen die Batteriezellen oftmals verschäumt. Die signifikant erschwerte Zugänglichkeit macht die Demontage, falls überhaupt möglich, äußerst aufwendig, was eine potenzielle Wiederverwendung der wertvollen Batteriezellen entscheidend erschweren kann [42]. Dies stellt die Wirtschaftlichkeit der Extraktion und anschließenden Wiederverwendung der Batteriezellen infrage und kann zu signifikanten Einbußen in der Ökobilanz von Hochvoltspeichern führen, da die Wiederverwendung einen substanziellen Beitrag zu einem geringeren ökologischen Fußabdruck leistet [44].

Darüber hinaus wird das strukturelle Design von Hochvoltspeichern zunehmend komplex, was beispielsweise auf fertigungsgerechte Auslegung und andere Optimierungen zurückzuführen ist [45]. Auch spielen Gewichts- und Platzeinsparungen bei strukturellen und schweren Komponenten, wozu in Elektromobilen der Hochvoltspeicher zählt, seit Jahrzehnten eine tragende Rolle. Dies führt zu zunehmend komplexen Produktdesigns, was in der Demontage entsprechende Herausforderungen und steigende Komplexität mit sich bringt [31, 45]. Die Zugänglichkeit von Verbindungen und Komponenten wird derzeit in der Konstruktion, beispielsweise in Form von Design-for-Re-X-Ansätzen, nur äußerst untergeordnet berücksichtigt [13]. Eine erschwerte Zugänglichkeit der Komponenten hemmt durch extensiven Einsatz von Zeit und Anlagentechnik damit die Wirtschaftlichkeit von Demontageansätzen weiter.

5.3 Prozessorientierte Herausforderungen

5.3.1 Manueller Betrieb

Vor allem aufgrund der hohen Varianz wird die Demontage von EOL-Traktionsbatterien aus dem Automobilbereich derzeit manuell ausgeführt [13, 33, 42, 46]. Der manuelle Betrieb ist aktuell noch möglich, da die zu prozessierenden Volumina noch überschaubar sind. Mit dem Hochlauf der Elektromobilität wird sich dies jedoch in der kommenden Dekade ändern [26, 47]. Entwicklungs- und Schwellenländer mit niedrigen Lohnstrukturen können diese Betriebsform im Vergleich zu lohnintensiven Industriestaaten noch länger aufrechterhalten. Insbesondere Industriestaaten müssen für den Betrieb von Demontageanlagen gerüstet sein, weil zumindest anfangs der Absatz und Betrieb von Elektrofahrzeugen vornehmlich in Industriestaaten stattfinden wird, aufgrund der vergleichsweisen hohen Investitionskosten und Betriebshürden, wie etwa Ladeinfrastruktur. Daher wird auch der EOL-Ort der Hochvoltspeicher in diesen Industriestaaten sein.

Da die nachfolgende Logistik im Gefahrgutbereich preisintensiv ist, wird in aktuellen Forschungsansätzen vom Betrieb lokaler Demontagewerke ausgegangen [10, 28]. Dies begründet den antizipierten Betrieb in Industriestaaten, die mit manuell betriebenen Demontagewerken die Wirtschaftlichkeit der gesamten Batterierecyclingkette negativ beeinflussen würden, was die manuelle Demontage zu einer Kernherausforderung macht [48]. Neben der herausfordernden Kostenstruktur der manuellen Demontage sind

Sicherheitsbedenken im direkten Umgang mit Hochvoltspeichern eine substanzielle Teilherausforderung [31]. Wird eine Wiederverwendung angestrebt, ist eine Tiefenentladung der Hochvoltspeicher ausgeschlossen, was das Arbeiten an zumindest teilweise geladenen Hochvoltspeichern erforderlich macht [13, 49]. Dies ist nur von geschulten Fachkräften mit entsprechender Arbeitsplatzausstattung möglich, um den vorherrschenden Sicherheitsbedenken vorzubauen. Diese sicherheitstechnischen Maßnahmen führen letztlich zu erhöhten Kosten und einer limitierten Skalierbarkeit der manuellen Demontage [31].

