



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Entwicklung einer Vorgehensweise zur optimierten Planung von Demontageprozessen diskreter Produkte unter dem Aspekt der Kreislaufwirtschaft

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Markus Steinlechner

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Johannes Hagenauer

Matr.Nr. 1227319



Wien, im April 2022

DD 12

Johannes Hagenauer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im April 2022

Johannes Hagenauer

Johannes Hagenauer

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Benedikt Fuchs bedanken, der mich bei dieser Diplomarbeit betreut hat. Er hat mir hilfreiche Anregungen und immer konstruktive Kritik gegeben, welche mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen hat.

Abschließend möchte ich mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden, welche mich über die gesamte Zeit des Studiums unterstützt und ermutigt haben, bedanken.

Kurzfassung

Eines der Hauptziele der Kreislaufwirtschaft ist es, Produkte und Ressourcen möglichst lange im Kreislauf zu halten. Um dies zu bewerkstelligen, ist es wichtig, die Lebensdauer von Produkten und ihren Teilen zu verlängern. Die existierenden Konzepte, welche sich mit der Verlängerung der Nutzungsdauer einzelner Komponenten beschäftigen, beginnen mit der Demontage. Daher ist eine effiziente Demontageplanung essenziell, um eine Kreislaufwirtschaft effektiv umzusetzen.

Das Ziel diese Arbeit ist es, eine Vorgehensweise zu entwickeln, welche den Demontageprozess eines Produktes unterstützt, indem eine optimale Demontagesequenz berechnet wird. Die entwickelte Logik basiert rein auf den geometrischen Daten eines Produktes und soll es Unternehmen erleichtern, einen Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft zu machen.

Anhand einer Systematischen Literaturanalyse, welche Literatur der letzten 20 Jahre umfasst, wurden die aktuellen Entwicklungen hinsichtlich Demontagealgorithmen aufgezeigt und basierend darauf eine robuste, effiziente und universell einsetzbare Demontagelogik entwickelt.

Dabei ist es wichtig, mögliche Reihenfolgen zu identifizieren, starre Konstruktionen zu vermeiden und gleichzeitig die Laufzeit gering zu halten. Um das zu erreichen, wird ein Ant Colony Optimization Algorithmus mit der Identifizierung von demontierbaren Unterbaugruppen kombiniert. Der Algorithmus zur Identifizierung von Unterbaugruppen bietet die nötige Robustheit und ermöglicht es, Selbsthemmung zu vermeiden. Diese Unterbaugruppen werden mit Hilfe der Ant Colony Optimization, welche durch einen heuristischen Ansatz sehr effizient ist, optimiert [werden](#).

Die Logik wurde in der Programmiersprache Python und mit Hilfe der FreeCAD API entwickelt. Um das Programm einfach anzuwenden, wurde eine Benutzeroberfläche erstellt, welche es erlaubt den Algorithmus auszuführen und nur eine CAD Datei als Input benötigt. Dieser simple Algorithmus soll Unternehmen die Produktdemontage erleichtern und sie dadurch ein Stück näher an im Produktions- und Entwicklungsprozess anwendbare Lösungen bringen.

Abstract

An important goal of the circular economy is to keep products and resources in circulation as long as possible. To achieve this, it is important to extend the life of products and their parts. Therefore different concepts to extend the life of individual components exist, but all of them start with disassembly. That is why efficient disassembly planning is essential to effectively implement a circular economy.

The purpose of this work is to develop a logic that simplifies the disassembly process of a product by proposing an optimal disassembly sequence. The developed algorithm is based on the geometric data of a product and should be efficient, robust and universally applicable.

Based on a systematic literature analysis, which includes literature from the last 20 years, the current developments regarding disassembly algorithms were shown and based on this, a robust, efficient and universally applicable logic was developed.

It is important to identify possible sequences, avoid interlocking constructions and at the same time keep the runtime short. To achieve this, an Ant Colony Optimisation algorithm is combined with the identification of subassemblies. The algorithm for identifying subassemblies provides the necessary robustness and makes it possible to avoid interlocking. These subassemblies can be optimised using an Ant Colony Optimisation algorithm, which is very efficient due to its heuristic approach.

The logic is developed in the Python programming language and uses the FreeCAD API. To make the logic easy to use, a user interface was created that executes the algorithm and requires a CAD file as the only input. This simple algorithm is designed to help companies better understand product disassembly and move them towards a circular economy.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Allgemeine Einleitung in das Themenfeld.....	2
1.2	Problemstellung und Forschungsfragen	3
1.3	Aufbau und Struktur der Arbeit	4
2	Theoretische Grundlagen.....	6
2.1	Kreislaufwirtschaft	6
2.1.1	Lineare Wirtschaft vs. Kreislaufwirtschaft	7
2.1.2	Ziele und Strategien der Kreislaufwirtschaft.....	10
2.1.3	Aktuelle Entwicklungen und Realisierung der Kreislaufwirtschaft	16
2.2	Demontageprozess	21
2.2.1	Montage und Demontage	23
2.2.2	Unterbaugruppen Demontage.....	24
2.2.3	Demontageroboter	25
2.3	Demontagealgorithmen	27
2.3.1	Optimierungsalgorithmen	27
2.3.2	Darstellungen.....	29
2.4	Zusammenfassung und Fazit	32
3	Aktueller Stand der Forschung.....	33
3.1	Systematische Literaturanalyse.....	33
3.1.1	Methode der systematischen Literaturanalyse.....	33
3.1.2	Durchführung der systematischen Literaturrecherche	34
3.2	Aktuelle Demontagealgorithmen	38
3.3	Lücken aktueller Demontagealgorithmen	40
3.4	Zusammenfassung und Fazit	42
4	Entwicklung der Vorgehensweise	43
4.1	Konzeption der Vorgehensweise	44
4.1.1	Morphologischer Kasten	44
4.1.2	Auswahl geeigneter Algorithmus-Elemente	45
4.1.3	Aufbau des Algorithmus	49

4.2	Numerische Repräsentation	51
4.2.1	Kontaktmatrix	51
4.2.2	Kollisionsmatrix (Interference Matrix).....	53
4.3	Demontagealgorithmus	60
4.3.1	Sequenzielles Identifizieren von demontierbaren Teilen	61
4.3.2	Aufteilung in Unterbaugruppen	63
4.3.3	Optimierung	70
4.4	Umsetzung in einen Proof-Of-Concept-Demonstrator	75
4.5	Zusammenfassung und Fazit	78
5	Validierung der Vorgehensweise	79
5.1	Use Case Beschreibung	79
5.1.1	Spielzeug LKW	79
5.1.2	Regal	80
5.2	Durchführung der Vorgehensweise	80
5.2.1	Demontage Regal	81
5.2.2	Demontage LKW.....	82
5.3	Kritische Reflexion der Ergebnisse.....	82
6	Schlussfolgerung und Ausblick	85
6.1	Ergebnis	85
6.2	Beantwortung der Forschungsfragen	85
6.3	Einschränkungen des Ansatzes	86
6.4	Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung	87
7	Literaturverzeichnis	88
8	Abbildungsverzeichnis	94
9	Formelverzeichnis	96
10	Tabellenverzeichnis	97
11	Anhang	98
11.1	Analyse der ausgewählten Literatur	98
11.2	Bewertungstabelle.....	102
11.3	Use-Case Ergebnisse	106

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Das vorherrschende Wirtschaftsprinzip der industriellen Produktion ist die Linearwirtschaft. Diese ist auf den Konsum und den einmaligen Nutzen von Gütern ausgerichtet und basiert auf dem "Entnahme-, Herstellungs- und Entsorgungs-" Prinzip. Die Rohstoffe für Konsumgüter werden der Umwelt entnommen, zu einem Produkt verarbeitet und nach der Verwendung wieder weggeworfen. Mit diesem Vorgehen beuten wir die Ressourcen unserer Erde aus, was dazu führt, dass diese nach und nach aufgebraucht werden.¹

Im Gegensatz dazu werden in der Kreislaufwirtschaft Materialien als endliche Güter betrachtet. Die Kreislaufwirtschaft ist ein vorausschauendes und nachhaltiges Geschäftsmodell, welches wirtschaftliches Wachstum ohne Verschwendung von Ressourcen und Umweltzerstörung erreichen will. In der Kreislaufwirtschaft wird der Ressourcenverbrauch durch Wartung, Wiederverwendung und Recycling reduziert. Derzeit ist die Demontage und die Wiederaufbereitung von „End-of-Use“ Produkten für Unternehmen selten gewinnbringend. Zurückgebrachte Produkte und nicht funktionierende Komponenten werden oft geschreddert oder recycelt, ideal wäre jedoch, wenn man die Produkte ordnungsgemäß demontiert und für ihren ursprünglichen Zweck wiederverwendet. Dadurch bleibt die Funktionsweise der Komponenten erhalten und der Kreislauf schließt sich wieder.²

Die Basis für die Wiederaufbereitung und Wiederverwendung von gebrauchten Produkten ist die Zerlegung in ihre Einzelteile. Da Produkte heutzutage jedoch immer komplexer aufgebaut sind und aus immer mehr Einzelteilen bestehen, ist das Berechnen der optimalen Demontagereihenfolge mit viel Aufwand verbunden. Alle möglichen Demontagevarianten händisch auszuprobieren und dann zu vergleichen, ist sehr unwirtschaftlich. Vielen Unternehmen ist die Demontage daher zu aufwendig und sie recyceln oder entsorgen alte, nicht mehr funktionstüchtige Produkte, anstatt sie zu reparieren oder aufzuarbeiten. Die Art und Reihenfolge, in welcher die einzelnen Teile eines Produktes demontiert werden, hat einen großen Einfluss auf die Demontagedauer. Mit Hilfe eines automatisierten Systems, welches die optimale Demontagereihenfolge berechnet, wird die Effizienz der Demontage verbessert, wodurch auch die Kosten für die Wiederaufbereitung reduziert wird.³

¹ WWF 2012.

² Cong et al. 2019.

³ Poschmann et al. 2020, S. 341.

1.2 Problemstellung und Forschungsfragen

In der Kreislaufwirtschaft werden Abfallprodukte durch das Schließen des Materialkreislaufes minimieren. Dies wird durch lebensverlängernde Maßnahmen wie Wiederherstellen, Reparieren oder Wiederverwenden bewerkstelligt. Um Unternehmen von diesem Konzept zu überzeugen, ist es wichtig, es wirtschaftlich und möglichst einfach umsetzbar zu gestalten. Viele Maßnahmen, welche die Lebensdauer eines Produktes verlängern, beginnen mit der Demontage. Will man beispielsweise kaputte Komponenten reparieren, müssen diese in der richtigen Reihenfolge entnommen und wieder zusammengesetzt werden. Auch bei dem Recyceln ist der erste Schritt die Trennung der einzelnen Komponenten und demnach eine fachgerechte Demontage.⁴

Historisch bedingt generieren Unternehmen, welche sich mit der Demontage beschäftigen, ihre Demontagesequenzen manuell, was viel Zeit und Aufwand benötigt. Da das Problem der Demontage mit der Anzahl an einzelnen Bauteilen exponentiell an Komplexität zunimmt, ist viel Erfahrung und Fachwissen nötig, um komplexe Produkte effizient zu demontieren. Um Unternehmen den Umstieg in Richtung einer Kreislaufwirtschaft zu erleichtern, ist es wichtig ihnen den Einstieg einfach und effizient zu gestalten. Ein System, welches automatisiert eine möglichst optimale Demontagesequenz vorschlägt, kann die Effizienz der Demontage erhöhen und somit die Kreislaufwirtschaft für Unternehmen attraktiver machen.⁵

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Logik zu entwickeln, welches dabei helfen soll, ein Produkt effizient zu demontieren. Auf Basis dieser Logik wird ein Programm, inklusive Benutzeroberfläche entworfen, welches die Demontagesequenz eines Produktes erstellt und dabei möglichst einfach zu bedienen und universell einsetzbar ist. Der Input für die Generierung einer Demontagesequenz ist eine CAD Datei, welche eine Baugruppe beinhaltet, die aus mehreren Einzelteilen besteht. Anhand der geometrischen Daten eines Produktes wird im Anschluss eine optimale Demontagerihenfolge identifiziert.

Im Zuge dessen muss im ersten Schritt definiert werden, welche Bauteilinformationen für die Demontage interessant sind und wie diese aus einer CAD Datei ausgelesen werden können. Im nächsten Schritt müssen jene Sequenzen identifiziert werden, die geometrischen Sinn ergeben und machbar sind, ohne die Komponenten zu zerstören. Um die identifizierten Reihenfolgen in eine optimale Sequenz zu bringen, müssen Optimierungskriterien aufgestellt werden, anhand derer die Demontage optimiert werden kann.

⁴ Stahel 2019.

⁵ Neb und Göke 2021, S. 33.

Aus diesen Anforderungen ergeben sich folgende Forschungsfragen und Unterfragen, welche alle in dieser Arbeit beantwortet werden:

Wie kann die optimierte Planung von Demontageprozessen zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft beitragen?

Wie kann eine optimierte Demontagereihenfolge von diskreten Produkten automatisiert generiert werden?

- Welche unterschiedlichen Ansätze zur automatisierten Planung von Demontagereihenfolgen gibt es und was sind die Vor- und Nachteile dieser?
- Was sind relevante Bauteil Informationen für die Planung der Demontagereihenfolge und wie kann man diese automatisiert aus CAD-Files auslesen?
- Anhand welcher Kriterien kann ein Demontageprozess optimiert werden?
- Welche Logik steht hinter der Optimierung von Demontagereihenfolgen?

Die entwickelte Logik soll darüber hinaus robust und universell einsetzbar sein. Der Algorithmus soll Personen, welche keine Kenntnisse über Demontage haben, ermöglichen, mit Hilfe einer CAD-Datei eine technisch funktionierende und optimierte Demontagesequenz zu generieren.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Diese Arbeit ist in vier große Unterpunkte aufgeteilt:

- Theoretischen Grundlagen
- Aktueller Stand der Forschung
- Entwicklung der Vorgehensweise
- Validierung der Vorgehensweise

Der erste Punkt, die theoretischen Grundlagen, bieten einen Überblick über alle wichtigen Begriffe, welche im Laufe der Arbeit verwendet werden. Es wird die Kreislaufwirtschaft definiert und der Unterschied zu linearer Wirtschaft erläutert. Des Weiteren werden noch aktuelle Entwicklungen aufgegriffen und die praktische Etablierung der Kreislaufwirtschaft als System erläutert. Der Demontageprozess, welcher einen wichtigen Teil der Kreislaufwirtschaft darstellt, wird ebenfalls in diesem Kapitel thematisiert. Dabei werden die unterschiedlichen Demontagearten beschrieben und die Probleme, welche bei einer automatisierten Demontage auftreten können, diskutiert. Zum Abschluss des Kapitels wird auf zentrale Begriffe von Demontagealgorithmen eingegangen. Es werden die wichtigsten Elemente der gängigsten Algorithmen erklärt, um eine Grundlage für die Entwicklung eines neuartigen Algorithmus zu schaffen.

Kapitel 3 widmet sich dem aktuellen Stand der Forschung. Um die Entwicklungen der letzten Jahre hinsichtlich Demontagealgorithmen zu analysieren, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Für diese systematische Literaturrecherche wird die Methode von Tranfield verwendet, welche zu Beginn vorgestellt wird. Im Anschluss daran werden die gängigsten Algorithmen, mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben, die Lücken darin aufgezeigt und schlussendlich erklärt, was nötig ist, um diese Lücken zu schließen.

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturanalyse wird, mit Hilfe des morphologischen Kastens, ein neuartigen Demontagealgorithmus entworfen, welcher darauf ausgerichtet ist, einfach und universell einsetzbar zu sein. Der Aufbau der Logik setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Eine numerische Repräsentation des Produktes wird erstellt.
- Teile, welche einen Freiheitsgrad größer gleich eins haben, werden sequenziell entfernt.
- Existiert kein Bauteil, welches von der Baugruppe entfernt werden kann, wird diese in Unterbaugruppen aufgeteilt, welche getrennt sequenziell demontiert werden.
- Im letzten Schritt wird mit Hilfe der Ant Colony Optimization die Entnahmereihenfolge optimiert.

Nachdem die Funktionsweise des Algorithmus genau beschrieben wurde, wird die entworfene Benutzeroberfläche für das Programm vorgestellt. Anhand von zwei Beispielen wird schlussendlich die entwickelte Logik und das User Interface demonstriert sowie validiert.

Im letzten Kapitel werden die Erkenntnisse, welche im Laufe dieser Arbeit gewonnen worden sind, zusammengefasst, auf die Beantwortung der Forschungsfragen eingegangen sowie mögliche Weiterentwicklungen besprochen.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Kreislaufwirtschaft sowie mit der Demontage im Allgemeinen und den Komponenten von Demontagealgorithmen im Speziellen. Es wird zuerst die weit verbreitete lineare Wirtschaft beschrieben und anschließend dem Begriff der Kreislaufwirtschaft gegenübergestellt. Des Weiteren wird auf die Ziele sowie Strategien einer solchen eingegangen und erläutert, welche Schritte notwendig sind, um einen Wandel zu vollziehen.

Im zweiten Abschnitt der theoretischen Grundlagen wird auf den Demontageprozess, welcher in der Kreislaufwirtschaft eine wichtige Rolle spielt, genauer eingegangen. Es werden die unterschiedlichen Demontagearten erläutert und ein Vergleich zwischen Montage- und Demontageprozess durchgeführt. Schlussendlich werden noch aktuelle Entwicklungen hinsichtlich Roboter Demontage analysiert.

Zum Abschluss des Kapitels wird der Aufbau von Demontagealgorithmen erklärt und die darin auftretenden Konzepte werden beschrieben. Dies bietet eine Grundlage für die Entwicklung der im späteren Kapitel beschriebenen Logik.

2.1 Kreislaufwirtschaft

Das Prinzip der Kreislaufwirtschaft ist für die Menschheit keine neues. Vor der Industriellen Revolution im 18. Jahrhundert, war Aufarbeitung und Wiederverwendung selbstverständlich und notwendig, um zu überleben. War ein Werkzeug defekt, wurde es repariert, anstatt ein neues zu bauen. Man hatte nicht die Möglichkeiten, die wir heute haben und musste alle Ressourcen, die man finden konnte, möglichst effizient nutzen, bevor diese schlussendlich entsorgt wurden.⁶

Vor zweihundertfünfzig Jahren ermöglichte die industrielle Revolution den Menschen den Mangel an Nahrung, Unterkunft und Kleidung zu überwinden. Mit Hilfe von neuen Erfindungen, wie Dampfmaschinen und Webstühlen, beziehungsweise neuen Arbeitsweisen wie Arbeitsteilung und Spezialisierung, war es möglich, die Produktivität zu steigern. Durch neue Technologien wurde erstmal mehr produziert als man zum Überleben braucht. Daraus entstand eine lineare Wirtschaft, welche sich bis heute besonders in den wohlhabenden Ländern Europas und Amerikas etabliert hat.⁷

⁶ Stahel 2019, S. 1.

⁷ Stahel 2019, S. 3.

2.1.1 Lineare Wirtschaft vs. Kreislaufwirtschaft

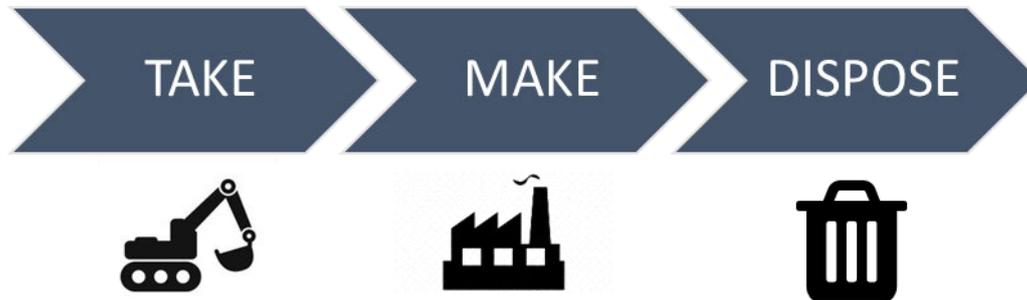


Abbildung 1: Lineare Wirtschaft⁸

Das heutzutage übliche Geschäftsmodell basiert auf dem in Abbildung 1 dargestellten „take-make-dispose“ Prinzip, zu Deutsch Entnehmen, Herstellen und Entsorgen.⁹

Der erste Schritt der linearen Wirtschaft ist das Fördern von Rohstoffen. Viele Rohstoffe, die wir in den letzten Jahrhunderten gefördert und verarbeitet haben, sind jedoch nur endlich auf unserem Planeten vorhanden. Betrachtet man den Verbrauch von Erdöl der letzten 50 Jahre, stellt man fest, dass dieser sich mehr als verdreifacht hat. Erdöl gehört, neben Kohle und Erdgas zu den fossilen Energieträgern und ist ein nicht regenerierbarer Rohstoff. Dies bedeutet, es wird uns, wenn die lineare Wirtschaft weiter betrieben wird, früher oder später ausgehen. Bei Förderungen wird oft nicht auf Nachhaltigkeit geschaut, sondern eher auf den Gewinn, welcher durch günstigen Abbau erzielt werden kann. Anstatt Geld in neue Recyclingmethoden zu investieren, wird günstig gefördert, was jetzt noch vorhanden ist.¹⁰

Der zweite Schritt des linearen Wirtschaftskonzeptes ist das Produzieren. Dabei geht es darum, aus den zuvor geförderten Rohstoffen ein Produkt zu erstellen, welches die Kundenwünsche möglichst gut befriedigt. Wegen der Globalisierung der Welt und dem dadurch hervorgehenden, immer größer werdenden Wettbewerb, sind Unternehmen gezwungen, immer günstiger zu produzieren, um wirtschaftlich zu bleiben. Die Nachhaltigkeit spielt dabei jedoch häufig nur eine nebensächliche Rolle und in erster Linie geht es darum, möglichst viel Gewinn zu erwirtschaften. Produkte werden mit dem Ziel hergestellt, den Kunden beim Kauf zufriedenzustellen und haben selten den Anspruch, langlebig zu sein. Im Gegenteil, wird ein Produkt defekt, ist es für den Produzenten nicht von Nachteil solange der Kunde ein neues kauft.¹¹

⁸ Darstellung des Verfassers

⁹ Kranert 2017, S. 57.

¹⁰ vgl. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/40384/umfrage/welt-insgesamt---erdoelverbrauch-in-tausend-barrel-pro-tag/> (abgefragt am 13.06.1994)

¹¹ Stahel 2019, S. 6.

Der letzte Schritt einer linearen Wirtschaft ist die Entsorgung, welche heutzutage leider viel zu oft vorkommt. Wenn ein Produkt einmal verkauft wurde, ist es für ein Unternehmen oft uninteressant, was damit passiert. Ist es defekt, wird es vom Käufer weggeworfen und ein neues angeschafft. Viele Waren sind gar nicht dafür ausgelegt, lange zu halten. Die Erzeugnisse sollen nach ein zwei Jahren unbrauchbar werden oder veraltet sein, damit der Kunde wieder neu einkaufen muss. Die „alten“ Produkte werden dann einfach weggeworfen, weil man keine Verwendung mehr dafür hat. Kauft man sich zum Beispiel ein neues Handy, ist die verbaute Technik in zwei drei Jahren schon wieder veraltet und unsere Konsumgesellschaft drängt uns, ein neues zu kaufen. Dies führt dazu, dass sehr oft voll funktionstüchtige Produkte in Schubladen verstauben oder weggeworfen werden. Niemand denkt daran, die darin vorhandenen Rohstoffe wieder zu verwenden. Da Unternehmen diesen Markttrend kennen, versuchen sie erst gar nicht viel Geld in eine nachhaltige Produktentwicklung zu investieren. Sie haben wenig Anreize ihre Produkte langlebig und reparaturfreundlich zu gestalten.¹²

Mit diesem Vorgehen beuten wird jedoch unseren Planeten mehr und mehr aus. Fossile Rohstoffe werden immer weniger und die Müllberge werden immer größer, was dazu führt, dass die Menschheit ihren Planeten langsam zerstört. Das lineare Wirtschaftskonzept steht offensichtlich im Widerspruch zum Gedanken der Nachhaltigkeit. Das es jedoch auch anders geht, zeigt das Konzept der Kreislaufwirtschaft. Wir Menschen haben langsam erkannt, dass wir mit der Art und Weise, wie wir seit der industriellen Revolution gewirtschaftet haben nach und nach das Leben auf unserem Planeten erschweren. Die Schattenseiten der linearen Industrielwirtschaft sind heute eine der Triebfedern für einen Wandel hin zu einer industriellen Kreislaufwirtschaft.¹³

¹² Stahel 2019, S. 7.

¹³ Stahel 2019, S. 3.

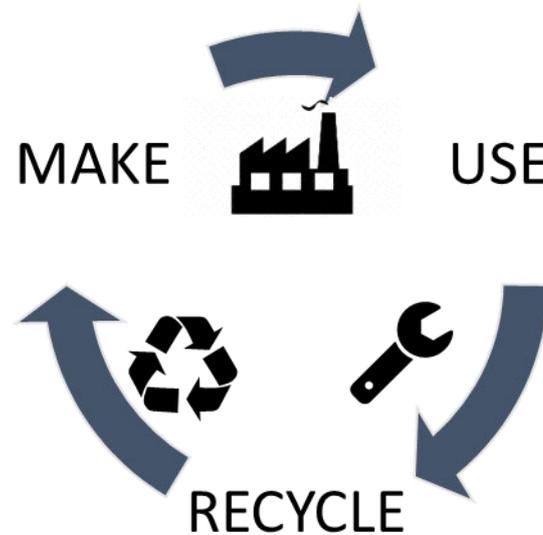


Abbildung 2: Kreislaufwirtschaft¹⁴

Eine Kreislaufwirtschaft (Abbildung 2) ist ein industrielles System, welches darauf ausgerichtet ist, regenerativ zu sein. Das lineare „End-of Life“ Konzept wird durch Wiederherstellung und Erneuerung erweitert und teilweise ersetzt. Ziel ist die Nutzung von erneuerbaren Ressourcen, Eliminierung von giftigen Chemikalien und die Beseitigung von Abfällen durch nachhaltiges Gestalten von Produkten, Materialien und Systemen.¹⁵

Durch das Umweltbewusstsein, welches sich langsam aber doch in unserer Gesellschaft etabliert, hat auch die Kreislaufwirtschaft mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. Eine eindeutige Definition für dieses Konzept zu finden, ist schwierig. Eine in der Literatur öfter vorkommende ist die von Geissdoerfer und Savaget aus dem Jahr 2017:

„The Circular Economy is a regenerative system in which resource input and waste, emission, and energy leakage are minimised by slowing, closing, and narrowing material and energy loops. This can be achieved through long-lasting design, maintenance, repair, reuse, remanufacturing, refurbishing, and recycling.“¹⁶

Kirchherr und Reike hingegen beschreiben Kreislaufwirtschaft (englisch Circular Economy = CE) folgendermaßen:

„We defined CE within our iteratively developed coding framework as an economic system that replaces the ‘end-of-life’ concept with reducing, alternatively reusing, recycling and recovering materials in production/distribution and consumption

¹⁴ Darstellung des Verfassers

¹⁵ Ellen MacArthur Foundation 2013, S. 9.

