

Ein Schritt in Richtung Durchgängigkeit beim Recycling von Automobilbaugruppen

Roboterbasierte virtuelle Demontage

A. Elser, L. Klingel, R. Dannecker, A. Verl

ZUSAMMENFASSUNG Daten aus der CAE-gestützten Fahrzeugentwicklung ermöglichen Planung, Validierung und Durchführung automatisierter Demontage und Sortierung gemäß R-Strategien (Reuse, Recycle, Recover etc.). Der Beitrag behandelt die automatisierte Demontagesimulation auf Basis von Engineeringdaten im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme. Datendurchgängigkeit entsteht durch Anpassung und Verkettung bestehender Teillösungen.

STICHWÖRTER

Industrieroboter, Digitalisierung, Recycling

Robot-based virtual disassembly

ABSTRACT Data from CAE-based vehicle development enables planning, validation, and execution of automated disassembly and sorting according to R-strategies (reuse, recycle, recover, etc.). This paper addresses automated disassembly simulation, based on engineering data within virtual commissioning. Data continuity is ensured by adapting and linking existing partial solutions for the specific use case.

1 Ausgangssituation

Die Kombination schnelllebiger Produkte mit einer konsumgeprägten Gesellschaft und Nachhaltigkeit erfordert das Etablieren einer Kreislaufwirtschaft und die Verwendung von R-Strategien wie Rückgewinnen, Recycling und Wiederverwendung von Materialien sowie Bauteilen. Die dafür geforderte ganzheitliche Planung wurde in Produkten und deren Montage, etwa der Klebe- und Fügetechnik, bisher nicht bedacht. Die Planung der Demontage unter Berücksichtigung der gewählten Nachhaltigkeitsstrategie steht am Anfang. Notwendige Engineering-Daten müssen zur Verfügung stehen und Ausgangspunkt eines möglichst automatisierten Wieder- oder Rückgewinnungsprozesses sein.

Obwohl die Notwendigkeit der Nachhaltigkeit auch im Bereich der Produktionstechnik im Automobilbereich unumstritten ist, geht deren Realisierung nur schleppend voran. Die Kreislaufwirtschaft durchbricht an einigen Stellen etablierte Abläufe, und erfordert damit Umdenken in der Produktionsplanung, Ressourcenplanung, Produktplanung und neue Zusammenschlüsse von Unternehmen, die gemeinsam das Geschäftsfeld der Nachhaltigkeit neu denken. Für viele Unternehmen sind die Hürden groß und das rein finanzielle Potenzial nicht abschätzbar. Um die dringend notwendige Kreislaufwirtschaft in Schwung zu bringen sind daher nicht zuletzt staatliche Fördermaßnahmen gefragt. Jedoch müssen Lösungen vor dem Hintergrund von Fachkräftemangel auch möglichst automatisiert sein. Das vom Land Baden-Württemberg geförderte Projekt „EcoPass3D“ hat durch die finanzielle Unterstützung die Möglichkeit, Geschäftsmodelle, erforderliche Kooperation und Datenräume, sowie die konkrete technische

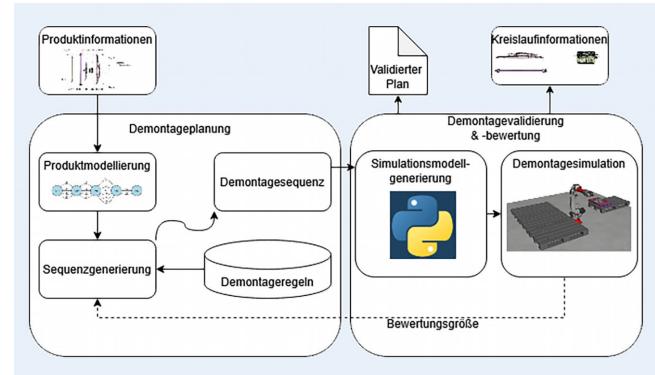


Bild 1 Demontageplanung im Projekt „EcoPass3D“. Grafik: ISW, Universität Stuttgart

Planung und Umsetzung der Demontage auf Basis des digitalen Produktpasses [1] zu untersuchen (Bild 1).

Der Vorgang der Demontage wird auf Basis von Engineeringdaten der Firma Tecosim GmbH in mögliche Demontagesequenzen aufgeschlüsselt. Dabei werden alle notwendigen Daten für eine Demontage extrahiert und die Demontagesequenz in einer Simulation bewertet. Sowohl die Sequenzplanung als auch die Simulation sollen möglichst automatisiert erfolgen. Nach Validierung der Sequenz in der virtuellen Umgebung, sollen konkrete Abläufe und Bewegungsprofile an die reale Anlage übergeben werden können. Nachfolgend werden die Erstellung von Demontagesequenzen, der Simulationserstellung und die Extraktion von technischen Abläufen als Teil des Gesamtprojektes betrachtet.

