

Demontage von Elektroantrieben mit Assistenzrobotern zum wirtschaftlichen Recycling

Von Jan Jungbluth¹, Wolfgang Gerke², Peter Plapper³

1 Einleitung

Die zerstörungsfreie Demontage zum Zweck der Refabrikation oder des höherwertigem Produktrecyclings findet nur selten im industriellen Umfeld Anwendung. Allerdings ist mit einem Anstieg dieses trennenden Fertigungsverfahrens in naher Zukunft zu rechnen da die immer stärker begrenzten und zugänglichen Ressourcen durch strengere Gesetze im Rahmen der Abfallwirtschaft gesichert werden müssen. Zum Beispiel wurden durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz der europäischen Union [1] die Hersteller dazu verpflichtet Rücknahmesysteme für elektrische und elektronische Geräte zu schaffen um sie einer weiteren wirtschaftlichen Nutzung oder umweltgerechten Entsorgung zugänglich zu machen. Für die umweltgerechte Entsorgung ist eine wertstoffgerechte Trennung der Produktkomponenten vorgesehen. Aus wirtschaftlichen Gründen erfolgt diese Materialtrennung meist verfahrenstechnisch durch Zerkleinern und Sortieren der Wertstoffe. Die weitere wirtschaftliche Nutzung ganzer Komponenten wird, trotz hoher Einsparpotenziale [2], durch den Aufwand der Refabrikation kaum in Betracht gezogen. Denn die zerstörungsfreie Trennung kann bisher meist nur manuell und damit kostenintensiv erfolgen. In der Folge werden gerade im Bereich der Elektroschrottverwertung häufig illegale Entsorgungswege über das außereuropäische Ausland gewählt [3].

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Demontage bietet oft die Automatisierung Lösungen. Um diesen Sektor der Automatisierung zugänglich zu machen, erfolgten bereits Forschungsaktivitäten zur Automatisierung der Demontage von Fernsehgeräten [4] und PCs [5]. Das Ergebnis dieser Studien zeigt, dass durch die hohe Variation der Produktgestalt oder aufgrund von Beschädigungen der Produkte, der automatische Demontageprozess nicht bzw. nicht vollständig automatisiert beherrschbar ist.

1.1 Sammelkonzept

Die Studien [4,5] orientierten sich an gängigen Recycling Konzepten der stofflichen Verwertungsbetriebe die zentrale Sammelstellen zur Altgeräteentsorgung betreiben. In diesen Sammelstellen kommen Produkte verschiedenster Hersteller, in unterschiedlichen Varianten zusammen und es liegen keine Kenntnisse über den genauen Aufbau der Altgeräte vor. Die gesammelten Elektrogeräte sind vielfach unterschiedlich aufgebaut und eine Verfahrensweisung zur Demontage existiert nicht. Es ist daher sehr aufwendig ein Automatisierungskonzept zu entwickeln, dass jede Produktgestalt berücksichtigt. Erfolgreicher scheint eine herstellerkontrollierte Kreislaufwirtschaft die durch Sammelstellen beim Endkunden die Rückführung der Altgeräte zur herstellereigenen Verwertung übernimmt. Da Hersteller über detaillierte Kenntnisse des Produktaufbaus verfügen und darüber hinaus die demontagegerechte

¹ Jan Jungbluth, M. Eng., SEW-Eurodrive GmbH & Co KG, Bruchsal

² Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerke, Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Birkenfeld

³ Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper, Universität Luxemburg, Luxemburg

Produktgestaltung direkt beeinflussen können, bietet diese Art der Kreislaufwirtschaft die besten Erfolgsaussichten. Der Hersteller kann zudem den größtmöglichen Nutzen aus dem hochwertigen Produktrecycling, im Sinne des Remanufacturing, erwarten und den unkontrollierten Handel mit Ersatzteilen unterbinden.

