

# KI-gestützte Demontage von Elektrofahrzeugbatterien

## Ein nachhaltiger Übergang zur Elektromobilität

*Dominik Hertel\*,  
Gerald Bräunig,  
Thomas Reuter und  
Jonas Hummel*

Im Jahr 2015 wurden seitens der internationalen Gemeinschaft 17 globale Ziele für nachhaltige Entwicklung definiert, welche die Schaffung einer menschlicheren Zukunft sowie den Erhalt natürlicher Ressourcen zum Ziel haben. Die Umstellung auf grüne Elektromobilität stellt ein entscheidendes Element zur Erreichung einiger der genannten Ziele dar. Ein bloßer Mobilitätswandel ist jedoch nicht ausreichend. Auch der Umgang mit den Batteriesystemen von Elektrofahrzeugen am Ende ihrer Produktlebensdauer sollte geregelt werden, um die Ressourcenschonung zu maximieren.

### Einleitung

Die Förderung der Elektromobilität stellt einen maßgeblichen Faktor für die Transformation des Verkehrssektors von der Nutzung fossiler Brennstoffe hin zur Integration erneuerbarer Energiequellen dar. Der beschriebene Wandel ist unerlässlich, um die Dekarbonisierung des Verkehrs voranzutreiben und somit die globalen Klimaziele zu erreichen [1]. Politische Maßnahmen in einer Vielzahl von Ländern zielen folglich darauf ab, den Kauf und die Nutzung von Elektrofahrzeugen zu fördern. Mit der steigenden Zahl der zugelassenen Elektrofahrzeuge wird jedoch auch das Volumen der Altbatteriesysteme am Ende der Fahrzeuglebensdauer entsprechend ansteigen. In der Europäischen Union wird die Zahl der zu entsorgenden Altbatterien

aus Elektrofahrzeugen von etwa 104.178 im Jahr 2024 auf über 1,1 Millionen im Jahr 2030 ansteigen [2].

In Abhängigkeit vom Zustand der Elektrofahrzeug-Batteriesysteme (EFBS) kann eine Verwendung für einen sekundären Zweck vorteilhaft sein. Ist dies wirtschaftlich nicht sinnvoll, so ist es zumindest empfehlenswert die enthaltenen wertvollen Rohstoffe eines EFBS zu recyceln. Eine Weiternutzung einzelner Batteriekomponenten in einem Second-Life-Szenario kann sich positiv auf die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen auswirken, da sich die Notwendigkeit, wertvolle, seltene Rohstoffe abzubauen, verringert [3]. Sowohl, um eine Wiederverwendung von Komponenten von Altbatterien für Second-Life-Anwendungen als auch ein möglichst sortenreines Recycling enthaltener Rohstoffe zu ermöglichen, ist eine

Demontage der EFBS bis auf Modul-, Zell- oder sogar Materialebene erforderlich. Derzeit erfolgt dies hauptsächlich manuell, da die große Anzahl unterschiedlicher EFBS-Modelle und -Hersteller auf dem Markt eine Automatisierung erschwert [4, 5]. In der Konsequenz ist eine kosteneffiziente Demontage ausgedienter EFBS derzeit oft nicht realisierbar. Dies stellt eine große Herausforderung für den Übergang zur Nutzung grüner Energie im Verkehrssektor dar. Des Weiteren erfordert die rasch anwachsende Anzahl verfügbarer EFBS eine leicht skalierbare Lösung, um die anfallenden Mengen bewältigen zu können.

Eine Möglichkeit zur Gewährleistung eines kostengünstigen und skalierbaren Prozesses stellt die Automatisierung dar. Um Second-Life-Anwendungen oder stoffliches Recycling auch bei steigenden Stückzahlen an Altbatterien sinnvoll realisieren zu können, ist eine Automatisierung des Demontageprozesses von entscheidender Bedeutung [5, 6]. Gleichzeitig erweist sich die Automatisierung des Demontageprozesses für EFBS aufgrund der Vielzahl an Batterie-Modellen als anspruchsvoll. Des Weiteren kann der Zustand der EFBS nach der Nutzungsdauer die automatisierte Demontage zusätzlich

#### \* Korrespondenzautor

*Dipl.-Ing. (FH) Dominik Hertel*; Technische Universität Chemnitz, Professur Fabrikplanung und Intralogistik; Erfenschlager Straße 73, 09125 Chemnitz; Tel.: +49 (0) 371 531-33895, E-Mail: dominik.hertel@mb.tu-chemnitz.de

#### Weiterer Autoren

*Gerald Bräunig, M. Eng.*; Technische Universität Chemnitz, Professur Fabrikplanung und Intralogistik  
*Dipl.-Ing. (FH) Thomas Reuter, M. Eng.*; ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e. V.  
*Jonas Hummel, M. Sc.*; ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e. V.

erschweren, da er sich beispielsweise durch Korrosion oder mechanische Einwirkung von seinem ursprünglichen Zustand unterscheiden kann.

In diesem Beitrag wird deshalb ein konzeptioneller Ansatz für ein auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierendes System vorgestellt, welches eine automatisierte Demontage von EFBS ermöglicht.