¹⁶ Geissdoerfer et al. 2017, S. 759.

processes. It operates at the micro level (products, companies, consumers), meso level (eco-industrial parks) and macro level (city, region, nation and beyond), with the aim to accomplish sustainable development, thus simultaneously creating environmental quality, economic prosperity and social equity, to the benefit of current and future generations. It is enabled by novel business models and responsible consumers. We hope that this CE definition can be a contribution to the scholarly CE community with this definition ideally serving as a conceptual foundation for future work on the topic. ¹⁷

Wichtige Begriffe, die bei fast allen Definitionen der Kreislaufwirtschaft auftauchen, sind die sogenannten 4Rs: ¹⁸

- Reduce (Reduzieren)
- Reuse (Wiederverwenden)
- Recycle (Recyclen)
- Recover (Rückgewinnen/ Wiederaufbereiten)

Diese 4Rs erweitert Potting noch und gliedert sie in die Wertschöpfungskette ein. Dadurch ergeben sich drei Gruppen mit jeweils Unterpunkten, welche die Ziele und Strategie der Kreislaufwirtschaft beschreiben. ¹⁹

- Sinnvolle Anwendung von Materialien
 - Rückgewinnung (Recover)
 - Recyclen (Recycle)
- Verlängerte Lebensdauer der Produkte und ihrer Teile
 - Umfunktionieren (Repurpose)
 - Wiederaufarbeitung (Remanufacture)
 - Wiederherstellung (Refurbish)
 - Reparieren (Repair)
 - Wiederverwenden (Reuse)
- Intelligenterer Produktnutzung und -herstellung
 - Reduzieren (Reduce)
 - Überdenken (Rethink)
 - Verwerfen (Refuse)

2.1.2 Ziele und Strategien der Kreislaufwirtschaft

Die Ziele der Kreislaufwirtschaft sind vielseitig und erstrecken sich über den ganzen Produktlebenszyklus. Beginnend bei der Nutzung der Materialien über die Herstellung bis zu Verlängerung der Lebensdauer. Um eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren, ist

¹⁷ Kirchherr et al. 2017, S. 229.

¹⁸ Kirchherr et al. 2017, S. 226.

¹⁹ Potting et al. 2017, S. 15.

es wichtig, alle Stufen des Kreislaufes miteinzubeziehen und sich nicht nur auf einen Punkt zu konzentrieren.²⁰

Die Ziele der Kreislaufwirtschaft und ihre Unterteilung in drei Gruppen sind in Abbildung 3 dargestellt und werden im Weiteren genauer beschrieben.

Gruppe	Strategie	Beschreibung
Intelligentere Produktnutzung und - herstellung	Verwerfen (Refuse)	Mach Produkte überflüssig durch integrieren seiner Funktion in einem völlig anderen Produkt
	Überdenken (Rethink)	Mache das Produkt Nutzungsintensiver (zum Beispiel durch multifunktionale Produkte)
	Reduzieren (Reduce)	Erhöhung der Effizienz bei der Herstellung oder Verwendung von Produkten, indem weniger Ressourcen verbraucht werden
Verlängerte Lebensdauer der Produkte und ihrer Teile	Wiederverwenden (Reuse)	Wiederverwendung eines gebrauchten Produkts durch einen anderen Verbraucher
	Reparieren (Repair)	Reparatur und Wartung defekter Produkte, so dass sie wieder mit ihrer ursprünglichen Funktion verwendet werden können
	Wiederherstellung (Refurbish)	Ein altes Produkt wiederherstellen und es auf den neuesten Stand bringen
	Wiederaufarbeitung (Remanufacture)	Verwendung gebrauchter Produkte oder ihrer Teile in einem neuen Produkt mit der selben Funktion
Sinnvolle Anwendung von Materialien	Umfunktionieren (Repurpose)	Verwendung gebrauchter Produkte oder ihrer Teile in einem neuen Produkt mit einer anderen Funktion
	Recyceln (Recycle)	Wiederherstellen von Materialien aus alten Produkten
	Rückgewinnung (Recover)	Verbrennung von Materialien mit Energierückgewinnung

Abbildung 3: Ziele und Strategien der Kreislaufwirtschaft²¹

2.1.2.1 Sinnvolle Anwendung von Materialien

Ein wichtiger Punkt und ein Gerüst, auf dem die Kreislaufwirtschaft steht, ist der sinnvolle und bewusste Einsatz von Materialien. Dieser Punkt bezieht sich auf Abfälle, die ihr „End-of-Life“ erreicht haben und in der linearen Wirtschaft auf der Deponie landen, oder ohne Wärmerückgewinnung verbrannt werden. Die wichtigen Punkte hierbei sind Recycling, wodurch Materialien wiederverwendet werden können und Rückgewinnung, mit deren Hilfe Energie durch Verbrennung gewonnen wird. Die Energie- und Umwandlungsausbeute beim Verbrennen kann je nach Material und Verarbeitung stark variieren, ist jedoch oft niedrig. Die Abfallregulierung hat, obwohl sie einen wichtigen Punkt in der Kreislaufwirtschaft darstellt, wenig Einfluss auf die Produktion und den Verbrauch. Nur Abfallwirtschaft und Recycling allein führen uns nicht in eine Kreislaufwirtschaft. Es muss das gesamte System von der Entwicklung, Herstellung und Nutzung bis zur Entsorgung angepasst werden, um einen wirklichen Kreislauf zu betreiben. Die meisten kreislaufwirtschaftlichen Maßnahmen heutzutage sind jedoch in der Entsorgung und im „End-of-Life“ angesiedelt.²²

²⁰ Morseletto 2020, S. 4–8.

²¹ Darstellung des Verfassers nach Potting et al. 2017, S. 5.

²² Morseletto 2020, S. 4.

Trotzdem ist ein wichtiges und nicht zu vernachlässigendes Ziel der Kreislaufwirtschaft, aus „Abfällen“, mit Hilfe von Recycling und Rückgewinnung, wertvolle Ressourcen zu gewinnen und somit den Kreislauf zu schließen.

Rückgewinnung (Recover)

Rückgewinnung bezieht sich auf die Verwertung von Abfällen, welche nicht recycelt werden können. Dies geschieht durch Verbrennung mit dem Ziel der Energierückgewinnung. Dadurch ist es zwar möglich, Energie zu gewinnen, der Nachteil ist jedoch, dass die Verbrennung Materialien und Produkte für immer zerstört und die Materialverschwendung fördert.²³

Die Verbrennung erfordert billige und reichlich vorhandene Abfälle, um die Rentabilität der Anlagen zu gewährleisten, was bedeutet, dass sie mit anderen R-Strategien um Ressourcen konkurriert. Daher sollte Rückgewinnung durch Verbrennung auch nur dann in Betracht gezogen werden, wenn andere Strategien, wie zum Beispiel Recycling, nicht angewendet werden können. Eine perfekte Kreislaufwirtschaft sollte dazu tendieren, keine Verbrennung mehr benötigen zu müssen. Wird jedoch nur Abfall verbrannt, der wirklich nicht anderwärtig verwendet werden kann, leistet die Rückgewinnung einen positiven Beitrag zum Übergang in eine Kreislaufwirtschaft.²⁴

Recyclen

Beim Recyclen werden Materialien, sogenannte Sekundärmaterialien, aus weggeworfenen Produkten gewonnen. Sekundärmaterialien können einem Upcycling unterzogen werden, welches das Rezyklat in Materialien von höherer Qualität und größerer Funktionalität umwandelt. Die andere Richtung ist ein Downcycling, welches bei den meisten Recyclingvorgängen heutzutage betrieben wird.²⁵

Recyclen ist jedoch energieintensiv und nicht frei von Umweltauswirkungen. Vor allem aber zerstört das Recycling die Integrität und den Marktwert eines Produkts, verschlechtert die Qualität der Materialien und führt nicht zu wesentlichen Änderungen bei der Gestaltung und Herstellung von Produkten. Außerdem ist Recyclen nicht immer machbar oder praktisch. So lassen sich beispielsweise Verbundwerkstoffe nur schwer oder teuer recyceln, Metalle sind korrosionsanfällig und selbst das Recycling von Glas, welches theoretisch unendlich oft recycelt werden kann, kann unpraktisch oder teuer sein, wenn das Altglas zerbrochen, verunreinigt oder von unterschiedlicher Farbe ist.²⁶

Der Recyclingprozess ist ebenfalls ein Teil der Abfallwirtschaft und braucht eine Kultur mit Abfall. Die Abfallwirtschaft ist jedoch nicht auf den gesellschaftlichen Wandel,

²³ Potting et al. 2017, S. 20.

²⁴ Reike et al. 2018, S. 257.

²⁵ Morsetto 2020, S. 5.

²⁶ Jani und Hogland 2014, S. 1768.

welcher für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft erforderlich ist, ausgerichtet. Daher sollte Recycling erst dann angewendet werden, wenn es keine anderen Möglichkeiten mehr gibt die Produkte zu verwenden. Für einen funktionierenden Kreislauf ist die sinnvolle Anwendung von Materialien in Kombination mit einer verlängerten Lebensdauer und einer intelligenten Produktion und Nutzung unumgänglich.²⁷

2.1.2.2 Verlängerte Lebensdauer der Produkte und ihrer Teile

Dieser Ansatz entwickelt Strategien, um Produkte und ihre Teile länger in der Wirtschaft zu halten und gleichzeitig ihren Wert zu bewahren oder zu verbessern. Um dies zu bewerkstelligen, müssen sich die in den letzten Jahrzehnten etablierten Geschäftsmodelle verändern, um beispielsweise eine Rücknahme- und Reparaturlogistik aufzubauen.²⁸

Für eine gut funktionierende Kreislaufwirtschaft ist es notwendig, Produkte so lang wie möglich im Kreislauf zu halten. Jedoch hat eine Verlängerung der Produktlebensdauer nicht nur positive Effekte. So kann beispielsweise die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten in bestimmten Fällen die Innovation verlangsamen oder die Entwicklung neuer Produkte, die umweltfreundlicher sind, verhindern. Daher ist es wichtig die richtigen Maßnahmen zu setzen und die Lebensdauer nicht grundlos zu verlängern.²⁹

Um die Nutzungsdauer einzelner Produkte zu verlängern, gibt es unterschiedliche Konzepte, die in einer Kreislaufwirtschaft alle zum Einsatz kommen:

Umfunktionieren (Repurpose)

Unter Umfunktionierung versteht man die Verwendung gebrauchter Produkte oder ihrer Teile zur Herstellung eines neuen Produkts mit anderen Funktionen. Dies ist ähnlich der Wiederverwendung, jedoch erhalten die ursprünglichen Teile bei der Umfunktionierung neue Aufgaben. Die Umfunktionierung ist nicht immer möglich, da viele Produkte zwar in eine Vielzahl separater Teile zerlegt werden können, aber nur wenige Produkte dabei umfunktioniert werden, da dies oft von der Kreativität des „Umfunktionierers“ abhängt.³⁰

Wiederaufarbeitung (Remanufacture)

Wiederaufarbeitung, auch Second-Life-Produktion genannt, bedeutet die Verwendung von Teilen gebrauchter Produkte in einem neuen Produkt mit der gleichen Funktion. Dabei werden Komponenten bestehender Produkte zerlegt, gereinigt und

²⁷ Haupt und Zschokke 2017, S. 836.

²⁸ Morseletto 2020, S. 5.

²⁹ Bressanelli et al. 2019, S. 7406.

³⁰ Morseletto 2020, S. 6.

gegebenenfalls ersetzt oder repariert. Ein wiederaufgearbeitetes Produkt sollte die Qualität eines fabrikneuen Produkts haben, auch wenn Komponenten aus anderen Produkten wiederverwendet werden.³¹

Wiederherstellung (Refurbish)

Wiederherstellung bedeutet, ein altes Produkt zu restaurieren und auf den neuesten Stand zu bringen. Beim Refurbishing geht es um die Verbesserung beziehungsweise Modernisierung der Funktion eines Produkts. In der Regel werden die Teile dabei nicht demontiert, sondern ausgetauscht.³²

Reparieren (Repair)

Bei einer Reparatur wird ein defektes Produkt gewartet und repariert, damit es wieder in seiner ursprünglichen Funktion verwendet werden kann. Der allgemeine Zweck ist es also, die Lebensdauer des Produktes zu verlängern. Reparaturen können, im Gegensatz zu Wiederaufbereitung und Wiederherstellung von verschiedenen Akteuren durchgeführt werden. Darüber hinaus können Reparaturen auch Teil eines Wartungsplans sein.³³

Wiederverwenden (Reuse)

Wiederverwendung kann definiert werden als die weitere Verwendung eines Produktes, durch einen anderen Nutzer oder Besitzer, wenn das Produkt noch in gutem Zustand ist und seine ursprüngliche Funktion erfüllen kann. Ein wiederverwendetes Produkt behält dabei seine Funktion. Im Allgemeinen bezieht sich der Begriff "Wiederverwendung" auf einen zweiten Verbraucher eines Produkts, das kaum Anpassungen benötigt und "wie neu", "mit demselben Zweck", "ohne Aufarbeitung" und "ohne Nacharbeit" oder "ohne Reparatur" funktioniert. Mehr als eine Reinigung des Produktes ist meistens nicht nötig, um es als „Second-Hand“ zu verkaufen.³⁴

2.1.2.3 Intelligente Produktnutzung und -herstellung

Diese Gruppe umfasst die Strategien „Reduzieren“, „Überdenken“ und „Verwerfen“, die bei der Konzeption, Gestaltung und Entwicklung von Produkten zum Tragen kommen. Diese Strategien sind:

- Vorbereitend
- Unterstützend
- Transformativ

³¹ Reike et al. 2018, S. 256.

³² Reike et al. 2018, S. 255.

³³ Reike et al. 2018, S. 255.

³⁴ Morseletto 2020, S. 7.

Vorbereitend, weil sie vor allen anderen Strategien stattfinden. Unterstützend, weil sie alle anderen Strategien unterstützen. Transformativ, weil sie das Wirtschaftssystem zu einem echten Kreislaufsystem machen können, wenn sie umfassend angewendet werden. Dementsprechend kann eine intelligente Produktherstellung den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft einleiten, bevor die Produktion stattfindet.³⁵

Überdenken (Rethinking)

Überdenken bedeutet ein Produkt nutzungsintensiver zu machen. Zum Beispiel durch das Teilen von Produkten oder das Anbieten multifunktionaler Produkte auf dem Markt. Der Begriff Rethinking ist jedoch weiter gefasst, da er die Neuausarbeitung- und Konzeptionierung der Ideen, Dynamiken, Prozessen, Konzepten, Verwendung und Nachnutzung eines Produkts umfasst. Dies ermöglicht es beispielsweise, ein Teil mit einem nicht materiellen Teil zu substituieren und dennoch dem Verbraucher den gleichen Nutzen zu bieten. Überdenken ist ein wichtiges Merkmal der Kreislaufwirtschaft, denn um etwas zirkulärer zu machen, muss man es bis zu einem gewissen Grad neu überdenken.³⁶

Verwerfen (Refuse)

Verwerfen bedeutet, ein Produkt oder Teil überflüssig zu machen, indem seine Funktion aufgegeben oder die gleiche Funktion in einem völlig anderen Produkt zu integrieren. Ein Beispiel dafür ist das Verwenden von weniger Verpackung oder das Ersetzen mit digitalen Produkten. Verwerfen kann sowohl der Konsument als auch der Produzent. Im Fall des Konsumenten bedeutet das weniger zu verbrauchen und dadurch Abfall zu vermeiden.³⁷

Reduzieren (Reduce)

Beim Reduzieren geht es darum, weniger natürliche Ressourcen und damit weniger Energie-, Rohstoff- und Abfall zu verursachen. Diese Definition kann auf die Verringerung der Anzahl von Produkten ausgedehnt werden. In diesem Sinne kann „Reduce“ mit „Reuse“ verknüpft werden. Bis zu einem gewissen Grad kann Reduzieren auch als eine weniger drastische Form von „Verwerfen“ interpretiert werden.³⁸

³⁵ Morseletto 2020, S. 8.

³⁶ Andrews 2015, S. 312.

³⁷ Reike et al. 2018, S. 255.

³⁸ Morseletto 2020, S. 9.

2.1.3 Aktuelle Entwicklungen und Realisierung der Kreislaufwirtschaft

In den letzten fünf bis zehn Jahren hat das Konzept der Kreislaufwirtschaft auf verschiedenen Ebenen zunehmende Beachtung gefunden, unter anderem in der Politik, in der Interessenvertretung, sowie in der Wissenschaft. Eine kurze Suche des Begriffes „circular economy“ in der Datenbank Scopus zeigt, wie in Abbildung 4 zu sehen, die zunehmende Popularität in der Wissenschaft. In den letzten fünf Jahren ist ein Anstieg, um über 800% zu erkennen. Allein in den letzten beiden Jahren wurden so viele Artikel veröffentlicht wie in den 50 Jahren zuvor.³⁹

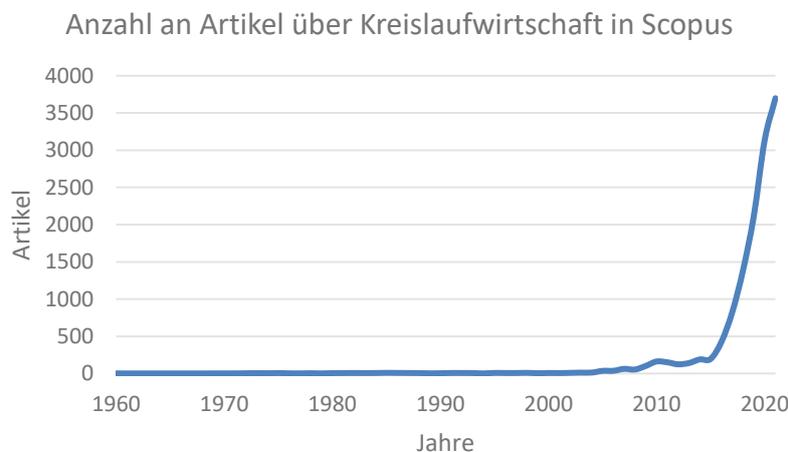


Abbildung 4: Anzahl der Artikel über Kreislaufwirtschaft in Scopus⁴⁰

Dieser Trend ist jedoch nicht nur in wissenschaftlichen Publikationen zu sehen, auch die Politik ist auf den Zug der Kreislaufwirtschaft aufgesprungen. Dieses Konzept, welches in den letzten Jahren immer populärer wurde, existiert jedoch schon länger. Die frühesten Beispiele für die Schließung von Materialkreisläufen stammen aus dem 19. Jahrhundert.⁴¹

2.1.3.1 Anfänge der Kreislaufwirtschaft

In den 1970er Jahre gewinnt neben den Umweltbewegungen das 3R-Konzept

- Reduce
- Reuse
- Recycling

zunehmend an Aufmerksamkeit. Die Regierungen regulieren, die Unternehmen folgen meist reaktiv. Die meisten Maßnahmen in diesen Jahrzehnten konzentrieren sich auf die "Output-Seite". Abfälle werden nicht vermieden, sondern die Verschmutzung wird

³⁹ Reike et al. 2018, S. 246.

⁴⁰ Darstellung des Verfassers mit Daten der Onlinebibliothek Scopus entnommen am 05.10.2021

⁴¹ Cooper 2011.

durch Prinzipien wie "der Verursacher zahlt" begrenzt. Die Abfallbewirtschaftung gewinnt durch die Regulierung von Deponien und Verbrennung immer mehr an Bedeutung, aber es gibt noch kein etabliertes Systemdenken, da große Abfallmengen außerhalb der "eigenen Grenzen" behandelt oder sogar in weniger wohlhabenden Ländern deponiert werden. Die größten Erfolge sind nach wie vor auf der Output-Seite zu verzeichnen. Die Recyclingquoten steigen jedoch zwischen den 1980er und 1990er Jahren erheblich, nicht zuletzt aufgrund politischer Maßnahmen.⁴²

Um die Jahrtausendwende werden zunehmend Umweltprobleme als wirtschaftliche Chance dargestellt. Weitere Konzepte wie „Design for the Environment“ etablieren sich und der Frage nach Effizienz durch Design wird zunehmend Aufmerksamkeit gewidmet. Das Denken in Systemen nimmt zu, und die wissenschaftlichen Daten über die globale Erwärmung, die Wasserknappheit und den Verlust der biologischen Vielfalt lassen in den ersten Jahren der 2000er ein neues Gefühl der Dringlichkeit entstehen. Unterstützt wird dies durch den immer schnelleren Informationsaustausch, durch die Digitalisierung und das Internet, die es ermöglichen, die lokalen mit den globalen Umweltproblemen in noch nie dagewesener Weise zu verbinden.⁴³

2.1.3.2 Politische Entwicklungen

Das Konzept hat auch bei politischen Entscheidungsträgern an Bedeutung gewonnen und beeinflusst Regierungen auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene. In Europa haben viele Staaten kreislaufwirtschaftliche Initiativen und Pilotprogramme eingeführt, wobei Dänemark, Deutschland, die Niederlande und das Vereinigte Königreich eine Vorreiterrolle spielen.⁴⁴

Vor allem Deutschland war ein Vorreiter bei der Integration der Kreislaufwirtschaft in die nationale Gesetzgebung, und zwar bereits 1996 mit der Verabschiedung des "Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes". Es folgten Japans "Basic Law for Establishing a Recycling-Based Society" aus dem Jahr 2002 und Chinas "Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of China" aus dem Jahr 2009. Darüber hinaus ist die Kreislaufwirtschaft auch in den letzten beiden Fünfjahresplänen der chinesischen Regierung enthalten.⁴⁵

Nicht nur auf nationaler Ebene gibt es Bestrebungen zu einer Kreislaufwirtschaft, sondern auch auf internationaler Ebene, wie der „Closing the loop“ Aktionsplan der Europäischen Union aus dem Jahre 2015 zeigt. Dieser Plan beinhaltet beispielsweise Maßnahmen zur Verringerung der Lebensmittelverschwendung, Entwicklung von Qualitätsstandards für Sekundärrohstoffe, sowie Maßnahmen im Ökodesign zur

⁴² Reike et al. 2018, S. 248.

⁴³ Reike et al. 2018, S. 249.

⁴⁴ European Urban Knowledge Network (EUKN) 2015.

⁴⁵ Geissdoerfer et al. 2017, S. 759.

Steigerung der Reparierbarkeit, Langlebigkeit und Wiederverwertbarkeit von Produkten.⁴⁶

2.1.3.3 Realisierung einer Kreislaufwirtschaft

Um eine Kreislaufwirtschaft in unserer Gesellschaft etablieren zu können, bedarf es einiger Bemühungen der Industrie. Die wichtigsten Punkte wären dabei:

- eine Änderung in Richtung eines dienstleistungsbasierten Geschäftsmodells
- ein nachhaltiges Design der Produkte
- sowie die Nutzung von regenerativer Energie

Es gibt jedoch auch einige Hindernisse, welche es uns erschweren eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren.⁴⁷

Für eine erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ist nicht nur ein Top-Down-Ansatz, also von der Politik ausgehend, sondern auch ein Bottom-Up-Ansatz der Industrie sowie dem Verbraucher notwendig. Unternehmen müssen ihr gesamtes Geschäftsmodell, welches sie in den letzten Jahrzehnten aufgebaut haben, überdenken und neugestalten.⁴⁸

Die heute oft übliche „Kauf- und Konsum“ – Wirtschaft muss sich hin zu einer dienstleistungsbasierten Wirtschaft wandeln. Das bedeutet, Unternehmen sollten nicht mehr Produkte, sondern Dienstleistungen anbieten. Das Prinzip ein Produkt zu produzieren, dann zu verkaufen und nichts mehr damit zu tun zu haben funktioniert in der Kreislaufwirtschaft nicht. Vielmehr sollen die Dienstleistung und nicht das Produkt selbst im Vordergrund stehen. Waren werden nicht mehr verkauft, sondern geleast, gemietet oder geteilt.⁴⁹

Durch dieses neue Geschäftsmodell haben Hersteller ein Interesse, ihre Produkte langlebiger zu gestalten. Dadurch wird auch der immer noch häufig angewendeten Strategie der geplanten Obsoleszenz entgegengewirkt. Die geplante Obsoleszenz zielt darauf ab, dass Konsumgüter schnell veralten und ersetzt werden. In extremen Fällen werden Waren absichtlich so gebaut, dass sie nicht lange halten und nach ein paar Jahren unbrauchbar sind. Dies ist vor allem bei elektronischen Produkten weit verbreitet.⁵⁰

Eines der bekanntesten Beispiele für geplante Obsoleszenz ist das Phoebus-Kartell. Im Dezember 1924 taten sich die damals führenden Glühbirnenproduzenten Osram, Philips und General Electric zusammen und beschränkten allesamt die Lebensdauer ihrer Glühbirnen von 2500 auf 1000 Stunden. Sie ersetzten einfach den bisher

⁴⁶ European Commission 2015.

⁴⁷ Ellen MacArthur Foundation 2013.

⁴⁸ Bressanelli et al. 2019, S. 7396.

⁴⁹ Ellen MacArthur Foundation 2013, S. 7.

⁵⁰ Andrews 2015, S. 307.

genutzten Glühdraht durch einen weniger haltbaren. Die Intention hinter diesem Vorgehen war, mehr Glühbirnen zu verkaufen und dadurch den Unternehmensgewinn zu steigern.⁵¹

In einer idealen Kreislaufwirtschaft müsste sich das Geschäftsmodell aller drei Firmen grundlegend verändern. Sie würden nicht mehr Glühbirnen verkaufen, sondern die Dienstleistung Licht. Das bedeutet, sie würden ein Gebäude mit Licht versorgen und darauf achten, dass es immer hell ist. Die Glühbirnen, die sie produzieren, würden nicht in den Besitz des Gebäudes übergehen, sondern Eigentum des Herstellers bleiben. Dadurch ist der Glühbirnenerzeuger auch interessiert, möglichst langlebige Glühbirnen zu entwickeln, um seine Kosten zu senken. Geplante Obsoleszenz wäre kein Thema mehr. Es wird nämlich nur für die Dienstleistung Licht bereitzustellen bezahlt, unabhängig davon wie viele Glühbirnen verbraucht werden. Um ein solches Geschäftsmodell wirtschaftlich zu betreiben, muss sich auch das grundlegende Design der Produkte verändern.⁵²

2.1.3.4 Nachhaltiges Design

Nachhaltiges Design ist ein Herzstück einer Kreislaufwirtschaft. Dies beinhaltet eine nachhaltige Materialauswahl, Standardisierung und Modularisierung von Komponenten und ein Design für leichte Demontage. Die Mehrzahl, der heutzutage im Umlauf befindlichen Produkte, sind jedoch nicht für die Demontage oder das Recycling konzipiert. Dies führt dazu, dass bei der Demontage Bauteile und Materialien beschädigt werden können und die Kosten und der Aufwand für die Zerlegung relativ hoch sind.⁵³

Victor Papanek⁵⁴ schrieb in seinem 1985 erschienenen Buch „Design for the Real World“, dass es Berufe gibt, die schädlicher sind als Industriedesign, aber nur wenige. Viele Designer sind für die geplante Obsoleszenz verantwortlich und haben Müll geschaffen, der die Landschaft verschandelt. Die Wahl von Prozessen und Materialien verschmutzt die Luft, die wir atmen. Daher kommt er zum Schluss, dass Designer an der Umweltverschmutzung eine Mitschuld haben.⁵⁵

Obwohl schon lange bekannt ist, dass Design einen großen Einfluss auf die Nachhaltigkeit von Produkten hat, sind Praktiken im Zusammenhang mit geplanter Obsoleszenz immer noch gängig. Vor allem bei Elektronikprodukten werden sehr oft Teile verklebt, was das Reparieren sehr schwierig macht. So verwendet Apple beispielsweise maßgeschneiderte Befestigungen, die den Austausch von Batterien und anderen Komponenten in seinen Produkten erschweren oder sogar unmöglich

⁵¹ Krajewski 2014.