5.3.3 Automatisierung

Als direkte Schlussfolgerung aus den Herausforderungen der manuellen Demontage begründet sich der Bedarf nach automatisierten Lösungen [9, 10, 27]. Aufgrund der produktorientierten Herausforderungen aus Kapitel 5.2 gestaltet sich die automatisierte Demontage zunehmend herausfordernd [31, 41, 46, 48]. Die extensive Variantenvielfalt wirkt sich in hohen Anforderungen an die Anlagenflexibilität aus, was den Aufwand für eine automatisierte Umsetzung erhöht [13, 27, 39, 41, 46, 48].

Außerdem muss in automatisierten Lösungen nicht nur das derzeitig bekannte Variantenspektrum berücksichtigt sein, sondern auch die Adaptierbarkeit an künftige Architekturen gewährleistet werden [18, 27, 34, 46]. Dieser Anforderungskorridor geht zulasten der Produktivität dieser automatisierten Lösungen, weshalb derzeit die automatisierte Demontage nur im Forschungs- und Pilotmaßstab betrieben wird [31, 42]. Selbst diese Ansätze sind meistens auf wenige Varianten limitiert, um die Komplexität der Anlagentechnik einzuschränken. Darüber hinaus muss in automatisierten Demontageanlagen die Kombination von mehreren (semi-) zerstörenden und nicht-zerstörenden Technologien in flexibler Art und Weise erfolgen, um den diversen Designderivaten von Hochvoltspeichern gerecht zu werden. Dies ist nicht nur konstruktiv, sondern auch im operativen Betrieb derartiger Anlagen herausfordernd. Um eine wirtschaftliche Demontage zu gestalten, sind automatisierte Ansätze aber elementar, weshalb die Automatisierung dieses Prozessschritts eine Kernherausforderung darstellt.

5.3.2 Fachkräfte

Sowohl manuelle als auch automatisierte Demontageansätze benötigen qualifizierte Fachkräfte [26, 45]. In manuellen Demontagewerken sind in Deutschland beispielsweise Fachkräfte mit entsprechender Hochvoltausbildung erforderlich [22]. In automatisierten Demontagewerken wird hochkomplexe Automatisierungstechnik eingesetzt, welche nicht nur im Rüsten und in der Wartung, sondern auch zunehmend im Betrieb und Störungsfall entsprechende Fachkräfte benötigt. Damit ist die erhöhte Lohnstruktur dieser Fachkräfte eine Herausforderung, die sich letztlich auf die Wirtschaftlichkeit der Demontage auswirkt. Zudem ist die Verfügbarkeit dieser Fachkräfte in Zeiten des Fachkräftemangels in Industriestaaten, wie Deutschland, eine Herausforderung [45].

5.4 Produkt- und prozessorientierte Herausforderungen

5.4.1 Unsicherheiten

Ausgediente Traktionsbatterien wurden meist viele Jahre im Elektromobil betrieben und vor dem Demontageprozess aus dem

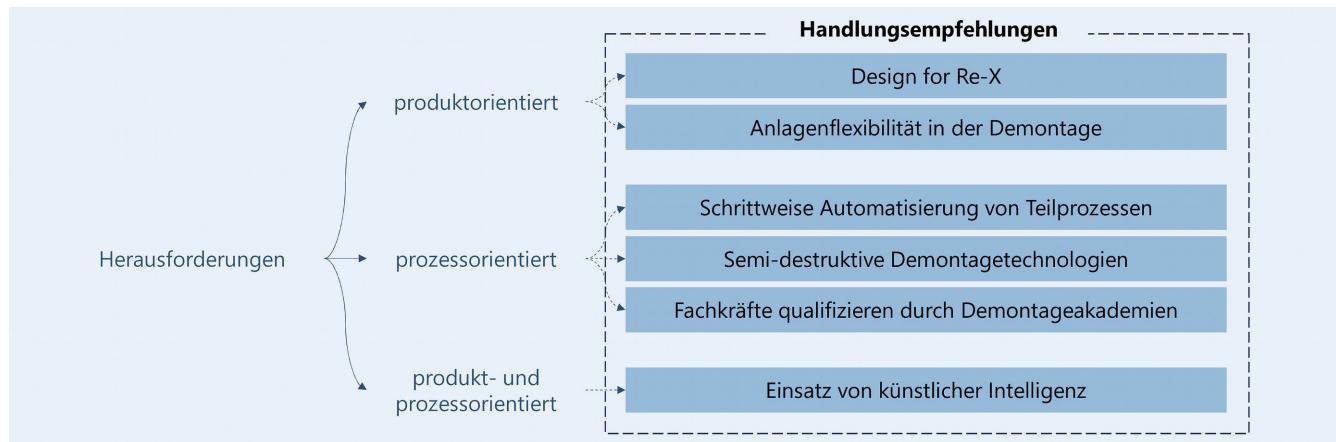


Bild 3. Handlungsempfehlungen für verschiedene Herausforderungen der Demontage. *Grafik: Eigene Darstellung*

Fahrzeug extrahiert. Deshalb ist die Beschaffenheit der Hochvoltspeicher bei Ankunft am Demontageprozess oftmals nicht vergleichbar mit dem Ursprungszustand direkt nach der Produktion [43].

