

# Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft am Beispiel der automatisierten Demontage für Cascade Use Anwendungen und Recycling

Jan Henning Seelig, Sven Birkenfeld, Oliver Keich und Torsten Zeller

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 1.     | Demontage – wozu?.....                                  | 350 |
| 2.     | Wirtschaftlichkeit der Demontage.....                   | 351 |
| 3.     | Realisierung der automatisierten Demontage.....         | 353 |
| 3.1.   | Ausgestaltung der Demontagefabrik.....                  | 353 |
| 3.2.   | Entwicklung eines automatisierten Demontagemoduls ..... | 356 |
| 3.2.1. | Digitale Datenverarbeitung.....                         | 357 |
| 3.2.2. | Maschinelle Ausstattung .....                           | 359 |
| 4.     | Fazit und Ausblick .....                                | 360 |
| 5.     | Literatur .....   | 361 |

Der Ausbau der Ressourceneffizienz nimmt in Deutschland einen wichtigen Stellenwert ein, da die Schonung natürlicher Ressourcen nicht nur aufgrund ökologischer Aspekte, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht bedeutend ist. Eine gesicherte Rohstoffversorgung ist für eine stabile Wirtschaftsleistung unabdingbar. Branchen wie der Maschinen- und Anlagenbau profitieren zudem durch die Weiterentwicklung vorhandener sowie die Entwicklung neuer Recyclingtechnologien. Für die Etablierung einer ökonomisch sowie ökologisch tragfähigen Kreislaufwirtschaft werden zukünftig innovative Recycling- und Kaskadennutzungs-Strategien (vgl. Bild 3) eine entscheidende Rolle spielen. Essentiell sind dabei hochspezifische Rückgewinnungsverfahren, die durch die Verwendung digitaler Datenverarbeitung unterstützt werden. Der folgend vorgestellte Ansatz sieht eine automatisierte Demontage zur gezielten Gewinnung von Komponenten und Konzentraten vor und zielt damit auf ein möglichst hochwertiges Recycling technisch komplexer Produkte wie Elektro(nik)geräte oder Kraftfahrzeuge bzw. deren Komponenten ab.

Der vorliegende Fachbeitrag gibt eine Übersicht über die Ergebnisse, welche in zwei bereits abgeschlossenen Projekten und einem derzeit laufenden Projekt zur industriellen Demontage erzielt wurden. Im Einzelnen sind dies:

- Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse [3],
- Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung [13] und
- Industrielle Demontagefabrik 4.0 [laufendes Projekt].

Tiefere Details sind in den entsprechenden Projektberichten nachzulesen.

Die Realisierung einer industriellen Demontagefabrik wird im Rahmen der Landesstrategie *Ressourceneffizienz Baden-Württemberg* vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert. Das Bundesland konkretisiert seine ressortübergreifende Digitalisierungsstrategie mit dem Ziel, die Nachhaltigkeit und Innovationskraft, verbunden mit einem konkreten Nutzen für die Bürgerinnen und Bürger, zu intensivieren. In diesem Rahmen hat der Ausbau der baden-württembergischen Vorreiterrolle auf dem Gebiet der Digitalisierung der Industrie einen hohen Stellenwert.

## 1. Demontage – wozu?

Die Produkte der modernen Industriegesellschaft beinhalten aufgrund voranschreitender technischer Entwicklungen und Digitalisierung eine zunehmende Anzahl an Elementen, von denen einige unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren als versorgungskritisch für ansässige Industrien eingestuft werden [1, 2, 5, 7]. Mit der Primärgewinnung der benötigten Rohstoffe sind stets Umweltauswirkungen verbunden, bei manchen sind zudem negative soziale Auswirkungen in den Förderländern zu verzeichnen [12]. Ziel muss daher sein, die Rohstoffe lange in der Verwendung zu halten. Die Zielvorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [6] sehen zu diesem Zweck die Etablierung einer Abfallhierarchie vor, in der die Wiederverwendung dem Recycling vorzuziehen ist (Bild 1).

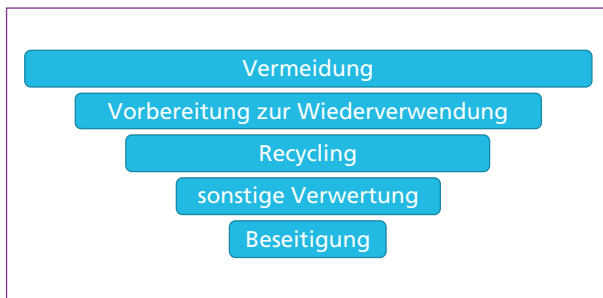


Bild 1:

Abfallhierarchie laut Kreislaufwirtschaftsgesetz

Quelle: Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.

Erst wenn eine Wiederverwendung nicht möglich ist, sind die betreffenden Produkte am Ende ihrer Nutzung zu recyceln. Um den Primärabbau zu reduzieren und die Ressourceneffizienz effektiv zu verbessern, muss dies möglichst hochwertig unter Vermeidung funktioneller Verluste geschehen, die das Anwendungsspektrum des Sekundärmaterials gegenüber dem Primärmaterial einschränken würden [9].

Eine hochwertige Kreislaufführung wird unter anderem durch folgende Umstände verhindert:

- Die bestehende Abfalllogistik zielt nicht auf die Unversehrtheit der Produkte in Sammlung und Transport ab. Die Vorbereitung zur Wiederverwendung erfordert daher die Etablierung verbesserter Logistikstrukturen.