2 Stand der Technik

Es existieren bereits verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Demontagesequenzen von Baugruppen. Gemeinsam haben sie die Schritte der (i) Modellbildung, die (ii) Sequenzgenerierung oder die Suche nach geeigneten Demontagerienfolgen und zuletzt den optionalen Schritt der (iii) Optimierung. Eine Übersicht zu Demontageplanung mit Roboter ist zum Beispiel in [2] zu finden.

Bei der (i) Modellbildung wird die zu demontierende Baugruppe entsprechend ihrer Bauteile und deren Verbindungen und Verbindungsarten gespeichert. Ziel ist, eine vollständige Datenbasis für die Sequenzgenerierung zu erstellen. Gängige Ansätze sind der graphenbasierte Ansatz, wie von Jungbluth [2] oder Tian [3] gewählt, kombiniert mit objektorientierter Programmierung.

Daneben steht der matrizenbasierte Ansatz, zum Beispiel nach Smith [4]. Letzterer beschreibt das Produkt über vier Matrizen, welche Informationen zu Demontagerichtung, Verbindungen und Zugänglichkeit enthalten.

Graphenbasierte Ansätze zielen auf einen Produktgraphen mit Knoten und Kanten ab, welcher Objekte wie Platten und Deckel in einer Graphenstruktur als Knoten abspeichert und über Verbindungselemente wie Schrauben und Nieten deren Zusammenhänge in Form von Kanten abbildet. Unterschieden wird noch in den gespeicherten Informationen und wie diese erzeugt werden. Dabei kommen manuell Modellierungsschritte beziehungsweise die Informationsgenerierung aus CAD-Software oder CAE-Preprozessoren zum Einsatz. Diese Daten können bereits Verbindungsinformationen enthalten, dennoch muss die Verbindungs-technik bei der Modellierung explizit berücksichtigt werden [5]. Eine Übersicht zur Erstellung von solchen Graphen ist in [6] einzusehen.

Bei der (ii) Sequenzgenerierung wird untersucht, wie das Bauteilmodell in seine Bauteile oder Unterbaugruppen zerlegt werden kann. Es werden kollisionsfrei zugängliche Teile nach-einander ausgewählt und in einer möglichen Demontagesequenz gelistet. Eine solche Zerlegung erfolgt häufig regelbasiert, simulationsbasiert oder durch eine Kombination der beiden Ansätze. Bei einer graphenbasierten Modellierung beziehen sich die Regeln auf die Graphenstruktur, wie etwa auf die Anzahl an Verbindungen von einem Knoten zu einem anderen. Die in den Knoten und Verbindungen gespeicherten Informationen sind entscheidend dafür, welche Regeln und Kriterien zu Demontageplanung herangezogen werden können.

Auf Basis des Produktmodells kann gemäß dem gewählten Optimierungsziel eine (iii) Optimierung erfolgen, wie etwa in [3] über einen Bienenvolkalgorithmus. Durch das Ordnen von Regeln nach ihrer Relevanz ist es möglich, Optimierungskriterien in den Prozess einzubringen. Eine mögliche Optimierungsgröße ist etwa die Anzahl an Werkzeugwechseln, überlagert von Profitmaximierung oder maximaler Materialrückgewinnung [6]. Alternativ zu einer Sortierung der Regeln können durch Regeln Gewichtungen für die einzelnen Verbindungselemente zugeordnet werden, so-dass eine klassische Pfadsuche auf dem gewichteten Graphen durchgeführt werden kann. Herausforderung hierbei ist, wie bei vielen Optimierungen, die Rechendauer zu reduzieren und nicht in lokalen Minima zu konvergieren [6].

Simulationssoftware für die Simulation von Fertigungsanlagen und Maschinen existieren mit verschiedenem Detailgrad beziehungsweise Fokus der Simulation. Prozesssimulationen, wie eine

Frässimulation, fokussieren auf Details im Prozess und weniger auf den Ablauf. Eine Finite-Elemente-Simulation wird etwa eingesetzt, um die mechanische Belastung von Komponenten zu untersuchen. Ablaufsimulationen bilden Abläufe in Produktionsanlagen ab, sodass Kennzahlen wie Durchsatz und Auslastung einer Anlage schnell ermittelt werden können. Hier liegt der Fokus auf kurze Modellierungs- und Simulationszeiten. Die Bewegungsabläufe werden abstrahiert. Bei der virtuellen Inbetriebnahme-Simulation [7] liegt der Fokus auf realitätsgtreuen Bewegungen und einem zeitlichen Eins-zu-eins-Abbild. Dadurch wird die Modellgenerierung komplexer im Vergleich zur Ablaufsimulation.