## Stand der Technik

Der Einsatz von KI-Methoden kann einen entscheidenden Vorteil für ein flexibles, automatisiertes Demontagesystem zur ökologischen und ökonomischen Demontage von EFBS bieten. Diesbezüglich sind insbesondere die Erkennung wiederkehrender Muster aus Bildern von EFBS sowie die Optimierung von Prozessen zur Demontage von EFBS mit entsprechenden vordefinierten Kriterien zu nennen. EFBS werden nach heutigem Stand der Technik als Kombination einzelner Batteriemodule verbaut [7], deren Demontage bis auf Modulebene größtenteils durch manuelles Lösen der Verbindungselemente (z.B. Schrauben, Nieten, Klebe- und Schweißstellen) erfolgt [8–10]. Ein automatisiertes und KI-gestütztes Verfahren, welches der signifikanten Vielfalt an Batteriesystemvarianten Rechnung trägt, existiert derzeit nicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zu trennenden Verbindungen eine hohe Diversität aufweisen und somit unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzten Prozesstechnologien stellen [11]. Jedoch existieren erste Ansätze, die sich mit Automatisierungskonzepten, Prozessoptimierungen und integrierten KI-Methoden im Bereich der Demontage von EFBS befassen. Der Hauptfokus liegt dabei auf der Objekterkennung und Positionsbestimmung, der Bahnplanung sowie der Prozessplanung der einzelnen Demontageschritte und deren Reihenfolge.

Beispielsweise setzten *Bilal et al.* [12] einen KI-Algorithmus ein, um Schrauben in EFBS zu erkennen und deren Schraubenkopf-Zentrum zu lokalisieren. Auch *Li et al.* [13] nutzten eine KI, um zunächst Schrauben in einem EFBS zu identifizieren und nachfolgend anhand der erfassten Bilddaten die präzise Position der Schrauben zu ermitteln. Zusätzlich zur Schraubenerkennung verwendeten *Poschmann et al.* [14]

den Detectron2-Algorithmus in einer Fallstudie zur Identifizierung von Verbindungselementen in einem EFBS mithilfe eines Kamerasystems. *Brådlund et al.* [15] demonstrierten die Erkennbarkeit von Kabeln in einem EFBS unter Zuhilfenahme des LightGBM-Algorithmus. In ihrer Veröffentlichung präsentieren *Gerbers et al.* [16] eine KI, die auf Basis erkannter Objekte in einem EFBS geeignete Werkzeuge zur Demontage vorschlägt.

*Yin et al.* [17] nutzen in ihrer Studie eine KI, um auf Basis von erfassten Bildern und identifizierten Batteriekomponenten einen effizienten und kollisionsfreien Demontepfad für diese zu ermitteln. In einem von *Zhang et al.* [18] durchgeführten Versuch konnte nachgewiesen werden, dass die entwickelte KI in der Lage ist, den optimalen Annäherungspfad eines Roboterarms an ein Objekt zu ermitteln. Des Weiteren erfolgt eine automatische Ausweichbewegung des Roboterarms bei Erkennung potenzieller Hindernisse.

In mehreren Publikationen wurde bereits die Gestaltung einer idealen Demontagerihenfolge unter Zuhilfenahme KI-basierter Demontageplaner erörtert [19, 20]. *Choux et al.* [21] setzten eine KI ein, um zusätzlich Überschneidungen einzelner Batteriekomponenten innerhalb von Bildaufnahmen eines EFBS zu erkennen und daraus eine zwangsläufige Demontagesequenz abzuleiten.

## Konzeptrahmen

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept fokussiert den gesamten Prozess der Demontage von EFBS bis auf Modulebene, der durch den Einsatz von KI automatisiert werden soll. Um die Umsetzbarkeit des Konzepts zu zeigen, soll es an zwei physischen Demonstratoren gezeigt und erprobt werden. Am ersten Demonstrator soll dabei das Lösen von Fügeverbindungen, einschließlich Schraub-, Schweiß- oder Klebverbindungen gezeigt werden. Am zweiten Demonstrator soll der Prozess des Einbringens und Ausschleusens eines EFBS in die bzw. aus der Demontageanlage, die Bildaufnahme und -erkennung von Batteriemodell und Fügeverbindungen sowie die Entnahme einzelner Batteriekomponenten aus dem Gehäuse dargestellt werden.

Um verschiedene Demontageszenarien sicher testen zu können, werden EFBS-Dummies entwickelt. Hierdurch sollen potenzielle Risiken für Menschen und die Testumgebung, die von elektrischen Strömen und Brandgefahren ausgehen, eliminiert werden. Die Dummies werden einen modularen Aufbau mit abstrahierten Batteriekomponenten der gängigsten Batteriemodelle aufweisen, wodurch eine Vielzahl von Montagemöglichkeiten gegeben ist und die Simulation verschiedener Batteriemodelle ermöglicht wird.

Um den gesamten Demontageprozess flexibel automatisieren zu können, ist eine Unterstützung durch eine KI sowohl bei der Bildauswertung als auch bei der Prozessablaufplanung und -steuerung erforderlich.

## Künstliche Intelligenz

Die Künstliche Intelligenz ermöglicht Algorithmen, die ungewöhnliche Muster oder Ereignisse erkennen und vorbeugende Maßnahmen ableiten. Des Weiteren können Anwendungen, die visuellen Input aus Kameras, Bildern oder Videos sowie Programme, die geschriebene oder gesprochene Sprache interpretieren, generiert werden. Die Grundlage dafür bietet das maschinelle Lernen, indem es Vorhersagemodelle basierend auf Daten und Statistiken erstellt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie dieser Lernvorgang erfolgen kann: Supervised Learning, Reinforcement Learning und Unsupervised Learning. Ein Teilgebiet des maschinellen Lernens ist das Deep Learning, bei dem neuronale Netze zur Implementierung verwendet werden [22].