- Die Marktpreise wirtschaftskritischer Rohstoffe aus der Primärgewinnung sind verhältnismäßig niedrig. Grund dafür ist die fehlende Internalisierung der externen Umwelt- und Sozialkosten. Die Erfordernis, diese Marktpreise mit sekundär gewonnenen Rohstoffen zu erreichen oder zu unterbieten, senkt die Gewinnspanne der Recyclingverfahren.
- In komplexen Produkten und den entsprechenden Abfallströmen liegen viele Elemente nur in geringen Konzentration vor. Dadurch ist beim Recycling der Quotient zwischen Input und Output sehr hoch und die Rückgewinnung unwirtschaftlich.
- Komplexe Produkte werden im Zuge des Recyclings oftmals einer maschinellen Zerkleinerung und Sortierung unterzogen. Dabei kommt es aufgrund von Anhaftungen und unvollständiger Auftrennung zu hohen Materialverlusten [8].

Die automatisierte Demontage kann einerseits als Werkzeug der Vorbereitung zur Wiederverwendung dienen und andererseits auch ein hochwertiges Recycling unterstützen, da sie folgende Vorteile bietet:

- Eine Einzelbehandlung der Geräte ermöglicht die individuelle Entscheidung zwischen Wiederverwendung und Recycling. Durch gerätespezifische Informationen kann der Marktwert des Gebrauchtgerätes bzw. einzelner Komponenten dem Demontageaufwand kalkulatorisch gegenübergestellt werden, wodurch eine individuelle Beurteilung der Wirtschaftlichkeit möglich ist.
- Wird die Wiederverwendung eines Produkts angestrebt, so muss eine Funktionsprüfung erfolgen. Diese kann aufgrund der ohnehin etablierten Einzelbehandlung in der Demontage mit geringerem Mehraufwand realisiert werden als in derzeitigen Recyclingsystemen.
- Gezielter Ausbau einzelner Bauteile oder Baugruppen fördert das Ersatzteilangebot.
- Durch gezielten Ausbau von Materialien können kostengünstig Vorkonzentrate bereitgestellt werden. Ein so erzeugtes, stabiles Angebot spezifischer Konzentrate fördert die Etablierung neuer, spezialisierter Rückgewinnungsverfahren, die andernfalls den Sprung von der Entwicklung zur Markteinführung nicht bewältigen.

## 2. Wirtschaftlichkeit der Demontage

Im Projekt *Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung* [13] wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, um die grundlegende Umsetzbarkeit einer industriellen Demontage von EoL-Geräten (EoL = End-of-Life) zu überprüfen. Dazu wurde im ersten Schritt aufgrund folgender Kriterien eine Modell-Produktgruppe ausgewählt:

- für eine Demontage geeigneter technischer Aufbau,
- ausreichende mengenbezogene Verfügbarkeit für eine industrielle Umsetzung sowie
- Beinhaltung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe.

Die Wahl fiel dabei auf elektrische Motoren und Generatoren in Form von Industrie-Elektromotoren, elektrischen Fahrrad-Antriebsmotoren und Nabendynamos. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich aufgrund des ähnlichen Aufbaus grundsätzlich auf Motoren und Generatoren aus dem Kfz-Bereich übertragen.

Die Tiefe einer Demontage kann je nach Anforderung unterschiedlich ausfallen. Ist der Zweck eine reine Materialrückgewinnung, so ist eine große Demontagetiefe erforderlich. Sollen hingegen Bauteile oder Baugruppen zur Wiederverwendung ausgebaut werden, so wird der Demontageaufwand entsprechend geringer ausfallen. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde eine saubere Trennung sämtlicher Materialien zugrunde gelegt, die möglichst hochwertige Konzentrate für die anschließende Vermarktung erzeugt. Da bei Bergung von Baugruppen bzw. Bauteilen von einem geringeren Demontageaufwand bei gleichzeitig höheren erzielbaren Preisen auszugehen ist, was den wirtschaftlichen Erfolg stark begünstigt, ist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konservativ ausgelegt.

Ausschlaggebend für die Höhe der Kosten einer Demontage ist der benötigte Arbeitsaufwand. Um diesen für die betrachteten Produkte zu ermitteln, wurden manuelle Demontageversuche durchgeführt. Diese lieferten ebenfalls Daten zu den beinhalteten Materialmengen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde zunächst die Wirtschaftlichkeit einer manuellen Demontage im industriellen Maßstab berechnet. (Eine detaillierte Darstellung der Berechnungsgrundlagen ist dem Abschlussbericht des Projekts [13] zu entnehmen). Dies erwies sich aufgrund des hiesigen Lohnniveaus als unwirtschaftlich. Die Ergebnisse dienten anschließend dazu, die durch eine roboterbasierte Automatisierung zu erreichende Verringerung der Demontagezeiten zu berechnen, die den wirtschaftlich selbsttragenden Betrieb (*schwarze Null*) der Demontagefabrik ermöglicht. Das Ergebnis dieser Modellrechnung ist die Erkenntnis, dass die Demontage durch Roboter den Zeitaufwand um etwa ein Drittel gegenüber der manuellen Vorgehensweise verringern müsste. Da eine solche Zeitersparnis durch moderne Datenverarbeitungs- und Automatisierungstechnik im Bereich des Möglichen liegt, wurden weiterführende Entwicklungen zur Realisierung einer automatisierten Demontagefabrik vorgenommen. Diese werden in Kapitel 3 dargestellt.