⁵² Krajewski 2014.

⁵³ Andrews 2015, S. 310.

⁵⁴ Viktor Papanek (1923-1998) war ein österreichisch-amerikanischer Designer und Designphilosoph

⁵⁵ Victor Papanek 1985.

machen sollen. Ein weiteres Beispiel für nicht nachhaltige Produkte sind Tintenpatronen für Drucker, die so gestaltet sind, dass sie weder nachgefüllt noch vollständig verbraucht werden können.⁵⁶

Designer müssen langsam die längerfristigen Auswirkungen ihrer Aktivitäten bedenken, was wiederum die Notwendigkeit eines Wandels im Designdenken unterstreicht. Sie können nicht auf die Entwicklung einer Infrastruktur für Wiederaufbereitung, Wiederverwendung und Recycling warten. Designer haben nun die Möglichkeit, den Paradigmenwechsel anzuführen. Neben der Gestaltung für den "geschlossenen Kreislauf" haben sie das Potenzial, das Verhalten von Unternehmen und Verbrauchern sowie den Konsum zu beeinflussen, indem sie die tatsächliche Produktlebensdauer verlängern und den wahrgenommenen Wert von Produkten erhöhen.⁵⁷

⁵⁶ Andrews 2015, S. 311.

⁵⁷ Andrews 2015, S. 312.

2.2 Demontageprozess

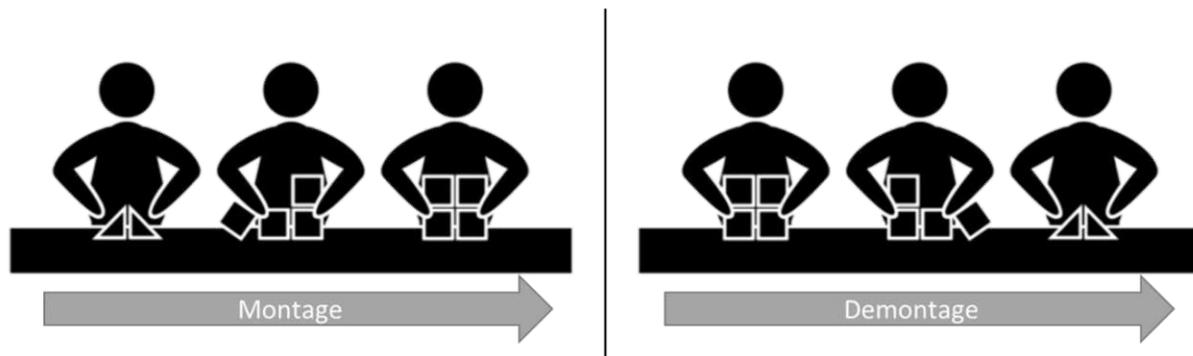


Abbildung 5: Montage/Demontageprozess⁵⁸

Ein Produkt besteht meistens aus einer Reihe von Baugruppen, wobei eine mechanische Baugruppe eine stabile Einheit ist, die aus mehr als einem Teil besteht. Das Entfernen eines Teils oder mehrerer Teile aus der Baugruppe wird als Demontageprozess bezeichnet. Die Demontage ist also ein Prozess, bei dem eine Baugruppe, bestehend aus mehreren Einzelteilen in ihre Komponenten zerlegt wird. Eine Demontage wird durchgeführt, um die Komponenten zu warten, auszutauschen oder zu reparieren. In der linearen Wirtschaft wird die Demontage oft als ein Vorgang betrachtet, der keinen Mehrwert für die Unternehmen bringt, da er zusätzlichen Aufwand und Kosten verursacht. In der Kreislaufwirtschaft ist dieser Prozess jedoch essenziell und ein wichtiger Bestandteil des Kreislaufes. Die oben erwähnten Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer eines Produktes bauen alle auf der Demontage auf. Das Recycling erfordert zunächst eine Demontage, damit die einzelnen Komponenten und Materialien wiederverwendet oder recycelt werden können. Bei der Wiederaufarbeitung ist das Zerlegen in Einzelteile unumgänglich und auch bei der Reparatur werden einzelne Teile aus einer Baugruppe entnommen. Einmal auseinandergenommen können die Teile viel einfacher wiederverwendet, gewartet oder recycelt werden.⁵⁹

Die Nachfrage nach effizienten Demontageprozessen wächst in den letzten Jahren erheblich. Laut Neb und Göke verursachen Montageprozesse in der Fertigungsindustrie 20% der Produktionsstückkosten, bis zu 50% der erforderlichen Produktionszeit und 30-50% der gesamten Arbeitskosten. Die Komplexität der Demontage steigt mit der Anzahl der Einzelteile. Auch der Grund des Zerlegens hat einen großen Einfluss auf die Komplexität. Der Demontageprozess beim Recycling ist beispielsweise grundlegend anders als bei einer Reparatur.⁶⁰

⁵⁸ Darstellung des Verfassers

⁵⁹ Giri und Kanthababu 2015, S. 5118.

⁶⁰ Neb und Göke 2021, S. 33.

Der Demontagevorgang kann in destruktive- und nicht-destruktive Demontage unterteilt werden, wie in Abbildung 6 dargestellt.

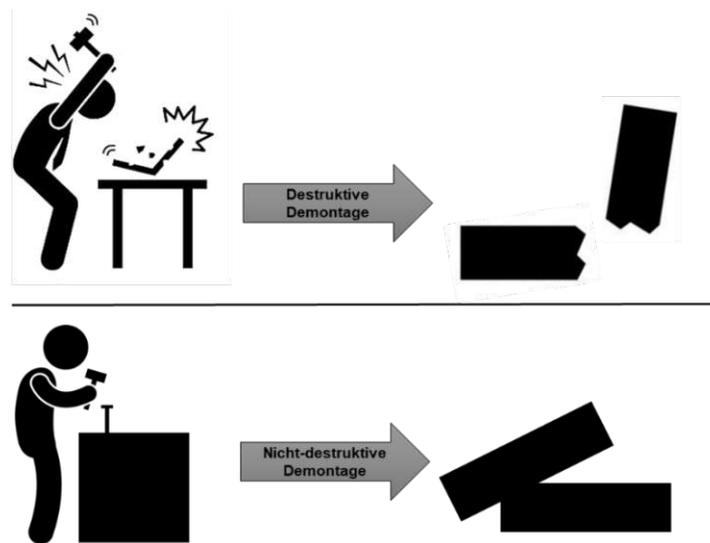


Abbildung 6: Destruktive und nicht-destruktive Demontage⁶¹

Bei der nicht-destruktiven Demontage werden die gewünschten Bestandteile systematisch aus einer Baugruppe entfernt, wobei sichergestellt wird, dass die Teile durch den Prozess nicht beschädigt werden. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn man die Einzelteile weiterverwenden will. Daher muss man bei der nicht-destruktiven Demontage besonders darauf achten, die Komponenten nicht zu beschädigen, damit ihre Funktion intakt bleibt. Diese Art der Demontage wird hauptsächlich bei Wartungsarbeiten, welche Reparatur, Wiederherstellung und Wiederaufbereitung beinhalten kann, angewandt.⁶²

Das Gegenteil zur nicht-destruktiven Demontage ist die destruktive Demontage. Das Ziel dieser ist es, gleichartige Materialien von einer Baugruppe zu trennen. Hier ist es egal, ob die Funktion der einzelnen Teile beeinträchtigt wird oder nicht. Dadurch kann man andere, zerstörende Methoden anwenden, um die Komponenten von der Baugruppe zu trennen. Die destruktive Demontage wird hauptsächlich beim Recycling verwendet. Dabei spielt es keine Rolle ob beispielsweise ein Plastik Teil in mehrere Komponenten zerbricht oder nicht. Es wird im Nachhinein sowieso zerkleinert und eingeschmolzen, wichtig ist nur, dass die einzelnen Materialien voneinander getrennt werden. Die für eine Kreislaufwirtschaft relevante Art ist die nicht destruktive Demontage.⁶³

⁶¹ Darstellung des Verfassers

⁶² Surendra und Charles 1996, S. 226.

⁶³ Surendra und Charles 1996, S. 226.

2.2.1 Montage und Demontage

Die Demontage eines Produktes kann anhand einer Demontage Sequenz beschrieben werden. Diese Sequenz gibt die Reihenfolge an, nach der die einzelnen Teile und Unterbaugruppen entnommen werden können. Daher könnte man meinen, dass ein Demontageprozess einfach die Umkehrung der in der Konstruktionsphase des Produktes geplanten Montagereihenfolge ist. Dies ist jedoch in der Praxis aus mehreren Gründen nicht der Fall. Wird ein Produkt demontiert, hat dies meistens einen Grund. Entweder, wird es gewartet, weil es schon lange in Gebrauch ist, repariert, weil etwas defekt ist oder die Teile werden für das Recycling getrennt. Bei all diesen Gründen ist das zu demontierende Teil nicht neuwertig. Fabrikneue Komponenten unterscheiden sich aber oft gravierend von gebrauchten. Teile werden mit der Zeit beschädigt, verunreinigt und verschmutzt. Verbiegt sich beispielsweise ein Nagel während der Benutzung ist es nicht mehr so einfach diesen auf demselben Weg zu entnehmen, wie er montiert wurde. Durch solche Gebrauchsspuren und Abnutzungen ist es oft nicht mehr möglich, Komponenten zerstörungsfrei zu entnehmen.⁶⁴

Auch die Prozesse, Methoden und Werkzeuge von Montage und Demontage unterscheiden sich deutlich. Die wesentlichen Operationen bei der Montage sind:

- Fügen
 - Nageln
 - Verschrauben
 - Einclipsen
 - Kleben
 - Lötten
 - Schweißen
- Handhaben
 - Legen
 - Greifen
 - Bewegen
 - Umdrehen
 - Kontrollieren
- Prüfen
- Justieren

Bei der Demontage wird versucht, das Fügen rückgängig zu machen. Je nachdem welche Fügemethode angewandt wurde, muss auch eine andere Trennmethode verwendet werden. Bei den Trennmethode muss man wieder zwischen zerstörenden und nicht zerstörenden Methoden unterscheiden. Nicht zerstörende Vorgänge werden zwar meistens bevorzugt, sind aber nicht immer möglich. Dies hängt ganz von der

⁶⁴ Dini et al. 2001, S. 3.

zuvor gewählten Fügemethode und dem Grad der Gebrauchsspuren ab. Die am einfachsten rückgängig machende Montagemethode ist das Verschrauben. Jedoch ist auch dies nicht immer zerstörungsfrei möglich. Ist eine Schraube rostig und alt, ist es teilweise notwendig diese aufzubohren, um die Teile zu demontieren. Das Aufbohren zerstört wiederum die Einzelkomponenten. Schrauben und Nägel sind aber im allgemeinen reversible Fügemethoden, ganz anders sieht dies aber beim Schweißen, Löten und Kleben aus. Dies sind irreversible Operationen, das bedeutet, sie können nicht zerstörungsfrei rückgängig gemacht werden. Daher sollten solche Fügemethoden im Sinne einer Kreislaufwirtschaft auch möglichst vermieden werden.⁶⁵

Aus den oben angeführten Gründen ist es nicht möglich für die Planung eines Demontageprozesses einfach die Montagereihenfolge umzukehren. Daher ist für die Demontage eine gesonderte Planung der Demontagesequenz notwendig.

2.2.2 Unterbaugruppen Demontage

Weiters ist bei der Demontage zu beachten, ob man Einzelteile oder Unterbaugruppen entnimmt. Die einfachste Option, welche oft angewandt wird, ist es ein Teil nach dem anderen, also sequenziell zu entfernen. Das Problem bei dieser Vorgehensweise ist erstens, dass dies nicht immer die effizienteste Methode ist und zweitens kann es dabei zu selbsthemmenden, starren Baugruppen kommen.⁶⁶

Die alternative zu einer sequenziellen Demontage ist eine Demontage auf Unterbaugruppenebene. In diesem Zusammenhang bedeutet „Unterbaugruppe“ eine Gruppe von mehreren Einzelteilen, die separat auseinandergenommen werden können. Diese Unterbaugruppen sind eigenständig und haben keine Zwangsbedingungen zu Teilen außerhalb der Gruppe. Das heißt sie können nach Entnahme als eigenständige Baugruppe betrachtet werden. Durch Aufteilung des Produktes in eigenständige Unterbaugruppen kann das Demontageproblem effizienter gelöst werden. Darüber hinaus können die einzelnen Unterbaugruppen dann auch parallel weiter zerlegt werden, was wiederum Zeit sparen kann.⁶⁷

Ein weiterer Vorteil der Zerlegung in Unterbaugruppen ist, dass eine Selbsthemmung vermieden werden kann, welche es unmöglich macht, das Produkt weiter auseinanderzunehmen. Eine Selbsthemmung liegt dann vor, wenn kein weiteres Einzelteil von der Baugruppe entnommen werden kann, da andere Teile dies verhindern. Dies kann meistens durch eine Zerlegung in Unterbaugruppen vermieden werden. Eine Untersuchung von mehr als 239 mechanischen Produkten ergibt, dass

⁶⁵ Dini et al. 2001, S. 3.

⁶⁶ Lan F. et al., S. 195.

⁶⁷ Dini et al. 2001, S. 6.

etwa 23% davon selbsthemmende Strukturen aufweisen und nicht durch die sequenzielle Demontagemethode zerlegt werden können.⁶⁸

2.2.3 Demontageroboter

Der globale Roboter Markt wächst enorm schnell. Im Jahr 2017 stieg der weltweite Roboterabsatz um 30% und erreichte damit das fünfte Jahr in Folge einen Höchststand.⁶⁹ In Zukunft werden Roboter noch beliebter sein, als sie es heute schon sind, was vor allem an den sinkenden Preisen und dem Aufkommen von COBOTS liegt.⁷⁰ Neue technische Möglichkeiten und die Implementierung von KI-Technologien tragen weiter zu flexibleren Anwendungsfällen bei.⁷¹

Die derzeit jedoch in der Industrie am häufigsten angewandte Technik, um Teile zu demontieren, ist das Schreddern. Dabei werden ganze Produkte oder Komponenten in einen Industrieschredder geworfen, welcher die Komponenten in kleinere, leichter zu trennenden Teilen zerlegt. Dieses Verfahren lässt erheblichen Spielraum für Verbesserungen bei der Rückgewinnungsrate sowie der Qualität und Reinheit der gewonnenen Materialien. Moderne Geräte werden immer kleiner, komplexer und enthalten ein breites Spektrum an unterschiedlichen Materialien. Diese Vielfalt an unterschiedlichen Materialien macht die Schreddertechnik unwirksam und es wird schwieriger aus dem geschredderten Schrott einzelne Materialien zu isolieren.⁷²

Eine Alternative ist die Automatisierung der Demontage mit Hilfe von Robotern. Dies hat jedoch noch keine breite Anwendung in der Industrie und der Abfallwirtschaft gefunden. Bisher wurden verschiedene Versuche unternommen, die Demontage von hochkomplexen Produkten wie Autos und elektrischen Bauteilen zu automatisieren, aber nur wenige wurden bisher in der Industrie erfolgreich umgesetzt. Das wohl bekannteste Beispiel für einen funktionierenden Demontageroboter ist der Recycling Roboter Daisy und sein Vorgänger Liam von Apple.⁷³

Apple startete 2016 ein Forschungsprojekt, um die Rückgewinnung von Materialien aus gebrauchten Produkten zu verbessern. Durch die Entwicklung eines spezialisierten Roboters können einzelne Komponenten aus einem Gerät entnommen werden, anstatt alles zu zerkleinern. Das Endergebnis sind einzelne Teile mit unterschiedlichen Materialien. Die größte technische Herausforderung dabei ist, mit der Variabilität der Teile umgehen zu können. Obwohl der Roboter nur iPhone Modelle zerlegen kann, kommen diese mit einer Vielzahl an internen und externen Schäden,

⁶⁸ Wang et al. 2020, S. 5.

⁶⁹ International Federation of Robotics (IFR) 2018, S. 13.

⁷⁰ Ein COBOT ist ein kollaborativer Roboter, der mit dem Menschen gemeinsam arbeitet und nicht durch Schutzzäune von diesen getrennt ist.

⁷¹ Poschmann et al. 2020, S. 342.

⁷² Shannon et al. 2016, S. 2.

⁷³ Poschmann et al. 2020, S. 343.

welche die Demontage erschweren. Daher gibt es für ein Modell viele unterschiedliche Möglichkeiten einzelne Komponenten voneinander zu trennen.⁷⁴

Der Einsatz von Robotern bei Demontgearbeiten könnte enorme Effizienzsteigerung bringen, wenn die derzeitigen Probleme überwunden werden können. Mit Hilfe neuer Entwicklungen in der Robotik, künstlicher Intelligenz und Computer Vision wäre es möglich, den Demontageprozess zu revolutionieren und damit einen großen Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft zu machen.⁷⁵

⁷⁴ Shannon et al. 2016.

⁷⁵ Poschmann et al. 2020, S. 353.

2.3 Demontagealgorithmen

„Ein Algorithmus ist ein endliches, schrittweises Verfahren zur Berechnung von gesuchten aus gegebenen Größen, in dem jeder Schritt aus einer Anzahl ausführbarer, eindeutiger Operationen und einer Angabe über den nächsten Schritt besteht.“⁷⁶

Dabei transformiert ein Algorithmus Eingabedaten (Input) in Ausgabedaten (Output) wie in Abbildung 7 zu sehen.



Abbildung 7: Algorithmus⁷⁷

2.3.1 Optimierungsalgorithmen

Optimierungsalgorithmen beschäftigen sich damit, optimale Parameter eines Problems zu finden. Im Falle der Demontage geht es darum, den Aufwand für die Demontage zu minimieren. Dies geschieht durch eine optimale Entnahmesequenz der Einzelteile und Baugruppen. Für diese Art von Problemen haben sich einige Algorithmen bewährt, welche im Folgenden kurz umrissen werden:

- Brute Force Algorithmen
- Baugruppenerkennung
- Rekursive Algorithmen
- Vereinfachungs-Algorithmen
- Heuristische Algorithmen
- Greedy Algorithmen
- Ant Colony Optimization
- Bee Algorithmen
- Genetic Algorithmen

⁷⁶ Rechenberg 2000.

⁷⁷ Darstellung des Verfassers

2.3.1.1 Brute Force Algorithmen

Brute Force, auf Deutsch „rohe Gewalt“, ist eine Lösungsmethode, bei der alle möglichen Fälle durchprobiert werden, bis das gewünschte Ergebnis erreicht wird. Die Algorithmen in dieser Kategorie berechnen anhand bestimmter Regeln alle möglichen Demontagesequenzen. Nachdem diese berechnet wurden, ist es möglich, die Reihenfolgen zu bewerten und die beste auszuwählen. Bei dieser Methode werden alle möglichen Reihenfolgen durchprobiert, daher ist sie sehr rechenintensiv und nicht effizient.⁷⁸

2.3.1.2 Baugruppenerkennung

Die Methode der Baugruppenerkennung zielt darauf ab, unterschiedliche Unterbaugruppen zu identifizieren. Eine Unterbaugruppe ist eine Menge von Einzelteilen welche unabhängig von den anderen betrachtet werden kann. Dadurch ist es möglich, das Problem in kleinere Subprobleme aufzuteilen und diese parallel zu lösen.⁷⁹

2.3.1.3 Rekursive Algorithmen

Ein rekursiver Algorithmus ist ein Verfahren, welches sich immer wieder selbst aufruft. Dies eignet sich vor allem für Probleme, welche sich in kleinere, wiederholbare Probleme zerlegen lassen. Besonders gut lassen sich damit Aufgaben mit vielen Verzweigungen lösen, die zu komplex für einen iterativen Ansatz sind. Rekursion eignet sich für Bäume, da sich mehrere Verzweigungen ohne aufwendige Bedingungen prüfen lassen.⁸⁰

2.3.1.4 Vereinfachungs-Algorithmen

Bei der Vereinfachung geht es darum ein komplexes System simpler zu machen, ohne dabei wertvolle Information zu verlieren. Um eine Baugruppe zu vereinfachen, können beispielsweise Verbindungsteile und Schrauben zusammengefasst werden. Auch das Ignorieren solcher Normteile bei der Sequenzberechnung ist eine Möglichkeit die Komplexität und dadurch den Rechenaufwand zu reduzieren.⁸¹

2.3.1.5 Heuristische Algorithmen

Ein heuristischer Algorithmus ist ein Verfahren, welches Genauigkeit und Präzession gegen Geschwindigkeit eintauscht. Diese Problemlösungsmethode liefert zwar nicht immer die optimale Lösung, jedoch oft eine für das Problem ausreichende. Ziel eines heuristischen Algorithmus ist es, sich einer optimalen Lösung anzunähern. Besonders für komplexe Optimierungsprobleme ist die Heuristik eine beliebte Methode, da mit wenig Aufwand eine gute Lösung gefunden werden kann.⁸²

⁷⁸ Ababneh Mohammad et al. 2006.

⁷⁹ Pham et al. 2018.

⁸⁰ lateinisch recurrere „zurücklaufen“

⁸¹ JingRong Li et al. 2009.

⁸² Avikal et al. 2014.

2.3.1.6 Greedy Algorithmen

Der Greedy Algorithmus gehört zu der Gruppe der heuristischen Methoden und versucht, sich einer optimalen Lösung schrittweise anzunähern. Diese Optimierungsmethode teilt das Problem in mehrere Level. Die Hauptidee ist es, für jedes Level ein optimales Ergebnis zu bekommen. Das Ergebnis jeder Stufe wird als Input für die nächste Stufe verwendet und so wird eine global optimale Lösung berechnet. Greedy-Algorithmen gehören zu den am häufigsten verwendeten und einfachsten Methoden zur Lösung von Optimierungsproblemen.⁸³

2.3.1.7 Ant Colony Optimization

Der Ant Colony Optimization Algorithmus ist durch das Verhalten echter Ameisen inspiriert. Ameisen stoßen bei der Erkundung ihrer Umgebung Pheromone aus, mit denen sie sich den kürzesten Weg zur Nahrung zeigen. Andere Ameisen wählen oft den Weg mit der höchsten Pheromonkonzentration. Die „künstlichen“ Ameisen kommunizieren auf ähnliche Weise und schaffen es dadurch, den kürzesten Weg zu finden.⁸⁴

2.3.1.8 Bee Algorithmen

Eine weitere Optimierungsmethode, welche auf dem Verhalten von Tieren beruht, ist der Bee Algorithmus. Er simuliert das Futtersuchverhalten von Bienen. In seiner Grundversion führt der Algorithmus eine Art Nachbarschaftssuche kombiniert mit einer globalen Suche durch und kann sowohl für die kombinatorische als auch für die kontinuierliche Optimierung verwendet werden.⁸⁵

2.3.1.9 Genetic Algorithmen

Ein Genetischer Algorithmus ist durch den Prozess der natürlichen Selektion inspiriert und gehört zu der Klasse der evolutionären Algorithmen. Bei dieser Methode werden am Anfang zufällige Lösungen angenommen. Im nächsten Schritt werden die besten Ergebnisse genommen und miteinander verknüpft. Es überleben also immer die besten Lösungen, aus welchen dann eine neue Lösung generiert wird.⁸⁶

2.3.2 Darstellungen

Demontagealgorithmen im speziellen Beschäftigen sich damit, die optimale Demontagesequenz zu generieren, also die Reihenfolge, in welcher die einzelnen Teile entnommen werden müssen, herauszufinden. Der erste Schritt bei der Generierung einer Demontagesequenz ist es jedoch, ein Produkt so darzustellen, dass es von einem Computer weiterverarbeitet werden kann. Ein CAD-Modell eignet sich dafür nur bedingt, da es viele, für die Sequenzgenerierung nicht notwendige

⁸³ McGovern und Gupta 2003.

⁸⁴ McGovern und Gupta 2006.

⁸⁵ Percoco und Diella 2013.

⁸⁶ Shimizu et al. 2007.

Informationen enthält und dadurch die Berechnung sehr lange und komplex werden kann. Ein Produkt besteht aus einer Gruppe miteinander verbundener Teile und/oder Unterbaugruppen. Eine gute Darstellung muss dabei nicht nur die Einzelteile beschreiben, sondern auch die Beziehung zwischen diesen. Darstellungen, mit denen ein Computer gut umgehen und effizient rechnen kann sind.⁸⁷

- Matrizen
- Graphen
- Bäume

2.3.2.1 Matrizen

Eine Matrix ist eine in der Mathematik oft verwendete Darstellung von Elementen, welche in einer Tabellenform angeordnet sind (Abbildung 8). Das Schema hat m Zeilen und n Spalten und der Eintrag einer Matrix in der i-ten Zeile und der j-ten Spalten wird als a_{ij} bezeichnet. Diese Darstellung ermöglicht es, Produkte und ihre Eigenschaften numerisch darzustellen. Solche numerischen Darstellungen können von Computern leicht verarbeitet werden und können deshalb sehr performant und effizient sein.⁸⁸

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

Abbildung 8: Matrix⁸⁹

2.3.2.2 Graph Darstellung

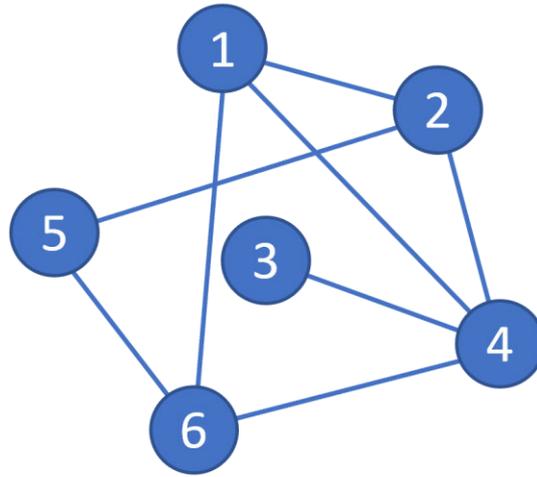
Ein Graph (Abbildung 9) ist eine abstrakte Struktur, welche Objekte und deren Verbindungen repräsentiert, wobei man Knoten und Kanten unterscheidet. Ein Knoten kann verschiedene Eigenschaften haben und eine Kante verbindet ein Paar von Knoten. In einer Baugruppe könnte beispielweise jeder Knoten ein Einzelteil repräsentieren und jede Kante eine Berührung zwischen den Teilen.⁹⁰

⁸⁷ Dini et al. 2001, S. 3.