1.2 Der Ansatz der Roboter-unterstützten Demontage

Die manuelle Zerlegung ist teuer und stellt meist eine hohe körperliche Belastung für die Demonteure dar. Da der Ansatz einer Vollautomatisierung, zur Entlastung und Rationalisierung, durch die Komplexität der Aufgabe nicht erfolgsversprechend scheint [4,5,7], können hybride Arbeitsplätze mit Roboterassistenzsystemen entlastend wirken und die Produktivität der Demonteure steigern [6,8]. Die Einbeziehung von Robotersystemen in Montagearbeitsplätzen ohne trennende Schutzvorrichtungen wurde durch die Entwicklung kollaborationsfähiger Robotersysteme möglich und ist zurzeit ein populäres Forschungsgebiet mit hohem Marktpotenzial. Man geht bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter davon aus, dass eine sehr günstige Überlagerung bezüglich der Stärken beider „Systeme“ entsteht. Die Vorteile des Menschen liegen besonders in Hinblick auf der Wahrnehmung der Umwelt, dem zielgerichteten Planen und der Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse. Der Roboter hingegen kann erschöpfungsfrei schwere oder monotone Tätigkeiten mit hoher Präzision ausführen. Allerdings fehlen häufig Planungssysteme mit deren Hilfe eine optimierte Mensch-Maschine Zusammenarbeit erzielt werden kann [8]. Es stellt sich die Frage, welche Aufgabe der Roboter bzw. der Mensch in einem bestimmten Prozess übernehmen soll. Die heutigen Assistenzroboter werden zwar auf einfache Weise ähnlich wie Industrieroboter programmiert, doch die Entscheidung der Aufgabenverteilung übernehmen sie nicht. Um die Arbeitsteilung durch Kommunikation zu konkretisieren fehlen im industriellen Umfeld leistungsfähige Mensch-Maschinen-Schnittstellen. Im Folgenden wird ein Planungskonzept für die Mensch Roboter Kooperation bei der Demontage vorgestellt.

Als Beispiel wird ein Elektroantrieb betrachtet. Soll durch einen Roboterassistenten eine Arbeitsunterstützung bei der Demontage möglich sein so kommen heutige Assistenzroboter an die Grenze ihrer Fähigkeiten. Da der Demontageprozess durch den konstruktiven Aufbau des Motors sowie dem Umfang der Demontage bestimmt wird, benötigt der Roboterassistent zur Planung der einzelnen Demontageschritte Informationen über den Aufbau des Motors. Die Informationen über den Aufbau werden durch die Bauteile des Motors sowie deren Verbindungen beschrieben. Da der Demontageprozess durch die schrittweise Auflösung dieser Verbindungen erfolgt, kann aus diesem Informationsmodell eine grobe Demontagesequenz beschrieben werden. Aufbauend auf dieser groben Reihenfolge und der in diesem Schritt zu lösenden Verbindungsart kann in der Detailplanung die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboterassistenten bestimmt werden. Hierfür muss zu der jeweiligen Verbindungsart hinterlegt sein, wie der Roboterassistent unterstützend tätig sein kann. Der Umfang der Assistenz kann dabei beliebig stark ausgeprägt sein. Von Zureichen des benötigten Werkzeugs bis hin zum selbsttätigen Lösen der Verbindung könnte der Assistent, ausgestattet mit den erforderlichen Effektoren, befähigt werden. Der Schwerpunkt dieses Forschungsprojekt liegt in der Entwicklung des hierzu notwendigen informationsverarbeitenden wissensbasierten Systems und der Realisierung der physischen Assistenz für bestimmte Verbindungsarten.

2 Der Demontageagent

Während einfache Roboterprogramme durch die ablaforientierte Programmierung gut darstellbar sind werden komplexere Programme schwer zu programmieren, zu warten und zu erweitern. Die gilt insbesondere für Prozesse ohne starren Ablauf. Hier bieten wissensbasierte Systeme erhebliche Vorteile in der Trennung von Faktenwissen und Informationsverarbeitung. Bei der Wahl der konkreten Architektur des verwendeten wissensbasierten Systems wurde die Form eines Agenten ausgewählt. Die Realisierung des wissensbasierten Systems als Softwareagent erfolgte anhand der notwendige Fähigkeiten und der zukünftigen geplanten Weiterentwicklung des Systems. Die entworfene Struktur des Demontageagenten ist in Bild 1 dargestellt.