Eine Stoffstromanalyse diente in dem durchgeführten Projekt der Abschätzung zu erwartender Abfallmengen der betrachteten Produktgruppen. Da bei der Demontage ein erhöhter Mengendurchsatz bei gegebener Verarbeitungsgeschwindigkeit nur durch Parallelisierung der Demontagestationen erreicht werden kann, ist die absolute Menge des verarbeiteten Stoffstroms nicht entscheidend für die Wirtschaftlichkeit. Vielmehr ist die Beständigkeit des Input-Stoffstroms ausschlaggebend, um eine industrielle Demontagefabrik erfolgreich betreiben zu können. Die Demontagefabrik kann somit in unterschiedlicher Skalierung realisiert werden.

Beim bisher etablierten Recycling technisch komplexer Produkte wie Elektro(nik)geräte oder Kraftfahrzeuge, bei dem zumeist ein maschineller Zerkleinerungsschritt erfolgt, ist hingegen ein höherer Mengendurchsatz durch Upscaling der Verarbeitungsanlagen möglich. Dieser führt – bei gegebener Auslastung – durch Skaleneffekte oft zu einer besseren Wirtschaftlichkeit größerer Anlagen. Die Demontage ist demgegenüber bereits in kleinerem Maßstab realisierbar.

### 3. Realisierung der automatisierten Demontage

Bei der automatisierten Demontage eines Produktes sind im Vergleich mit der Montage zusätzliche Herausforderungen zu überwinden:

- Die unbekannte Zusammensetzung angelieferter EoL-Produktchargen macht eine Identifizierung der EoL-Produkte notwendig.
- In der Demontage werden verschiedene Produkttypen an den gleichen Stationen verarbeitet. Diese müssen daher eine hohe Flexibilität aufweisen.
- Veränderungen aus der Nutzungsphase, wie beispielsweise ausgetauschte Schrauben oder Verschmutzungen, treten auf und dürfen die Arbeitsabläufe nicht stören.

Zwecks Überführung der Demontage in die industrielle Anwendung wurde ein Konzept zur Ausgestaltung einer Demontagefabrik entwickelt, das diese Herausforderungen berücksichtigt. Dieses basiert auf Ergebnissen des Projekts *Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung* [13] und wird im Folgenden vorgestellt.

#### 3.1. Ausgestaltung der Demontagefabrik

Bild 2 gibt eine schematische Übersicht über die mögliche Ausgestaltung einer industriellen Demontagefabrik. Der Modellstoffstrom wurde gegenüber den in [13] dargestellten Projektergebnissen um Kfz-Traktionsmotoren, aufgrund deren ähnlichen Aufbaus sowie ihrer Eignung für ReUse und Refurbishment im Sinne einer Kaskadennutzung, erweitert.

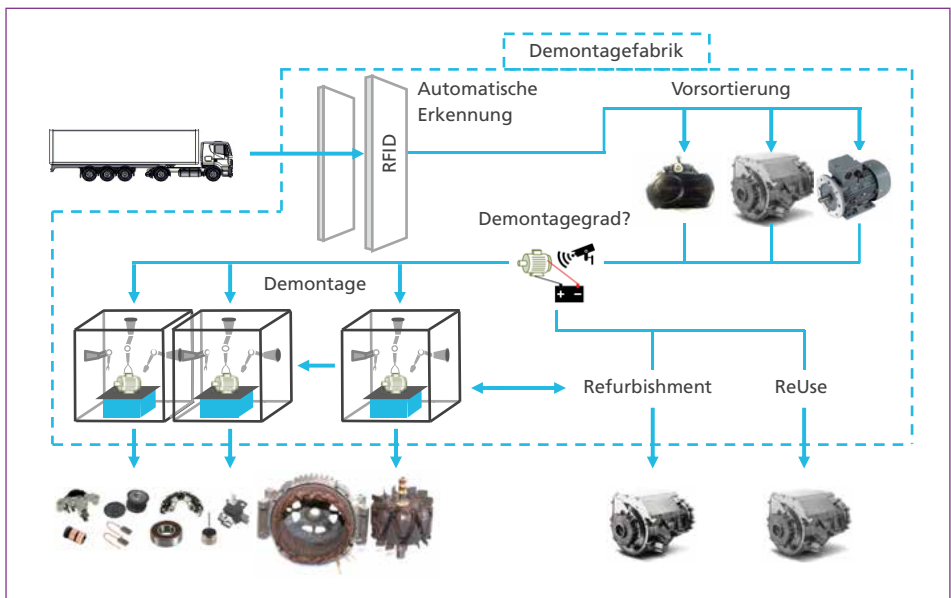


Bild 2: Konzept zur Ausgestaltung einer industriellen Demontagefabrik für Elektromotoren (Industrie-Elektromotoren, Kfz-Traktionsmotoren und Antriebsmotoren aus dem Fahrradbereich)

Der Ablauf notwendiger Arbeitsschritte innerhalb der Demontagefabrik ist wie folgt geplant:

### **Anlieferung der EoL-Produkte als gemischte Charge**

Die Demontagefabrik ist als zentralisierte Einrichtung vorgesehen. Mit dem Ziel der Vermeidung unnötiger Transportaufwände wird daher davon ausgegangen, dass die zu verarbeitenden Antriebe bereits ausgebaut in die Demontagefabrik gelangen. Die Entscheidung darüber, ob die Verarbeitung eines spezifischen EoL-Produkts aus ökonomischen oder ökologischen Gesichtspunkten vorteilhaft ist, sollte dabei bereits vor der Anlieferung erfolgen. Zu diesem Zweck ist die Nutzung einer zentralen Demontage-Datenbank vorgesehen, zu der Sammelstellen oder zuliefernde Entsorgungsbetriebe entsprechend Zugang benötigen. Durch Nutzen eines Markiersystems (z.B. RFID) und das Bereitstellen einer automatisierten Datenauswertung kann die Entscheidungsfindung schnell und ohne weiteres Detailwissen ermöglicht werden. Die gleiche Datenbank dient innerhalb der Demontagefabrik der Information über die Zusammensetzung der Charge bei Anlieferung.