## Überblick

Für den Aufbau eines flexiblen, automatisierten Demontagesystems können klassische Algorithmen nicht mehr angewendet werden, da eine bestimmte Logik vom Programmierer festgelegt wurde und diese sich im Laufe der Zeit nicht mehr ändert. Die Maschine verarbeitet die Daten entsprechend dieses Schemas. Bei Abweichungen oder unbekanntem Konstellationen kann der klassische Algorithmus die Daten nicht verwenden und gibt einen Ausnahmefehler zurück. Bei der Anwendung von intelligenten Algorithmen (KI-Methoden) hingegen kann sich die Logik im Laufe der Zeit anpassen. Die Maschi-

| Klassischer Algorithmus   | Intelligenter Algorithmus (KI-Methoden)   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegen einer bestimmten Logik (fix)</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegen einer bestimmten Logik (variabel)</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maschine verarbeitet Daten nach einem festgelegten Schema</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maschine „lernt“ und es entsteht KI</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abweichungen oder unbekannte Konstellationen führen zu einem Ausnahmefehler</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Programme und Algorithmen verbessern sich selbst</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beziehungen zwischen Variablen sind fest definiert und ändern sich nicht</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beziehungen zwischen den Variablen sind nicht fest, sondern ändern sich im Laufe der Zeit</li> </ul> |

Tabelle 1. Abgrenzung zwischen klassischem und intelligentem Algorithmus (KI-Methoden)

nen „lernen“ und KI entsteht. Programme und Algorithmen verbessern sich, ohne explizit programmiert zu sein [22, 23]. In Tabelle 1 sind die Unterschiede zwischen klassischen Algorithmen und den intelligenten Algorithmen (KI-Methoden) zusammenfassend dargestellt.

Für die Anwendung von KI-Methoden sind die zu identifizierenden Parameter bzw. Merkmale entscheidend. Speziell die hohe Anzahl an Prozess- und Geometriedaten, welche EFBS aufweisen, lässt eine erweiterte Datenanalyse nur durch bestimmte Algorithmen, Optimierungs- und Modellierungsstrategien aus dem Bereich Data Science zu [19, 24, 25]. Daher soll durch die Erweiterung von bestehenden Technologien und Ansätzen (Robotik und optische Erfassungssysteme) mit Methoden der KI und der Verwendung von Prozesssimulationen ein flexibles, voll- bzw. teilautomatisiertes Demontagesystem für EFBS aufgebaut und erprobt werden.

**Konzept**

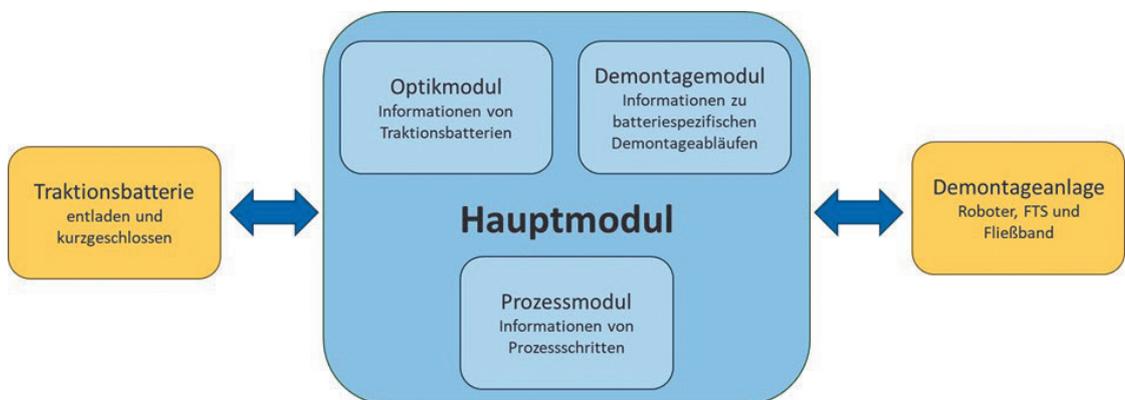
Für die Umsetzung eines flexiblen, automatisierten und zugleich intelligenten Demontagesystems wurde eine Vorgehensweise entwickelt, welche im Kern

auf verschiedene Module zurückgreift. In Bild 1 sind die benötigten Module und deren Wechselwirkung dargestellt. Als übergeordnete Einheit wurde ein Hauptmodul (Kommunikationsmodul) definiert, welches mit drei untergeordneten Teilmodulen (Prozess, Optik- und Demontagemodul) über geeignete Netzwerkschnittstellen kommuniziert. Dabei werden Parameter, Merkmale und Fehlermeldungen zwischen den Teilmodulen ausgetauscht sowie auf Plausibilität geprüft. Erst nach einer positiven Plausibilitätsprüfung werden relevante Daten an die Demontageanlage (Roboter, FTS, Fließband) weitergeleitet und der Demontageprozess gestartet. Das Prozessmodul enthält alle relevanten Informationen über die einzelnen Prozessschritte, wie z.B. Prozessparameter sowie Positionierungsdaten von Roboter und Werkzeug. Das Optikmodul liefert Informationen über die EFBS, wie z.B. Batterietyp, Batterieaufbau, Verbindungstechniken, Positionierungen sowie das Batterieinnenleben. Zur Erkennung dieser Informationen werden Bilddaten mithilfe von neuronalen Netzen bestehend aus unterschiedlichen Architekturen ausgewertet. Dabei ist die Kamera und der 3D-Sensor