3 Die Methode

Für das Projekt wurden eine graphenbasierte Modellierung sowie eine regelbasierte Sequenzgenerierung umgesetzt. Als notwendige Daten für die Sequenzplanung wurden folgende Daten identifiziert: Identifikationsnummer, Masse, Schwerpunkt, Griffpunkt, Information zum CAD, Material und Demontagerichtung. Die Masse wird benötigt, um später eine Energiesimulation zu ermöglichen oder einen Roboter zu dimensionieren. Der Schwerpunkt kann für eine Berechnung von zum Beispiel notwendigen Greifkräften herangezogen werden. Griffpunkt und Demontagerichtung sind essentiell, um eine spätere Roboterbewegung zu erzeugen ohne die CAD-Daten ein weiteres Mal analysieren zu müssen. Die CAD-Daten für jedes Bauteil müssen bereitgestellt werden, um diese in die Simulation laden zu können und dort mögliche Kollisionen berechnen zu können. Wird die notwendige Komponente für das Bauteil-Handling mit angegeben, kann die Demontage hinsichtlich der Anzahl von Werkzeugwechseln optimiert werden. Das Material liefert Informationen zur Wahl der richtigen R-Strategie: Gleiche Materialien müssen möglicherweise nicht voneinander getrennt werden. Zudem können auf Basis des Materials die demontierten Bauteile sortiert werden.

Das Klassendiagramm für die objektbasierte Speicherung dieser Daten ist in **Bild 2** dargestellt.

Bauteile sind zu demontierende Baugruppen oder Einzelteile, die über Verbindungselemente miteinander verknüpft sind. Aus einem Bauteil wird ein Knoten erzeugt, aus einem Verbindungs-element eine Kante. Eingang in den Modellierungsprozess ist eine xml-Datei, welche automatisiert ausgelesen wird und alle bereits genannten nötigen Informationen enthält. Verbindungselemente werden einer Demontageoperation zugeordnet und gewichtet. Die Gewichtung von Kanten führt dazu, dass sichergestellt wird, dass etwa Muttern vor Schrauben entfernt werden. Bauteile werden direkt als Knoten angelegt und entsprechend den in der xml-Datei referenzierten Verbindungselementen verknüpft. Für die Erzeugung einer Demontagesequenz setzt das Projekt auf einen erweiterbaren regelbasierten Algorithmus auf. Der aus den Regeln entstehende Ablauf ist in **Bild 3** dargestellt.

Der Grad eines Knotens ist dabei definiert über die Anzahl an Verbindungen, die zwischen diesem Knoten und weiteren Knoten bestehen. Knoten mit einem geringeren Grad werden stets bevorzugt. Potenzielle nächste Knoten für die Sequenz sind solche, die nur mit einem weiteren Knoten verknüpft sind. Gibt es nach dem Regelwerk gleichrangige Knoten, wird zufällig ein Knoten ausgewählt. Das Konzept sieht Mehrfachverknüpfungen zwischen Kan-ten, die Verknüpfung mehrere Bauteile über ein Verbindungselement (wie Schrauben) sowie Verbindungen, die mehrere Demontageschritte umfassen (wie Schrauben und Muttern), vor. Es ist