### **Vorsortierung**

Nach Anlieferung erfolgt eine manuelle Vorsortierung zwecks Zuordnung der verschiedenen EoL-Produkte in spezialisierte Demontagemodule. In einer Studie von Spitzbart et al. [10], in der unterschiedliche Szenarien zur Demontage von Elektrokleingeräten verglichen wurden, erwiesen sich Szenarien, die eine Vorsortierung umfassten, hinsichtlich Effizienzsteigerung und Kostenoptimierung als sehr vorteilhaft und ermöglichen demnach eine 15 bis 20%ige Steigerung der wirtschaftlichen Performance. Ein weiterer Vorteil der Vorsortierung ist die Möglichkeit zur Ausschleusung bei der Sammlung aufgetretener Fehlwürfe aus dem Input-Stoffstrom.

Zwecks Vorselektion ist die eindeutige Identifizierung der Produkte notwendig. Im Idealfall ist diese wiederum durch ein einheitliches Markiersystem möglich. Sind die entsprechenden Markierungen nicht lesbar, so ist eine Identifizierung alternativ mittels bildgebender Verfahren realisierbar. Eine Separation in Unterkategorien, die sich nach der Konstruktionsweise der Geräte richten, bedingt eine Minimierung der nötigen Werkzeugausstattung bzw. -wechsel in den Demontagemodulen und dient zudem der Zuordnung zu den automatisierten Prüfplätzen.

### **Automatisierte Vorprüfung**

Um hinsichtlich einer angestrebten Kaskadennutzung den größtmöglichen Mehrwert zu erzielen, werden die zur Wiederverwendung vorgesehenen EoL-Produkte einer optischen und funktionalen Prüfung unterzogen. Digitale Szenenanalyse kann dabei eingesetzt werden, um durch optische Aufnahmen Informationen über das EoL-Produkt zu gewinnen, die schließlich mit zuvor festgelegten Prüfparametern bzw. einer Referenzdatenbank abgeglichen werden können. Einerseits haben Verschleißzustand und Einsatzfähigkeit Einfluss auf den Wert, andererseits können korrosions- oder transportbedingte Schäden den Demontageprozess be- oder verhindern.

Die Entscheidung über die Demontagetiefe muss auf Basis eines multikriteriellen Ansatzes erfolgen. Durch Anbindung an die zentrale Demontage-Datenbank sind beispielsweise Informationen über Materialinhalte und Demontagezeiten abrufbar. Für den Fall, dass eine individuelle Produkterkennung auf Basis eines Markiersystems etabliert werden kann, ist im Sinne eines *Track and Trace* der individuelle Lebensweg eines Produktes nachvollziehbar. Dies ermöglicht unter anderem einen durch statistische Auswertung zu erzielenden Erkenntnisgewinn hinsichtlich Lebensdauer bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit. Zusätzlich müssen Informationen über die Marktlage für wiederaufbereitete Produkte bzw. einzelne Baugruppen oder Bauteile des jeweiligen EoL-Produkts einfließen. Dazu zählen die Nachfrage sowie die erzielbaren Einnahmen.

Die weitere Behandlung und die Demontagetiefe werden auf Basis dieser Daten festgelegt und die Information daraufhin mit dem individuellen Produkt verbunden. Die unterschiedlichen Optionen der Kaskadennutzung, welche Einfluss auf die Demontagetiefe haben, sind in Bild 3 dargestellt.

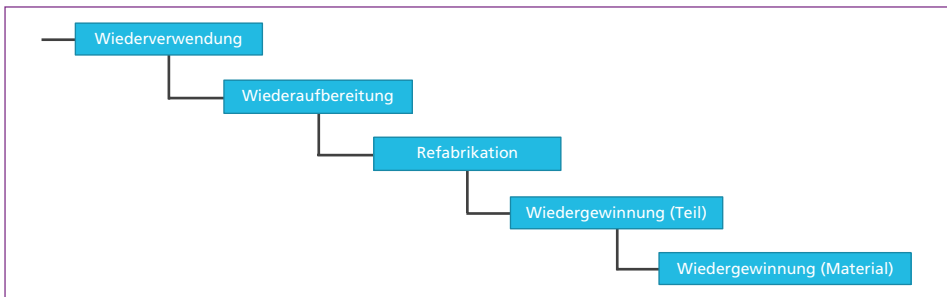


Bild 3: Optionen der Kaskadennutzung demontierbarer EoL-Produkte

Die Verwertungsmöglichkeit, welche nur bei geprüft einwandfreiem Zustand eines Produkts möglich ist und keine Demontage erforderlich macht, ist die direkte Wiederverwendung (ReUse). Bei der Wiederaufbereitung (Refurbishment) wird durch Überholung und Instandsetzung die Einsatzfähigkeit wiederhergestellt. Dies erfordert eine zerstörungsfreie Demontage mit mehr oder weniger großer Demontagetiefe. Refabrikation (Remanufacturing) unterscheidet sich von der Wiederaufbereitung dadurch, dass das verarbeitete Produkt auf den Qualitätsstandard eines Neuteils gebracht wird. Auch eine Aktualisierung des technischen Standards gegenüber dem Originalzustand bei (Erst-)Auslieferung ist möglich. Refabrikation erfordert insgesamt einen höheren Aufwand als die Wiederaufbereitung, kann jedoch insgesamt ökologisch wie ökonomisch vorteilhaft sein.