Rost und Verschmutzungen am Hochvoltspeicher sind unvermeidbar und kreieren eine produktorientierte Unsicherheit beim Ausgangsmaterial im Demontageprozess [13, 28, 35, 36, 39, 43]. Auch marginale Deformationen etwa von dokumentierten oder undokumentierten Unfällen können in automatisierten Demontageprozessen zu entscheidenden Ausgangunsicherheiten führen [13, 36, 48]. Verschmutzte oder beschädigte Kennzeichnungen, etwa von QR-Codes zur Identifikation der Batteriepacks, können zum Stillstand entsprechender Anlagentechnik führen. Zudem sind viele Hochvoltspeicher nicht gekennzeichnet, wodurch eine Erfassung der verwendeten Materialien oder Strukturelemente nicht gelingen kann, was für das Einlasten in die richtigen Recyclingrouten entscheidend ist [13, 41]. Auch wenn entsprechende Kennzeichnungen vorhanden sind, ist die dahinterliegende Informationsbasis oft nicht ausreichend [13, 28, 39, 40].

Neben diesen Unsicherheiten, welche in der Regel durch den Betrieb oder den Transport der Hochvoltspeicher entstehen, sind auch produktionsorientierte Unsicherheiten vorhanden. Als Beispiel kann hier die Verkabelung innerhalb der Hochvoltspeicher genannt werden, die nicht immer genau gleich vorliegt [9, 10, 34, 35, 41, 43]. Diese Unsicherheiten auf Produktseite erhöhen die Komplexität des Demontageprozesses signifikant, da nicht nur antizipierbare Varianten, sondern auch nicht antizipierbare Produktunsicherheiten berücksichtigt werden müssen. So muss die Anlagentechnik nicht nur flexibel, sondern auch intelligent und agil gestaltet werden, um auf diese Unsicherheiten zu reagieren. Beispielsweise sind verrostete Schrauben spontan mit zerstörenden Demontageverfahren zu bearbeiten, statt diese zu entschrauben, was einen Störfall auslösen würde.

5.4.2 Sicherheit

In der Regel werden Batteriepacks tiefenentladen, bevor sie dem Demontageprozess zugeführt werden [13]. Geladene Hochvoltspeicher bergen nicht nur elektrische Risiken, sondern auch ein erhöhtes Brandrisiko [13, 18, 26, 31–33, 35, 41, 45]. Zudem enthalten Lithium-Ionen-Batterien gefährliche und giftige Stoffe, die etwa durch die Beschädigung der Batteriezellen austreten können. Die austretenden Chemikalien können ein Risiko für

Mitarbeitende und die Anlagentechnik darstellen [13, 26, 32, 33, 41, 45].

Wird die Wiederverwendung der Batteriezellen angestrebt, ist die vorherige Tiefenentladung ausgeschlossen [13, 49]. Selbst wenn keine Wiederverwendung der Batteriezellen angestrebt wird, kann die Demontage von geladenen Batteriepacks nötig sein, da die Tiefenentladung von EOL-Traktionsbatterien zeit- und kostenintensiv ist und im Idealfall übersprungen wird. Die Demontage von geladenen Traktionsbatterien ist vor allem in der manuellen Demontage gefährlich und erfordert extensive Schulungs- und Arbeitssicherheitsmaßnahmen, was die Kostenstruktur negativ beeinflusst [31, 33]. Der Vorteil der automatisierten Demontage ist die verminderte Gefahr für die Mitarbeitenden [10, 13, 18, 28, 31, 43]. Dennoch müssen auch hier Evakuierungskonzepte bereitgestellt werden, um Gebäude- und Anlagentechnik im Havariefall zu schützen. Auch dies wirkt sich negativ auf die Kostenstruktur des Demontageprozesses aus, da sicherheitstechnische Maßnahmen erforderlich, aber gleichzeitig herausfordernd sind. Selbst bei extensiven Präventions- und Notfallkonzepten ist der Havariefall nie auszuschließen.