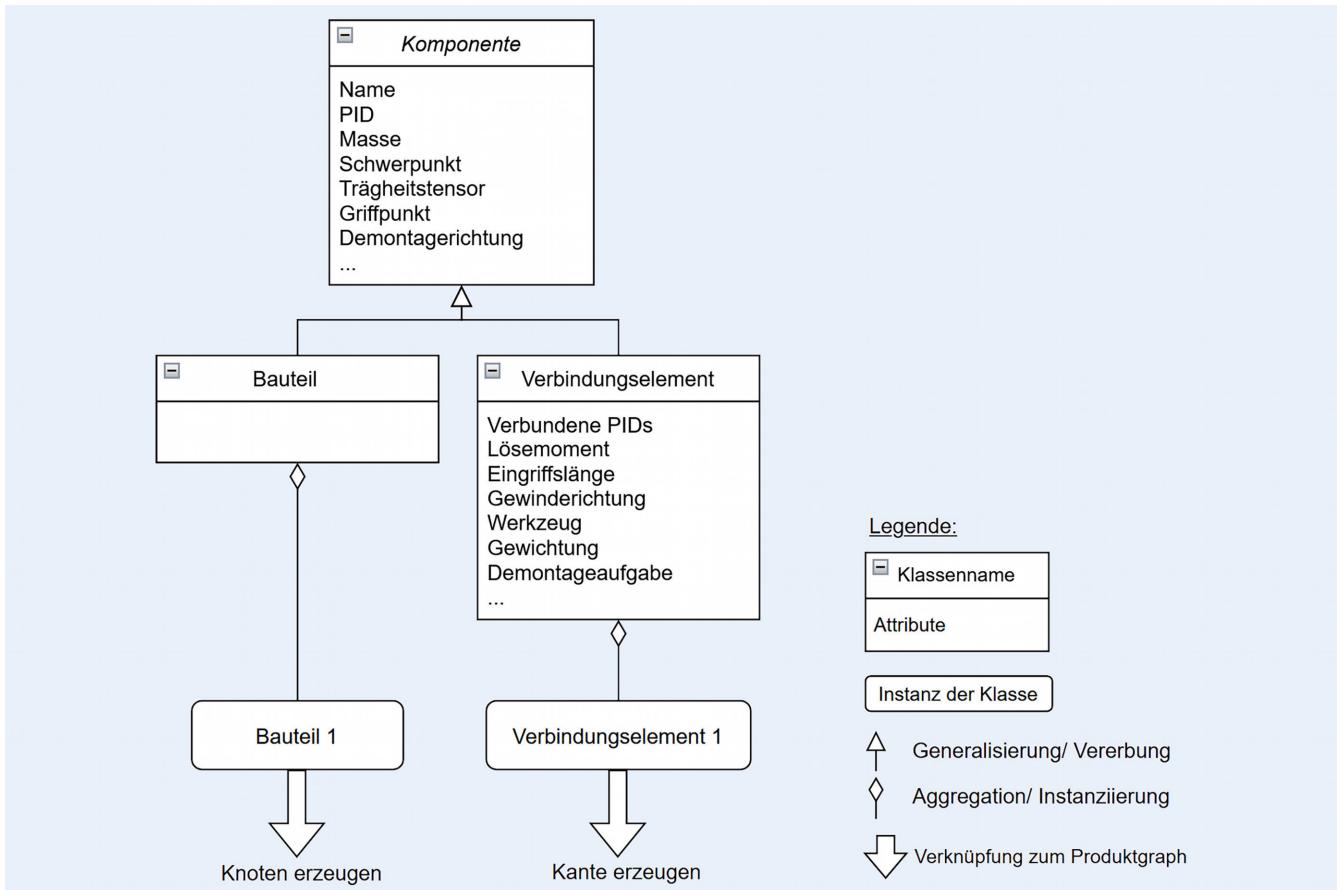


Bild 2 Klassendiagramm für die Datenspeicherung im Produktgraphen. *Grafik: ISW, Universität Stuttgart*

jedoch auf lösbare Verbindungen beschränkt. Fälle wie beispielsweise, dass eine Schraube nicht zerstörungsfrei gelöst werden kann, werden im ersten Schritt nicht betrachtet. Der Produktgraph kann nachträglich durch den Anwender so angepasst werden, dass ausgewählte Bauteile zusammengefasst werden. Dieser Schritt unterstützt das Zusammenfassen gleicher Materialien und erlaubt so die Optimierung entsprechend der besten R-Strategie. Zusätzlich kann ausgewählt werden, welches Bauteil als erstes oder letztes demontiert werden soll. Insofern ist das derzeit vorhandene Regelwerk als Minimallösung zu interpretieren, es können weitere Regeln und Demontageoperationen hinzugefügt werden. Für den gewünschten Prototypen im Projekt war das gewählte Regelwerk auseichend.

Ist eine konkrete Demontagesequenz definiert, soll diese verwendet werden, um eine Demontagesimulation zu erstellen. Es wird in einem ersten Schritt davon ausgegangen, dass die Demontagezelle an sich bereits definiert und modelliert ist. Für die Demontage wird ein Roboter verwendet, sodass der Fokus bei der Modellgenerierung auf der Bewegungsgenerierung des Roboters liegt. So können Demontagezeiten, etwaige Kollisionen oder etwa Energiebedarfe aus der Simulation extrahiert werden. Für die Bewegungserzeugung wird die Demontagesequenz eingelesen und die durchzuführenden Schritte werden nacheinander abgearbeitet. Positionen von Ablageflächen etwa für verschiedene Materialien, die Art der Ablage und der verwendete Roboter müssen zu Beginn definiert sein. Ablageflächen können in Form von Förderbändern (dynamisch) sein und haben in diesem Fall nur einen Ablagepunkt. Handelt es sich um (statische) Paletten, wird die