Sind die bisher genannten Optionen aufgrund des Produktzustands nicht möglich, so bleibt die Möglichkeit zur Wiedergewinnung einzelner Bauteile (Parts Recovery), die wiederum für die Wiederaufbereitung anderer Geräte eingesetzt werden. Die letzte zu wählende Option ist die Wiedergewinnung enthaltener Materialien (Material Recovery) aus einem zu demontierenden EoL-Produkt. Diese Option kann aufgrund eines schlechten Produktzustands, mangelnder Nachfrage oder nicht gegebener Wirtschaftlichkeit gewählt werden und erfordert die tendenziell höchste Demontagetiefe.

In dem Konzept der Demontagefabrik sind Prüfeinrichtungen vorgesehen, die automatisiert funktionspezifische Prüfmechanismen anwenden. Diese sollen eventuelle Schäden erkennen, die nicht durch optische Auswertung zu ermitteln sind. Anwendbar wären im Bereich der Elektromotoren beispielsweise elektrische oder akustische Prüfparameter.

Funktionsfähige EoL-Produkte können bereits hier separiert und bei gegebener Möglichkeit zur direkten Wiederverwendung vermarktet werden. Defekte sowie zur Wiederaufbereitung, Refabrikation bzw. Wiedergewinnung von Teilen oder Materialien vorgesehene Geräte werden demontiert.

## Demontage

In der Demontagefabrik werden, wie in Bild 2 dargestellt, mehrere Demontagestationen (sogenannte Demontagemodule) parallel betrieben. Dabei können sowohl gleich ausgestattete Module zur Anpassung an den Mengendurchsatz vorhanden sein als auch Module mit unterschiedlich spezialisierter Ausstattung für verschiedene EoL-Produktklassen. In jedem Fall sind die Demontagemodule im Konzept der Demontagefabrik so geplant, dass diese jeweils zur Verarbeitung eines Spektrums verschiedener Gerätetypen befähigt sind.

Ob ein Demontagemodul zur vollständigen Demontage eines Produktes befähigt sein sollte, oder eine Übergabe teildemontierter Produkte zwischen unterschiedlichen Demontagemodulen stattfinden muss, um eine wirtschaftlichere Betriebsweise zu erreichen, ist im Einzelfall von den notwendigen Arbeitsschritten abhängig und dementsprechend zu prüfen.

Da in einem einzelnen Demontagemodul stets verschiedene Arbeitsschritte durchgeführt werden, ist eine sehr flexible maschinelle Ausstattung erforderlich. Im Gegensatz zu einer Montagestrecke, bei der unterschiedliche Stationen für einen definierten Teilschritt vorgesehen sind, ist durch die Verwendung von Industrierobotern mit Werkzeugwechselsystemen ein Gesamtsystem einzurichten, welches verschiedenste Handling-, Spann- und Trennaufgaben erfüllen kann. Jedes Modul kann bei Veränderungen des Input-Stoffstroms der Demontagefabrik durch Austausch der Werkzeugausstattung an ein verändertes Produktspektrum angepasst werden.

Zwecks Wertstoffgewinnung ist im Demontagemodul eine bestmögliche Separation der Stoffströme zu etablieren. Für alle Wertstoffkategorien sind dazu eigene Behälter bereitzustellen, was einer automatisierten Sortierung nach gemeinsamer Sammlung vorzuziehen ist [10].

## 3.2. Entwicklung eines automatisierten Demontagemoduls

Die Entwicklung eines automatisierten Demontagemoduls ist Gegenstand des derzeit am CUTEC Clausthaler Umweltechnik Forschungszentrum durchgeführten Projekts *Industrielle Demontagefabrik 4.0* (Förderkennzeichen L75 18003). Dieses soll dem Nachweis dienen, dass das Erreichen wirtschaftlicher Demontagezeiten durch roboterbasierte



Automatisierung möglich ist. In den folgenden Unterkapiteln werden erste Ergebnisse zur Ausgestaltung des Demontagemoduls hinsichtlich der digitalen Datenverarbeitung und der erforderlichen maschinellen Ausstattung vorgestellt.

Als Modellstoffstrom für die Entwicklung des Moduls wurden Kfz-Lichtmaschinen gewählt. Diese Produktgruppe ist bereits Gegenstand des Wiederaufbereitungsgeschäfts unterschiedlicher Hersteller im Kfz-Bereich. Eine Kaskadennutzung ist in dieser Hinsicht somit teilweise etabliert. Die notwendigen Arbeitsschritte der Demontage werden dabei bisher weitgehend manuell durchgeführt.

### 3.2.1. Digitale Datenverarbeitung

Jedes einzelne Demontagemodul soll zur weitgehend selbständigen Demontage unterschiedlicher Lichtmaschinentypen fähig sein. Die Komplexität dieser Aufgabenstellung wird zusätzlich durch die Vielzahl möglicher nutzungsbedingter Veränderungen erhöht. Die daher notwendige Flexibilität ist nur durch Einsatz digitaler Informationsverarbeitung zu erreichen. Die benötigten Funktionalitäten sind in Bild 4 dargestellt.