⁸⁸ Galantucci et al. 2004, S. 69.

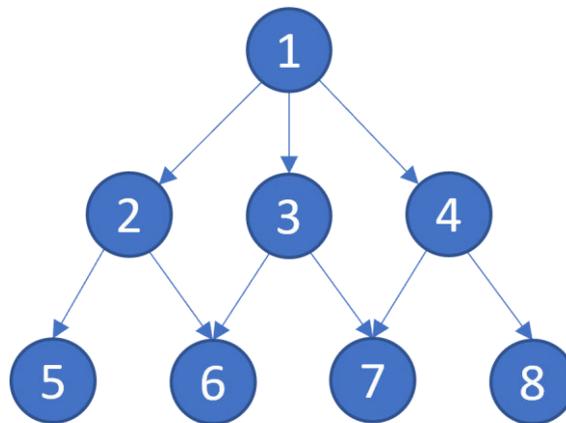
⁸⁹ Darstellung des Verfassers

⁹⁰ Dong et al. 2006, S. 507.

Abbildung 9: Graph⁹¹

2.3.2.3 Baum Darstellung

Ein Baum (Abbildung 10) ist eine Datenstruktur, in der sich hierarchische Strukturen abbilden lassen. Dies ermöglicht es, Baugruppen und ihre Abhängigkeiten darzustellen. Der Vorteil von Baumdarstellungen und Graphen ist, dass sie sowohl für den Computer, aber auch für den Menschen leicht verständlich sind. Bei Matrizen sind dagegen die Verbindungen zwischen den einzelnen Objekten auf den ersten Blick nicht so einfach zu erkennen.⁹²

Abbildung 10: Baum⁹³

⁹¹ Darstellung des Verfassers

⁹² Bahubalendruni et al. 2019, S. 212.

⁹³ Darstellung des Verfassers

2.4 Zusammenfassung und Fazit

Die Transformation von einer linearen Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft ist ein langwieriger Prozess und benötigt viel Zeit und Aufwand. Aus diesem Grund ist es wichtig, so bald als möglich mit der Transformation zu beginnen und Unternehmen so viel Hilfestellung wie möglich zu bieten. Die Demontagemethoden, welche heutzutage in der Industrie verwendet werden, sind im Allgemeinen zerstörend und haben nicht die Wiederverwendung im Sinn. Diese sind zwar universell anwendbar und können Produkte für das Recycling aufbereiten, indem sie einzelnen Materialien extrahieren, sind jedoch für die zerstörungsfreie Demontage ungeeignet.

Will man Produkte zerstörungsfrei demontieren, muss dies immer noch manuell gemacht werden, was viel Zeit und Geld erfordert. Dieser manuelle Vorgang kann mit einem unterstützenden Algorithmus, welcher die optimale Demontagesequenz berechnet, effizienter gestaltet werden. Wie in den theoretischen Grundlagen aufgezeigt, gibt es einige Algorithmen, welche dabei helfen können, eine effiziente Demontagesequenz zu erstellen. In den nachfolgenden Kapiteln wird dargelegt, welcher dieser Algorithmen sich besonders für die Demontage eignet und wie damit eine Demontagelogik erstellt werden kann.

3 Aktueller Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich Demontagealgorithmen, anhand einer systematischen Literaturanalyse, erläutert. Zuerst wird die Durchführung einer solchen Analyse erklärt, um in nachhinein beschreiben zu können, was es aktuell für Demontage Methoden gibt, wo die Lücken dies sind und was zu tun ist, um die Lücken zu schließen.

3.1 Systematische Literaturanalyse

Um eine nachvollziehbare und reproduzierbare Analyse der vorhandenen Literatur über Demontageprozesse zu liefern, wurde die Methode der systematischen Literaturanalyse angewandt. Obwohl diese viel Zeit in Anspruch nimmt und Sorgfalt erfordert, gilt sie als eine der effizientesten Methoden zur Bewertung von Literatur. Das Ziel einer Literaturrecherche ist es, das verfügbare Wissen zu untersuchen und zu bewerten, um dann den vorhandenen Wissensbestand weiterzuentwickeln. Systematische Analysen unterscheiden sich von traditionellen narrativen Analysen durch ein nachvollziehbares, wissenschaftliches und transparentes Vorgehen. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass das Ergebnis der Analyse nicht von der eigenen Meinung beeinflusst wird.⁹⁴

3.1.1 Methode der systematischen Literaturanalyse

Nach Tranfield wird eine systematische Literaturanalyse in drei Schritten durchgeführt:⁹⁵

1. Planung
2. Durchführung
3. Analysieren

3.1.1.1 Planung

Vor Beginn einer systematischen Analyse soll eine Übersichtsstudie durchgeführt werden, um die Relevanz und den Umfang der Literatur zu bewerten und das Fachgebiet abzugrenzen. Im nächsten Schritt wird eine Forschungsfrage definiert. Diese Frage ist für die systematische Analyse von entscheidender Bedeutung, da sich weitere Aspekte des Forschungsprozesses aus ihr ergeben. Alle Schritte, welche im Laufe der Recherche durchgeführt werden, müssen in einem Protokoll festgehalten werden. Das Protokoll dient zu Bewahrung der Objektivität. Es enthält Informationen

⁹⁴ Tranfield et al. 2003, S. 209.

⁹⁵ Tranfield et al. 2003, S. 214.

zur Forschungsfrage, zur Suchstrategie für die Identifizierung relevanter Studien und zu den Kriterien für die Aufnahme und den Ausschluss von Literatur in die Analyse.⁹⁶

3.1.1.2 Durchführung

Eine systematische Suche beginnt mit der Identifizierung von Schlagwörtern und Suchbegriffen, die sich aus der Übersichtsstudien ergeben. Aus diesen müssen dann die am besten geeigneten Suchbegriffe ausgewählt werden. Die Suchstrategie muss so detailliert wie möglich dokumentiert werden, um eine Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Die Suche soll nicht nur in veröffentlichten Artikel aus Bibliotheksdatenbanken stattfinden, sondern auch unveröffentlichte Studien, das Internet und sogar persönlich angefragte Information beinhalten. Das Ergebnis der Suche ist eine vollständige Auflistung aller Artikel, auf der die Analyse beruht. Diese werden zunächst grob überflogen und dann die für die Analyse relevanten Quellen detailliert ausgewertet. Ausschließlich Studien, welche alle Einschlusskriterien erfüllen und bei denen keines der Ausschlusskriterien zutrifft, werden in der finalen Recherche berücksichtigt. Um subjektive Bewertungen zu vermeiden, wird eine Bewertungsmatrix aufgestellt. Diese enthält allgemeine Informationen zu Titel, Autor und Publikationsdetails sowie spezifische Informationen zum Thema. In solch einer Matrix werden alle Schritte der Analyse festgehalten.⁹⁷

3.1.1.3 Analyse

Um ein Verständnis und einen Überblick über die Ergebnisse zu liefern, sollten die analysierten Artikel zusammengefasst werden. Die Ergebnisse werden anhand von spezifischen Beispielen erklärt und die Schlussfolgerungen müssen auf nachvollziehbaren Fakten beruhen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wird dann die Forschungsfrage möglichst objektiv beantwortet.⁹⁸

3.1.2 Durchführung der systematischen Literaturrecherche

Die Durchführung der Literaturrecherche erfolgt in vier Schritten:

- Auswahl der Datenbank
- Bestimmung der Suchbegriffe
- Bestimmung der Ein- und Ausschlusskriterien
- Literatúrauswahl

3.1.2.1 Auswahl der Datenbank

Die Durchführung der systematischen Literaturanalyse wurde mit Hilfe der online Datenbank Scopus umgesetzt. Scopus ist eine quellenneutrale Literaturdatenbank, die von unabhängigen Fachleuten verwaltet wird. Darüber hinaus bietet sie

⁹⁶ Tranfield et al. 2003, S. 214.

⁹⁷ Tranfield et al. 2003, S. 215.

⁹⁸ Tranfield et al. 2003, S. 218.

leistungsstarke Recherche- und Analysetools an. Die Datenbank beinhaltet mehr als 75 Millionen Artikel von 5 000 internationalen Verlagen. Scopus umfasst dabei die Bereiche Naturwissenschaften, Technik, Medizin, Sozialwissenschaften, Kunst- und Geisteswissenschaften.⁹⁹

3.1.2.2 Bestimmung der Suchbegriffe

Die Sprache, welche in der Wissenschaft mit Abstand am häufigsten verwendet wird, ist Englisch. Aus diesem Grund ist der definierte Suchterm auch auf Englisch. Aus der Übersichtsanalyse hat sich der Term „automated disassembly sequence planning“ ergeben. Um möglichst viele Artikel miteinzubeziehen, wurden Synonyme für die einzelnen Begriffe des Terms gesucht. Diese Begriffe wurde mittels der Boole'schen Operatoren „AND“ und „OR“ verknüpft, um den finalen Suchterm zu bilden. Es wurden Titel, Abstract und Keywords nach den Suchbegriffen durchsucht. Der für die Literaturrecherche verwendete Suchterm ist in Abbildung 11 zu finden.

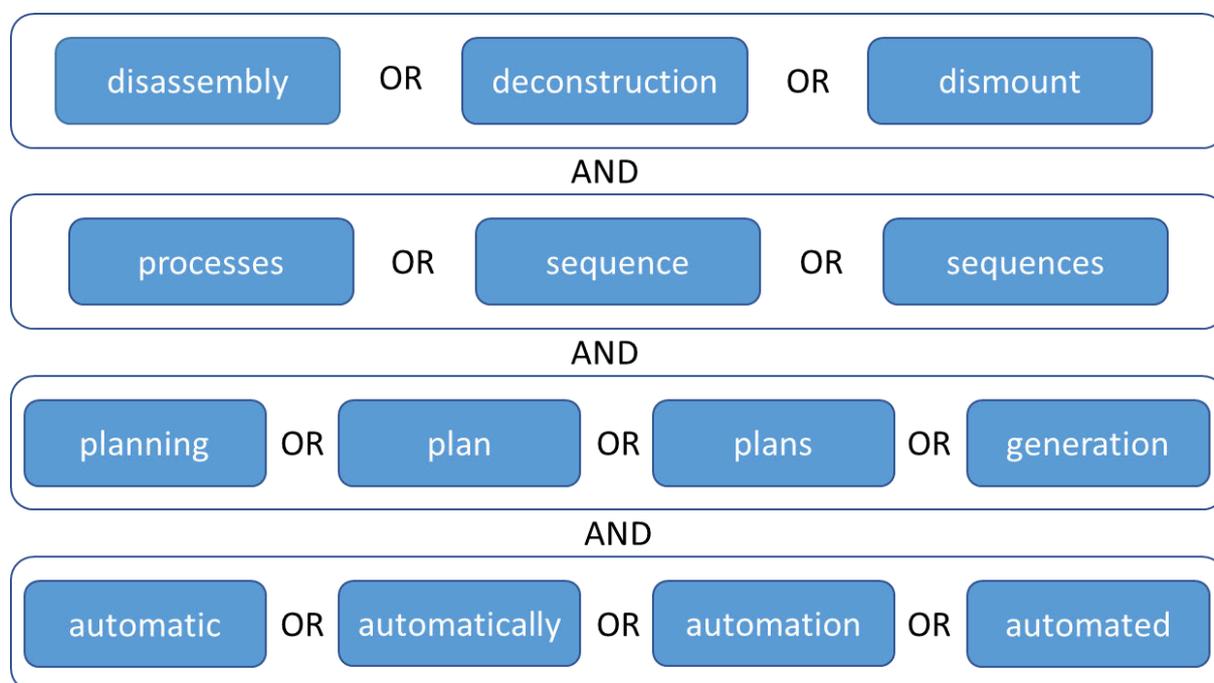


Abbildung 11: Aufgestellter Suchterm¹⁰⁰

3.1.2.3 Bestimmung der Ein- und Ausschlusskriterien

Die Ein- und Ausschlusskriterien helfen dabei, die Literatur, welche der Suchterm liefert, vorzufiltern. Das erste Filterkriterium ist das Fachgebiet, welches der Artikel behandelt. Ohne Filter schlägt die Datenbank Literatur in 18 unterschiedlichen Fachrichtungen vor. Für die Analyse werden jedoch ausschließlich Artikel in den Fachgebieten „Engineering“, „Computer Science“, „Mathematics“, „Decision

⁹⁹ Scopus 2019.

¹⁰⁰ Darstellung des Verfassers

Sciences“, „Business, Management and Accounting“ und „Materials Science“ berücksichtigt. Alle anderen Bereiche werden ausgeschlossen.

Scopus ist eine internationale Datenbank, deshalb wird auch Literatur in unterschiedlichen Sprachen vorgeschlagen. In dieser Arbeit werden jedoch nur englischsprachige Publikationen berücksichtigt da dies die Sprache der Wissenschaft ist.

Um einen aktuellen Überblick zu erhalten, wurden nur Artikel in der Recherche berücksichtigt, welche nach 2000 veröffentlicht wurden. Darüber hinaus sind nur Conference Papers und Articles berücksichtigt worden. Räumlich geographische Einschränkungen gab es nicht.

	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Fachgebiet	„Engineering“ „Computer Science“ „Mathematics“ „Decision Sciences“ „Business, Management and Accounting“ „Materials Science“	Sonstige Fachgebiete
Sprache	Englisch	Sonstige Sprachen
Jahr	2000-2021	Veröffentlichungen vor 2000
Dokument Typ	Articles, Conference Papers	Sonstige Dokument Typen

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien

3.1.2.4 Literatúrauswahl

Um die Literatur für die Analyse auszuwählen, wurde der zuvor beschriebene Suchbegriff in der Datenbank Scopus eingegeben. Die Suche nach relevanten Artikeln wurde am 21.06.2021 durchgeführt. Diese Suche lieferte 303 Artikel. Im nächsten Schritt wurden die Ein- und Ausschlusskriterien auf diese Publikationen angewandt, um die Literatur vorzufiltern.

Zuerst wurde nach Fachgebieten gefiltert und alle Artikel, welche nicht in den oben genannten Gebieten veröffentlicht wurden, entfernt. Einige Artikel in den Fachgebieten

Medizin, Chemie und Sozialwissenschaften wurden dadurch im Vorhinein ausgeschlossen. Die verbleibende Literatur enthielt neben Englisch auch Artikel auf Chinesisch, Japanisch und Deutsch. Da nur englischsprachige Literatur für diese Analyse verwendet wurde, wurden die anderen ausgeschlossen. Schlussendlich wurde noch nach Artikel und Conference Papers gefiltert. Das Ergebnis nach diesen Kriterien waren 260 Dokumente. Das ältere stammt aus dem Jahr 1988, da jedoch die aktuellen Entwicklungen der Demontage untersucht werden wurde die Literatur, welche vor 2000 veröffentlicht wurde, ebenfalls aus der Analyse ausgeschlossen. Schlussendlich blieben, nachdem alle Ein- und Ausschlusskriterien angewandt wurden, 203 Dokumente zum Überprüfen übrig.

Im nächsten Schritt wurden die Volltexte der Literatur organisiert. Von den 203 Texten sind 98 frei im Internet verfügbar. Die anderen Artikel waren über die Onlinebibliothek der Technischen Universität Wien erhältlich.

Von den 203 Dokumenten wurden Titel und Abstrakt studiert, um zu entscheiden, ob sie für die Literaturrecherche von Bedeutung sind. Titel die sich beispielsweise mit der Prozessplanung, Gebäudedemontage oder nicht mit der Demontagesequenz beschäftigen wurden dabei identifiziert und ausgeschlossen.

Nach dem Aussortieren aufgrund des Titels und des Abstracts blieben 82 Dokumente übrig. Von diesen wurden die Volltexte gelesen. Dadurch wurden weitere 14 Publikationen ausgeschlossen, da sie keine relevanten Informationen über die Generierung einer Demontagesequenz enthielten. Schlussendlich blieben 68 Texte, wie in Abbildung 12 zu sehen übrig, welche für die systematische Literaturrecherche verwendet wurden.

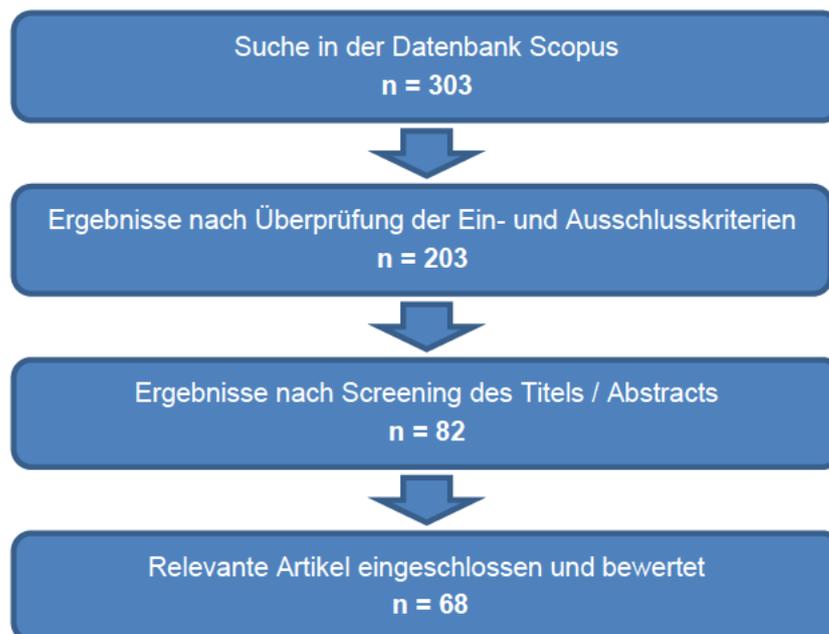


Abbildung 12: Verlauf der Literatúrauswahl¹⁰¹

¹⁰¹ Darstellung des Verfassers

3.2 Aktuelle Demontagealgorithmen

Anhand der oben beschriebenen Literaturanalyse wurden große Unterschiede in der Herangehensweise bei aktuellen Demontagealgorithmen identifiziert. Die einzelnen Autoren haben unterschiedliche Priorisierungen. McGovern und Gupta¹⁰² haben beispielsweise einen möglichst schnellen Algorithmus entwickelt, das Ziel von Friedrich et al.¹⁰³ hingegen war es, eine möglichst flexible Lösung für komplexe Produkte zu bieten.

Der erste Schritt bei allen Demontagealgorithmen ist es eine numerische Darstellung eines Produktes zu erstellen. Das in der Literatur am häufigsten verwendete Konzept, um die Bewegungen und Freiheitsgrade der einzelnen Teile darzustellen, ist die Matrixschreibweise und speziell die Interference Matrix. Kheder et al.¹⁰⁴ sowie Huang und Xu¹⁰⁵ verwenden jeweils drei Matrizen, um die möglichen Bewegungen der Teile in allen Achsen darzustellen (Abbildung 13). Dabei wird eine $n \times n$ Matrix verwendet, wobei n die Anzahl der Teile ist. Behindern sich zwei Teile bei ihrer Bewegung wird das mit einer „1“ gekennzeichnet, gibt es keine Störung und ein Teil kann sich gegenüber einem anderen beliebig bewegen, mit einer „0“.

$$\begin{array}{c}
 [I]_{+x} = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ P_1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ P_2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ P_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_5 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_7 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 [I]_{+z} = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ P_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_4 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_6 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ P_7 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 [I]_{+y} = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ P_1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ P_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ P_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_5 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Abbildung 13: Interference Matrix¹⁰⁶

Zhang et al. ergänzt diese Interference Matrix, indem er auch Kontaktinformationen mit aufnimmt. Eine „0“ bedeutet bei ihm keine Überschneidung bei einer Bewegung, eine „1“ bedeutet, zwei Teile berühren sich und eine „2“ bedeutet, die Teile schneiden sich bei einer Bewegung entlang einer der Achsen. Bei diesem Vorgehen wird ebenfalls eine Toleranz eingefügt, um eine unsaubere Konstruktion zu kompensieren.¹⁰⁷

Viele Algorithmen sind auf spezielle Ausgangsszenarien angepasst und benötigen neben den geometrischen Eigenschaften zusätzlich externe Daten als Input für die Berechnung der Demontage. Kheder benötigt beispielsweise für die Generierung einer optimalen Demontagesequenz verschiedene Parameter wie Teilvolumen, Werkzeugwechsel, Entnahmerichtung und Angaben über die Wartbarkeit der

¹⁰² McGovern und Gupta 2006.

¹⁰³ Friedrich et al. 2016.

¹⁰⁴ Kheder et al. 2018.

¹⁰⁵ Huang und Xu 2017.

¹⁰⁶ Kheder et al. 2018, S. 7.

¹⁰⁷ Zhang et al. 2017.

Komponenten.¹⁰⁸ Generell sind Informationen über die Demontagewerkzeuge in vielen Ansätzen wichtig. Weitere Daten, welche aus einer externen Datenbank entnommen werden können, sind Materialeigenschaften. Bahubalendruni und Varupala verwenden Informationen über den Anteil an giftigen Stoffen, um eine Toxizitätsmatrix aufzustellen. Mit dieser ist es ihnen möglich die Demontage auf das Recycling auszurichten.¹⁰⁹

Auch Informationen über die Entnahmezeiten einzelner Teile, spielen bei einigen Algorithmen eine große Rolle. Avikal verwendet beispielsweise Teilentnahmezeit, welche jedoch im Vorhinein anhand von Experimenten festgestellt werden müssen.¹¹⁰ Tao et al. benötigt neben der Entnahmezeit auch noch die Unterscheidung zwischen Einzelteil und Verbindungsteil.¹¹¹ Hadj et al. verwendet diese Information ebenfalls, um das Bauteil zu vereinfachen, indem es die Verbindungselemente eliminiert. Dadurch gibt es weniger Bauteile, die berechnet werden müssen und die Komplexität sinkt.¹¹²

Bei der Analyse ist aufgefallen, dass aktuell hauptsächlich heuristische Algorithmen für die Demontageplanung verwendet werden. Heuristische Algorithmen haben, gegenüber Brute Force Algorithmen, eine kurze Laufzeit, da sie nicht alle möglichen Ergebnisse berechnen und dann das Beste daraus auswählen, sondern durch intelligente Entscheidungen versuchen, eine Lösung nahe am Optimum zu finden. Brute Force Algorithmen funktionieren zwar bei einfachen Produkten mit wenigen Bauteilen, die Laufzeit steigt jedoch mit steigender Teilanzahl. Eine sehr einfache heuristische Methode, welche Aguinaga et al. verwenden, besteht in der Sortierung der Komponenten nach ihrer Größe. Bei den meisten Baugruppen ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass kleine Teile, wie Schrauben, direkt entfernt werden können. Jedoch ist dies Art der Optimierung nicht auf jedes Bauteil anwendbar und Produkte mit vielen ähnlich großen Teilen können nicht berechnet werden, daher werden meistens komplexere Heuristiken verwendet.¹¹³

Um dem Laufzeitproblem entgegenzuwirken vereinfacht Hadj et al. das zu demontierende Produkt. Verbindungsteile wie Schrauben, Unterlegscheiben und Muttern sind meist Standardteile und in einem Produkt häufig vertreten. Die Standardteile werden immer auf die gleiche Weise demontiert und können daher in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Dadurch wird es möglich bei einem Deckel, der mit mehreren Schrauben befestigt ist, nur noch die Demontage einer einzelnen Schraube zu berechnen, da die anderen auf die gleiche Art entfernt werden.

¹⁰⁸ Kheder et al. 2017.

¹⁰⁹ Bahubalendruni und Varupala 2021.

¹¹⁰ Avikal et al. 2014.

¹¹¹ Tao et al. 2018.

¹¹² Hadj et al. 2018.

¹¹³ Aguinaga et al. 2007.

Diese Vereinfachung ist jedoch nur möglich, wenn man zusätzliche Informationen über Verbindungsteile besitzt.¹¹⁴

Algorithmen, welche vom Verhalten von Tieren inspiriert sind, werden auch oft für die Lösung des Demontageproblems verwendet und haben durch ihren heuristischen Aufbau meist eine kurze Laufzeit. Hongbo Shan et al. schlägt einen Ant Colony Optimization Algorithmus für die Optimierung der Demontager Reihenfolge vor, welcher auf der Anzahl an Komponenten, den Demontagewerkzeugen und den Demontagerichtungen beruht.¹¹⁵ Huang und Xu verwenden eine modifizierte Strategie zur Initialisierung und Aktualisierung von Pheromonspuren, welche jedoch sehr sensibel auf Parameteränderungen reagiert.¹¹⁶

Viele Algorithmen versuchen, die Bauteile sequenziell zu demontieren. Diese Vorgehensweise kann jedoch dazu führen, dass es zu Selbsthemmungen kommt. Lan et al. hat dieses Problem erkannt und es durch die Identifizierung von Unterbaugruppen behoben.¹¹⁷ Wang et al. beschäftigen sich ebenfalls mit dem Problem der Selbsthemmung und schlagen eine flexible Methode vor, die für die selektive Demontage geeignet ist.¹¹⁸ Pham et al. versuchen, trennbare Unterbaugruppen mit Hilfe einer rekursiven Strategie zu finden. Ihr Algorithmus ist so konzipiert, dass er mit jeglicher Art von Unterbaugruppen mit Selbsthemmung funktioniert.¹¹⁹

3.3 Lücken aktueller Demontagealgorithmen

Viele der analysierten Algorithmen verwenden das weit verbreitete STEP (Standard for the Exchange of Product Data) Dateiformat. STEP Dateien können 3D Objekte darstellen und sind mit so gut wie jedem CAD Programm kompatibel, wodurch dieses Format oft zum Datenaustausch verwendet wird. Durch die weite Verbreitung und die Kompatibilität, ist dieses Format ideal für einen universell einsetzbaren Algorithmus. Aufgrund der ASCII-Struktur (American Standard Code for Information Interchange) der STEP-Datei ist sie einfach zu lesen und kann direkt mit Hilfe einer Programmiersprache analysiert werden. Dies ist jedoch sehr aufwändig da alle Funktionen, vom Extrahieren der Informationen aus der STEP-Datei, bis hin zur Kollisionsprüfung, selbst programmiert werden müssen.¹²⁰

Eine andere, weit verbreitete Option ist es, auf CAD Programme zurückzugreifen und die Funktionen dieser zu verwenden, um die STEP-Datei zu verarbeiten. Viele der

¹¹⁴ Hadj et al. 2018.