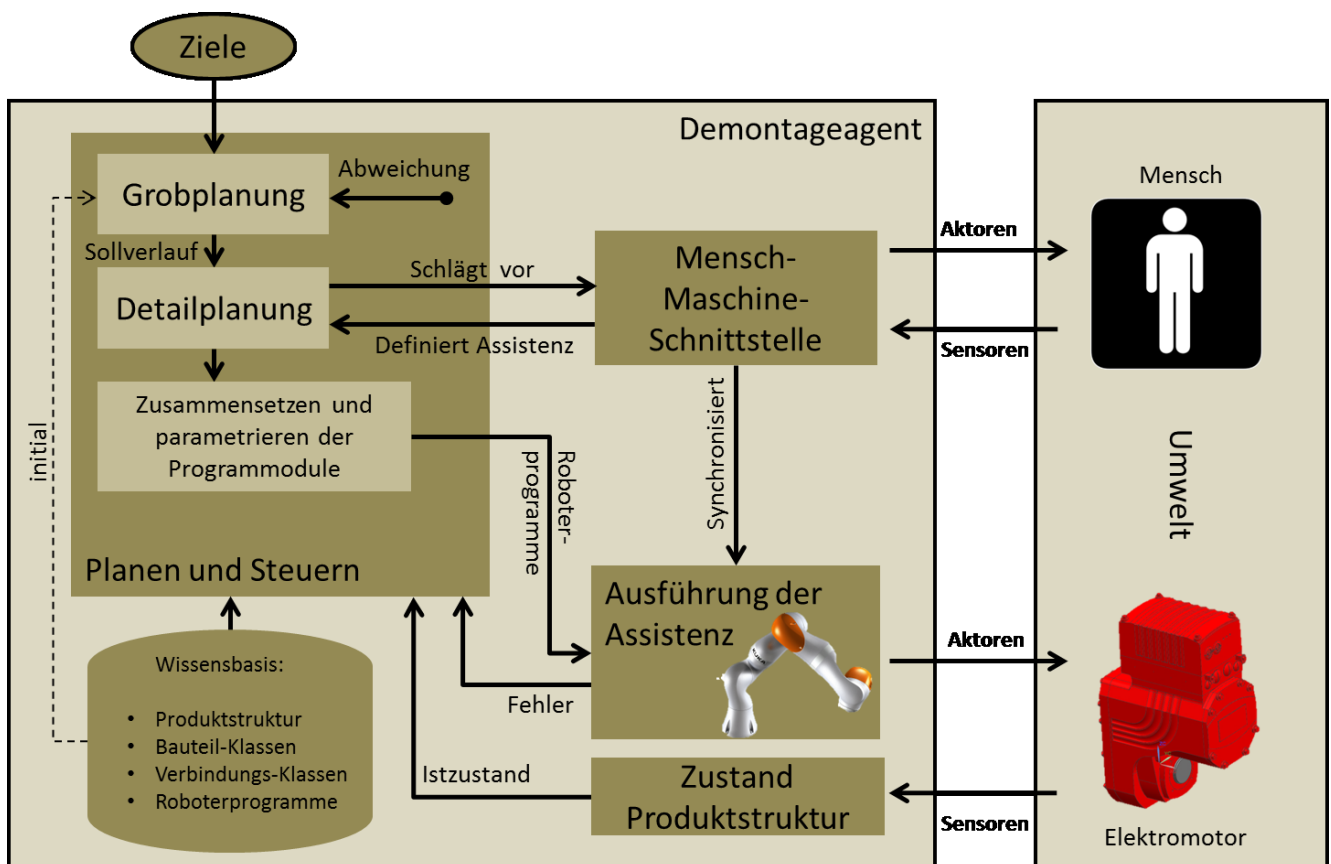


Bild 1: Darstellung der Struktur des Demontageagenten

Die Fähigkeiten zur Kommunikation mit dem Menschen erfolgt durch die Mensch-Maschinen-Schnittstelle des Demontageassistenten. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle wird in dieser Arbeit nicht näher beschrieben, sie wird allerdings als bedeutende Komponente von vorneher einbezogen. Ihre Rolle für den Planungs- und Steuerungsprozess wird an den relevanten Punkten dieser Arbeit angesprochen. Die Softwarekomponente die zum Planen und Steuern der Demontage zuständig ist, kann in drei Detaillierungsebenen unterteilt werden. In der Grobplanung wird die Abfolge einzelner Demontageschritte und -handlungen ermittelt. Hierzu werden Informationen zur Produktstruktur aus der Wissensbasis des Agenten verwendet. Innerhalb der Detailplanung erfolgt für jeden Demontageschritt die Definition der Assistenz, wodurch indirekt die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine festlegt wird. Hierzu werden Informationen über die unterschiedlichen Formen der Assistenz aus der Wissensbasis

verwendet. In der letzten Detaillierungsstufe werden die zur Ausführung der Assistenz benötigten Roboterprogramme erzeugt und parametrieren. Die hierzu notwendigen Parameter sowie Roboterprogrammmodule werden ebenfalls aus der Wissensbasis bezogen und zusammengefügt. Die parametrierten Roboterprogramme werden dann durch den Roboter ausgeführt. Spätere Weiterentwicklungen sollen den Roboterassistenten dahingehend befähigen den Demontagefortschritt zu verfolgen um entstehende Abweichungen zu registrieren und zu melden bzw. selbst zu beheben.

3 Die Wissensbasis

Für wissensbasierte Systeme sind die Art der Wissensrepräsentation und der Verarbeitungsmechanismus entscheidend. Die gewählte Wissensrepräsentation erfolgt, in Form eines gerichteten Graphen, erweitert mit Informationen zu Bauteilen und Verbindungen. Die symbolische Wissensrepräsentation innerhalb der Wissensbasis kann den drei Detaillierungsebenen zugeordnet werden:

- Informationen zur Grobplanung der Demontage.
Hier sind die Bauteile der Baugruppe sowie deren Verbindungen in Form eines gerichteten Graphen dargestellt. Der Graph repräsentiert die Produktstruktur des Elektromotors.
- Informationen zur Detailplanung der Demontage
Zu jeder Verbindungsart sind die verschiedenen Möglichkeiten der Assistenz hinterlegt.
- Informationen zur Ausführung der Assistenz.
Hierzu gehören die Roboterprogramme sowie die Informationen die für die Parametrierung der Roboterprogramme benötigt werden.