am Roboterarm positioniert. Das Demontagemodul besteht aus einer Datenbank mit Informationen zu batteriespezifischen Demontageabläufen, wie z.B. einzelne Demontageschritte oder komplette Demontageanleitungen (spezieller EFBS) mit den dazugehörigen Roboter- und Werkzeugparametern. Mittels intelligenter Algorithmen lässt sich beispielsweise aus einzelnen Demontageschritten ein optimaler Demontageablauf hinsichtlich verschiedener Zielkriterien generieren. Unter Anwendung dieses Konzepts lassen sich EFBS, welche entladen und kurzgeschlossen sind, automatisiert und zeitoptimiert demontieren. Bei unbekanntem Ladezustand der EFBS müssen diese vor der Demontage durch einen vorgelagerten Arbeitsschritt sowohl entladen als auch kurzgeschlossen werden.

Zur Erläuterung des Demontageprinzips werden zwei Szenarien näher betrachtet. Fall 1: die Demontageanleitung für die EFBS ist bekannt (Bild 2) und Fall 2: die Demontageanleitung für die EFBS ist nicht bekannt (Bild 3). In Fall 1 werden die typischen Merkmale (Batterietyp, Größe, Geometrie, Aufbau etc.) der vorhandenen Traktionsbatterie identifiziert und an das Demontagemodul weitergeleitet, woraufhin der passende Demontageplan geladen wird. Dabei kommen Suchalgorithmen zum Einsatz, die die identifizierten Merkmale mit den hinterlegten vergleichen und bewerten. Bei einer positiven Übereinstimmung wird der Demontageplan und damit die relevanten Demontageschritte an das Prozessmodul weitergeleitet und die einzelnen Demontageschritte an die Robotersteuerung übergeben. Nach jedem durchgeführten Prozessschritt (Demontage-

Bild 1. Konzept für die Umsetzung eines flexiblen, teilautomatisierten Demontagesystems



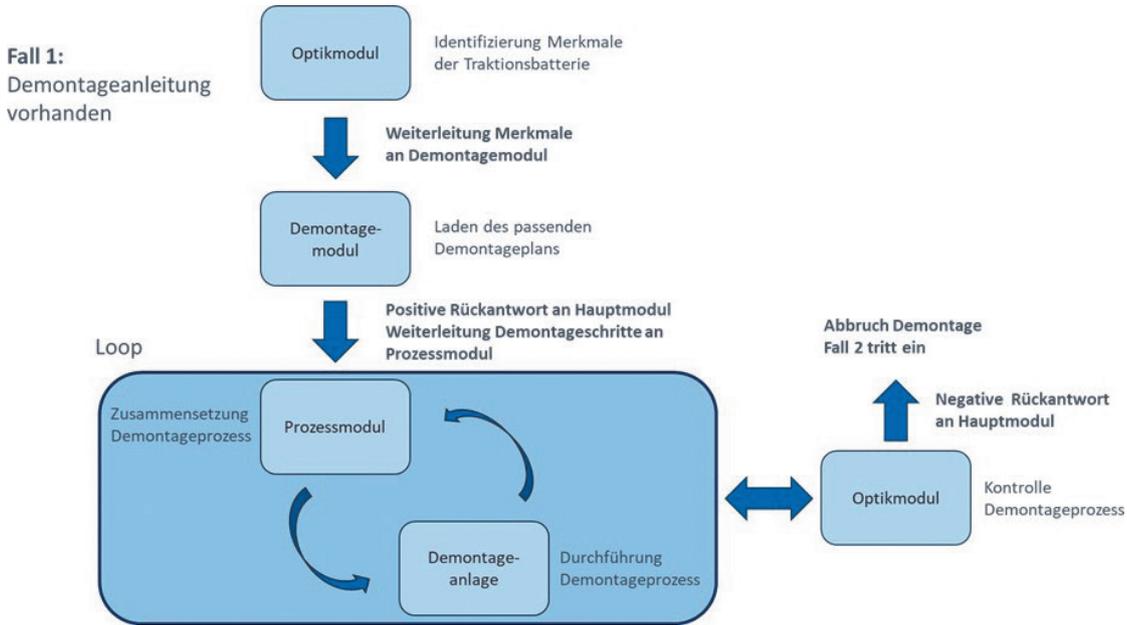


Bild 2. Demontageprinzip für Traktionsbatterien bei vorhandener Demontageanleitung