6 Lösungsansätze

6.1 Kategorisierte Lösungsansätze

Die Demontage von EOL-Traktionsbatterien ist ein wichtiger Schritt, um die Elektromobilität im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft zu gestalten. In diesem Beitrag wurden die anstehenden Herausforderungen, die mit diesem Prozessschritt verbunden sind, identifiziert, analysiert und systematisiert. In der Folge werden explorative Handlungsempfehlungen aufgezeigt, um den diversen Herausforderungen in der Praxis zu begegnen (Bild 3).

Die produktorientierten Herausforderungen können vor allem durch das Design for Re-X künftig bereits im Design- und Produktionsprozess abgeschwächt werden. Im Idealfall kann eine Standardisierung von Batteriepackdesigns mit demontageorientierter Gestaltung des Aufbaus und der Fügeverbindungen angestrebt werden. Leider erscheint dieses Unterfangen zunehmend unrealistisch, da bereits viele Batteriepackarchitekturen auf der Straße sind und die Produzenten keinerlei herstellerübergreifende Standardisierungsbestreben signalisieren. Wenngleich eine Standardisierung der Batteriepackdesigns aus Demontage-Sicht wünschenswert ist, würde dies auf Betriebs- und Produktionsseite an-

Tabelle 2. Matrix mit Lösungsansätzen für Herausforderungen in der Demontage.

Herausforderungen	Lösungsansätze		
	Politisch	Technologisch	Rechtlich
<i>Varianz und Flexibilität</i>	Initiativen zur internationalen Standardisierung (Design for Re-X). Förderprogramme zur Regulierungsanpassung.	(Weiter-) Entwicklung adaptiver Demontagesysteme mit smarten Sensoren, modularen Werkzeugen und flexiblen Demontagetechnologien.	Einführung verbindlicher (internationaler) Normen zur Begrenzung der Designvarianten.
<i>Irreversible Verbindungen</i>	Förderprogramme für reversible Fügetechniken oder semi- und non-destructive Demontagetechnologien.	(Weiter-) Entwicklung semi- oder non-destructiver Trennverfahren bzw. reversibler Fügeverbindungen.	Einführung von gesetzlichen Standards, die reversible oder verlässlich zerstörbare Verbindungsmethoden vorschreiben.
<i>Zugänglichkeit der Komponenten</i>	Förderprogramme für Design Re-X. Anreize für die Implementierung von Re-X Ansätzen.	Einsatz moderner Robotik und Bildverarbeitungssystemen zur besseren Zugänglichkeit.	Gesetzliche Vorgaben, die den Zugang zu kritischen Komponenten im Batteriepack vorschreiben.
<i>Manueller Betrieb</i>	Unterstützung manueller Prozesse durch arbeitsmarktpolitische Maßnahmen, wie beispielsweise die Förderung von Umschulungen.	Integration von halbautomatisierten Assistenzsystemen zur Unterstützung manueller Tätigkeiten.	Durchsetzung strenger Arbeitsschutz- und Sicherheitsvorschriften im manuellen Betrieb.
<i>Fachkräfte</i>	Förderung von Bildungs- und Ausbildungsprogrammen im Bereich Batteriedemontage.	Einsatz von digitalen Trainingssimulatoren und E-Learning-Plattformen zur Qualifizierung.	Etablierung gesetzlicher Mindestqualifikationen und Zertifizierungsstandards für Fachkräfte.
<i>Automatisierung</i>	Staatliche Förderprogramme und Innovationsanreize für automatisierte Systeme.	Integration von künstlicher Intelligenz, Robotik und maschinellem Lernen zur Bewältigung hoher Variantenvielfalt. Anvisieren von schrittweiser Automatisierung.	Regulatorische Standards und Zertifizierungen für den sicheren Einsatz automatisierter Systeme.
<i>Unsicherheiten</i>	Politische Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz in Batteriedesign und dazugehöriger Dokumentation.	Einsatz intelligenter Diagnostik und Sensorik zur Bewertung des Batteriezustands.	Gesetzliche Vorgaben zur klaren Kennzeichnung und Dokumentation von Batteriemarken und entsprechenden Schäden.
<i>Sicherheit</i>	Stärkere staatliche Sicherheitsvorgaben und -standards im Batteriebereich, insbesondere in der EOL-Phase.	Entwicklung von Sicherheitssystemen (z.B. automatisierte Entladung, Echtzeit-Überwachung, Sensorik zur Gefahrenerkennung).	Strikte rechtliche Regelungen und regelmäßige Audits zur Gewährleistung von Sicherheitsstandards.