Durch den symbolischen Ansatz können die Ergebnisse, z.B. der Demontageplan, direkt vom Menschen interpretiert werden. Außerdem ist der Graph für den Menschen gut verständlich. In Bild 2 ist ein Baugruppenschnitt eines elektrischen Servoantriebs dargestellt, der aus 14 Bauteilen besteht. Der dazugehörige Produktgraph dieses Antriebs ist ausschnittsweise daneben dargestellt. Der Produktgraph kann weitgehend aus den Datenbanken moderner CAD Systeme ermittelt werden. Der Graph in Bild 2 zeigt, dass mehrere Schrauben (1) den Verschlussdeckel (2) befestigen. Unterhalb des Verschlussdeckels befindet sich eine Dichtung mit der Bauteilnummer (3). Der Sicherungsring (4) sichert das Lagerschild (12). In dem Lagerschild befindet sich ein Rillenkugellager (11), das über zwei Sicherungsringe, (8) und (10), gesichert und mit dem Rotor (13) verbunden ist. Magnetträger (8) und Gebermodul (6) sind über die Zylinderschrauben (5) und (7) befestigt.

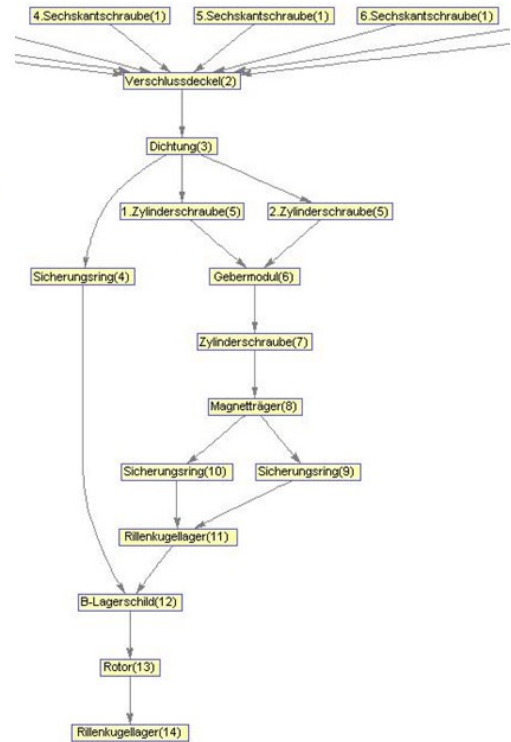
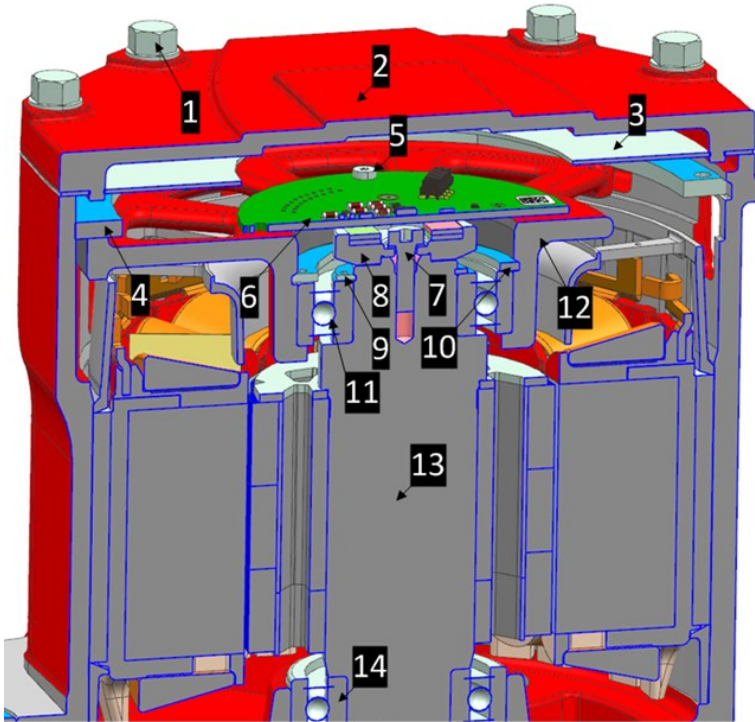


Bild 2: Links: Baugruppenschnitt durch den Elektromotor mit nummerierten Bauteilen. Rechts: Der klassische Produktgraph der den Aufbau des Motors beschreibt.