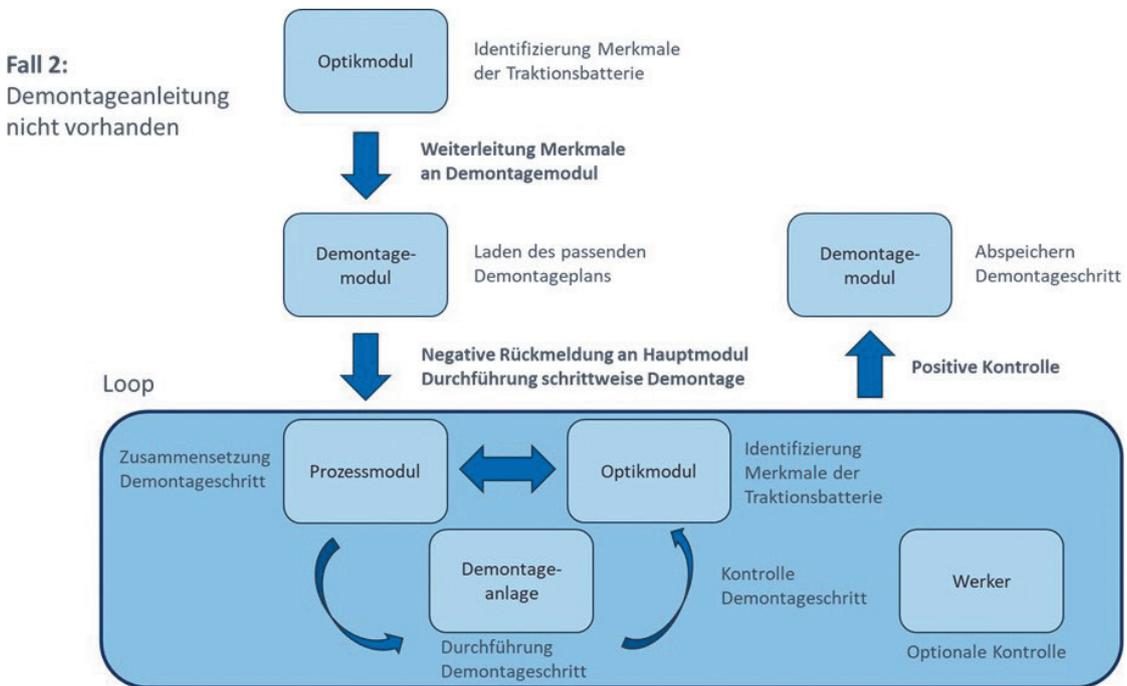


Bild 3. Demontageprinzip für Traktionsbatterien bei nicht vorhandener Demontageanleitung

schritt) wird eine Kontrolle mit dem Optikmodul durchgeführt und bewertet. Bei positiver Rückmeldung erfolgt der nächste Demontageschritt. Bei negativer Rückmeldung wird die Demontage abgebrochen und die Bedingungen für Fall 2 treten ein.

In Fall 2 werden ebenfalls die typischen Merkmale der EFBS identifiziert und an das Demontagemodul weitergeleitet. Jedoch kann aus der vorhandenen

Datenbank kein passender Demontageplan identifiziert werden. Es erfolgt daher eine schrittweise Demontage, indem das Optikmodul relevante Informationen (z.B. Verbindungselemente und deren Positionierungen) identifiziert und an das Prozessmodul weiterleitet. Das Prozessmodul setzt aus diesen Informationen den Demontageschritt aus Roboterposition, Werkzeugposition, Werkzeugtyp, Bahnkurve,

Verbindungsposition und Verbindungsanzahl zusammen und veranlasst die Prozessdurchführung. Nach Abschluss des Demontageschrittes erfolgt die Überprüfung sowohl durch das Optikmodul als auch durch einen Werker, der das System während der Anlernphase überwacht. Bei positiver Rückmeldung wird dieser Demontageschritt im Demontagemodul für die spezielle Traktionsbatterie abge-

speichert. Bei negativer Rückmeldung wird der Schritt wiederholt bzw. manuell durch einen Werker eingegriffen.

In beiden Fällen folgt die Demontage einem logischen Grundmuster: Zuerst erfolgt das Öffnen des Batteriesystems durch Lösen der Batterieabdeckung. Anschließend werden die elektrischen Verbindungselemente zwischen den Batteriemodulen und den elektrischen Komponenten getrennt. Danach erfolgt die Entfernung der mechanischen Verbindungselemente zwischen den Systemkomponenten (z. B. Batteriemodule, Elektronik) und der Unterseite der Batterie. Schließlich werden die elektronischen Komponenten und Batteriemodule entfernt.

### Training

Aufgrund der hohen Komplexität des Demontageprozesses von EFBS müssen die einzelnen Teilmodule mit deren spezifischen Algorithmen durch eine hohe Anzahl an Daten trainiert und getestet werden. Dafür wurden verschiedene Dummies, die bestimmte Teilelemente der EFBS abbilden, konstruiert. Somit besteht die Möglichkeit durch eine unterschiedliche Anordnung von z. B. Verbindungselementen einen hohen Datensatz zu generieren und dadurch die Robustheit der intelligenten Algorithmen zu erhöhen. Speziell die im Optikmodul zum Einsatz kommenden neuronalen Netze zur Mustererkennung in den Bilddaten können auf diese Weise trainiert werden. Auch Extremfälle, wie beispielsweise verschmutzte, schlecht zugängliche oder verdeckte Verbindungselemente, können mithilfe der Dummies untersucht werden. Dadurch wird die Robustheit der Mustererkennung erhöht, und die Grenzen dieser Technologie können bewertet werden. Für die Erprobung des hier vorgestellten Konzeptes zur flexiblen, automatisierten Demontage von EFBS wurde ein Digitaler Zwilling der Demontageanlage aufgebaut. Mit dieser virtuellen Abbildung der Demontageanlage lassen sich unterschiedliche Szenarien generieren, die sowohl den Normalbetrieb als auch Grenzfälle, wie zum Beispiel Maschinenausfälle oder Tests von Sicherheitsroutinen, des Demontageprozesses abbilden können. Somit lassen sich Interaktionen zwischen den einzelnen Teilmodulen und dem Hauptmodul sowie mit der Demontageanlage testen und optimieren.