¹¹⁵ Hongbo Shan et al. 2007.

¹¹⁶ Huang und Xu 2017.

¹¹⁷ Lan F. et al.

¹¹⁸ Wang et al. 2020.

¹¹⁹ Pham et al. 2018.

¹²⁰ Pan et al. 2005.

bekanntesten CAD Programme, besitzen APIs (Application Programming Interface), die es ermöglichen, mit den 3D Objekten zu interagieren und eigene Funktionen zu schreiben. Die am meisten verwendeten Schnittstellen sind jene von SolidWorks und CATIA. Beides sind kommerzielle Programme mit denen parametrische Modelle, Baugruppen und Zeichnungen erzeugt werden können. Der Nachteil an diesen Programmen ist jedoch, dass sie sehr teuer, nicht quelloffen und meistens auf Windows beschränkt sind.¹²¹

Des Weiteren sind viele Algorithmen auf spezielle Ausgangsszenarien zugeschnitten und demontieren nur eine spezielle Art von Produkten oder benötigen Informationen, welche nicht aus einer STEP-Datei extrahiert werden können. Das bedeutet, um solch einen Algorithmen zu verwenden, ist Vorwissen über das zu demontierende Produkt notwendig. Dieses Vorwissen muss oft manuell bereitgestellt werden, was dazu führt, dass die Demontagegenerierung hauptsächlich von Spezialisten durchführbar ist. Beispiele für Vorwissen wären Entnahmezeiten, Materialeigenschaften oder Informationen über Zwangsbedingungen der einzelnen Teile zueinander.

Das Laufzeitproblem spielt heutzutage, aufgrund der hohen Rechenleistung und dem Einsatz von Heuristischen Algorithmen eine immer kleinere Rolle, was jedoch öfter zu Problemen führt ist das Sequenzielle demontieren von Produkten. Je komplizierter die Produkte werden und je mehr Teile diese besitzen, desto häufiger kommt es zu Selbsthemmung bei der sequenziellen Demontage. Die Algorithmen, welche sich mit der Vermeidung der Selbsthemmung beschäftigen, demontieren das Produkt jedoch nur selektiv und nicht vollständig. Das bedeutet sie zerlegen es in trennbare Unterbaugruppen, welche dann nicht weiter behandelt werden. Eine gute Demontalogik sollte aber in der Lage sein, ein Produkt vollständig zu zerlegen und nicht nach der Erstellung von Unterbaugruppen aufhören.

Der letzte Punkt, welcher bei vielen Demontageprogrammen vernachlässigt wird, ist die Benutzerfreundlichkeit. Die Bedienung der bestehenden Programme läuft entweder über die Kommandozeile oder als Add-in über die Benutzeroberfläche des verwendeten CAD-Programms ab. Dabei ist eine Bedienung über die Kommandozeile für viele Benutzer überfordernd und Add-ins können nur in Kombination mit dem CAD-Programm verwendet werden und nicht eigenständig. Darüber hinaus wird die berechnete Demontagesequenz meistens nur in Textform ausgegeben, was zu einer unübersichtlichen Darstellung bei Produkten mit vielen Teilen führt.

¹²¹ Osti et al. 2017, S. 1485.

3.4 Zusammenfassung und Fazit

Anhand der vorhandenen Literatur wird ersichtlich, dass das Problem der automatisierten Demontage aktueller denn je ist. Mit Hilfe der verfügbaren Rechenleistung und durch heuristische Algorithmen ist es möglich, auch komplexe Produkte in kurzer Zeit zu demontieren. Um eine robuste, universell einsetzbare Logik, die von jedem verwendet werden kann, zu entwickeln, müssen darüber hinaus jedoch einige Punkte betrachtet werden:

- Die Ein- und Ausgabe von Informationen muss einfach gestaltet sein
- Es darf kein Vorwissen zu dem Produkt, welches demontiert werden soll, vorausgesetzt werden
- Die verwendete Software (CAD-Programm) muss frei zugänglich und plattformübergreifend sein
- Die Laufzeit muss geringgehalten werden
- Selbsthemmung muss durch Zerlegung in Unterbaugruppen vermieden werden
- Die Bedienung muss anhand einer simplen Benutzeroberfläche möglich sein

Da es aktuell keinen Algorithmus auf dem Markt gibt, der all diese Voraussetzungen erfüllt, wird im nächsten Kapitel die Entwicklung eines solchen beschrieben.

4 Entwicklung der Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird der entwickelte Demontagealgorithmus im Detail beschrieben. Es werden die Hintergründe der einzelnen Module erläutert und anhand von Pseudocode erklärt. Zuerst wird das Konzept der Vorgehensweise und deren Entwicklung beschrieben. Um die oben beschriebenen Lücken zu schließen, wurde sich der Methode des morphologischen Kastens bedient und mit Hilfe dieser geeignete Algorithmus Komponenten ausgewählt. Der entwickelte Algorithmus besteht aus zwei großen Teilen:

- Numerische Repräsentation
- Generierung der Demontagesequenz

Im Anschluss an die detaillierte Beschreibung des Algorithmus wird die Umsetzung dieses in einen Proof-Of-Concept-Demonstrator vorgestellt.

Um eine optimale Demontagesequenz zu erstellen, wurden folgende Annahmen getroffen:

- Jede Komponente der Baugruppe hat eine feste Geometrie und ist nicht deformierbar
- Komponenten werden nur entlang einer der sechs Hauptachsen des kartesischen-Koordinatensystems entnommen
- Wird ein Teil entfernt, bleiben die restlichen Komponenten auf ihrer ursprünglichen Position
- Die Komponenten werden nicht von der Gravitationskraft beeinflusst
- Die Komponenten in dem CAD Datei sind einzelne Bauteile mit fixer Position
- Normteile in der CAD Datei, wie zum Beispiel Schrauben, haben eine glatte Oberfläche (Gewinde werden nicht eingezeichnet)

Diese Annahmen wurden getroffen, um die Machbarkeit des Algorithmus zu gewährleisten. Gibt es beispielsweise deformierbare Komponenten, wie Gummis, ist es mit der hier vorgestellten Methode nicht möglich, Kollisionen eindeutig zu bestimmen. Des Weiteren werden nur Bewegungen entlang des kartesischen Koordinatensystems durchgeführt, deshalb können Komponenten, welche schräg dazu liegen nicht mit dieser Methode demontiert werden. Um immer die aktuelle Position der Komponenten zu kennen ist es essenziell nur eine Komponente oder Baugruppe auf einmal zu bewegen. Darüber hinaus wird der Einfluss der Gravitation nicht bei der Bewegung der Teile berücksichtigt. Die letzte Voraussetzung ist, dass alle Objekte glatte Oberflächen haben. Ist dies nicht der Fall muss FreeCAD viel mehr Berechnungen bei der Kollisionsprüfung durchführen, was zur erheblichen Leistungsverlusten führt.

4.1 Konzeption der Vorgehensweise

Im Kapitel Konzeption der Vorgehensweise wird beschrieben aus welchen Komponenten der Algorithmus besteht, wie diese Komponenten zusammenhängen und warum spezielle Komponenten ausgewählt wurden. Das Auswahlverfahren wurde mit Hilfe des morphologischen Kastens durchgeführt, welche im ersten Abschnitt kurz beschrieben wird.

4.1.1 Morphologischer Kasten

Für die Auswahl der Komponenten des Algorithmus wurde sich der Methode des Morphologischen Kastens bedient. Der Morphologische Kasten wurde in den späten 1940er Jahren von Fritz Zwicky entwickelt und hilft dabei, komplexe Probleme zu erfassen und zu lösen. Die Demontagelogik wird strukturiert in ihre Elemente / Parameter zerlegt und für diese werden mögliche Varianten aufgelistet. Durch das Kombinieren dieser Varianten ist es möglich, neue Ansätze zu identifizieren.¹²²

Die Auswertung der Literatur mithilfe des Morphologischen Kastens erfolgt in 3 Schritten:¹²³

1. Identifizierung der wichtigsten Parameter
2. Identifizieren möglichen Ausprägungen
3. Identifizieren sinnvoller Kombinationen

4.1.1.1 Identifizierung der wichtigsten Parameter

Wie in den theoretischen Grundlagen erklärt besteht ein Demontagealgorithmus immer aus einem Input, dem Algorithmus selbst und einem Output. Des Weiteren muss das zu demontierende Produkt in eine dem Computer leserlichen Darstellung gebracht werden. Um so eine Darstellung zu generieren, muss die CAD-Datei eines Produktes mithilfe geeigneter Software analysiert werden.

Anhand des Aufbaues der Demontagelogik lassen sich folgende Parameter identifizieren:

- CAD-Software
- Darstellung
- Input
- Algorithmus
- Output

¹²² Asunción Álvarez und Tom Ritchey 2015, S. 1.

¹²³ Asunción Álvarez und Tom Ritchey 2015, S. 29.

4.1.1.2 Identifizieren möglichen Ausprägungen

Im nächsten Schritt wird die Ausprägung der eben identifizierten Parameter bestimmt. Anhand der analysierten Literatur zu Demontagealgorithmen lassen sich für alle Parameter mögliche Varianten bestimmen. Die Ausprägungen werden unter die einzelnen Parameter geschrieben wodurch eine Matrix, der sogenannte Morphologische Kasten entsteht, welcher in Abbildung 14 dargestellt ist.

CAD Software	Darstellung	Input	Algorithmus	Output
FreeCAD	Matrix	Geometrische Eigenschaften	Brute Force	Optimale Reihenfolge
SolidWorks	Tree	Externer Sensor	Baugruppen Erkennung	Mögliche Reihenfolge
CATIA	Graph	Verbindungssteile / Verbindungsart	Rekursiv	Richtungen
Keine		Externe Datenbank	Vereinfachung	Werkzeuge
		Demontage Zeiten	Heuristik Algorithmus	Explosionszeichnung
			Greedy	Numerische Repräsentation
			Ant Colony Optimization	
			Bee Algorithmus	
			Genetic Algorithmus	

Abbildung 14: Ausprägungen des morphologischen Kastens¹²⁴

4.1.1.3 Identifizieren sinnvoller Kombinationen

Im finalen Schritt der Auswertung werden geeignete Kombinationen von Ausprägungen gesucht. Dabei werden alle Konfigurationen untersucht, um festzustellen, welche davon durchführbar, praktisch und interessant sind und welche nicht. Ziel ist es, dadurch das Beste aus allen schon vorhandenen Algorithmen herauszuziehen und eine neuartige Logik zu entwickeln, welche alle Anforderungen erfüllt.¹²⁵

4.1.2 Auswahl geeigneter Algorithmus-Elemente

Um eine Logik zu entwickeln, welche die in Kapitel 3.3 identifizierten Lücken schließt, müssen die einzelnen Elemente ausgewählt und in Verbindung zueinander gebracht werden. Dabei werden die vorher definierten Parameter mit ihren Ausprägungen analysiert und bewertet. Ziel dabei ist es die einzelnen Ausprägungen so zu kombinieren, dass ein neuer, simpler, universell einsetzbarer und robuster Algorithmus herauskommt.

¹²⁴ Darstellung des Verfassers

¹²⁵ Asunción Álvarez und Tom Ritchey 2015, S. 29.

4.1.2.1 CAD Software

Der einfachste Weg, um auf die Informationen einer STEP-Datei zuzugreifen, ist über die Verwendung existierender CAD Schnittstellen. Viele kommerzielle Programme bieten die Möglichkeit eigene Funktionen über eine API zu erstellen. Da das in dieser Arbeit entwickelte Programm jedoch universell einsetzbar sein soll, wird auf die Verwendung von kostenpflichtiger Software verzichtet. Eine kostenlose alternative zu SolidWorks oder CATIA, welche alle notwendigen Funktionen zum Extrahieren der geometrischen Daten besitzt, ist das unter anderem von Osti et al. verwendete Programm FreeCAD.¹²⁶

FreeCAD ist eine parametrische 3D Computer-Aided-Design (CAD) und Building-Information-Modeling (BIM) Software. Sie ist für die Konstruktion von Maschinenbauprodukten gedacht, findet jedoch auch in der Architektur oder der Elektrotechnik Anwendung. FreeCAD ist frei und quelloffen, unter der LGPL-2.0-or-later-Lizenz, und für die Betriebssysteme Linux, macOS und Windows verfügbar.¹²⁷

Die Benutzer können die Funktionalität der Software mit Hilfe der Programmiersprache Python erweitern. Die grafische Benutzeroberfläche bietet eine Konsole an in der der Python Code ausgeführt werden kann, wodurch es möglich ist, alle Funktionen von FreeCAD zu steuern. Darüber hinaus kann FreeCAD auch von anderen Programmen als Bibliothek verwendet werden. Um FreeCAD in ein eigenständiges Python Skript einzubinden, muss dieses auf dem jeweiligen PC installiert sein. Dem Python Programm muss dann mitgeteilt werden, in welchem Ordner die jeweiligen FreeCAD Bibliotheken installiert sind. Dies geschieht mit dem in Abbildung 15 dargestellten Code. Wobei hier die Variablen FREECADPATH1 und FREECADPATH2 jeweils zu den installierten Modulen führen müssen.

```
FREECADPATH1 = r'C:/Users/johan/Desktop/DA/FreeCAD-0.19.2/lib'  
FREECADPATH2 = r'C:/Users/johan/Desktop/DA/FreeCAD-0.19.2/bin'  
sys.path.append(FREECADPATH1)  
sys.path.append(FREECADPATH2)  
  
import FreeCAD  
import FreeCADGui
```

Abbildung 15: Erweiterung des PYTHONPATHS¹²⁸

¹²⁶ Osti et al. 2017, S. 1485.

¹²⁷ vgl. <https://web.archive.org/web/20161204022545/https://freecadweb.org/wiki/index.php?title=Licence> (abgefragt am 20.10.2021)

¹²⁸ Python Code

Wird der Pfad wie in Abbildung 15 hinzugefügt, kann FreeCAD ganz normal als Modul importiert werden. Dadurch sind alle Funktionen und auch die GUI von dem Skript aus aufrufbar.

4.1.2.2 Darstellung

Nachdem mit Hilfe der Software FreeCAD mit dem 3D Objekt interagiert werden kann, muss im nächsten Schritt eine effiziente numerische Darstellung erstellt werden. Um ein Produkt so darzustellen, dass ein Computer damit Berechnungen durchführen kann, wurden in der analysierten Literatur drei unterschiedliche Konzepte identifiziert:

- Matrix Darstellung
- Graphen Darstellung
- Baum Darstellung

Graphen und Bäume sind besonders dafür geeignet Beziehungen zwischen Objekten darzustellen. Matrizen hingegen können sehr einfach numerisch dargestellt werden, was es erlaubt, gut mit ihnen zu rechnen. Mit Hilfe der Kontakt-Matrix und der Interference-Matrix können die Einzelteile und ihre Beziehungen zueinander simpel und exakt numerisch beschrieben werden. Um eine Matrizendarstellung zu erstellen, sind nur geometrische Produktdaten notwendig und Programmiersprachen wie Python können mit Matrizen sehr effizient rechnen, weshalb in der entwickelten Logik die Matrizendarstellung verwendet wird.

4.1.2.3 Input

Alle existierenden Algorithmen verwenden für die Generierung einer Demontagesequenz geometrische Daten des Produktes. Einige der existierenden Algorithmen kommen dabei sogar nur mit geometrischen Daten aus und benötigen keinen zusätzlichen Input wie beispielsweise Entnahmezeiten, Materialeigenschaften oder Informationen über Zwangsbedingungen der einzelnen Teile zueinander.

Diese externen Informationen sind sehr hilfreich für die Entwicklung eines Demontagealgorithmus und vereinfachen die Logik meistens, sind jedoch für einen simplen Algorithmus, welcher nur die optimale Demontagesequenz herausfinden will, nicht nötig. Aus den geometrischen Daten eines Produktes können viele unterschiedliche Informationen abgeleitet werden, welche für die Generierung einer Demontagesequenz ausreichend sind. Die meisten Algorithmen verwenden die geometrischen Daten nur um eine Baugruppe numerisch oder als Graph darzustellen. Oishi verwendet die Daten aus einem CAD Programm jedoch auch, um zusätzlich die Entfernung zwischen den einzelnen Bauteilen zu berechnen, welche bei der Demontage zurückgelegt wird. Daraus wird eine Kostenfunktion erstellt, welche optimiert wird. Mit Hilfe dieser Kostenfunktion ist es möglich Demontagesequenzen

nur mit den geometrischen Daten, welche aus einer STEP Datei gelesen werden können, zu berechnen.¹²⁹

4.1.2.4 Algorithmus

Um einen robusten, universell einsetzbaren Algorithmus zu entwickeln, ist es wichtig Selbsthemmung zu vermeiden und gleichzeitig die Laufzeit gering zu halten. Die Vermeidung von Selbsthemmung kann mittels Erkennung von trennbaren Unterbaugruppen bewerkstelligt werden. Diese Unterbaugruppen müssen jedoch im nächsten Schritt effizient demontiert werden, indem die Entnahmewege der einzelnen Teile minimiert werden. Da die Ant Colony Optimization speziell für Routenoptimierungen geeignet ist, kann sie gut an das Minimierungsproblem angepasst werden und dieses effizient lösen.

Der hier entwickelte Algorithmus kombiniert also die Ant Colony Optimization mit der Identifizierung von Unterbaugruppen. Der Algorithmus zur Identifizierung von Unterbaugruppen bietet die nötige Robustheit und ermöglicht es Selbsthemmung zu vermeiden. Diese Unterbaugruppen können mit Hilfe der Ant Colony Optimization, welche durch den heuristischen Ansatz sehr effizient ist, optimiert werden.

4.1.2.5 Output

Der Output spielt eine wichtige Rolle, wenn es um die Benutzung des Programmes geht. Die einfachste Möglichkeit ist es, die Reihenfolge, welche aus einer Sequenz von entnommenen Teilen besteht, in Form einer Tabelle auszugeben. Zusätzlich zu der Information welches Teil entfernt werden soll, gibt es einige Algorithmen, die ebenfalls die Entnahmerichtung der Teile bestimmen können. Mit Hilfe der Sequenz und der Entnahmerichtung ist es möglich das Ergebnis visuell, anhand einer Explosionsdarstellung, darzustellen.¹³⁰

¹²⁹ Oishi 2020.

¹³⁰ Osti et al. 2017.

4.1.3 Aufbau des Algorithmus

Anhand der Erkenntnisse, welche im Zuge der Literaturanalyse gemacht wurden, konnte eine sinnvolle Kombination der Ausprägungen gewählt werden, welche einen neuartigen, universell einsetzbaren und robusten Algorithmus ermöglicht. Die Auswahl der einzelnen Komponenten der Logik ist in Abbildung 16 zusammengefasst.

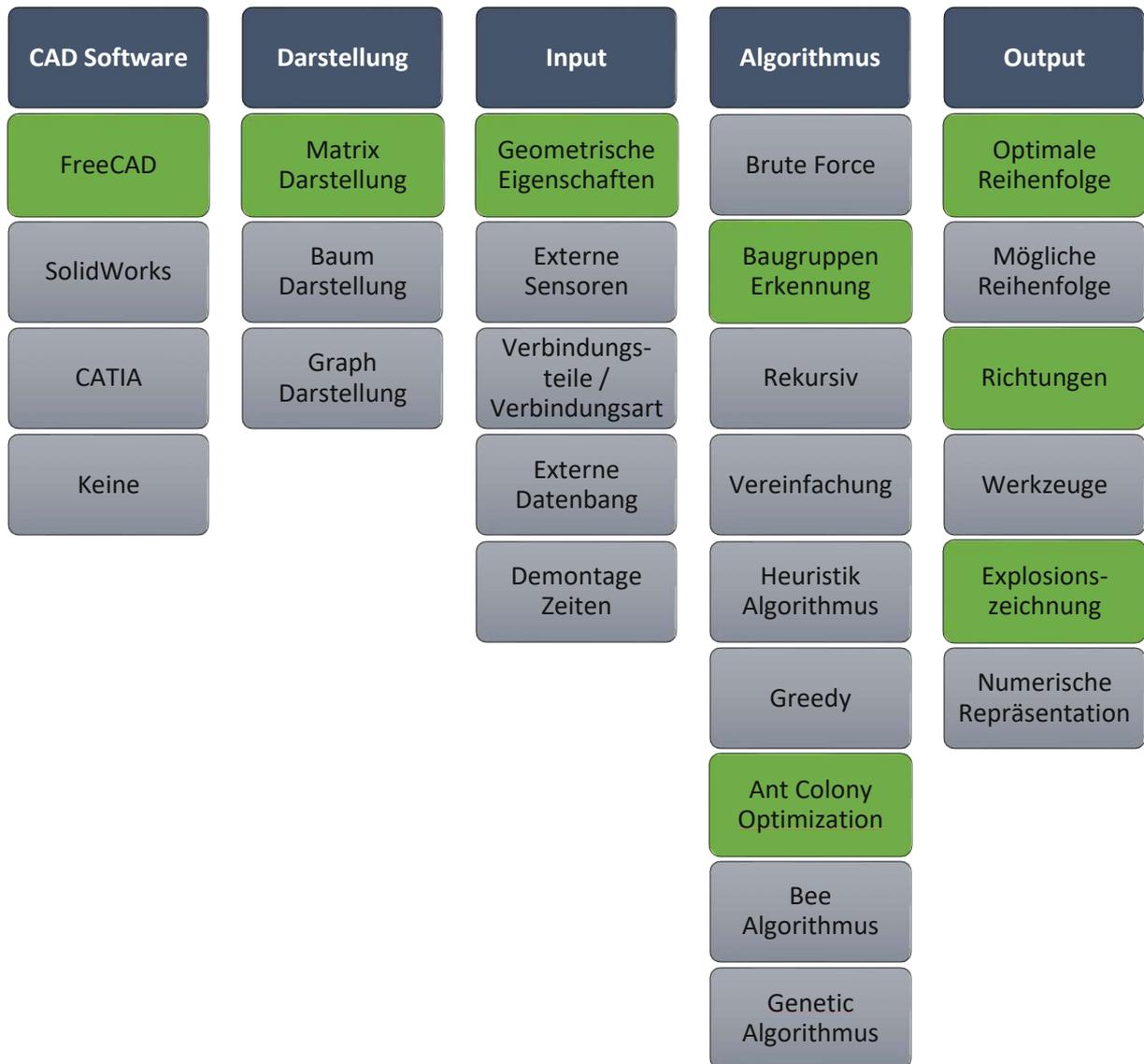
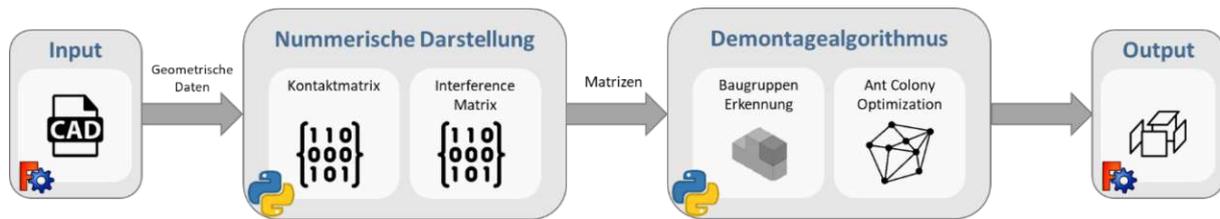


Abbildung 16: Morphologischer Kasten¹³¹

Die ausgewählten Komponenten müssen nur so verknüpft werden, dass eine Logik, welcher die definierten Voraussetzungen erfüllt, herauskommt. Diese Verknüpfung ist in Abbildung 17 ersichtlich.

¹³¹ Darstellung des Verfassers

Abbildung 17: Demontagelogik¹³²

Der erste Schritt der automatisierten Demontage ist es die CAD Datei, welche das zu demontierende Produkt enthält, zu verarbeiten. Dafür wird sich der Funktionen des 3D CAD Programms FreeCAD bedient. Aus der CAD-Datei müssen die geometrischen Eigenschaften, aus denen man sich die Beziehungen der einzelnen Teile zueinander ausrechnen kann, extrahiert werden. Andere Informationen wie Werkzeuge, Materialinfos oder Zeiten kann man nicht aus einer normalen STEP-Datei extrahieren und sind für diesen Algorithmus auch nicht notwendig.

Diese geometrischen Daten müssen nun in eine Numerische Darstellung gebracht werden, wobei sich die Matrixdarstellung dabei als bewährte Methode herausgestellt hat. Bei der Matrix Darstellung bieten die Kontaktmatrix zusammen mit der Interferenz Matrix ausreichend Informationen, um eine allgemeine Demontagesequenz zu erstellen und diese auf Machbarkeit zu überprüfen.

Mit Hilfe der numerischen Darstellung des Produktes kann nun die Optimierung der Demontage durchgeführt werden. Ziel dabei ist es starre Gebilde zu vermeiden und die Laufzeit gering zu halten. Aus diesem Grund wird eine Kombination von Unterbaugruppenerkennung und Ant Colony Optimization angewendet. Mit Hilfe der Baugruppenerkennung kann man Selbsthemmung vermeiden und so jegliche Art von Produkten demontieren, darüber hinaus bringt die Ant Colony Optimization die Eigenschaften Flexibilität sowie eine kurze Laufzeit durch die Heuristik mit.

Die Ausgabe der Demontagesequenz geschieht sowohl in Textform als auch grafisch in Form einer Animation. Die FreeCAD API ermöglicht es die Demontagerihenfolge grafisch darzustellen und die Richtung, in welche ein Teil entfernt werden muss, zu zeigen. Dies ist besonders bei Produkten, welche aus vielen Einzelteilen bestehen sinnvoll, da dort eine Tabellenansicht unübersichtlich wird.

¹³² Darstellung des Verfassers

4.2 Numerische Repräsentation

Für den Demontagealgorithmus sind zwei unterschiedliche Matrizen notwendig.

1. Die Kontaktmatrix
2. Die Kollisionsmatrix

Beide Matrizen können mit Hilfe der FreeCAD API aus einem CAD-Modell extrahiert werden.

Um die einzelnen Schritte des Algorithmus besser zu erklären, wird ein zweidimensionales Beispielprodukt (Abbildung 18) verwendet. Dieses Produkt wurde auch von Wang et al.¹³³ verwendet. Es handelt sich dabei um eine simple Baugruppe mit fünf Einzelteilen, welche durch ein C erkennbar sind und vier Verbindungsteile, welche mit einem f gekennzeichnet sind. Das Konzept zur Erstellung der beiden Matrizen wird anhand dieses Beispiels im nächsten Abschnitt erklärt.