Die symbolische Darstellung des Motoraufbaus lässt sich mathematisch als geordnetes Paar (V, E) in einem Graphen G darstellen. V stellt die Menge der Knoten in G dar, E die Menge der Kanten. Knoten repräsentieren die Bauteile, die Kanten bilden die Art der Verbindung ab. Im gerichteten Graphen besitzen die einzelnen Kanten $e = (u, w)$ einen Start- (u) sowie Endknoten- (w) . Als Datenstruktur können Graphen als Adjazenzmatrix dargestellt werden. In der Baugruppe, in Bild 3 a), sind zwei Platten durch zwei Schrauben verbunden. Die erste Platte „B“ wird auf die Platte „A“ gelegt und dann mit den Schrauben, benannt mit „C“ und „D“, verschraubt. Die in der Literatur [9,10] verwendete Darstellung des Graphen dieser Baugruppe ist in Bild 3 b) und die zugehörige Adjazenzmatrix in Tabelle 1 (links) dargestellt. In der Adjazenzmatrix sind jeweils in der ersten Zeile (i) und Spalte (j) alle n -Knoten des Graphen aufgetragen. Besitzt ein Matrixelement C_{ij} , mit $(n+1) > i, j > 1$, den Wert 1, dann geht von dem Knoten C_{i1} eine gerichtete Kante zum Knoten C_{1j} . In der Tabelle weiterhin als Werte enthalten ist die „0“, die aussagt, dass es keine Verbindung zwischen den Knoten C_{i1} und C_{1j} gibt, und das Symbol „-“, welches Schleifen im Graph ausschließt. Um den benötigten Informationsgehalt für den Roboterassistenten abzubilden wurde die Adjazenzmatrix mit Bauteilen und Verbindungen erweitert. Der um diese Objekte erweiterte Produktgraph ist in Bild 3 c) und die zugehörige Adjazenzmatrix in Tabelle 1 rechts dargestellt. Die erweiterte Adjazenzmatrix kann somit den Zustand der Baugruppe darstellen und dient zur Grobplanung der Demontage. Die in den Produktgraphen adressierten Bauteile und Verbindungen werden nach einem objektorientierten Ansatz beschrieben. Dazu werden Bauteil- und Verbindungsklassen gebildet, die sich aus Superklassen ableiten.

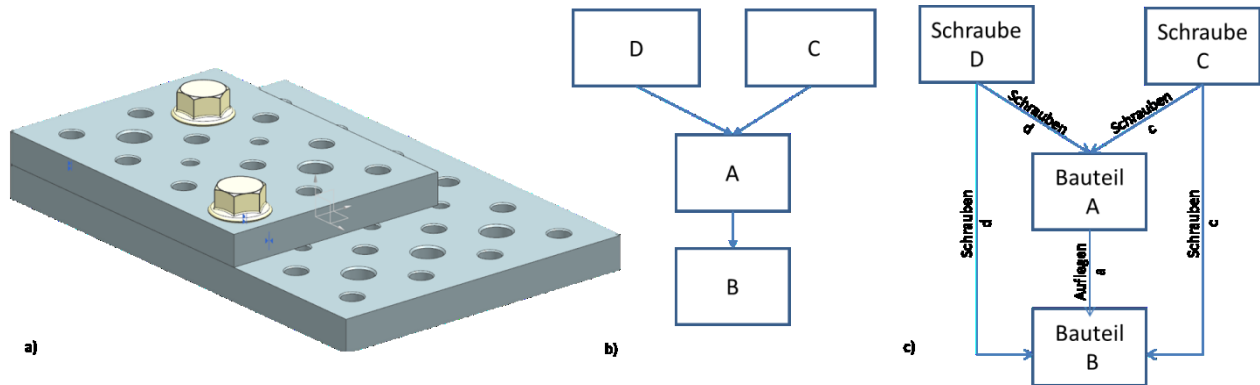


Bild 3: a) Baugruppe bestehend aus den zwei Platten „A“ und „B“ sowie den Schrauben „C“ und „D“. In b) der klassischer und in c) der erweiterte Produktgraphen mit Mehrfachkanten und Bauteil- sowie Verbindungsobjekten.