### Diskussion

Ziel dieses Beitrags ist es, ein Konzept für ein System vorzustellen, welches KI-gestützt eine flexible und automatisierte Demontage unterschiedlicher EFBS-Modelle ermöglicht.

In Anbetracht der signifikanten Zunahme der Zahl zugelassener Elektrofahrzeuge erlangt die Entsorgung der EFBS dieser Fahrzeuge am Ende ihrer Lebensdauer eine hohe Relevanz. Die Wiederverwendung einzelner Komponenten für Second-Life-Anwendungen kann sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Perspektive vorteilhaft sein. Hierfür ist jedoch eine vorherige Demontage des EFBS in seine einzelnen Komponenten erforderlich. Aufgrund der großen Anzahl von EFBS-Modellen auf dem Markt, welche die Entwicklung eines standardisierten und leicht automatisierbaren Demontageprozesses erschwert, erfolgt diese Demontage derzeit hauptsächlich manuell.

Das vorgestellte Konzept soll diesen Herausforderungen begegnen. Eine KI wird genutzt, um Bild- und Positionsdaten eines Batterie-Dummies bzw. dessen Komponenten über ein Kamerasystem selbstständig zu erfassen, auszuwerten und daraus einen Demontageprozess abzuleiten. Ein Industrieroboter, der mittels KI gesteuert wird, demontiert dann den EFBS-Dummy.

Sowohl das Design der Batterie-Dummies und damit das Training der KI als auch der abgeleitete Demontageprozess basieren auf den derzeit auf dem Markt befindlichen EFBS-Modellen, wobei der Fokus auf den Marktführern liegt. Damit soll sichergestellt werden, dass die wichtigsten heute auf dem Markt befindlichen EFBS-Modelle mit dem entwickelten System demontiert werden können. Gleichzeitig handelt es sich um die Modelle, die in naher Zukunft nach dem Ende des Produktlebenszyklus der zugehörigen Elektrofahrzeuge demontiert werden müssen. Aufgrund der gegenwärtigen, rasanten Entwicklung und des starken Wachstums des EFBS-Marktes lässt sich keine Prognose darüber treffen, inwiefern EFBS-Modelle in Zukunft leichter demontierbar sein werden oder ob das vorgestellte System für derartige Szenarien überhaupt noch anwendbar ist. Dennoch ist ein automatisiertes und KI-gestütztes System

auf dem aktuellen Markt weiterhin von essentieller Bedeutung.

Das Prozessdesign basiert auf der Annahme, dass das EFBS vollständig entladen und frei von Kühlflüssigkeit ist, bevor es in das Demontagesystem eingebracht wird, um so den Fokus alleinig auf den Prozess der Demontage zu legen. Zusätzliche Gefährdungen für Maschinen und Menschen, wie etwa Kurzschlüsse, Brände und das Auslaufen von Kühlflüssigkeit, werden somit zunächst nicht betrachtet und der Prozess ist als idealisiert anzusehen. Im Vorfeld wurde eine „Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse“ (FMEA) durchgeführt, um potenzielle Gefährdungen eines realen Prozesses zu identifizieren. Die Ergebnisse dieser Analyse können zu einem späteren Zeitpunkt bei der Evaluierung der Durchführbarkeit und Realisierung des Konzepts Berücksichtigung finden.

Die Dummies, welche der KI als Trainingsgrundlage dienen und im Anschluss im Demonstrator zerlegt werden, weisen eine sehr abstrakte Gestaltung auf. Neben den bereits erwähnten Vorteilen für die Sicherheit bei den Testszenarien soll durch die Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Komponenten der Dummies eine Vielzahl unterschiedlicher EFBS-Modelle nachempfunden werden. Dadurch kann eine große Datenmenge für das Training der KI generiert werden.

### Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Anstieg der Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen werden auch die Mengen an Elektro-Altfahrzeugen und damit an EFBS in Zukunft enorm ansteigen. Um diese steigenden Mengen bewältigen zu können, ist ein möglichst hoher Automatisierungsgrad im Demontageprozess und eine damit verbundene hohe Prozesseffizienz dringend erforderlich. Dies ist notwendig, um eine funktionierende Kreislaufwirtschaft für Second-Life-Anwendungen von gebrauchten Batteriekomponenten und das Recycling von Rohstoffen zu ermöglichen, die die Grundlage für ein wirklich nachhaltiges Wachstum des Elektrofahrzeugmarktes darstellen. Die große Vielfalt der EFBS-Modelle und die Abweichungen vom ursprünglichen Nachnutzungszustand sind jedoch ein Hindernis für eine einfache

Automatisierung des Demontageprozesses. Daher ist es entscheidend, ein Demontagesystem intelligent zu gestalten und mit lernenden Algorithmen zu unterstützen. Nur so kann sichergestellt werden, dass das System EFBS auch ohne Kenntnis des spezifischen Demontageprozesses selbstständig und flexibel demontieren kann.