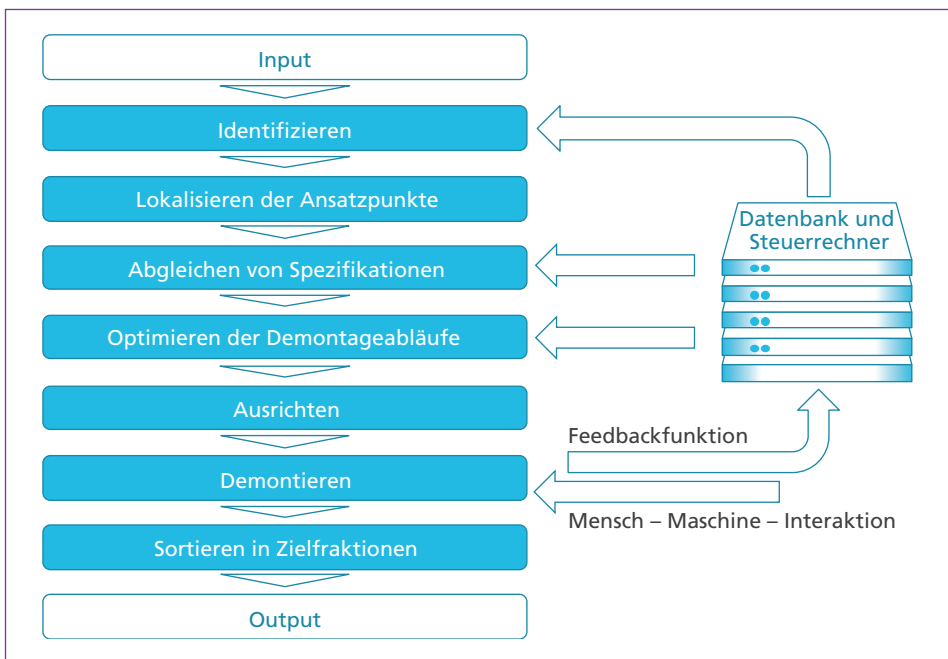


Bild 4: Durch digitale Datenverarbeitung zu unterstützende Funktionalitäten eines Demontagemoduls

Im hier entwickelten Konzept ist die stückweise Verbringung der Lichtmaschinen in die Module vorgesehen. Ein flexibel gestaltetes Demontagemodul muss zunächst fähig sein, den vorliegenden Input zu identifizieren sowie dessen Positionierung zu erkennen. Nach Abrufen der zugehörigen Konstruktionsdaten für die vorliegende Licht-

maschine können die Ansatzpunkte für die Demontagewerkzeuge, wie beispielsweise Schraubenköpfe, Druck- oder Greifpunkte, lokalisiert werden. Die Auswertung der optisch erfassten Daten beinhaltet den Abgleich mit den werkseitigen Spezifikationen. Softwareseitig werden dabei die optisch erfassten Daten mit hinterlegten Modellen aus der Demontage-Datenbank gematcht (Bild 5), was einen hohen Aufwand hinsichtlich der Algorithmen zur Szenenanalyse erfordert.

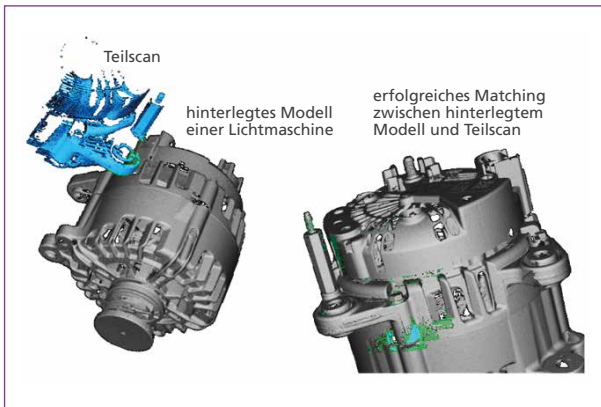


Bild 5:

Links: Visualisierung des digitalen Matchings zwischen einem per 3D-Scanner erfassten Bildausschnitt (Teilschan, blau) und einem in der Demontage-Datenbank hinterlegtem digitalen Modell einer Lichtmaschine (grau); rechts: erfolgreiche Positionsbestimmung

Erkannte Abweichungen, wie geänderte Schraubenköpfe, werden in die Planung der Demontageabläufe zwecks Optimierung der benötigten Zeiten einbezogen. Die Bilderkennung muss dabei fähig sein, einerseits schnell ähnliche Produkttypen voneinander zu unterscheiden und andererseits auch feine Details, wie beispielsweise Schraubenköpfe und deren Orientierung, eindeutig auszumachen. Anhand der ermittelten Position der Lichtmaschine und der beabsichtigten Reihenfolge der Arbeitsschritte werden anschließend Steuerbefehle für die Industrieroboter generiert. Die optische Datenerfassung wird während der Demontage für Szenenanalysen eingesetzt, um die Präzision der Abläufe zu gewährleisten und bei Abweichungen von den Sollwerten entsprechend einzugreifen.