Kante von / zu	„A“	„B“	„C“	„D“
„A“	-	1	0	0
„B“	0	-	0	0
„C“	1	0	-	0
„D“	1	0	0	-

Kante von \ zu	Bauteil „A“	Bauteil „B“	Schraube „C“	Schraube „D“
Bauteil „A“	-	Aufgelegt a	0	0
Bauteil „B“	0	-	0	0
Schraube „C“	Schrauben c	Schrauben c	-	0
Schraube „D“	Schrauben d	Schrauben d	0	-

Tabelle 1: Links: Klassische Adjazenzmatrix. Rechts: Erweiterte Adjazenzmatrix

3.1 Die Bauteil-Klassen

Jeder Knoten des Produktgraphen enthält ein Bauteil-Objekt das zu einer Klasse von Bauteilen gehört. Unter Bauteile werden alle physischen Körper einer Baugruppe verstanden. Die Einteilung der Bauteile in Klassen trägt zur Repräsentation ihrer Eigenschaften durch Attribute bei. Attribute, die jedes Bauteil besitzt, können in einer Super-Klasse definiert werden, siehe Bild 4. Speziellere Bauteilklassen können dann durch Vererbung diese Basis-Attribute übernehmen und erweitern. Durch die Klasseneinteilung werden Attribute klar definiert und eine einfache Erweiterung der Wissensbasis um neue Bauteile, mit neuem Informationsgehalt, ist möglich. Neben dem Vorteil der Informationskapselung kann die Wissensbasis dadurch leicht mit den Fähigkeiten des Assistenten „mitwachsen“. Ähnlich zu den Bauteil-Klassen werden Klassen von Verbindungen definiert und den Kanten zugewiesen.

3.2 Die Verbindungs-Klassen

Die Art der Verbindung zwischen zwei Bauteilen bestimmt die Vorgehensweise bei der Demontage. Um die Verbindungsarten zu klassifizieren wurde die Norm DIN 8593 (Fertigungsverfahren-Fügen) verwendet und um weitere Verbindungsarten erweitert. Verbindungen die zwischen Bauteilen definiert werden, besitzen mindestens einen Start- und einen Endknoten und schränken je nach Art die Bewegungsfreiheitsgrade der Bauteile ein. Attribute der Verbindungs-Superklasse, dargestellt in Bild 4, sind weiterhin die eindeutige Identifikationsnummer und die Lösepriorität. Sind z.B. mehrere Verbindungen definiert legt die Lösepriorität fest, welche Verbindung innerhalb eines Demontageschritts zuerst gelöst wird. Eine besondere Bedeutung, die in Kapitel 4.2 näher beschrieben wird, besitzen die Methoden der Verbin-

ungs-Klassen. Ein Verbindungsobjekt das mehrere Bauteile verbindet wird als Mehrfachkante dargestellt. Damit konnte der Aufbau einer Baugruppe wesentlich besser abgebildet werden.

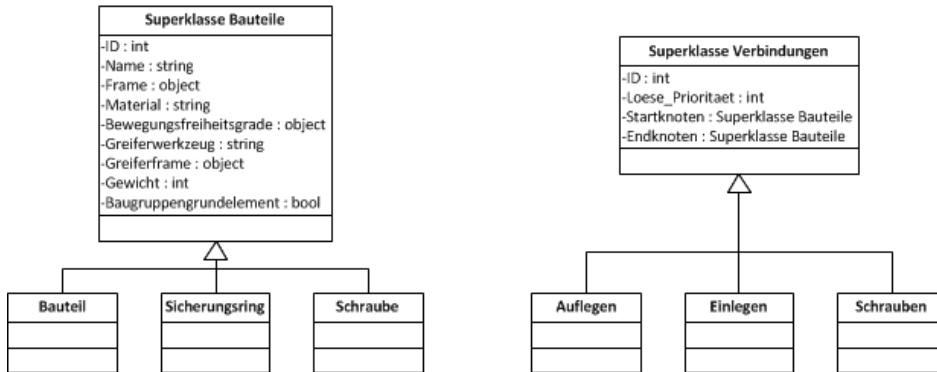


Bild 4: Dargestellt sind die Superklassen der Bauteile und der Verbindungen sowie jeweils drei abgeleitete Klassen(ohne weitere Parameter) in UML Notation.

4 Planen und Steuern

4.1 Die Grobplanung der Demontage

Die Demontage kann sehr grob dadurch beschrieben werden, dass alle Verbindungen zwischen den Bauteilen gelöst und die losen Bauteile entfernt werden müssen. Um die Demontage grob zu beschreiben ist also eine Liste der Verbindungen gesucht, deren schrittweise Trennung die Bauteile freilegt um sie dann zu entfernen. Soll nicht die ganze Baugruppe demontiert werden, sondern nur ein bestimmtes Bauteil, z.B. im Rahmen einer Instandsetzung, dann muss die Baugruppe nicht vollständig zerlegt werden. Aus diesem Grund findet die Grobplanung der Demontage anhand eines Zielbauteils statt. Soll die vollständige Demontage einer Baugruppe erfolgen, kann als Zielbauteil das Grundelement der Baugruppe angegeben werden. Als Grundelement einer Baugruppe wird das Bauteil bezeichnet an dem alle anderen Bauteile befestigt sind. Am Beispiel des Elektromotors wäre dies das Gehäuse. Die Grobplanung beinhaltet die Ermittlung einer Sequenz von Demontageschritten mit dem Zielbauteil als letztes zu demontierendes Bauteil. Die Demontagesequenz wird mit Hilfe des Produktgraphen anhand von Pfaden beschrieben. Gültige Pfade beginnen an Knoten ohne eingehende Kante(n) und enden im Knoten des Zielbauteils. Günstiger als die Vorwärtsberechnung dieser Pfade ist die rekursive Berechnung ausgehend vom Zielknoten. Der grobe Demontageplan zur Demontage des Bauteils A aus der Baugruppe, dargestellt in Bild 3 a), ist in Tabelle 2 abgebildet.