Ablageposition dynamisch angepasst. Es ist bereits vorgesehen, verschiedene Roboter verwenden zu können. Daher werden Roboterbewegungen zuerst funktional definiert und erzeugt (wie homing(), moving(), gripping()). Je nach gewähltem Roboter wird diese Bewegung dann in einem Roboterprogramm für die Simulation erzeugt. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass bei Wahl des realen Roboters das Roboterprogramm für die jeweilige Zielsteuerung erzeugt werden kann.

Bei der Optimierung der Demontagesequenz gibt es zwei Varianten. Zum einen kann die Optimierungsgröße bereits im Produktgraphen hinterlegt sein und so eine klassische Optimierung auf Graphen durchgeführt werden. Zum anderen ist es möglich, eine Sequenz zu erstellen, diese in Roboterbewegungen zu übersetzen und Werte der Simulation (wie Dauer oder Kollision) zu verwenden, um die Sequenz zu bewerten.

4 Das Ergebnis

Im Projekt EcoPass3D wird beispielhaft ein Kühler als Baugruppe betrachtet. Dieser ist in **Bild 4** dargestellt, die einzelnen Bauteile sind der Explosionsansicht in **Bild 5** zu entnehmen.

Entsprechend dem Vorgehen aus Kapitel 2 ergeben sich ein Produktgraph nach **Bild 6** und die Demontagesequenz (12, 14, 16, 18, 31, 131, 32, 132, 33, 133, 4033, 34, 134, 4051, 4052, 11, 13, 15, 17, 4050, 4044).

Die notwendigen Daten wurden von der Firma Tecosim GmbH aus CAE-Daten extrahiert und zur Verfügung gestellt. Für die Simulation wurde die Software "ISG-virtuos" eingesetzt, eine