In diesem Beitrag wird ein Konzept für ein Demonstrator-System vorgestellt, das flexibel und automatisiert verschiedene Typen von EFBS, KI-unterstützt demontieren kann. Es wird die grundlegende Hardwarestruktur dieses Systems vorgestellt und gezeigt, wie die einzelnen Komponenten interagieren und miteinander kommunizieren, um den gesamten Demontageprozess eines EFBS abzubilden. Zusätzlich wird ein Konzept für eine KI zur Unterstützung der Automatisierung des Demontageprozesses vorgestellt. Diese KI besteht aus vier einzelnen Modulen mit unterschiedlichen Aufgaben, die von der Bildverarbeitung und Objekterkennung über die Ableitung der Demontalogik und die Bestimmung der Prozessparameter bis hin zur Speicherung dieser Daten reichen.

Im nächsten Schritt soll die Hardware für die beiden Demonstratoren installiert werden. Parallel dazu werden die einzelnen Module der KI programmiert und die optische KI anschließend anhand von Bildern realer Batteriekomponenten trainiert. Außerdem werden die entworfenen EFBS-Dummies hergestellt und im nächsten Schritt zum Training der optischen KI verwendet. Parallel zur Anbindung der Demonstrator-Hardware an die KI wird die Datenbank mit Daten aus dem KI-Training gefüllt. Nach erfolgreicher Installation aller Komponenten soll durch verschiedene Erkennungs-, Trenn- und Pick-and-Place-Experimente gezeigt werden, dass eine automatisierte Demontage verschiedenster EFBS-Modelle mithilfe einer KI möglich ist. Darüber hinaus sollen Anforderungen an das zukünftige Produktdesign von EFBS, den Bau von Produktionsanlagen und Systemkonzepten abgeleitet werden können.

## Literatur

- Buberger, J.; Kersten, A.; Kuder, M.; Eckerle, R.; Weyh, T.; Thiringer, T.: Total CO<sub>2</sub>-Equivalent Life-Cycle eEmissions from 31 Commercially Available Passenger Cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159 (2022) 112158  
DOI:10.1016/j.rser.2022.112158
- Alves, D.P.; Blagoeva, D.; Pavel, C.; Arvanitidis, N.: Cobalt: Demand-Supply Balances in the Transition to Electric Mobility. EUR 29381 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2018
- Wang, Y.; Tang, B.; Shen, M.; Wu, Y.; Qu, S.; Hu, Y.; Feng, Y.: Environmental Impact Assessment of Second Life and Recycling for LiFePO<sub>4</sub> Power Batteries in China. *J Environ Manag* 314 (2022) 115083  
DOI:10.1016/j.jenvman.2022.115083
- Elwert, T.; Römer, F.; Schneider, K.; Hua, O.; Buchert, M.: Recycling of Batteries from Electric Vehicles. In: Pistoia, G.; Liaw, B. (Hrsg.): *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*. Green Energy and Technology. Springer International, Cham 2018  
DOI:10.1007/978-3-319-69950-9\_12
- Hertel, D.; Bräunig, G.; Thüerer, 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) 5, S. 387–396  
DOI:10.1016/j.jmsy.2024.03.013
- Tan, W.J.; Mei Mei Chin, C.; Garg, A.; Gao, L.: A Hybrid Disassembly Framework for Disassembly of Electric Vehicle Batteries. *International Journal of Energy Research* 45 (2021) 5, S. 8073–8082  
DOI:10.1002/er.6364
- Sharma, A.; Zanotti, P.; Musunur, L.P.: Enabling the Electric Future of Mobility: Robotic Automation for Electric Vehicle Battery Assembly. *IEEE Access* 7 (2019) 170961–170991  
DOI:10.1109/ACCESS.2019.2953712
- Wegener, K.; Andrew, S.; Raatz, A.; Dröder, K.; Hermann, C.: Disassembly of Electric Vehicle Batteries Using the Example of the Audi Q5 Hybrid System. *Procedia CIRP* 23 (2014), S. 155–160  
DOI:10.1016/j.procir.2014.10.098
- Wegener, K.; Chen, W.H.; Dietrich, F.; Dröder, K.; Kara, S.: Robot Assisted Disassembly for the Recycling of Electric Vehicle Batteries. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 716–721  
DOI:10.1016/j.procir.2015.02.051
- Garg, A.; Zhou, L.; Zheng, J.; Gao, L.: Qualitative Framework Based on Intelligent Robotics for Safe and Efficient Disassembly of Battery Modules for Recycling Purposes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 463 (2020)  
DOI:10.1088/1755-1315/463/1/012159
- Harper, G.; Sommerville, R.; Kendrick, E.; Driscoll, L.; Slater, P.; Stolkin, R.; Walton, A.; Christensen, P.; Heidrich, O.; Lambert, S.; Abbott, A.; Ryder, K.; Gaines, L.; Anderson, P.: Recycling Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles. *Nature* 575 (2019) 7781, S. 75–86  
DOI:10.1038/s41586-019-1682-5
- Bilal, M. T.; Tyapin, I.; Choux, M. M. H.: Enhancing Object Localization Accuracy by using Multiple Camera Viewpoints for Disassembly Systems. In: *IECON 2022 – 48<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2022, S. 1–6  
DOI:10.1016/j.jmsy.2024.03.013
- Li, H.; Zhang, H.; Zhang, Y.; Zhang, S.; Peng, Y.; Wang, Z.; Song, H.; Chen, M.: An Accurate Activate Screw Detection Method for Automatic Electric Vehicle Battery Disassembly. *Batteries* 9 (2023) 3, 187  
DOI:10.3390/batteries9030187
- Poschmann, H.; Brüggemann, H.; Goldmann, D.: Fostering End-of-Life Utilization by Information-driven Robotic Disassembly. *Procedia CIRP* 98 (2021), S. 282–287  
DOI:10.1016/j.procir.2021.01.104
- Brådlund, H.; Choux, M.; Cenkeramaddi, L.R.: Point Cloud Instance Segmentation for Automatic Electric Vehicle Battery Disassembly. *Intell Technologies and Applications: 4<sup>th</sup> Int Conference (INTAP)*. Springer International, Cham 2022  
DOI:10.1007/978-3-031-10525-8\_20
- Gerbers, R.; Wegener, K.; Dietrich, F.; Dröder, K.: Safe, Flexible and Productive Human-Robot-Collaboration for Disassembly of Lithium-Ion Batteries. *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way*. Springer International, Cham 2018, 99–126  
DOI:10.1007/978-3-319-70572-9\_6
- Yin, H.; Xiao, J.; Wang, G.: Human-Robot Collaboration Re-Manufacturing for Uncertain Disassembly in Retired Battery Recycling. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing, WCMEIM, Ma'anshan, China 2022*, S. 595–598  
DOI:10.1109/WCMEIM56910.2022.10021388
- Zhang, H.; Yang, H.; Wang, H.; Wang, Z.; Zhang, S.; Chen, M.: Autonomous Electric Vehicle Battery Disassembly Based on NeuroSymbolic Computing. In: *Intelligent Systems and Applications, Proceedings of the 2022 Intelligent Systems Conference (IntelliSys) Volume 2*. Springer International, Cham 2023, S. 443–457  
DOI:10.1007/978-3-031-16078-3\_30
- Baazouzi, S.; Rist, F.P.; Weeber, M.; Birke, K.P.: Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries. *Batteries* 7 (2021) 4, 74  
DOI:10.3390/batteries7040074
- Ke, Q.; Zhang, P.; Zhang, L.; Song, S.: Electric Vehicle Battery Disassembly Sequence Planning Based on Frame-Subgroup Structure Combined with Genetic Algorithm. *Frontiers in Mechanical Engineering* 6 (2020), 576642  
DOI:10.3389/fmech.2020.576642