Demontageschritt	Zu lösende Verbindung	Zu entfernendes Bauteil
1	Schrauben d	Schraube D
2	Schrauben c	Schraube C
3	Aufgelegt a	Bauteil A

Tabelle 2: Grober Demontageplan der Baugruppe in Bild 3 a)

4.2 Die Detailplanung der Demontage

Ziel der Detailplanung ist es die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine genauer zu definieren. Hierzu wurden im Vorfeld, bei der Erstellung der Verbindungsklassen, bereits verschiedene Arten der Arbeitsteilung ermittelt und als Methoden der Verbindungsklasse hinterlegt. In Tabelle 3 werden ausschnittsweise die Methoden der Schraubenklasse beschrieben. Innerhalb eines Demontageschritts werden anhand der vorliegenden Verbindungsklasse diese Methoden geladen und als mögliche Unterstützung vorgeschlagen. Der Mensch definiert die gewünschte Art der Assistenz über die Mensch-Maschinen-Schnittstelle. Die Modalität wie diese Kommunikation stattfindet wird in dieser Arbeit nicht näher ausgeführt. Einfach wäre es durch ein Terminal die Art der Assistenz zu definieren. Als langfristiges Ziel und als sehr erfolgsversprechend, wird die Definition der Assistenz über die Beobachtung und Interpretation des menschlichen Verhaltens (Gestik) angesehen.

Methode	Beschreibung der Assistenz
be_idle	Der Assistent soll nichts tun.
inform	Information zum Demontageschritt können angezeigt werden. Zum Beispiel welche Schraube (Bild) gelöst und entfernt werden soll.
hand_tool	Der Assistent kann das richtige Werkzeug dem Menschen zureichen.
loosen_the_screw	Der Assistent kann die Schraube lockern.
grap_and_remove_the_screw	Der Mensch kann die Schraube lösen und der Assistent kann die Schraube entfernen.
loosen_and_remove_the_screw_completely	Der Assistent kann die Schraube lösen und entfernen.

Tabelle 3: Dargestellt sind die Methoden der Verbindungsklasse „Schrauben“ sowie eine kurze Beschreibung der Assistenz die sie bieten.

5 Anwendungsbeispiele

Durch die Wahl der Methode der Verbindungsklasse wird der weitere Ablauf der Prozesssteuerung festgelegt. Die für die Ausführung der Assistenz notwendigen Roboterprogramme liegen in einer Programmbibliothek vor und werden den gewählten Methoden der Verbindungsklasse zugeordnet. Am Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier, wurden Programmbibliotheken erstellt um Experimente zur Demontage durchzuführen.

Die untersuchten Demontagehandlungen am Elektromotor sind das Lösen von Schraubenverbindungen, das Lösen von Sicherungsringen sowie das Entfernen der Schrauben (1) Sicherungsringe (9) und des Verschlussdeckels (2) (siehe Bild 2). Die Roboterapplikationen zum Lösen von Schraubenverbindungen mit dem Fanuc Industrieroboter (M-900iA/350) soll kurz dargestellt werden.

5.1 Lösen von Schraubenverbindungen

Der Industrieroboter führt den in Bild 5 dargestellten Effektor. An diesem Effektor angebracht sind ein elektrischer Schrauber, ein Zwei-Fingergreifer, ein Saugglockengreifer sowie eine Kamera. Der Einbauschrauber wurde dabei an einem speziellen für diesen Anwendungsfall entwickelten RCC (Remote center of compliance)-Modul befestigt. Dadurch können Ungenau-

igkeiten bei der Positionierung ausgeglichen werden. Der zu demontierende Elektromotor befindet sich in einer Haltevorrichtung. An der Halterung sind weiterhin ein Nuss- und Bitwechsler sowie mehrere Beleuchtungsquellen befestigt. Über der Haltevorrichtung befindet sich eine zweite ortsfeste Kamera. Der Gesamtprozess wird zentral über einen Prozessrechner gesteuert.



Bild 5: Rechts dargestellt sind der Industrieroboter und der angebrachte Effektor. Links ist die Haltevorrichtung dargestellt.

Als Referenzprozess soll der Ablauf beim Lösen von Schraubenverbindungen dargestellt werden.