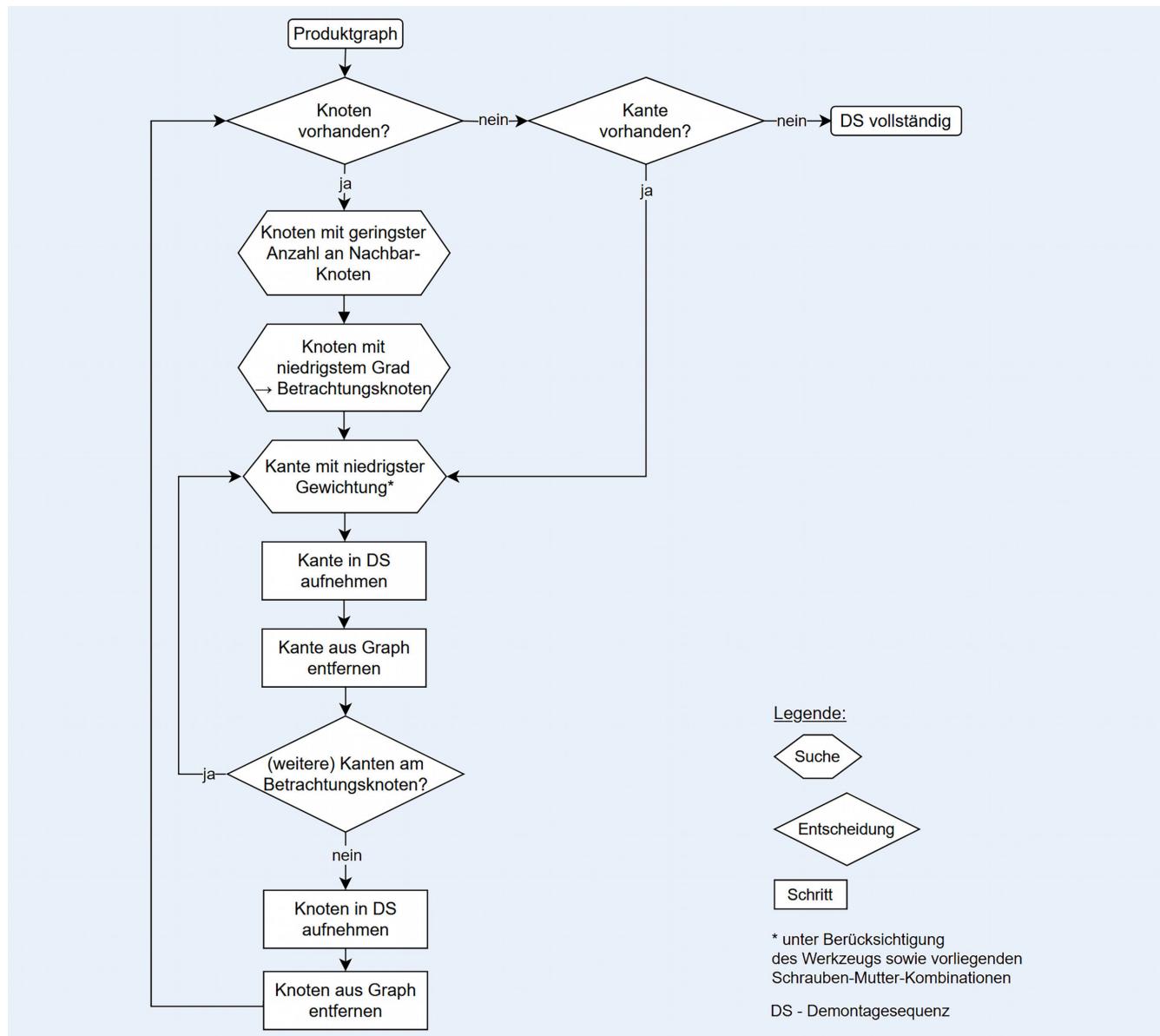


Bild 3 Ablaufdiagramm zur Erstellung des Produktgraphen. *Grafik: ISW, Universität Stuttgart*

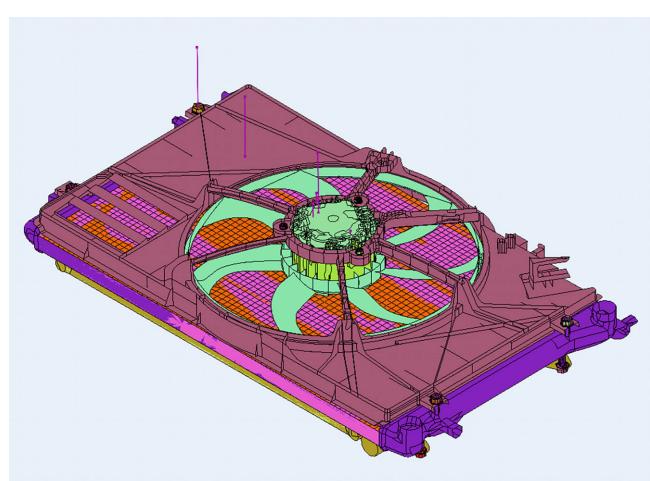


Bild 4 Beispielbaugruppe. *Grafik: ISW, Universität Stuttgart*

Software für die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) von Anlagen und Maschinen. Im Bereich der Robotik bietet sie die Möglichkeit, innerhalb der 3D-Umgebung einen Roboter zu teachen, ähnlich dem Vorgehen an der realen Anlage. Dafür ist es, entgegen dem sonstigen Vorgehen bei der VIBN, nicht notwendig, eine Steuerung an die Simulation anzubinden. Diese Funktion wird verwendet, um Roboterbewegungen zu erzeugen. Jedoch wird die Bewegung nun programmatisch, auf Basis des in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehens, zuerst abstrakt und anschließend für den konkreten Roboter erstellt. So ist kein manuelles Teachen mehr nötig, die Simulation wird automatisch erstellt.

Die Simulation wurde sowohl mit einem industriellen Sechs-Achs-Roboter als auch einem Delta-Roboter, der in Realität auch im Projekt zur Verfügung steht, erstellt. **Bild 7** zeigt die Kombination dieser Roboter in der Simulation einer Demontageanlage.

Der Sechs-Achs-Roboter legt Bauteile auf Paletten ab, während der Delta-Roboter auf Förderbänder ablegt. Zu Beginn der Simulation wird der Kühler in die Simulation geladen. Anschließend