21. Choux, M.; Bigorra, E. M.; Tyapin, I.: Task Planner for Robotic Disassembly of Electric Vehicle Battery Pack. *Metals* 11 (2021) 3, 387  
DOI:10.3390/met11030387
22. Ertel, W.: *Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine praxisorientierte Einführung*. Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2016
23. Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J.: *The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer-Verlag, New York 2009  
DOI:10.1007/978-0-387-84858-7
24. Michie, D.; Spiegelhalter, D. J.; Taylor, C. C.; Campbell, J.: *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*. Ellis Horwood Ltd, USA 1995
25. Brunton, S. L.; Kutz, J. N.: *Data-Driven Science and Engineering. Machine Learning, Dynamical Systems and Control*. Cambridge University Press, New York 2019  
DOI:10.1017/9781108380690

### Die Autoren dieses Beitrags

Dipl. Ing. (FH) Dominik Hertel, geb. 1991, hat Maschinenbau mit Fachrichtung Produktionstechnik in Zwickau studiert. Er ist als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Chemnitz an der Professur Fabrikplanung und Intralogistik mit den Arbeitsschwerpunkten Produktionsplanung und -steuerung sowie Automatisierung beschäftigt.

Gerald Bräunig, M. Eng., geb. 1998, hat Materialfluss und Logistik (Fakultät Wirtschaft

Logistik-Verkehr) an der Fachhochschule Erfurt studiert. Er ist als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Chemnitz (Professur Fabrikplanung und Intralogistik; Institut für Betriebswissenschaften und Fabrik-systeme; Fakultät für Maschinenbau) mit den Arbeitsschwerpunkten Materialfluss & Logistik sowie Prozessmanagement beschäftigt.

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Reuter, M. Eng., geb. 1983, hat physikalische Technik und Computational Engineering in Zwickau und Berlin studiert. Er ist seit 2016 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ICM e. V. mit den Arbeitsschwerpunkten Datenanalyse, Simulation und Berechnung beschäftigt.

Jonas Hummel, M. Sc., geb. 1991, hat Industrial Management an der Hochschule Mittweida studiert. Seit 2018 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ICM e. V. tätig, mit den Schwerpunkten Projekt- und Netzwerkmanagement sowie Geschäftsmodellentwicklung.

### Abstract

AI-assisted Disassembly of Electric Vehicle batteries – A Sustainable Transition to Electromobility. In 2015, the international community established 17 Global Sustainable Development Goals to create a more humane future and preserve natural resources. Green electromobility transition is a crucial element in achieving some of these goals with focus on climate protection. However, this mobility transition alone is not enough. There is also the question of how to

deal with the battery systems of electric vehicles at the end of their product life in order to maximize resource conservation and at the same time reduce environmental pollution caused by improper disposal.

### Förderhinweis

Dieses Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen: 13IK018F).

### Schlüsselwörter

Demontage, Elektrofahrzeugbatterie, Automatisierung, Künstliche Intelligenz, Recycling, Nachhaltigkeit

### Keywords

Disassembly, Electric Vehicle Battery, Dismantling, Automation, Artificial Intelligence, Recycling, Sustainability

### Bibliography

DOI:10.1515/zwf-2024-1150

ZWF 119 (2024) 11; page 845 – 851

Open Access. © 2024 bei den Autoren,

publiziert von De Gruyter. 

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

ISSN 0947-0085 · e-ISSN 2511-0896