Die physischen Aufgaben während der Demontage umfassen die Ausrichtung der Lichtmaschine, das Trennen einzelner Materialien und Komponenten sowie deren Entfernen aus dem Arbeitsbereich und sortiertes Ablegen. Beim Demontieren ist mit dem Auftreten unvorhersehbarer Problemstellungen zu rechnen, zu deren Überwindung menschliches Eingreifen notwendig sein wird. Damit die Demontage bei dem erneuten Eintreten einer gleichartigen Problemstellung unterbrechungsfrei abläuft, ist die Ermöglichung einer Mensch-Maschine-Interaktion sowie die Hinterlegung des dabei erarbeiteten Lösungswegs in der Datenbank erforderlich. Dazu ist es langfristig vorgesehen, eine Feedbackfunktion zu integrieren. Aufgrund der datenseitigen Vernetzung mehrerer Demontagemodule innerhalb der Demontagefabrik „lernen“ sämtliche Module durch die in einem Modul eingetretene und gelöste Problemstellung. Der Lernprozess ist somit durch den parallelen Betrieb vieler Module zu beschleunigen.

### 3.2.2. Maschinelle Ausstattung

Die Planung der maschinellen Ausstattung des Demontagemoduls (Bild 6) basiert auf den Erkenntnissen über notwendige Arbeitsschritte aus manuellen Vorversuchen der Demontage von Lichtmaschinen.

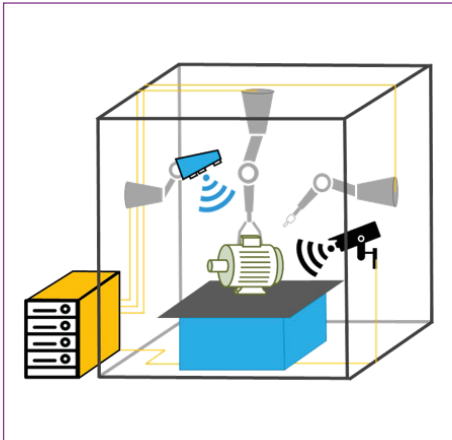


Bild 6: Konzeptdarstellung des Demontagemoduls mit Kamera und 3D-Scanner zur optischen Datenerfassung, Steuerrechner, Industrierobotern und zentralem Spanntisch

Durch umfangreiche Gespräche mit Marktteilnehmern sowie das Testen verschiedener Produkte wurde die geeignete Ausstattung für die optische Erfassung ausgewählt. Die Bildererkennung durch einen 3D-Scanner erwies sich hinsichtlich Handhabung und erzeugter Datenqualität als sinnvollste Option für die schnelle Unterscheidung ähnlicher Produkttypen und die Darstellung feiner Details für das Generieren präziser Maschinenbefehle. Zusätzlich werden 2D-Kameras für die Szenenanalyse während des Demontageprozesses eingesetzt.

Die Berechnungen zu Positionserkennung und Matching der vom 3D-Scanner ausgegebenen Punktwolke mit den hinterlegten Modellen sind zeitkritisch, da die Roboter in der dazu notwendigen

Zeitspanne nicht mit der eigentlichen Demontage beginnen können. Zur Beschleunigung der Rechenzeiten wird daher im Projekt ein System für einen Steuerrechner mit Datenbankbindung erstellt, welches auf die Ressourcen der GPU (Graphics Processing Unit) zugreift. Diese weist im Vergleich mit der CPU (Central Processing Unit) eine für die gestellten Aufgaben geeignetere Architektur auf. Die Rechenperformance der Grafikkarte ist somit ausschlaggebend für die Performance des Gesamtsystems.

Da eine mehrfache Neuausrichtung der Lichtmaschine bis zur vollständigen Demontage nötig ist, ist ein 6-Achs-Industrieroboter ausschließlich für deren Handling vorgesehen. Die in den Vorversuchen verwendeten Lichtmaschinen aus dem Kfz-Bereich haben ein Gewicht von bis zu zehn Kilogramm. Da die Wirtschaftlichkeit stark von den benötigten Demontagezeiten abhängt, ist von hohen Beschleunigungskräften auszugehen. Beim Handling ist somit ein sicheres und präzises Greifen essentiell. Die Ansatzpunkte für die Greifer sind je nach Lichtmaschinen-Modell unterschiedlich ausgeprägt. Aus Zeitgründen ist einerseits auf möglichst universell einsetzbare Geometrien der mit den Lichtmaschinen in Kontakt stehenden Greifbacken zu achten, andererseits wird bei stark abweichenden Formen (Ansatzpunkten) trotzdem ein Wechsel des Greifwerkzeuges notwendig. In dem Demontagemodul ist daher der Einbau eines Werkzeugwechselsystems für den Handling-Roboter geplant.

Zur Unterstützung der Handling-Aufgaben wird zudem ein zentraler Arbeitstisch mit integriertem Spannsystem dienen. Hier wird die Lichtmaschine eingespannt, wenn ein Umgreifen, also ein Wechsel der Ansatzpunkte oder der Orientierung der Greifbacken notwendig wird. Neben diesem Handling-System für die Gesamtmaschine sind zwei weitere, kleinere 6-Achs-Industrieroboter für Schraub- und Greifaufgaben zur Demontage von Einzelteilen und deren Entfernen aus dem Arbeitsbereich vorgesehen. Da diese ein deutlich erweitertes Aufgabenspektrum abdecken müssen, sind auch hier entsprechende Werkzeugwechselsysteme vorgesehen.

## 4. Fazit und Ausblick

Die Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Datenverarbeitung rücken die Realisierung einer industriellen Demontagefabrik technisch und wirtschaftlich in den Bereich des Möglichen. Wie dargestellt, hängt die Wirtschaftlichkeit bei gegebenen EoL-Produkten, neben den für die erzeugten Produkte, Bauteile oder Konzentrate erzielbaren Preisen, wesentlich von den Kosten der Demontage ab. Je schneller der Demontageprozess, desto geringer ist der entsprechende Kostenaufwand. Die Automatisierung der Demontage kann daher eine positive Gesamtbilanz für ein Spektrum an Anwendungsfällen ermöglichen, bei denen die manuelle Demontage nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Eine hohe Flexibilität des Demontagesystems ist dabei notwendig, um bei variierender Zusammensetzung des Inputs eine stabile Auslastung zu gewährleisten.