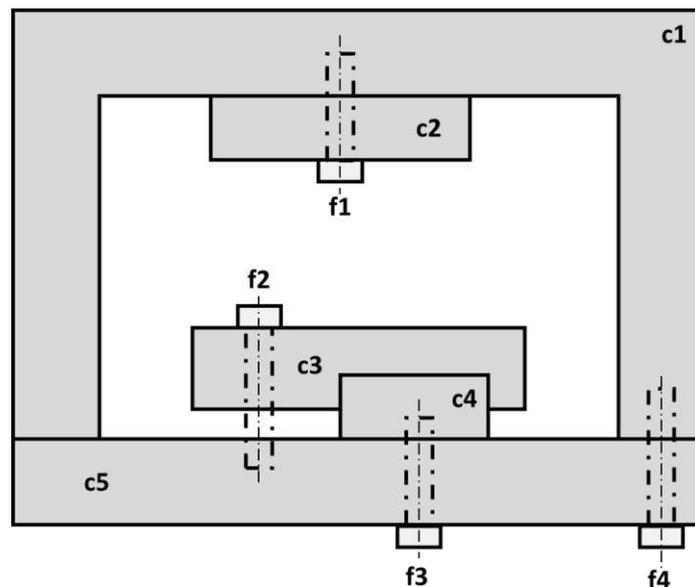


Abbildung 18: Beispielprodukt¹³⁴

4.2.1 Kontaktmatrix

Die Kontaktmatrix, welche mit einem „K“ gekennzeichnet wird, gibt an, ob zwei Teile in direktem physischem Kontakt miteinander stehen, sich also berühren, oder nicht. Diese Kontaktbeziehungen werden typischerweise in einer Matrix angegeben die N Zeilen und Spalten hat, wobei N die Anzahl der zu analysierenden Teile ist. Der Wert (Zeile i, Spalte j) in der Matrix gibt die Kontaktbeziehung zwischen Teil i und Teil j an.

¹³³ Wang et al. 2020.

¹³⁴ Darstellung des Verfassers nach Wang et al. 2020.

Er kann die Werte "0" oder "1" annehmen, wobei "1" bedeutet, dass Teil i mit Teil j in Kontakt ist, "0" bedeutet, dass Teil i und Teil j keine Kontaktbeziehung haben.

Die Kontaktmatrix für das Beispielprodukt ist in Abbildung 19 zu sehen. $K_{12} = 1$ oder $K_{21} = 1$ bedeutet das es eine Berührung zwischen dem Teil „C1“ und „C2“ gibt. Aus der ersten Zeile kann man ablesen das „C1“ mit „C2“, „C5“, „f1“ und „f4“ in Kontakt steht. Mit den anderen Teilen gibt es keine Berührung.

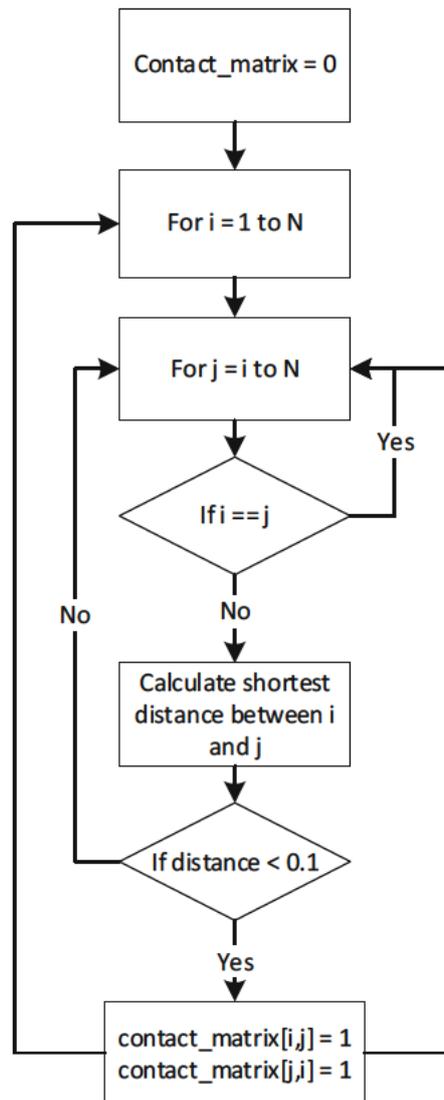
	C1	C2	C3	C4	C5	f1	f2	f3	f4
C1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
C2	1	0	0	0	0	1	0	0	0
C3	0	0	0	1	0	0	1	0	0
C4	0	0	1	0	1	0	0	1	0
C5	1	0	0	1	0	0	1	1	1
f1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
f2	0	0	1	0	1	0	0	0	0
f3	0	0	0	1	1	0	0	0	0
f4	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Abbildung 19: Kontaktmatrix¹³⁵

Um die Kontaktmatrix zu erstellen, wird zuerst eine leere Matrix der Größe $N \times N$ erstellt, in der alle Elemente „0“ sind. Nun wird jedes Teil der Baugruppe mit jedem anderen Teil verglichen, um die Matrix zu füllen. Dabei wird die kürzeste Distanz der beiden Teile zueinander gemessen. Dies funktioniert mit einer Funktion in FreeCAD. Ist die kürzeste Distanz kleiner als 0,1 kann man davon ausgehen, dass sich die Teile berühren. Ein Schwellenwert von 0,1 wurde gewählt, um mögliche Ungenauigkeiten der Konstruktion zu kompensieren. Dieser Schwellenwert wurde durch Ausprobieren anhand von Normteilen ermittelt, muss jedoch gegebenenfalls bei sehr großen oder sehr kleinen Produkten angepasst werden. Berühren sich zwei Teile wird der entsprechende Wert in der Matrix „1“ gesetzt.

Die Überprüfung der kürzesten Distanz wird nun für jedes Teil der Baugruppe durchgeführt, bis die Matrix vollständig gefüllt ist. Dabei wird keine Unterscheidung gemacht, ob eine Komponente ein Einzelteil oder ein Verbindungsteil ist. Der verwendete Algorithmus ist in Abbildung 20 zusammengefasst.

¹³⁵ Darstellung des Verfassers

Abbildung 20: Flow Chart Kontaktmatrix¹³⁶

4.2.2 Kollisionsmatrix (Interference Matrix)

Die Kollisionsmatrix, auf Englisch interference Matrix [I], gibt an, ob eine Komponente ungestört entfernt werden kann, ohne mit einem anderen Teil zu kollidieren. Diese Matrix ist eine $N \times N$ Matrix, die in alle Richtungen des kartesischen Koordinatensystems angegeben wird. Kann sich ein Bauteil beliebig in eine Achsrichtung bewegen, ohne dabei mit einem anderen zu kollidieren, ist der entsprechende Eintrag in der Matrix „0“. Ist dies jedoch nicht möglich und es kommt zu einer Kollision ist der Eintrag „1“.

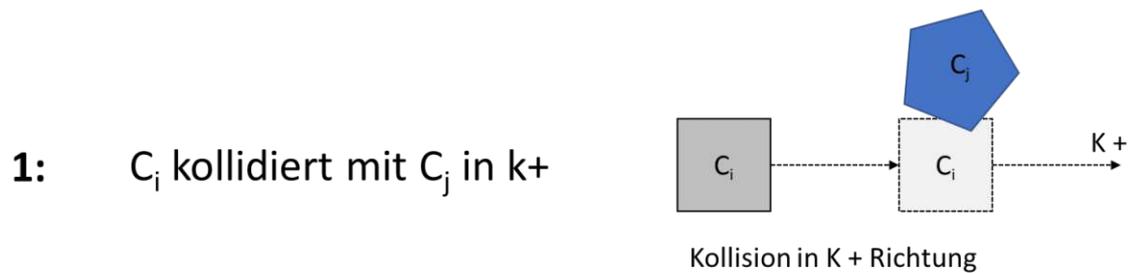
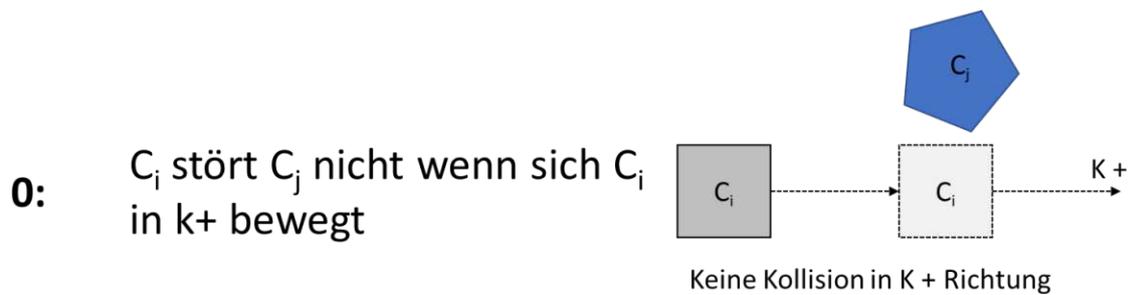


Abbildung 21: Beschreibung der Kollisionsmatrix ¹³⁷

Wenn ein Bauteil C_i einer Baugruppe nicht mit einem anderen Bauteil C_j in Richtung der k -Achse kollidiert, kann das Bauteil C_i in Richtung k frei demontiert werden, wie in Abbildung 21 zu sehen.

$$[I]_{+x} = \begin{matrix} & C1 & C2 & C3 & C4 & C5 & f1 & f2 & f3 & f4 \\ C1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ C2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ C3 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ C4 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ C5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ f1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ f3 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ f4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad [I]_{+y} = \begin{matrix} & C1 & C2 & C3 & C4 & C5 & f1 & f2 & f3 & f4 \\ C1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ C2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ C3 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ C4 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ C5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ f1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ f3 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ f4 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix}$$

Abbildung 22: Kollisionsmatrix des Beispielproduktes ¹³⁸

Wenn $[I]_{+x}$ (Abbildung 22) die Kollisionsmatrix in Richtung $+x$ ist, stellt die transponierte Matrix $[I]_{+x}^T$ die Kollisionsmatrix in der entgegengesetzten Richtung $-x$ dar. Diese Eigenschaft erlaubt es, die Bauteilverschiebungen auf die Hauptrichtungen zu beschränken. Abbildung 23 zeigt die vollständige Kollisionsmatrix des Beispielproduktes in alle Richtungen des Koordinatensystems. Da das Beispiel Produkt nur zwei Dimensionen hat werden nur vier Richtungen benötigt ($X+$, $X-$, $Y+$, $Y-$). Ein Produkt im dreidimensionalen Raum hat dementsprechend sechs Richtungen ($X+$, $X-$, $Y+$, $Y-$, $Z+$, $Z-$).

¹³⁷ Darstellung des Verfassers

¹³⁸ Darstellung des Verfassers

	C1	C2	C3	C4	C5	f1	f2	f3	f4
C1	0000	1101	1101	1101	0001	1111	1101	1101	1111
C2	1110	0000	0001	0001	0001	111	0001	0001	0000
C3	1110	0010	0000	1101	0001	0010	1111	1101	1000
C4	1110	0010	1110	0000	0001	0010	0100	1111	1000
C5	0010	0010	0010	0010	0000	0000	1111	1111	1111
f1	1110	1110	0001	0001	0001	0000	0000	0001	0000
f2	1110	0010	1101	1000	1101	0010	0000	1000	1000
f3	1110	0010	1110	1110	1110	0010	0100	0000	1000
f4	1110	0000	0100	0100	1110	0000	0100	0100	0000

Abbildung 23: Kollisionsmatrix in alle Achsrichtungen¹³⁹

In dieser Matrix (Abbildung 23) steht jedes Element N_j für ein Teil der Baugruppe, $r_{ij,x+}$, $r_{ij,x-}$, $r_{j,y+}$, $r_{j,y-}$ beschreiben den Kontaktstatus in der jeweiligen Richtung. Das Element in der ersten Zeile C1 und der zweiten Spalte C2 lautet 1101. Dies besagt, dass C1 von C2 in $y+$ Richtung entfernt werden kann. In allen anderen Richtungen würde es zu einer Kollision kommen. Wichtig zu erwähnen ist, dass diese Matrix nicht symmetrisch ist. Beispielsweise ist das Element l_{21} 1101 und l_{12} 1100. C1 kann gegenüber C2 nur in $y+$ demontiert werden, C2 kann gegenüber C1 hingegen nur in $y-$ demontiert werden.

Kollisionserkennung im dreidimensionalen Raum ist ein rechenintensiver Vorgang. Um die Performanz des Algorithmus zu steigern, wird ein Algorithmus in zwei Schritten vorgeschlagen. Im ersten Schritt werden zwei Teile auf eine Ebene projiziert. Wenn sich die Projektionen nicht überschneiden, können die entsprechenden Teile nicht kollidieren. Daher wird dieses Teilepaar für den nächsten Schritt verworfen. Kommt es zu einer Kollision wird eine genaue Prüfung im dreidimensionalen Raum durchgeführt.¹⁴⁰

Die vorgeschlagene Methode projiziert die Umhüllungsquader der zu untersuchenden Teile auf eine Ebene in einer der drei Hauptachsenrichtungen. Eine Überschneidung zwischen den Projektionen von zwei beliebigen Teilen in einer bestimmten Achsenrichtung zeigt eine potenzielle Kollision zwischen den beiden Teilen an, wenn sich eines der beiden Teile entlang der Richtung in Bezug auf das andere Teil bewegt.

In Abbildung 24 sind zwei Teile C1 und C2 mit ihren jeweiligen Umhüllungsquadern, auf Englisch Bound Boxes, BB1 und BB2 dargestellt. Nun werden C1 und C2 auf die Ebene yz entlang der Achse x projiziert. Gibt es keine Überschneidung der beiden Projektionen, so wie in Abbildung 25, kann eine Kollision bei Bewegung entlang der Achse ausgeschlossen werden. Kommt es zu einer Überschneidung wie in Abbildung

¹³⁹ Darstellung des Verfassers

¹⁴⁰ Zhang et al. 2017.

24 rechts, kann eine Kollision nicht ausgeschlossen werden und eine genauere Überprüfung im dreidimensionalen Raum ist notwendig.

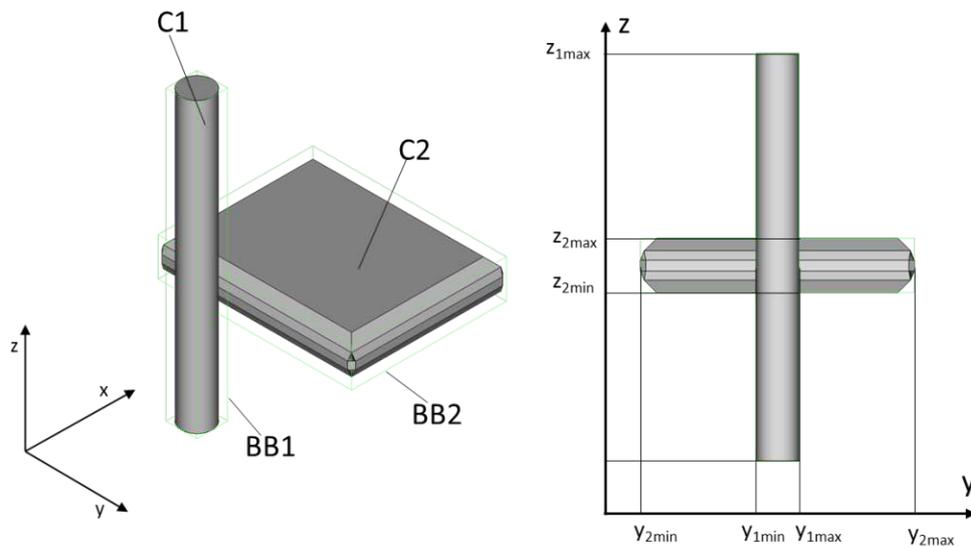


Abbildung 24: 2D Projektion einer 3D Baugruppe¹⁴¹

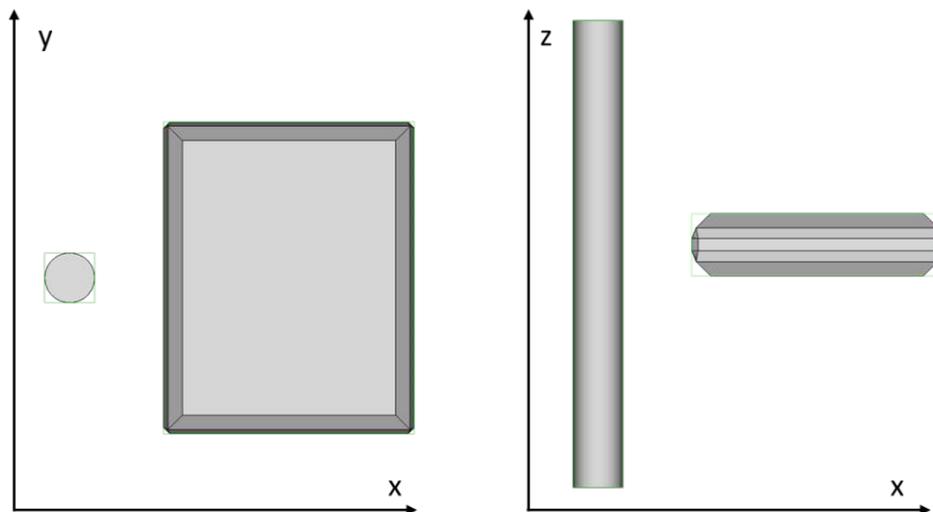


Abbildung 25: Projektion auf yx und zx Ebene¹⁴²

Um die Kollisionsmatrix aus einer CAD-Datei zu generieren, wird im ersten Schritt eine $N \times N$ Matrix für jede Achse erstellt. Dann wird, ähnlich wie beim Erstellen der Kontaktmatrix, jedes Teil mit jedem Teil verglichen.

Es werden quadratische Bound Boxes über die Teile gelegt, um eine simple 2D Kollisionserkennung durchzuführen. Nun wird überprüft, ob sich die Teile in einer der

¹⁴¹ Darstellung des Verfassers

¹⁴² Darstellung des Verfassers

Projektionsebenen überlappen. Dies geschieht beispielsweise für die X-Achse mit folgenden Bedingungen:

$(\text{part1.XMin} \geq \text{part2.XMax}) \text{ or } (\text{part1.YMax} \leq \text{part2.YMin}) \text{ or } (\text{part1.ZMax} \leq \text{part2.ZMin}) \text{ or } (\text{part1.YMin} \geq \text{part2.YMax}) \text{ or } (\text{part1.ZMin} \geq \text{part2.ZMax})$

Formel 1: Überschneidungsprüfung

Ist einer dieser Bedingungen wahr, kann es zu keiner Kollision der beiden Teile entlang der positiven X-Achse kommen. Ist dies der Fall, wird das jeweilige Element in der Kollisionsmatrix „0“ gesetzt und die nächsten Komponenten werden geprüft.

Wird jedoch eine Überlappung der Bound Boxes in der Ebene festgestellt muss eine detaillierte Überprüfung stattfinden. Diese Überprüfung funktioniert anhand der „common“ Funktion in FreeCAD, welche die Kollision zweier Teile im dreidimensionalen Raum überprüft.

Für die detaillierte Prüfung werden die beiden Teile schrittweise aufeinander zu bewegt, bis es zu einer Kollision kommt oder die Teile aneinander vorbei gegliedert sind. In Abbildung 26 oben ist zu erkennen, wie sich der kleine Quader schrittweise nach rechts bewegt bis er mit dem Hufeisen kollidiert. In Abbildung 26 unten bewegt sich das gleiche Teil in eine andere Achsrichtung. Sobald die Teile ohne Kollision aneinander vorbei gegliedert sind, kann die Überprüfung abgebrochen werden.

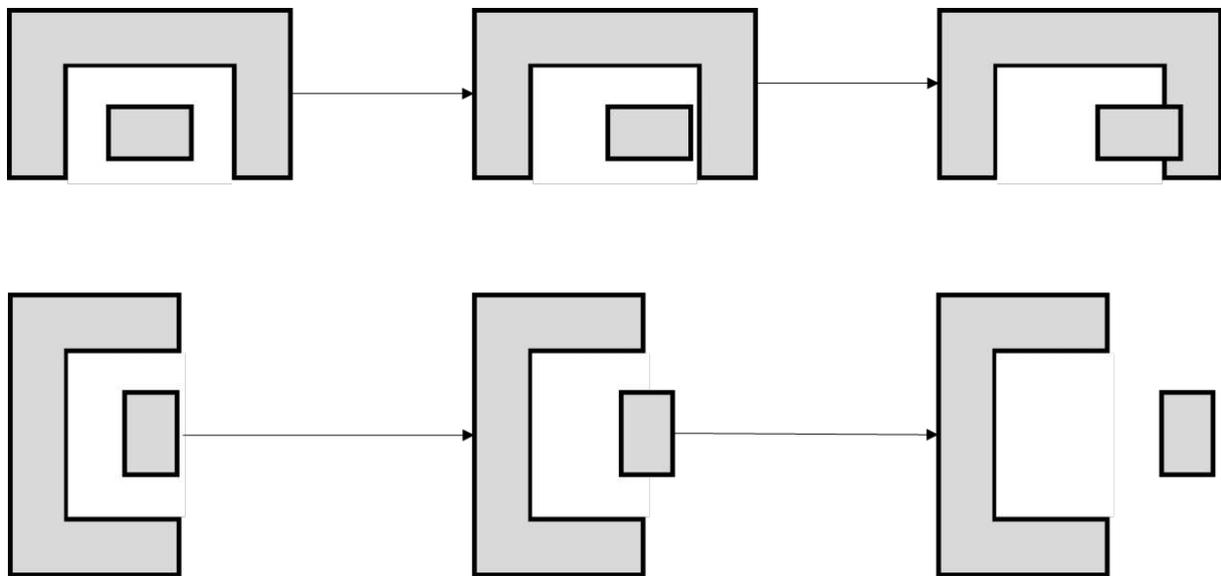


Abbildung 26: Kollisionserkennung im dreidimensionalen Raum¹⁴³

Um dieses Vorgehen zu beschleunigen, wird die Schrittweite mit dem sich die Teile aufeinander zubewegen variabel angepasst. Sind beide Komponenten, wie in Abbildung 27 oben dargestellt, weit voneinander entfernt ist die Schrittweite groß. Ist die Entfernung der beiden Teile, wie in Abbildung 27 unten, klein wird auch die

¹⁴³ Darstellung des Verfassers

Schrittweite kleiner. Dadurch verfehlen sich die beiden Teile nicht und es kann sichergestellt werden, dass die Kollisionsmatrix richtig berechnet wird.

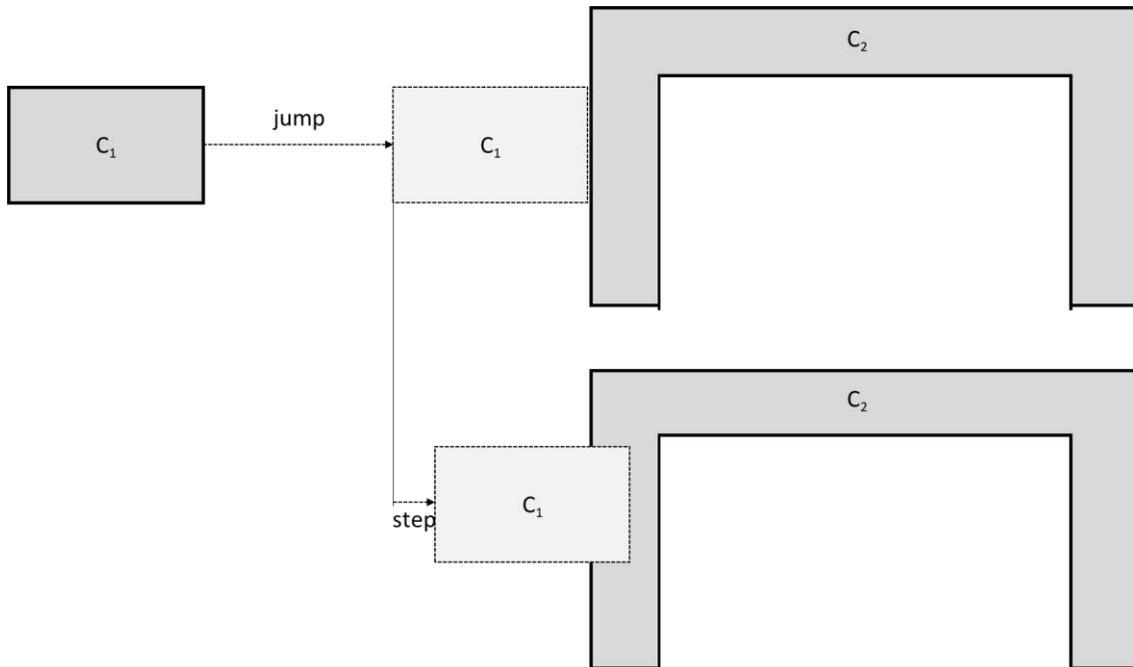
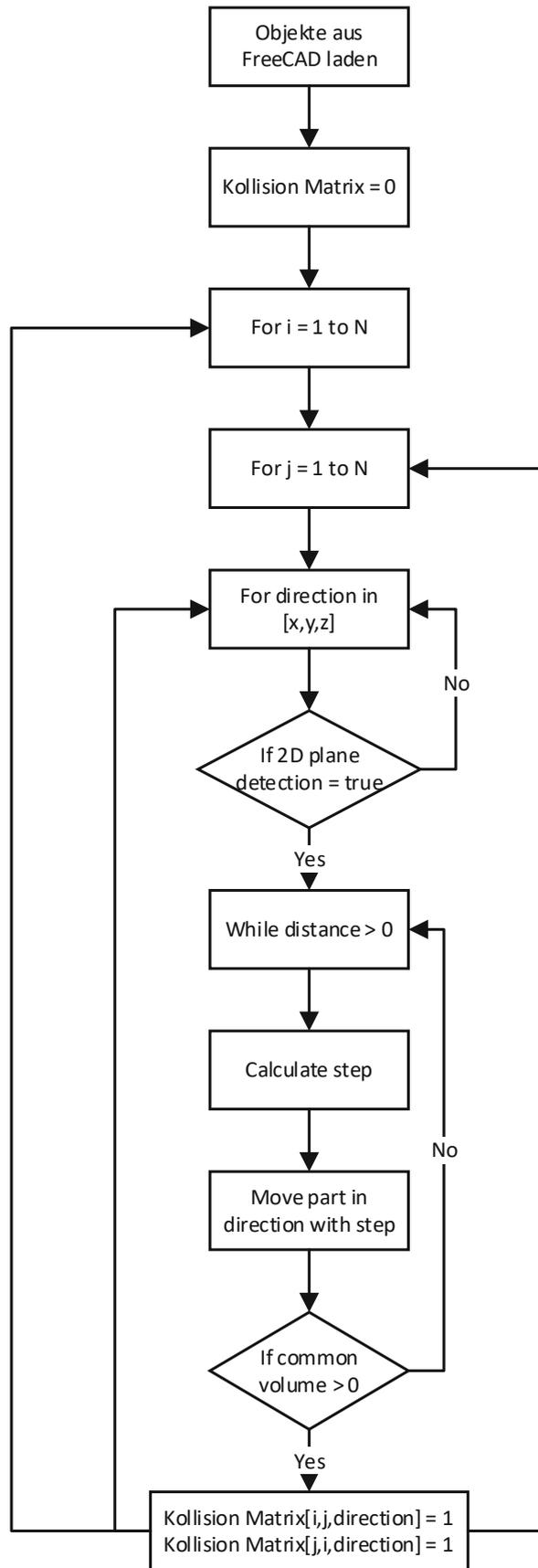


Abbildung 27: Kollisionserkennung mit variabler Schrittweite¹⁴⁴

Der Prozess zur Generierung der Kollisionsmatrix ist in Abbildung 28 zusammengefasst.