dere Herausforderungen mit sich bringen, weshalb eine Abwägung des Gesamtkontexts wichtig ist. Aus diesen Gründen wird Variantenflexibilität auch in Zukunft eine tragende Rolle bei der Auslegung von Demontagelinien spielen. Nichtsdestotrotz sind alle Hersteller von automobilen Hochvoltspeichern angehalten, bereits im Konstruktions- und Produktionsprozess die entsprechenden Demontagemöglichkeiten mitzudenken, sofern dies im Gesamtkontext sinnvoll ist. Dabei sind nicht nur reversible Fügetechniken, sondern auch die Zugänglichkeit der Komponenten wichtige Aspekte.

Beim Betrieb von Demontagelinien sollte eine zunehmende Automatisierung des gesamten Demontageprozesses forciert werden. Dabei empfiehlt sich eine schrittweise Automatisierung verschiedener Teilprozesse der Demontage. Eine gänzliche Automatisierung der Demontage für alle Varianten ist derzeit aufgrund der noch geringen Volumina wirtschaftlich schwer umsetzbar. Daher könnten einzelne Prozessschritte, die besonders zeitintensiv und vergleichbar einfach automatisierbar sind, forciert werden. Ein Beispiel ist die Demontage des Batteriepackdeckels. Obwohl viele verschiedene Schraubenarten die automatisierte Demontage via Entschraubung herausfordernd machen, können semi-destructive Demontagetechnologien, wie Laserschnitt oder

Fräsen effizient angewandt und hochautomatisiert implementiert werden.

Wichtig ist auf einen modularen Anlagenaufbau zu achten, sodass im Zeitverlauf weitere Demontageschritte automatisiert werden können. Durch die schrittweise Implementierung werden die Investitionskosten sowie das Störungsrisiko vermindert, was der automatisierten Demontage zum Durchbruch verhelfen kann. Die nötigen Fachkräfte für die manuelle sowie automatisierte Demontage sollten frühzeitig qualifiziert werden, um rechtzeitig die personelle Infrastruktur zur Verfügung zu haben. Deshalb empfiehlt sich der Aufbau von Kompetenzzentren auf nationaler oder sogar multi-nationaler Ebene, beispielsweise durch Demontageakademien, in denen Personal binnen weniger Wochen oder Monate zur Demontagefachkraft weitergebildet wird.

Herausforderungen, die sowohl produkt- als auch prozessorientiert sind, können beispielsweise durch den Einsatz moderner Methoden der künstlichen Intelligenz adressiert werden. Die Unsicherheitsfaktoren, die bezüglich der Beschaffenheit und der Charakteristika der zu demontierenden Batteriepacks herrschen, können durch intelligente Bilderkennungsalgorithmen unterstützt werden. Dadurch könnten verschmutzte Schrauben erkannt und beispielsweise Laserschnittprogramme oder Fräsprogramme bei Verformungen automatisch angepasst werden. Dies erhöht nicht

nur die Prozessrobustheit in der Demontage, sondern auch die Wirtschaftlichkeit und Automatisierbarkeit des Gesamtprozesses. Weiterhin kann die Sicherheit in der Demontage beispielsweise durch den Einsatz von Gefahrenerkennungsmethoden erhöht werden. So könnte durch künstliche Intelligenz das Kombinieren verschiedener Sensordaten, wie Gaserkennung oder Wärmebild, genutzt werden, um eine präzisere Gefahreneinschätzung zu treffen.

6.2 Matrix mit Lösungsansätzen

Zur Systematisierung der Lösungsansätze wurde eine Matrix entwickelt. Diese Matrix ist in **Tabelle 2** dargestellt und soll Entscheidungsträgern in Industrie und Politik eine entsprechende Grundlage für das Bewältigen der Herausforderungen in der Demontage von Traktionsbatterien bieten.