Flexibilität und Geschwindigkeit werden wesentlich durch die aktuelle digitale Bildverarbeitung ermöglicht. Einerseits hat die optische Datenerfassung im dreidimensionalen Raum eine Auflösung erreicht, die ein hochpräzises Erfassen der Werkzeugansatzpunkte ermöglicht. Andererseits macht es die fortschreitende Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeiten gleichzeitig möglich, die dadurch erzeugten Datenmengen zeitnah zu verarbeiten. Neben der Demontage führt diese Entwicklung im Recyclingbereich beispielsweise auch zur Entwicklung schneller und präziser Multisensorsysteme für automatische Sortierstrecken [4, 11].

Die Idee, durch Demontage von EoL-Produkten Fortschritte hin zu einer Kaskadennutzung und damit zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft zu erreichen, ist nicht neu. Der aktuelle Stand der digitalen Datenverarbeitung schafft jedoch erstmals eine Ausgangslage, in der diese auch aus wirtschaftlicher Sicht interessant wird. Im Rahmen des Projekts *Industrielle Demontagefabrik 4.0* werden Grundlagen geschaffen, die eine notwendige Basis für die Ausweitung der Demontage auf weitere Produktgruppen darstellen.

Wir danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die Förderung der Projekte.

## 5. Literatur

- [1] Erdmann, L.; Behrendt, S.; Feil, M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland *Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte*. Berlin: adelphi, 2011, 134 S.
- [2] Europäische Kommission: Report on Critical Raw Materials for the EU - Critical Raw Materials Profiles. Brüssel: Europäische Kommission, 2014, 202 S.
- [3] Faulstich, M.; Benker, B.; Seelig, J. H.; Franke, M.; Reh, K.: Demontagefabrik im urbanen Raum – Erweiterte Stoffstromanalyse, Abschlussbericht. Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC), veröffentlicht durch: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe, 2015, S. 150
- [4] Flamme, S.: ARGOS – Steigerung des funktionellen Recyclings entlang der Wertschöpfungskette durch Echtzeitanalyse metallreicher Aufbereitungsprodukte. In: CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (Hrsg.): Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe (r4) – ZWISCHENERGEBNISSE. Clausthal, CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum, 2018, 120 S. URL: [https://www.r4-innovation.de/files/Broschuere\\_R4\\_06092018.pdf](https://www.r4-innovation.de/files/Broschuere_R4_06092018.pdf)
- [5] Goldfarb R.; Berger B.; George M.; Seal R.: Critical Mineral Resources of the United States – Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. Professional Paper 1802. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2017, 862 S.
- [6] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [7] Kroop S.; Kaufhold T.; Lohmeyer R.; Mocker M.; Franke M. u. a.: Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg. Sulzbach-Rosenberg: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik. UMSICHT; Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, 2014, 274 S.
- [8] Reuter M.; Hudson C.; van Schaik A.; Heiskanen K.; Meskers C.; Hagelüken C.: Metal Recycling – Opportunities, limits, infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Paris, UNEP Division of Technology, Industry and Economics, 2013, 314 S.
- [9] Seelig, J. H.; Stein, T.; Zeller, T.; Faulstich, M.: Ressourcen- und Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft. In: Kranert, M.; Cord-Landwehr, K. (Hrsg.): Einführung in die Kreislaufwirtschaft – Planung - Recht - Verfahren, 5. Auflage. Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016, S. 47-64. ISBN 978-3834818379
- [10] Spitzbart M.; Schneider F.; Salhofer S.; Stengeli A.; Luger T.: Semimanuelle Demontage von Elektro(nik)-Kleingeräten. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 22/2008, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2008, 91 S.
- [11] STEINERT: E-Schrott Aufbereitung: Kombiniere und sortiere mit der STEINERT KSS. In: recovery Recycling Technology Worldwide 6/2017, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2017. URL: [https://www.recovery-worldwide.com/download/1259473/recovery\\_6\\_2017.pdf](https://www.recovery-worldwide.com/download/1259473/recovery_6_2017.pdf)
- [12] Van der Voet, E., Salminen, R., Eckelman, M., Norgate, T., Mudd, G., Hisschier, R.: Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Paris, UNEP Division of Technology, Industry and Economics, 2013, 232 S.
- [13] Zeller, T.; Birkenfeld, S.; Keich, O.; Nawothenig, B.; Seelig, J. H.: Demontagefabrik im urbanen Raum - Konzeption und Planung, Abschlussbericht. Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC). Karlsruhe: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2016, 221 S.

## Ansprechpartner



**Dipl.-Biol., M. Eng. Jan Henning Seelig**  
CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum  
Ressourcentechnik und -systeme  
Gruppenleiter Stoffströme  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland  
+49 5323-933-280  
jan.seelig@cutec.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel • Olaf Holm • Elisabeth Thomé-Kozmiensky  
Daniel Goldmann • Bernd Friedrich (Hrsg.):  
**Recycling und Rohstoffe** – Band 12

ISBN 978-3-944310-46-6 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2019

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,  
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Claudia Naumann-Deppe,  
Janin Burbott-Seidel, Ginette Teske, Sarah Pietsch, Roland Richter,  
Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Beltz Grafische Betriebe GmbH, Bad Langensalza

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.