¹⁴⁴ Darstellung des Verfassers

Abbildung 28: Flow Chart Kollisionsmatrix¹⁴⁵¹⁴⁵ Darstellung des Verfassers

4.3 Demontagealgorithmus

Der entwickelte Demontagealgorithmus ist in drei Module aufgeteilt:

1. Sequenzielles Identifizieren von demontierbaren Teilen
2. Aufteilung in Unterbaugruppen
3. Optimierung

Das vorgestellte Konzept der Demontage mit der Aufteilung in Unterbaugruppen wurde in ähnlicher Weise 2018 von Pham et al.¹⁴⁶ vorgestellt und 2020 erweitert.¹⁴⁷ Diese Demontagemethode wurde nun mit Hilfe der ACO erweitert um die Reihenfolge, in der die Teile entwendet werden können zu optimieren. Das Konzept ist in Abbildung 29 zu sehen und wird im nächsten Abschnitt detailliert erklärt.

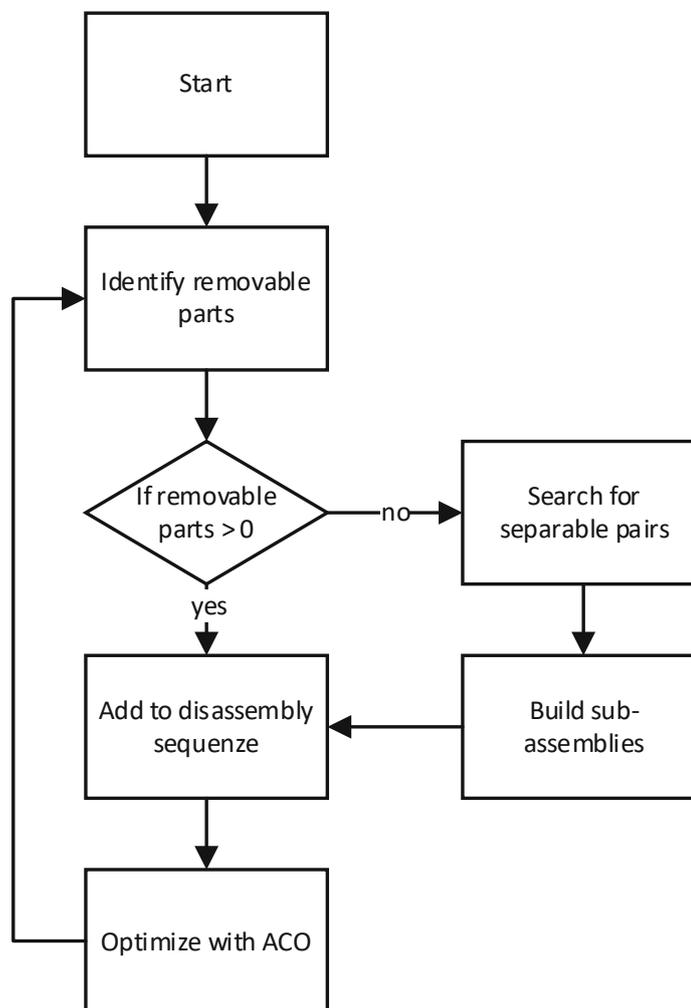


Abbildung 29: Flow Chart Demontagealgorithmus¹⁴⁸

¹⁴⁶ Pham et al. 2018.

¹⁴⁷ Wang et al. 2020.

¹⁴⁸ Darstellung des Verfassers

4.3.1 Sequenzielles Identifizieren von demontierbaren Teilen

Basierend auf der Kontaktmatrix in alle Richtungen des kartesischen Koordinatensystems haben Jin et al.¹⁴⁹ einen Matrixanalysealgorithmus entwickelt, welcher die demontierbaren Teile identifiziert. Die Grundidee dieses Ansatzes ist es, Komponenten zu finden, welche einen Freiheitsgrad von mindestens „1“ in einer Richtung haben, was bedeutet, dass die Komponenten demontierbar sind. Das Beispielprodukt aus Abbildung 18 wird verwendet, um diesen Algorithmus zu erklären.

	C1	C2	C3	C4	C5	f1	f2	f3	f4
C1	0000	1101	1101	1101	0001	1111	1101	1101	1111
C2	1110	0000	0001	0001	0001	1111	0001	0001	0000
C3	1110	0010	0000	1101	0001	0010	1111	1101	1000
C4	1110	0010	1110	0000	0001	0010	0100	1111	1000
C5	0010	0010	0010	0010	0000	0010	1111	1111	1111
f1	1110	1110	0001	0001	0001	0000	0000	0001	0000
f2	1110	0010	1101	1000	1101	0000	0000	1000	1000
f3	1110	0010	1110	1110	1110	0010	0100	0000	1000
f4	1110	0000	0100	0100	1110	0000	0100	0100	0000

Abbildung 30: Kollisionsmatrix in alle Achsrichtungen¹⁵⁰

Im ersten Schritt werden die einzelnen Reihen der Kontaktmatrix (Abbildung 30) mit Hilfe der Booleschen Operation „OR“ verknüpft. Wenn zum Beispiel in einer Reihe eine „1“ in einer Richtung vorkommt, ist das Ergebnis nach der „OR“ Verknüpfung in dieser Richtung ebenfalls eine „1“. Kommt keine „1“ in einer Richtung vor ist das resultierende Element „0“.

Das Ergebnis „1 1 1 1“ repräsentiert die Beziehung zwischen einer Komponente mit all den anderen Komponenten der Baugruppe. Besteht das Ergebnis nur aus Einsern, kann das Bauteil nicht kollisionsfrei entfernt werden. Enthält das Ergebnis mindestens eine „0“, kann die Komponente in Richtung der „0“ entfernt werden.

Die Komponenten C1 bis f2 des Beispielproduktes können nicht entfernt werden, da das Ergebnis der „OR“ Verknüpfung nur „1“ beinhaltet. Die Teile f3 und f4 können jeweils in Y- Richtung entfernt werden wie Abbildung 31 in zu sehen.

¹⁴⁹ Jin et al. 2017.

¹⁵⁰ Darstellung des Verfassers

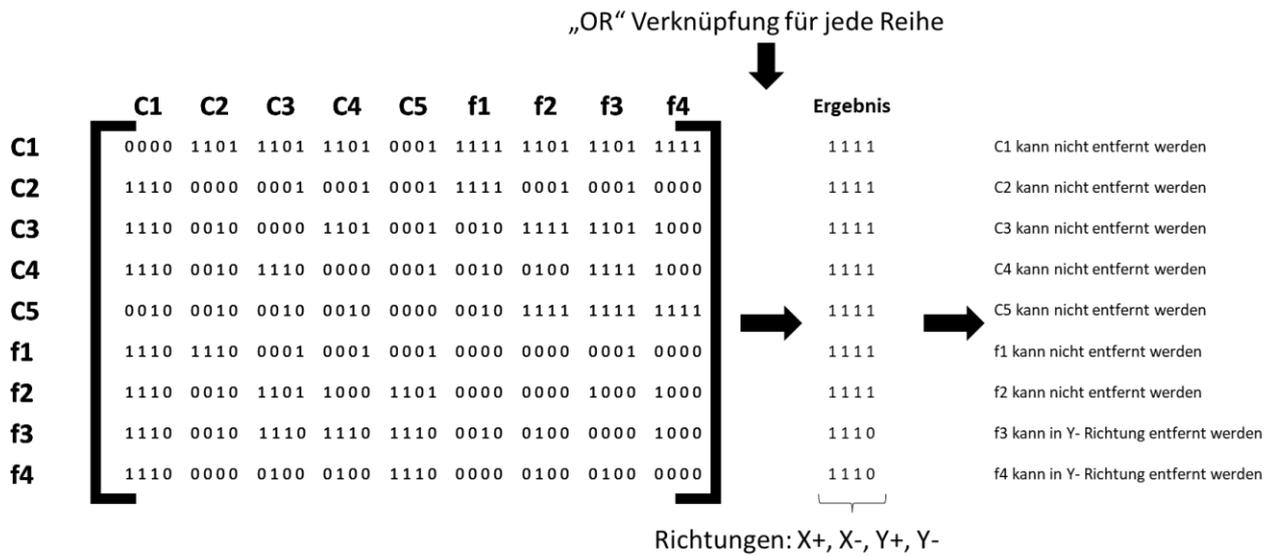


Abbildung 31: Matrixanalyse¹⁵¹

Im nächsten Schritt werden jene Teile, welche entfernt werden können, entfernt und die Kollisionsmatrix wird upgedatet (Abbildung 32). Die entfernten Teile werden in eine Liste geschrieben und die Sequenz dieser wird später mit Hilfe der ACO optimiert. Um ein Produkt vollständig zu demontieren, werden die Teile Schritt für Schritt entfernt, bis es keine Teile mehr gibt, oder keines mehr entnommen werden kann.

	C1	C2	C3	C4	C5	f1	f2
C1	0000	1101	1101	1101	0001	1111	1101
C2	1110	0000	0001	0001	0001	1111	0001
C3	1110	0010	0000	1101	0001	0010	1111
C4	1110	0010	1110	0000	0001	0010	0100
C5	0010	0010	0010	0010	0000	0000	1111
f1	1110	1110	0001	0001	0001	0000	0000
f2	1110	0010	1101	1000	1101	0000	0000

Abbildung 32: Kollisionsmatrix Level 2¹⁵²

¹⁵¹ Darstellung des Verfassers

¹⁵² Darstellung des Verfassers

4.3.2 Aufteilung in Unterbaugruppen¹⁵³

Wird jedoch das oben beschriebene Verfahren zur Identifizierung von demontierbaren Teilen auf das Beispielprodukt angewandt, können nach der Entfernung von f3 und f4 im ersten Schritt keine weiteren Komponenten mehr demontiert werden (Abbildung 33). Dies ist ein typisches Beispiel für Selbsthemmung. Eine Baugruppe kann nicht weiter zerlegt werden, da keine Einzelteile entnommen werden können, bis die gesamte Struktur in kleinere Unterbaugruppen zerlegt wird.

	C1	C2	C3	C4	C5	f1	f2		Ergebnis
C1	0000	1101	1101	1101	0001	1111	1101	1111	C1 kann nicht entfernt werden
C2	1110	0000	0001	0001	0001	1111	0001	1111	C2 kann nicht entfernt werden
C3	1110	0010	0000	1101	0001	0010	1111	1111	C3 kann nicht entfernt werden
C4	1110	0010	1110	0000	0001	0010	0100	1111	C4 kann nicht entfernt werden
C5	0010	0010	0010	0010	0000	0000	1111	1111	C5 kann nicht entfernt werden
f1	1110	1110	0001	0001	0001	0000	0000	1111	f1 kann nicht entfernt werden
f2	1110	0010	1101	1000	1101	0000	0000	1111	f2 kann nicht entfernt werden

Abbildung 33: Matrixanalyse Level 2¹⁵⁴

In dem Beispiel müsste die Baugruppe in zwei Unterbaugruppen zerlegt werden. Dies funktioniert durch Trennung von C1 und C5. Die Trennbarkeit von zwei Komponenten gibt an, ob eine Baugruppe in kleinere Unterbaugruppen geteilt werden kann. Zwei Baugruppen können in Unterbaugruppen geteilt werden, wenn sie trennbare Paare enthalten. Trennbare Paare sind sich berührende Komponenten, welche auseinandergenommen werden können, ohne dabei andere Komponenten zu beeinflussen.

Um dieses Verhalten besser zu beschreiben, hat Wang et al. ein Beispielprodukt bestehend aus drei Teilen herangezogen (Abbildung 34).

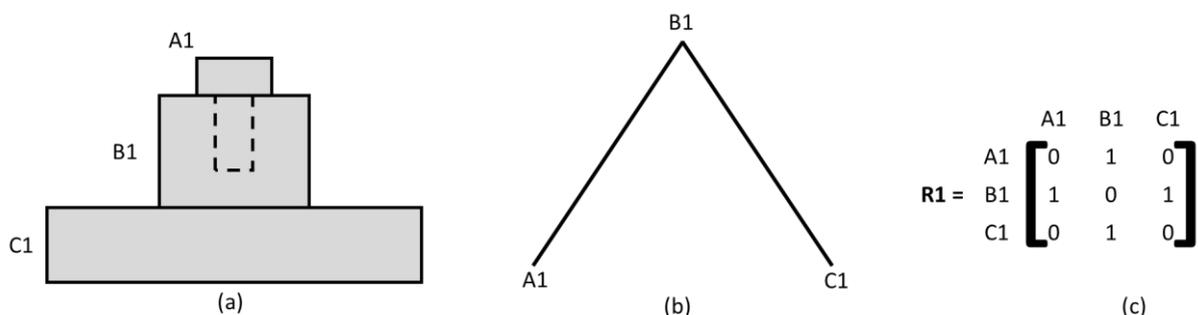


Abbildung 34: Beispielprodukt mit trennbaren Paaren¹⁵⁵

¹⁵³ Wang et al. 2020.

¹⁵⁴ Darstellung des Verfassers

¹⁵⁵ Wang et al. 2020.

Das Beispielprodukt aus Abbildung 34 hat drei Komponenten, A1, B1 und C1 wobei zwei Paare davon in Kontakt miteinander stehen A1-B1 und B1-C1. Das physikalische Modell Abbildung 34 (a) kann auch vereinfacht anhand eines Linienmodells Abbildung 34 (b) dargestellt werden. Dabei repräsentierte jede Linie eine Kontaktstelle zwischen zwei Paaren. Numerisch kann diese mit der Kontaktmatrix Abbildung 34 (c) dargestellt werden. Beide Paare, A1-B1 und B1-C1, sind trennbar, da die Trennung eines Paares das andere nicht beeinträchtigen würde.

Ändert man nun dieses Produkt minimal, indem man die Schraube A ein bisschen verlängert, ändern sich die Abhängigkeiten der einzelnen Teile zueinander (Abbildung 35).

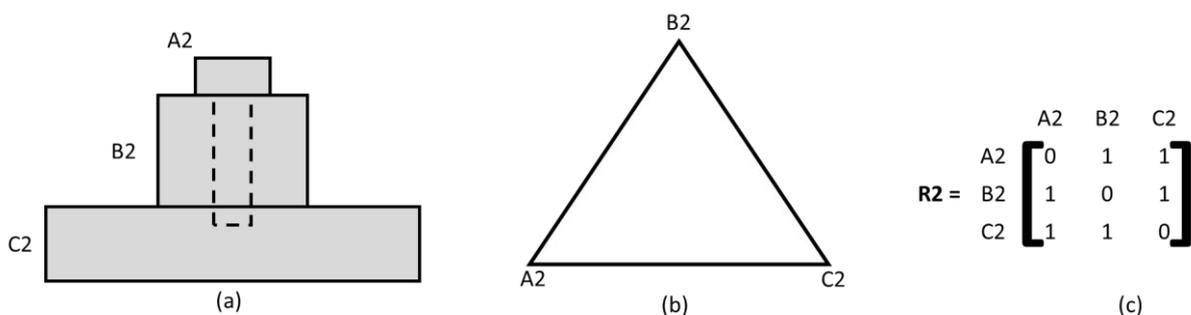


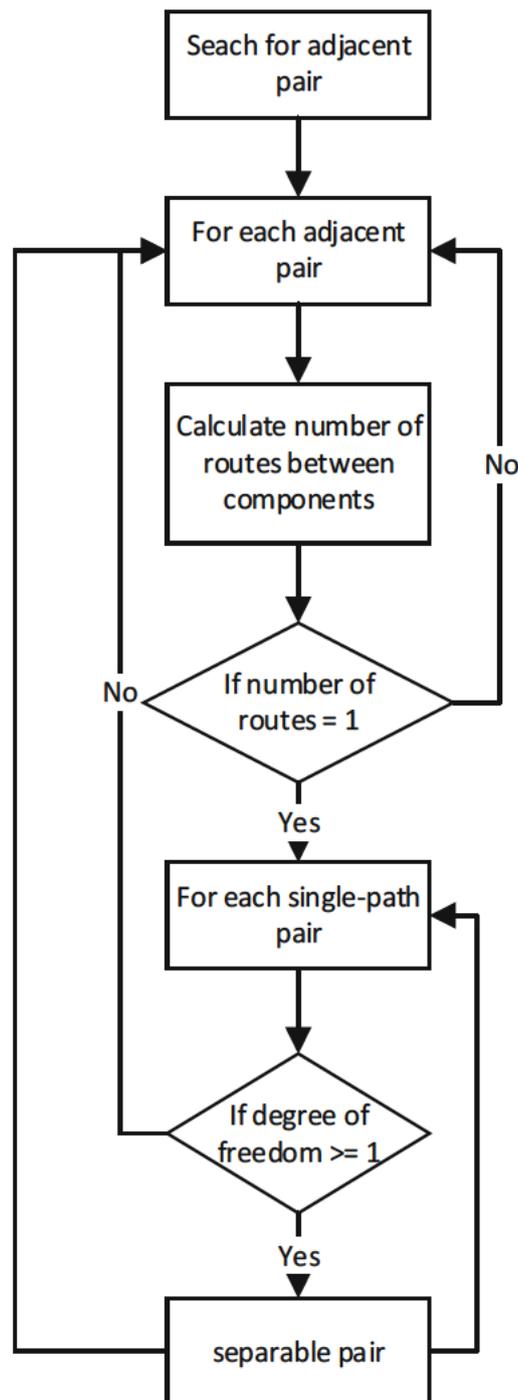
Abbildung 35: Beispielprodukt mit nicht trennbaren Paaren¹⁵⁶

Nun gibt es drei Paare, die in Kontakt miteinander stehen A2-B2, B2-C2 und A2-C2. Keine dieser Paare sind voneinander trennbar, da die Trennung eines Paares die anderen Paare beeinflussen würde. Die Trennung des Paares A2-B2 führt unweigerlich zu einer Beeinflussung des Teiles C2. Die Baugruppe kann also nicht in Unterbaugruppen geteilt werden. Vergleicht man die beiden Beispielprodukte wird ersichtlich, dass es in Abbildung 34 nur einen Weg von Teil A1 zu B1 (A1-B1) gibt. In Abbildung 35 hingegen gibt es mehrere Wege zwischen den beiden Komponenten (A2-B2, A2-C2-B2). Wenn es nur einen Pfad zwischen zwei Komponenten gibt, ist diese Verbindung unabhängig von anderen Komponenten. Bei trennbaren Paaren gibt es also nur einen Weg zwischen den beiden Komponenten eines Paares.

Um also selbsthemmende Strukturen zu erkennen, müssen trennbare Komponenten identifiziert werden. Die Suche nach trennbaren Komponenten erfolgt in drei Schritten und ist in Abbildung 36 dargestellt.

1. Benachbarte Teile suchen
2. Anzahl der Wege zwischen den Teilen berechnen
3. Entfernbare prüfen

¹⁵⁶ Wang et al. 2020.

Abbildung 36: Trennbare Komponenten identifizieren¹⁵⁷

4.3.2.1 Benachbarte Teile suchen

Benachbarte Teile können mit Hilfe von sogenannten Teilevektoren identifiziert werden. Multipliziert man den Teilevektor einer Komponente mit der Kontaktmatrix, ist das Ergebnis ein Teilevektor der benachbarten Teile (Formel 2). Mit Hilfe dieser Methode können benachbarte Teile identifiziert werden. $R1 * A1$ gibt beispielsweise

¹⁵⁷ Darstellung des Verfassers

an, dass A1 mit B1 in Kontakt steht. Das Ergebnis von $R1 * B1$ ist $[1 \ 0 \ 1]$, was bedeutet das B1 die beiden Teile A1 und C1 berührt.

$$A1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, B1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$R1 * A1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = B1$$

$$R1 * B1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A1 + C1$$

$$R1 * C1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = B1$$

Formel 2: Benachbarte Teile suchen

4.3.2.2 Anzahl der Wege zwischen den Teilen berechnen

Der zweite Schritt ist es, nur die Paare zu finden zwischen denen es nur einen Weg gibt. Dieses Problem kann mithilfe eines rekursiven Algorithmus gelöst werden. Dafür iteriert man über die Liste an benachbarten Teilen, welche im ersten Schritt erstellt wurde. Nun wird für jedes Paar ein Zählvariable auf „0“ gesetzt und der Suchalgorithmus aufgerufen.

Dieser Suchalgorithmus markiert das erste Teil des Paares und iteriert dann über alle benachbarten Teile. Ist ein benachbartes Teil noch nicht gelabelt und gleich der zweiten Komponente des Paares wird die Zählvariable um „1“ erhöht. Andernfalls wird der Suchalgorithmus mit dem benachbarten Teil als Eingangsvariable wieder aufgerufen. Die Abbruchbedingung wird ausgelöst, wenn die Zählvariable größer gleich „2“ ist. Dies bedeutet, dass es mehrere Wege zwischen den beiden Teilen gibt. Alle Paare, zwischen denen es nur einen Weg gibt, werden in eine „single-path“ Liste geschrieben.

In Abbildung 37 ist der Algorithmus anhand von Pseudocode Schritt für Schritt erklärt.

Input: adjacent pair list (APL)

Output: Single-path list (SPL)

```
def generate_single_path_list(adjacent_components):
    single_path_list = []
    for pair(X,Y) in adjacent_components:
        counter = 0
        discovered = []
        counter = search_path(pair[0], pair[1])

        if counter == 1:
            single_path_list.append(X,Y)
    return single_path_list

def search_path(X, Y):
    discovered.append(X)

    for adjacent in adjacent_to_X:
        if adjacent not in discovered:
            if adjacent == Y:
                counter += 1
                if counter >= 2:
                    return counter
            else:
                counter = search_path(adjacent, Y)
    return counter
```

Abbildung 37: Pseudocode¹⁵⁸

4.3.2.3 Entfernbarkeit prüfen

Nachdem alle Paare, welche durch nur einen Weg miteinander verbunden sind, gefunden wurden, muss überprüft werden, ob diese auch demontierbar sind. Dies geschieht wieder anhand der Kollisionsmatrix. Sind die Elemente der gefundenen Paare nicht 1111, kann das Paar getrennt werden. Dies bedeutet, dass die Komponenten mindestens in eine Richtung einen Freiheitsgrad größer gleich eins haben.

4.3.2.4 Beispiel für Unterbaugruppen Erkennung

Um den eben vorgestellten Algorithmus zu erklären, wird er auf das Beispielprodukt in Abbildung 18 angewendet.

¹⁵⁸ Darstellung des Verfassers nach Lan F. et al., S. 199.

Mit Hilfe der Matrixanalyse konnten die Teile f3 und f4 demontiert werden. Da im nächsten Schritt jedoch keine demontierbaren Teile mehr existieren, muss die Zerlegung in Unterbaugruppen erfolgen. Mit Hilfe der in Kapitel 4.3.2.1 beschriebenen Methode werden acht benachbarte Paare gefunden:

- C1–C2
- C1–C5
- C1–f1
- C2–f1
- C3–C4
- C3–f2
- C4–C5
- C5–f2.

Der Algorithmus, welcher die Anzahl an möglichen Wegen berechnet (Abbildung 37), überprüft alle Paare. Er beginnt mit C1-C2 und kommt zu dem Ergebnis, dass dieses Paar nicht trennbar ist, da es mehr als einen Weg von C1 nach C2 gibt (Abbildung 38).

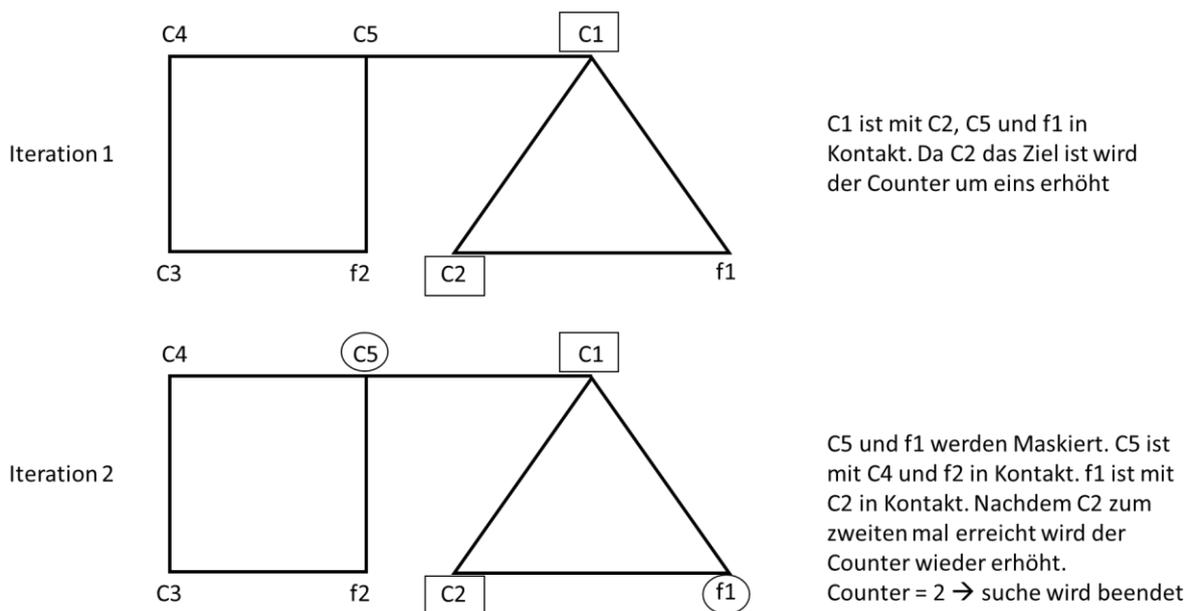
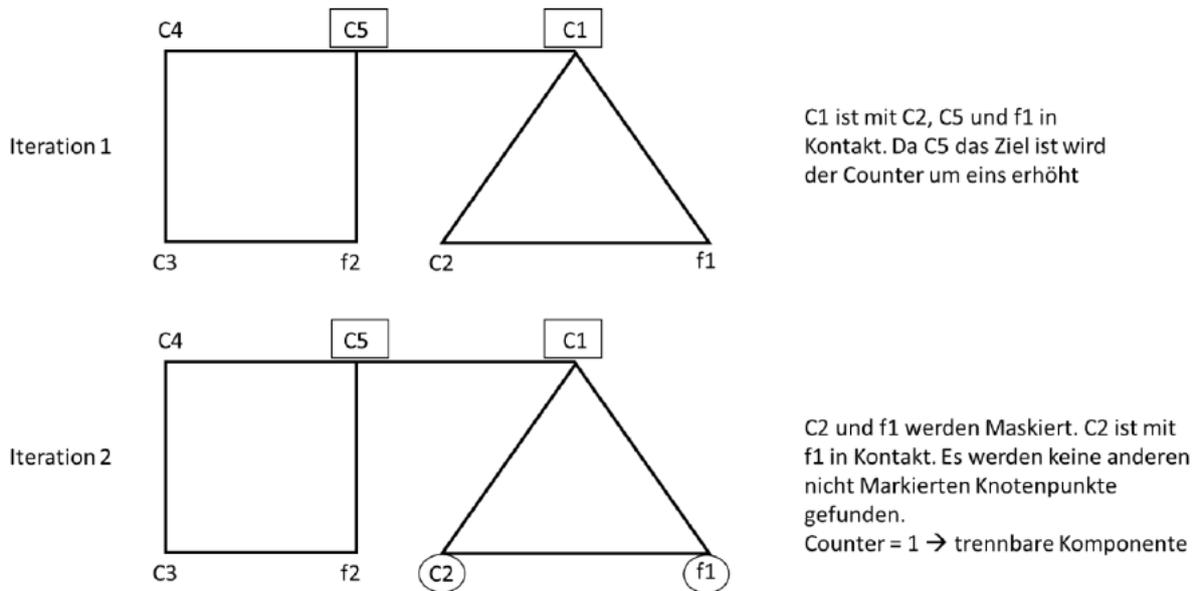


Abbildung 38: Wege zwischen C1 und C2¹⁵⁹

Für das nächste Paar, C1-C5, gibt es laut Algorithmus nur einen Weg (Abbildung 39). Daher wird es in eine Liste mit Teilen, zwischen denen es nur einen Weg gibt, gespeichert. Der Algorithmus überprüft im nächsten Schritt alle weiteren Paare.