Die politischen und rechtlichen Dimensionen sind vor allem für politische Akteure relevant. Technologische Aspekte können vornehmlich von Industrieunternehmen realisiert werden. Gleichzeitig sind alle Aspekte für Industrie und Politik relevant, da beispielsweise technologische Entwicklungen auch durch gezielte Förderungen oder öffentliche Forschungseinrichtungen bedient werden können. Parallel können Unternehmen auch ohne politischen Einfluss entsprechende Normungs- und Regulierungsbestrebungen etwa über Verbände vorantreiben. Deshalb kann diese Matrix allen Akteuren in der Demontage von Traktionsbatterien dienen.

7 Schlussteil und Ausblick

In diesem Beitrag konnten basierend auf vorangegangenen Untersuchungen verschiedene Herausforderungen in der Demontage von automobilen Traktionsbatterien identifiziert, analysiert und systematisiert werden. Dabei konnten produkt- und prozessorientierte sowie diesbezüglich hybride Herausforderungen identifiziert werden. Die produktorientierten Herausforderungen umfassen Varianz, irreversible Verbindungen und Zugänglichkeit der Komponenten. Die prozessorientierten Herausforderungen sind auf den manuellen Betrieb, die Automatisierung und auf Fachkräfte fokussiert. Hybride Herausforderungen, die sowohl produkt- als auch prozessorientiert sind, konzentrieren sich maßgeblich auf Unsicherheiten und Sicherheit. Durch die Diskussion dieser Herausforderungen konnten verschiedene Lösungsstrategien aufgezeigt werden.

Die Handlungsempfehlungen wurden in einer Matrix systematisiert und als Entscheidungsvorlage für Politik und Industrie aufbereitet. Dies wurde unter Zuhilfenahme von politischen, technologischen und rechtlichen Faktoren getätigt.

Künftige Forschungen sollten sich nun vor allem darauf fokussieren, einfache Design-for-Re-X- Ansätze zu identifizieren und zu implementieren. So können Hersteller unterstützt werden, ein demontagegerechtes Design zu etablieren, ohne Einbußen im Betrieb und der Produktion der Hochvoltspeicher in Kauf nehmen zu müssen. Weiterhin sollte die schrittweise und wirtschaftliche Automatisierung von Teilschritten der Demontage weiter erforscht und industrialisiert werden. Außerdem empfiehlt sich die tiefgehende Erforschung von Methoden der künstlichen Intelligenz, um Unsicherheiten robuster behandeln zu können.

FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit wurde gefördert vom Landesministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg im Rahmen der Nachhaltigkeitsförderung der Projekte der Exzellenzinitiative II.

L i t e r a t u r

- [1] Armstrong McKay, D. I.; Staal, A.; Abrams, J. F. et al.: Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* 377 (2022) 6611, doi.org/10.1126/science.abn7950
- [2] International Energy Agency: Cars and Vans. . Internet: www.iea.org/energy-system/transport/cars-and-vans#tracking. Zugriff am 31.03.2025
- [3] European Parliament: EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. Internet: www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained. Zugriff am 31.03.2025
- [4] International Energy Agency: Comparative life-cycle greenhouse gas emissions of a mid-size BEV and ICE vehicle. Stand: 2021. Internet: www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparative-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-a-mid-size-bev-and-ice-vehicle. Zugriff am 31.03.2025
- [5] Ginster, R.; Blömeke, S.; Popien, J.-L. et al.: Circular battery production in the EU: Insights from integrating life cycle assessment into system dynamics modeling on recycled content and environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology* 28 (2024) 5, pp. 1165–1182
- [6] European Commission: Study on the critical raw materials for the EU 2023. Final report. Publications Office of the European Union, Luxembourg, Stand: 2023. Internet: single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en. Zugriff am 31.03.2025
- [7] European Union: Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance). Stand: 2023. Internet: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj/eng. Zugriff am 31.03.2025
- [8] Choux, M.; Pripp, S. W.; Kvalnes, F. et al.: To shred or to disassemble – A techno-economic assessment of automated disassembly vs. shredding in lithium-ion battery module recycling. *Resources, Conservation and Recycling* 203 (2024), #107430
- [9] Thompson, D. L.; Hyde, C.; Hartley, J. M. et al.: To shred or not to shred: A comparative techno-economic assessment of lithium ion battery hydrometallurgical recycling retaining value and improving circularity in LIB supply chains. *Resources, Conservation and Recycling* 175 (2021), #105741
- [10] Thompson, D. L.; Hartley, J. M.; Lambert, S. M. et al.: The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review. *Green Chemistry* 22 (2020) 22, pp. 7585–7603
- [11] Rettenmeier, M.; Eckstein, S.; Hackenbeck, C. et al.: Model-driven evaluation of exoskeletons for efficient traction battery dismantling. *Procedia CIRP* 130 (2024), pp. 1850–1855
- [12] 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
- [13] Harper, G.; Sommerville, R.; Kendrick, E. et al.: Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575 (2019) 7781, pp. 75–86
- [14] Wu, X.; Ma, J.; Wang, J. et al.: Progress, Key Issues, and Future Prospects for Li-Ion Battery Recycling. *Global Challenges* 6 (2022) 12, #2200067
- [15] Gerlitz, E.; Greifenstein, M.; Hofmann, J. et al.: Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System. *Procedia CIRP* 96 (2021), pp. 175–180
- [16] Schäfer, J.; Singer, R.; Hofmann, J. et al.: Challenges and Solutions of Automated Disassembly and Condition-Based Remanufacturing of Lithium-Ion Battery Modules for a Circular Economy. *Procedia Manufacturing* 43 (2020), pp. 614–619
- [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, #89