- Schritt 1: Über die ortsfeste Kamera wird ein Bild erzeugt. Durch die Bildverarbeitung wird die Lage des Elektromotors erkannt.
- Schritt 2: Die am Werkzeug befestigte Kamera wird zu Detail-Bildaufnahmepose für jede Schraube gefahren.
- Schritt 3: Der Roboter fährt eine Startposition oberhalb der Schraube an.
- Schritt 4: Dann erfolgt die Anfahrt der Schraubenposition mit reduzierter Geschwindigkeit in Richtung der negativen Z-Achse der Schraube bis die Spindel des Einbauschraubers den festgelegten Einfederweg erreicht hat.
- Schritt 5: Durch ein digitales Signal der Robotersteuerung an die Schrauber-Steuerung wird das Entschraubprogramm gestartet.
- Schritt 6: Ist die Schraube vollständig gelöst fährt der Roboter auf einen Abfahrpunkt über der Schraube.

Die Schritte 3 bis 6 werden für alle Schrauben wiederholt.

5.2 Ergebnisse der Experimente

Die Objekterkennung der überlackierten Schrauben stellte die erste große Herausforderung dar. Diese Problemstellung konnte durch eine Dunkelfeldbeleuchtung entschärft, jedoch nicht vollständig gelöst werden. Zur Lösung des Problems könnte der Schutz der Schraubenköpfe bei der Lackierung empfohlen werden. Beim Lösen der Schraubenverbindungen ist das Einfädeln des Schrauberbits auf den Schraubenkopf zu beachten. Auch der Verschlussdeckel konnte mit dem Sauglockengreifer ohne Probleme entfernt werden. Die Versuche zum

Entfernen von Sicherungsringen zeigen jedoch deren komplexen Charakter. Um die 1,5 Millimeter im Durchmesser messenden Augen der Sicherungsringe exakt zu treffen genügte die Absolutgenauigkeit der verwendeten Robotersysteme nicht aus. Zur weiteren Verbesserung der Prozesse finden weiterhin Versuche statt.

6 Ausblick

Da die Ressourcenschonung in der Zukunft immer wichtiger wird, müssen allgemeingültige Konzepte zur Abfallwirtschaft entwickelt werden. Nicht jedem Hersteller wird es möglich sein eigene Rückführungssysteme zu unterhalten. Die zentralen Sammelstellen der Verwertungsbetriebe könnten hier die roboterunterstützte Demontage übernehmen unter der Voraussetzung, dass die Hersteller das hierzu notwendige Wissen verfügbar machen würden. Das Wissen könnte in intelligenten Produkten hinterlegt oder durch einen Webservice vom Hersteller abgerufen werden. Hierzu müssen allerdings eine umfangreiche Standardisierung der Wissensdarstellung und der Demontageprozesse stattfinden. Weitere Forschungsaktivitäten im Bereich der roboterunterstützten Demontage sind vorgesehen und zielen auf die Detaillierung der Wissenserstellung und -darstellung sowie der Steuerung bei der Zusammenarbeit von Mensch und Assistenzroboter ab.

7 Literatur

- [1] Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte
- [2] ZF Friedrichshafen AG, Die nachhaltige Alternative - Remanufacturing in Erstausrüsterqualität, Broschüre
- [3] Huisman, J., Botezatu, I., Herreras, Countering WEEE Illegal Trade (CWIT) Summary Report, Market Assessment, Legal Analysis, Crime Analysis and Recommendations Roadmap, August 30, 2015, Lyon, France
- [4] Hohm, K., Müller Hofstede, H., Tolle, H., Robot Assisted Disassembly of Electronic Devices, Proceedings of the ZOOO IEEE/RSJ, Page 1273 - 1278.
- [5] Nave, M., Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen, Dissertation Technische Universität Dortmund, 2003.
- [6] Frey, C., Osborne, M., TECHNOLOGY AT WORK - The Future of Innovation and Employment, Citi GPS: Global Perspectives & Solutions, 2015
- [7] BDU-Projekt: Untersuchungen zur automatisierten Demontage von elektronischen Altgeräten und Bestimmung der Recyclingmöglichkeiten, Technische Universität Braunschweig - Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, 2012.
- [8] Gerke, W., Technische Assistenzsystem: Vom Industrieroboter zum Roboterassistenten, De Gruyter Oldenbourg Verlag, 2015
- [9] Jyh-Cheng Yu, Yi-Ming Li, The Structure Representation for the Concurrent Analysis of Product Assembly and Disassembly, The 9th International Conference on Computer Supported Cooperative Workshop in Design Proceedings, May 24-26, Coventry, UK
- [10] N. S. Ong Y. C. Wong, Automatic Subassembly Detection from a Product Model for Disassembly Sequence Generation, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag London 1999.