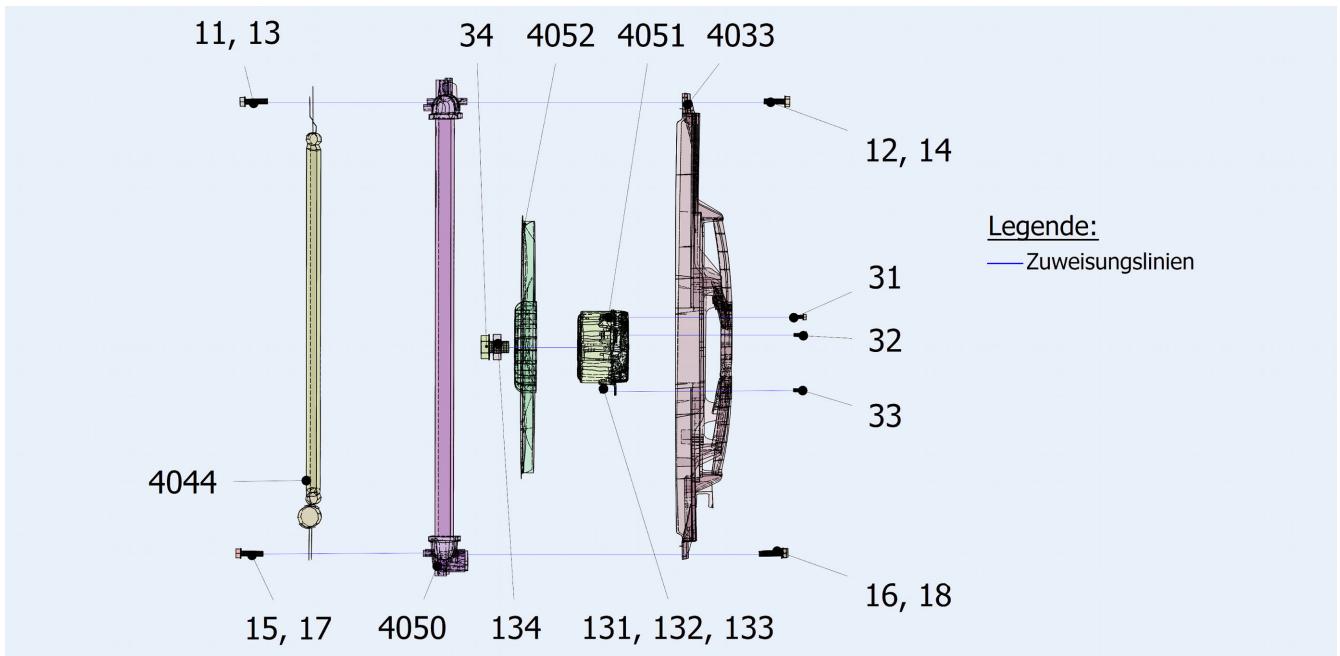


Bild 5 Bauteile der Beispielbaugruppe. Grafik: ISW, Universität Stuttgart

startet der Roboter die Demontage entsprechend der Sequenz. Die demontierten Bauteile werden entsprechend des abgespeicherten Materials sortiert.

5 Zusammenfassung

Im Projekt wurde erfolgreich eine automatische Planung und Simulation einer Demontage auf Basis von CAE-Daten durchgeführt. Die automatisierbare Demontageplanung und Demontagedurchführung dient als Grundlage für die R-Strategien Refurbish und Remanufacturing.

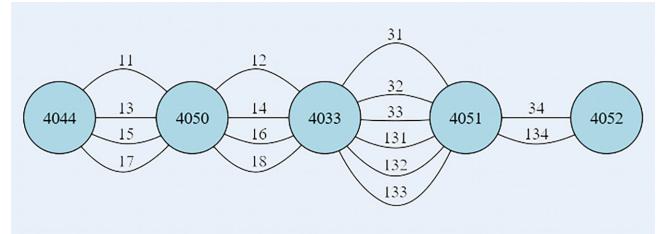


Bild 6 Demontagesequenz für Beispielbaugruppe.
Grafik: ISW, Universität Stuttgart