- [18] Miloradović, B.; Bigorra, E. M.; Nolte, T. et al.: Challenges in the Automated Disassembly Process of Electric Vehicle Battery Packs. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2023, Sinaia/Romania, 2023, pp. 1–4, doi.org/10.1109/ETFA54631.2023.10275389
- [19] Hathaway, J.; Contreras, C. A.; Asif, M. E. et al.: Technoeconomic Assessment of Electric Vehicle Battery Disassembly—Challenges and Opportunities From a Robotics Perspective. *IEEE Access* 13 (2025), pp. 716–733
- [20] Zhou, L.; Garg, A.; Zheng, J. et al.: Battery pack recycling challenges for the year 2030: Recommended solutions based on intelligent robotics for safe and efficient disassembly, residual energy detection, and secondary utilization. *Energy Storage* 3 (2021) 3, e190
- [21] Rehman, S.; Al-Greer, M.; Burn, A. S. et al.: High-Volume Battery Recycling: Technical Review of Challenges and Future Directions. *Batteries* 11 (2025) 3, #94
- [22] Windisch-Kern, S.; Gerold, E.; Nigl, T. et al.: Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. *Waste Management* 138 (2022), pp. 125–139
- [23] Fan, E.; Li, L.; Wang, Z. et al.: Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. *Chemical Reviews* 120 (2020) 14, pp. 7020–7063
- [24] Elwert, T.; Goldmann, D.; Römer, F. et al.: Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. *Recycling* 1 (2016) 1, pp. 25–60
- [25] Yu, X.; Li, W.; Gupta, V. et al.: Current Challenges in Efficient Lithium-Ion Batteries' Recycling: A Perspective. *Global Challenges* 6 (2022) 12, #2200099
- [26] Elwert, T.; Römer, F.; Schneider, K. et al.: Recycling of Batteries from Electric Vehicles. In: Pistoia, G.; Liaw, B. Y. (eds.): *Behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles. Battery health, performance, safety, and cost*. Cham: Springer 2018, pp. 289–321
- [27] Lander, L.; Tagnon, C.; Nguyen-Tien, V. et al.: Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs. *Applied Energy* 331 (2023), #120437
- [28] Glöser-Chahoud, S.; Huster, S.; Rosenberg, S. et al.: Industrial disassembly as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems. *Resources, Conservation and Recycling* 174 (2021), #105735
- [29] Pražanová, A.; Mika, M. H.; Knap, V.: Lithium-ion battery module-to-cell: disassembly and material analysis. *Journal of Physics: Conference Series* 2382 (2022) 1, #012002, doi.org/10.1088/1742-6596/2382/1/012002
- [30] Jin, T.; Singer, G.; Liang, K. et al.: Structural batteries: Advances, challenges and perspectives. *Materials Today* 62 (2023), pp. 151–167
- [31] Beghi, M.; Braghin, F.; Roveda, L.: Enhancing Disassembly Practices for Electric Vehicle Battery Packs: A Narrative Comprehensive Review. *designs* 7 (2023) 5, #109, doi.org/10.3390/designs7050109
- [32] Kampker, A.; Heimes, H. H.; Ordung, M. et al.: Evaluation Of A Remanufacturing For Lithium Ion Batteries From Electric Cars. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 3 (2016), pp. 1929–1935
- [33] Wegener, K.; Andrew, S.; Raatz, A. et al.: Disassembly of Electric Vehicle Batteries Using the Example of the Audi Q5 Hybrid System. *TS 2014 – CIRP Conference on Assembly Systems and Tech Conference on Assembly Technologies and Systems* 23 (2014), pp. 155–160
- [34] Rosenberg, S.; Huster, S.; Baazouzi, S. et al.: Field Study and Multimethod Analysis of an EV Battery System Disassembly. *Energies* 15 (2022) 15, #5324