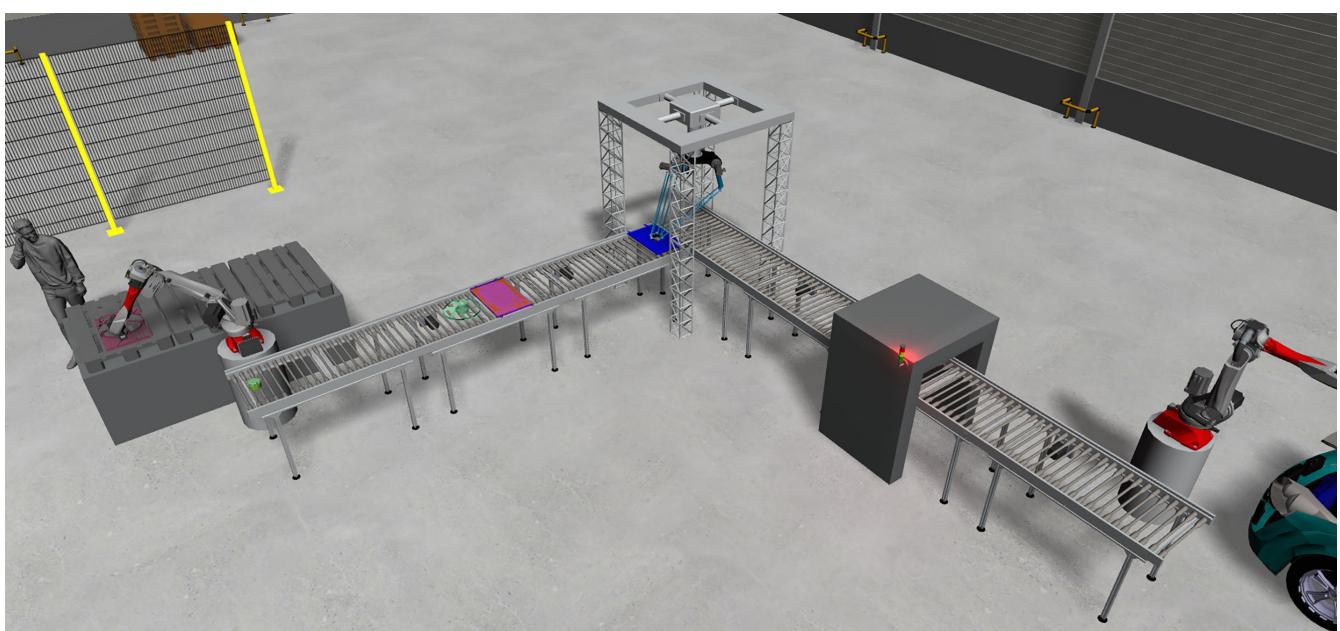


Bild 7 Simulationsmodell der Demontageanlage mit industriellem Delta-Roboter und zwei Sechs-Achs-Robotern.
Grafik: ISW, Universität Stuttgart und ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH

Eine denkbare Erweiterung ist die genannte Rückführung von Simulationsdaten in die Sequenzplanung. Die Ausführung der Bewegungen mit einem realen Roboter steht noch aus, wird aber im Projekt ohne tatsächliches Greifen beziehungsweise Demontieren umgesetzt werden. Eine reale Demontage erfordert eine intensive Betrachtung von Greiftechnik und Modellunsicherheiten.

FÖRDERHINWEIS

Der Inhalt dieses Beitrags ist überwiegend Ergebnis des Projektes EcoPass3D, gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg als Teil des Invest BW „GreenTech“ Innovationsförderprogramms.

LITERATUR

- [1] Werner, A.; Schuseil, F.; Hämerle, M. et al.: Modular Digital Twin – an approach for generating and exploiting product sustainability information towards service-oriented business models. *International Journal of Production Research* 63 (2024) 3, pp. 992–1010, doi: [org/10.1080/00207543.2024.2366997](https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2366997)
- [2] Jungbluth, J.: Entwicklung eines intelligenten, robotergestützten Assistenzsystems für die Demontage industrieller Produkte. PhD Thesis, Unilu – University of Luxembourg, Luxembourg, 2019
- [3] Tian, G.; Ren, Y.; Feng, Y. et al.: Modeling and Planning for Dual-Objective Selective Disassembly Using AND/OR Graph and Discrete Artificial Bee Colony. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15 (2019) 4, pp. 2456–2468, doi.org/10.1109/TII.2018.2884845
- [4] Smith, S. S.; Chen, W.-H.: Rule-based recursive selective disassembly sequence planning for green design. *Advanced Engineering Informatics* 25 (2011) 1, pp. 77–87
- [5] Neb, A.: Methodik zur automatischen Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell. Dissertation, Universität Stuttgart, 2023
- [6] Asif, M. E.; Rastegarpanah, A.; Stolkin, R.: Robotic disassembly for end-of-life products focusing on task and motion planning: A comprehensive survey. *Journal of Manufacturing Systems* 77 (2024), pp. 483–524
- [7] Scheifele, C.; Verl, A.; Riedel, O.: Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems. *Procedia CIRP* 79 (2019), pp. 397–402

Dr.-Ing. Anja Elser 

ISW, Universität Stuttgart  und
ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH
Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart

Lars Klingel, M.Sc. 
lars.klingel@isw.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl 
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen (ISW)
Universität Stuttgart
Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart
www.isw.uni-stuttgart.de

Dr. Robert Dannecker 
TECOSIM GmbH
Industriestr. 3, 70565 Stuttgart
www.tecosim.com

LIZENZ



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