- [35] Meng, K.; Xu, G.; Peng, X. et al.: Intelligent disassembly of electric-vehicle batteries: a forward-looking overview. *Resources, Conservation and Recycling* 182 (2022), #106207
- [36] Zhang, S.; Zhang, Y.; Wang, Z. et al.: Design and Implementation of a Multifunctional Screw Disassembly Workstation. *16th International Conference, ICIRA 2023, Proceedings, Part VIII* 14274 LNAI (2023), pp. 506–519
- [37] Rettenmeier, M.; Sauer, A.; Möller, M.: Laser-based battery pack disassembly: a compact benchmark analysis for separation technologies. *Procedia CIRP* 122 (2024), pp. 181–186
- [38] Rettenmeier, M.; Schilling, N. J.; Möller, M. et al.: Laser-based disassembly of end-of-life automotive traction batteries: A systematic patent analysis. *World Patent Information* 79 (2024), #102322
- [39] 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, #48
- [40] Baazouzi, S.; Rist, F. P.; Weeber, M. et al.: Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries. *Batteries* 7 (2021) 4, #74
- [41] Ali, H.; Khan, H. A.; Pecht, M.: Preprocessing of spent lithium-ion batteries for recycling: Need, methods, and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168 (2022), #112809
- [42] Wang, X.-T.; Gu, Z.-Y.; Ang, E. H. et al.: Prospects for managing end-of-life lithium-ion batteries: Present and future. *Interdisciplinary Materials* 1 (2022) 3, pp. 417–433
- [43] Zang, Y.; Wang, Y.; Yang C. et al.: Robotic disassembly of electric vehicle batteries: an overview. *27th International Conference on Automation and Computing: Smart Systems and Manufacturing (ICAC) 2022*, Bristol, United Kingdom, 2022, pp. 1–6
- [44] Yang, J.; Gu, F.; Guo, J.: Environmental feasibility of secondary use of electric vehicle lithium-ion batteries in communication base stations. *Resources, Conservation and Recycling* 156 (2020), #104713
- [45] Tan, W. J.; Chin, C. M. M.; Garg, A. et al.: A hybrid disassembly framework for disassembly of electric vehicle batteries. *International Journal of Energy Research* 45 (2021) 5, pp. 8073–8082
- [46] Gerbers, R.; Wegener, K.; Dietrich, F. et al.: Safe, Flexible and Productive Human-Robot-Collaboration for Disassembly of Lithium-Ion Batteries. In: Kwade, A.; Diekmann, J. (eds.): *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. Cham: Springer International Publishing 2018, pp. 99–126
- [47] Rettenmeier, M.; Petrik, D.; Möller, M. et al.: A modeling framework and benchmark for end-of-life automotive traction battery pack forecasting. *Journal Of Cleaner Production* 491 (2025), #144752
- [48] Harper, G.; Kendrick, E.; Anderson, P. et al.: Roadmap for a sustainable circular economy in lithium-ion and future battery technologies. *Journal of Physics: Energy* 5 (2023) 2, #021501
- [49] Borchardt, I.; Finkbeiner, S.: Approach for a Systematic Assessment of Electrical Risks During Disassembly of Traction Batteries. *10th Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering* (2021), pp. 26–32



Max Rettenmeier, M. Sc. 

max.retteneier@gsame.uni-stuttgart.de

Foto: Kochinke Visuelle Gestaltung

Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.gsame.uni-stuttgart.de

Dr. Mauritz Möller 

Trumpf Laser- und Systemtechnik SE
Johann-Maus-Str. 2, 71254 Ditzingen
www.trumpf.com

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer 

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

LIZENZ



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