¹⁵⁹ Darstellung des Verfassers nach Lan F. et al., S. 200.

Abbildung 39: Wege zwischen C1 und C5¹⁶⁰

Letztendlich ist nur C1-C2 ein „single-path“ Paar. Die Prüfung nach Demontierbarkeit mithilfe der Matrixanalyse ergibt Freiheitsgrade in drei Richtungen. Daher ist C1-C5 ein trennbares Paar.

Dies bedeutet, dass man die Baugruppe an den Teilen C1 und C5 in zwei Unterbaugruppen trennen kann. Die erste Untergruppe besteht aus C1-C2-f1 und die zweite aus C3-C4-C5-f2. Diese beide Baugruppen werden jetzt separat behandelt und mit dem gleichen Algorithmus weiter demontiert. Schließlich erhält man die in Tabelle 2 dargestellte Demontage Sequenz.

Level	Demontierbare Komponenten	Richtung
1	f3 f4	-Y -Y
2	(C1, C2, f1) (C5, C4, f2, C3)	[+X, -X, +Y] [+X, +Y, -Y]
3	f1	-Y
4	C1 C2	-X -Y
5	f2	-X
6	C5 C3	[+X, -X, -Y] -X
7	C4	[+X, -X, +Y, -Y]

Tabelle 2: Vollständige Demontagesequenz

¹⁶⁰ Darstellung des Verfassers nach Wang et al. 2020.

4.3.3 Optimierung

Im letzten Schritt wird nun die generierte Demontagesequenz mit Hilfe der Ant Colony Optimization optimiert. Die Komponenten innerhalb der einzelnen Levels können beliebig miteinander vertauscht werden, ohne die Machbarkeit der Demontage zu beeinflussen.

Das Hauptziel der Optimierung ist die Minimierung der Demontagezeit. Diese umfasst die Zeit für die Entnahme eines Bauteils, aber auch die Zeit, die für die Bewegung von einer Komponente zur anderen notwendig ist. Die Zeit für diese Bewegung hängt von der Distanz der Teile ab, aber auch von der Richtung, in die das Teil entfernt werden soll. Da die Entnahmezeit eines Bauteiles von vielen unsicheren Begebenheiten abhängt, wird in dieser Arbeit die Demontagezeit als Summe von Verschiebezeit und Richtungswechselzeit berechnet. Diese Vereinfachung wurde ebenfalls von Laili et al. vorgenommen.¹⁶¹

Mit Hilfe dieser Annahmen lässt sich eine Zeitmatrix erstellen. Diese Zeitmatrix ist eine $N \times N$ große Matrix, wobei N die Anzahl an Komponenten pro Level ist. Die einzelnen Elemente dieser Matrix werden wie in Formel 3 berechnet:

$$T = \text{Rotationszeit} * \text{Rotationsgewichtung} + \text{Verschiebezeit} * \text{Verschiebegewichtung}$$

Formel 3: Berechnung der Zeitmatrix

Rotationsgewichtung und Verschiebegewichtung sind zwei Variablen, um dem Algorithmus eine gewisse Flexibilität zu geben. Diese sind frei zu wählen und beschreiben die Gewichtung der Rotations- und Verschiebezeit. Der Standardwert für diese beiden Variablen ist „1“. Ist der Rotationsgewichtungs-Parameter größer als die Verschiebegewichtung, wird versucht die Rotation zwischen den Teilen geringe zu halten. Ist hingegen die Verschiebungsgewichtung größer, versucht der Algorithmus die Verschiebezeit zwischen den einzelnen Teilen so gering wie möglich zu halten.

Die Verschiebezeit beschreibt die Zeit, welche verstreicht, um von einer Komponente zur anderen zu gelangen. Diese Zeit wird mit Hilfe der Distanz zweier Komponenten zueinander und einer Geschwindigkeit, welche ebenfalls als Variable einzustellen ist, berechnet. Die Distanz kann mit Hilfe der FreeCAD API aus dem 3D Modell extrahiert werden.

Die Rotationszeit ist jene Zeit, welche ein Demontagewerkzeug braucht, um in die richtige Ausgangslage zu gelangen. Dies hängt von der Richtung ab, in die ein Bauteil entnommen wird. Werden zwei Komponenten hintereinander in die gleiche Richtung entfernt, beträgt die Rotationszeit „0“. Wird eine Komponente jedoch in eine andere Achsrichtung demontiert, muss dies in der Rotationszeit berücksichtigt werden.

¹⁶¹ Laili et al. 2019.

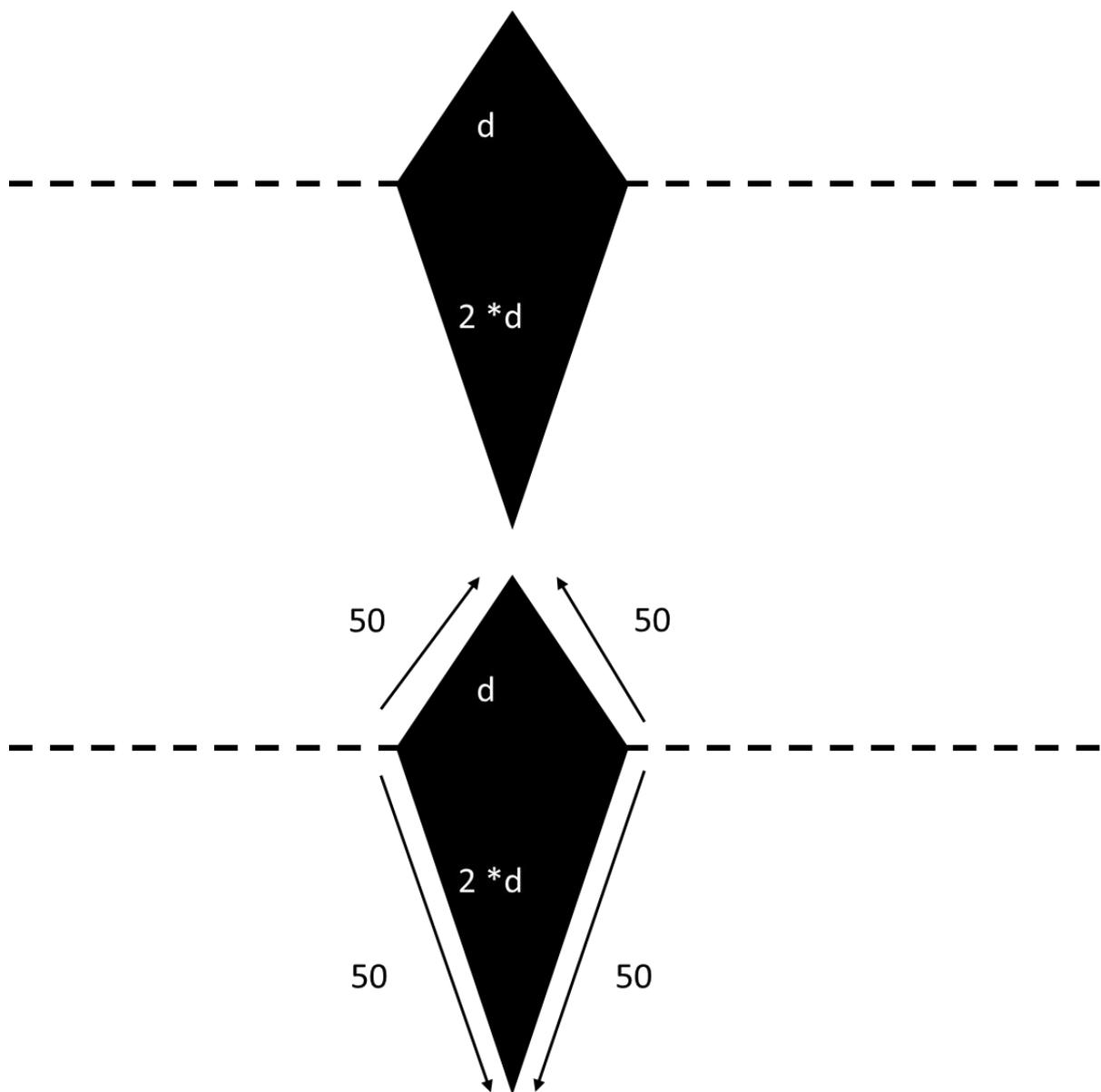
$$\text{Zeitmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & \cdots & T_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N1} & \cdots & T_{NN} \end{bmatrix}$$

Formel 4: Zeitmatrix

Nachdem diese Zeitmatrix (Formel 4) aufgestellt wurde, kann die optimale Reihenfolge mit Hilfe der Ant Colony Optimization berechnet werden.

4.3.3.1 Ant colony optimization

Die Ant Colony Optimization ist vom Futtersuchverhalten der Ameisen inspiriert. Ameisen hinterlassen beim Gehen Pheromone und andere Ameisen wiederum folgen dem Pfad welcher am meisten Pheromone hat.

Abbildung 40: Ameisenalgorithmus¹⁶²

¹⁶² Darstellung des Verfassers

Nehmen wir an, 200 Ameisen folgen einer geraden Linie zwischen ihrem Futter und dem Nest (Abbildung 40). Wird ihr Weg von einem Hindernis gestört, müssen sie sich einen neuen Weg zum Futter suchen. Dieses Hindernis kann oben oder unten umgangen werden, wobei der Weg unten doppelt so lange ist wie der Weg oben. Da zu Beginn keine Pheromone vorhanden sind, werden 50% der Ameisen den oberen Weg gehen und 50% den unteren Weg.

Benötigen die Ameisen eine Sekunde, um die Distanz d zurückzulegen, haben jene welche oben gegangen sind innerhalb von zwei Sekunden das Hindernis überwunden, während die Ameisen, welche unten gegangen sind, erst die Hälfte des Weges zurückgelegt haben.

Die Pheromone, welche die Ameisen hinterlassen verdunsten nach einer gewissen Zeit. In unserem Beispiel bleiben die Pheromone für die erste Sekunde nach der Ausschüttung bestehen und halbieren sich dann jede weitere Sekunde. Das bedeutet nach einer Sekunde sind 100% vorhanden, nach zwei 50% und nach drei nur noch 25%.

Nach einer Sekunde wird also der obere Weg ein Pheromon Level von 100 haben, da 100 Ameisen diesen Weg genommen haben. Der untere Weg hingegen wird nach einer Sekunde nur eine Pheromon Level von 50 haben, da die Ameisen erst die Hälfte des Weges zurückgelegt haben. Nach noch einer Sekunde werden nun mehr Ameisen den oberen Weg gehen, da dort mehr Pheromone vorhanden sind. Da die Ameisen auf dem kürzeren Weg in gleicher Zeit öfters hin und her kommen, wird dadurch die Konzentration der Pheromone auf dem oberen Pfad immer größer und nach einer gewissen Zeit werden fast alle Ameisen den kürzeren Weg, welcher mehr Pheromone hat, nehmen.

Es wird nun versucht, dieses Verhalten auf das Optimierungsproblem umzulegen. Es gibt innerhalb eines Levels mehrere Einzelteile und es soll der kürzeste Weg herausgefunden werden, um alle diese Teile zu entfernen. Die einzelnen Bauteile können mit dem Futter gleichgesetzt werden. Die Ameisen müssen also jedes Bauteil einmal besuchen und dabei den Weg mit der kürzesten Zeit identifizieren. Die Zeit, welche eine Ameise von einem Bauteil zum anderen benötigt, wurde mit Hilfe der Zeitmatrix (Formel 4) berechnet.

Die künstlichen Ameisen, welche für den Algorithmus verwendet werden, haben folgende wesentliche Unterschiede zu echten Ameisen:

1. Sie haben ein Gedächtnis und können sich merken, wo sie schon waren, sie besuchen keinen Ort, den sie schon einmal besucht haben, ein zweites Mal.
2. Sie kennen die Distanz (Zeit) zwischen den Orten und wählen mit hoher Wahrscheinlichkeit den nächstgelegenen Ort als nächstes Ziel.

3. Wenn die Distanz zwischen zwei Zielen gleich ist, wählen sie den Ort mit mehr Pheromonen.

Zu Beginn werden 1 bis N Ameisen auf die 1 bis N Bauteile zufällig verteilt und müssen sich ihr nächstes Ziel aussuchen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Ameise k , welche gerade bei Bauteil i ist als nächstes Ziel j wählt, wird durch P_{ij}^k (Formel 5) angegeben.

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha * [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}]^\alpha * [\eta_{is}]^\beta} & j \in allowed_k \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

Formel 5: Wahrscheinlichkeit

Dabei sind die darin vorkommenden Variablen folgendermaßen definiert:

- τ_{ij} gibt die Intensität der Pheromone zwischen den Orten i und j an
- α ist eine Variable zwischen 0 und 1 und steuert den Einfluss der Pheromone
- η_j ist die Sichtbarkeit des Ortes j vom Ort i aus. ($\eta_{ij} = 1 / d_{ij}$ wobei d die Distanz zwischen i und j ist)
- β ist eine Variable zwischen 0 und 1 und steuert den Einfluss der Sichtbarkeit
- $Allowed_k$ sind alle Orte, welche die Ameise k noch nicht besucht hat

Die Ameisen hinterlassen Pheromone und deshalb muss der Pheromonvektor nach jeder Iteration aktualisiert werden. Dieser findet so statt, dass auf kürzeren Wegen mehr Pheromonen verteilt werden als auf längeren.

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}$$

Formel 6: Pheromonkonzentration

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^l \Delta\tau_{ij}^k$$

Formel 7: Änderung der Pheromone

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k & \text{if ant } k \text{ travels on edge } (i,j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Formel 8: Änderung der Pheromone für Ameise k

- $\tau_{ij}(t)$ ist die Pheromonkonzentration zum Zeitpunkt t
- ρ ist die Verdunstungsrate, diese gibt an wie viele Pheromone nach t noch vorhanden sind
- L_k ist die Länge der von der Ameise k zurückgelegten Strecke
- Q ist eine Konstante
- $\Delta\tau_{ij}$ gibt die Änderung der Pheromone zwischen i und j an

Da die Wahrscheinlichkeit, welcher Ort als nächstes ausgewählt wird, stark von den Pheromonen abhängt, wird dadurch Schritt für Schritt der kürzeste Pfad identifiziert. Dieses Vorgehen ist im Pseudocode Abbildung 41 dargestellt.

```
for t=1 to iterations:
  for k=1 to l ant:
    for move count=1 to n:
      let ant move based on  $P_{ij}^k$ 
    Loop
    Calculate  $L^k$ 
  Loop
  update pheromone  $\Delta \tau_i$ 
Loop
```

Abbildung 41: Pseudocode ACO¹⁶³

Diese Logik wird auf jedes Level der Demontagesequenz angewendet, um die Distanz und damit die Zeit, welche bei der Bewegung von einem Bauteil zum anderen gebraucht wird, zu minimieren.

4.4 Umsetzung in einen Proof-Of-Concept-Demonstrator

Um den Algorithmus auch Benutzern, die keine Programmiererfahrung haben, zugänglich zu machen, wurde eine simples User Interface erstellt. Diese Benutzeroberfläche ermöglicht es, eine CAD-Datei auszuwählen und per Knopfdruck eine optimierte Demontagesequenz zu erhalten. Des Weiteren ist es möglich, einige Einstellungen vorzunehmen und sich das Ergebnis sowohl in Form einer Excel Datei als auch in Form einer Animation ausgeben zu lassen.

Das User Interface (Abbildung 42) wurde mit der Programmiersprache Python und dem GUI Modul PyQt5 erstellt. Die FreeCAD UI basiert ebenfalls auf dem Qt Toolkit wodurch die Kompatibilität gegeben ist.

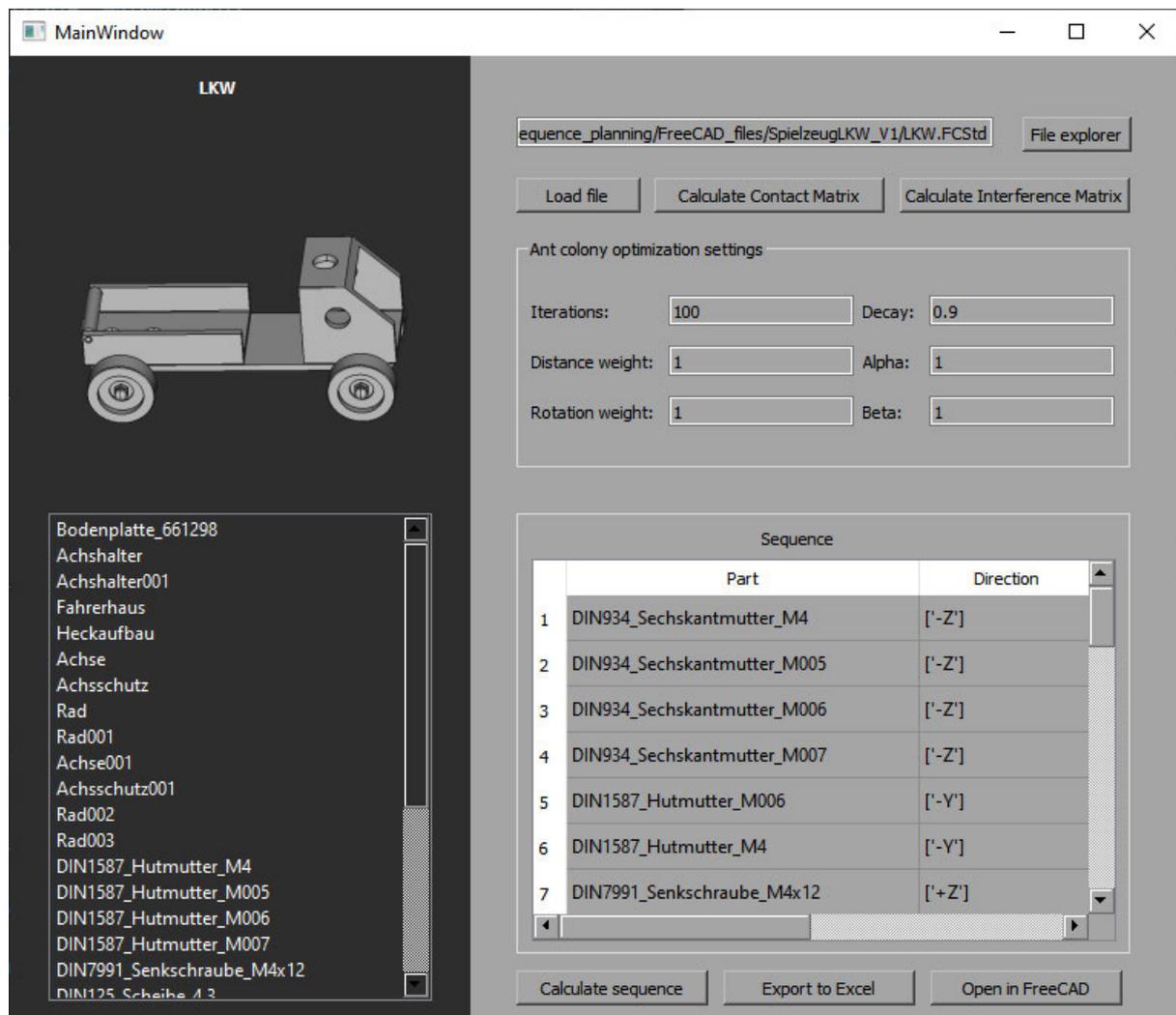


Abbildung 42: GUI¹⁶⁴

¹⁶⁴ Screenshot der Benutzeroberfläche

Das User Interface ist in zwei Teile aufgeteilt. Links werden Informationen zu dem ausgewählten Produkt dargestellt und auf der rechten Seite sind die Bedienelemente. Zu Beginn muss ein FreeCAD CAD Datei ausgewählt und in das Programm geladen werden. Mit einem Klick auf den Knopf „File explorer“ öffnet sich ein Browserfenster, welches dabei hilft, die Datei auszuwählen. Im nächsten Schritt muss die Datei mit einem Klick auf „Load file“ in das Programm geladen werden. Dadurch werden Stückliste und ein Bild des Produktes auf der linken Seite angezeigt.

In den nächsten beiden Schritten wird eine numerische Repräsentation des Produktes erstellt. Da der Algorithmus modular aufgebaut wurde, können die beiden Matrizen individuell voneinander berechnet werden. Die Kontaktmatrix und die Kollisionsmatrix sind Voraussetzungen für den Demontagealgorithmus und müssen deshalb berechnet werden, bevor man den „Calculate sequence“ Knopf bedienen kann. Hat man kein 3D Modell eines Produktes zu Verfügung kann man die beiden Matrizen auch manuell in das Programm hineinladen. Wird auf „Calculate Contact Matrix“ oder „Calculate Interference Matrix“ gedrückt, ohne dass vorher eine CAD Modell geladen wurde, öffnet sich ein Eingabefeld für eine Excel-Datei, welches die notwendigen Matrizen enthält.

Nachdem die numerische Repräsentation des Produktes erstellt wurde, kann die Demontagesequenz berechnet werden. Für den Algorithmus gibt es einige Einstellungsmöglichkeiten, die sich auf das Ergebnis auswirken. Die Gewichtung von Distanz und Rotation wirken sich auf die Berechnung der Zeitmatrix aus. Ist die Distanz-Gewichtung größer als die Rotations-Gewichtung wird der Algorithmus versuchen, die Wege minimal zu halten. Ist es umgekehrt, wird der Algorithmus mehr darauf achten, so wenige Rotationen wie möglich zu machen.

Die restlichen Variablen beeinflussen die Ant Colony Optimization direkt. Die Anzahl der Iterationen ist ein Maß für die Genauigkeit des Algorithmus. Je mehr Iterationen, desto optimaler wird das Ergebnis, dafür leidet aber die Performanz. Decay ist die Verdunstungsrate der Pheromone. Beträgt dieser Parameter den Wert „1“, verdunsten die Pheromone nicht, bei „0“ verdunsten sie sofort. „0,9“ hat sich für die verwendeten Beispielprodukte als ein guter Wert herausgestellt. Die letzten beiden Variablen Alpha und Beta steuern den Einfluss der Pheromone und der Sichtbarkeit.

Wurden alle Variablen überprüft, kann durch Bedienen von „Calculate sequence“ eine optimierte Demontagesequenz berechnet werden. Das Ergebnis, welches aus der Sequenz der Bauteile und ihrer Demontagerichtung besteht, wird in der Tabelle angezeigt. Zusätzlich dazu ist es möglich, die Sequenz in einer Excel Datei exportieren zu lassen. Bei dem Exportieren in eine Excel Datei werden auch die beiden Matrizen mitgespeichert.

Neben dem Export als Excel Datei kann man sich das Ergebnis auch als Animation ausgeben lassen. Dies geschieht anhand einer animierten Explosionsdarstellung. Ein Klick auf „Open in FreeCAD“ öffnet das Produkt in FreeCAD und zeigt Schritt für Schritt wie eine Demontage aussehen könnte (Abbildung 43).

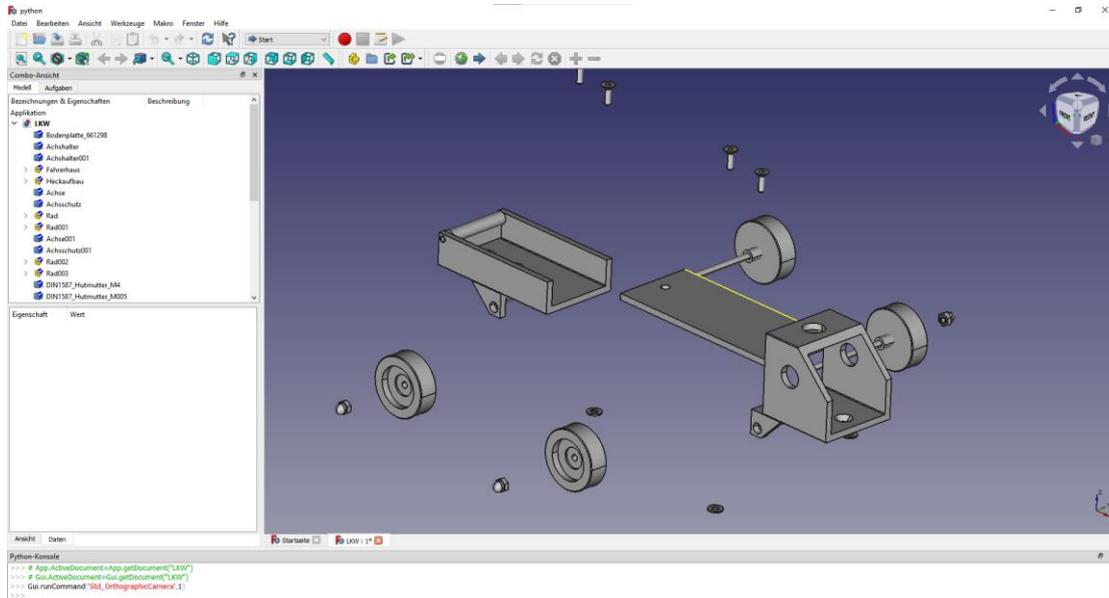


Abbildung 43: Demontagesequenz in FreeCAD¹⁶⁵

4.5 Zusammenfassung und Fazit

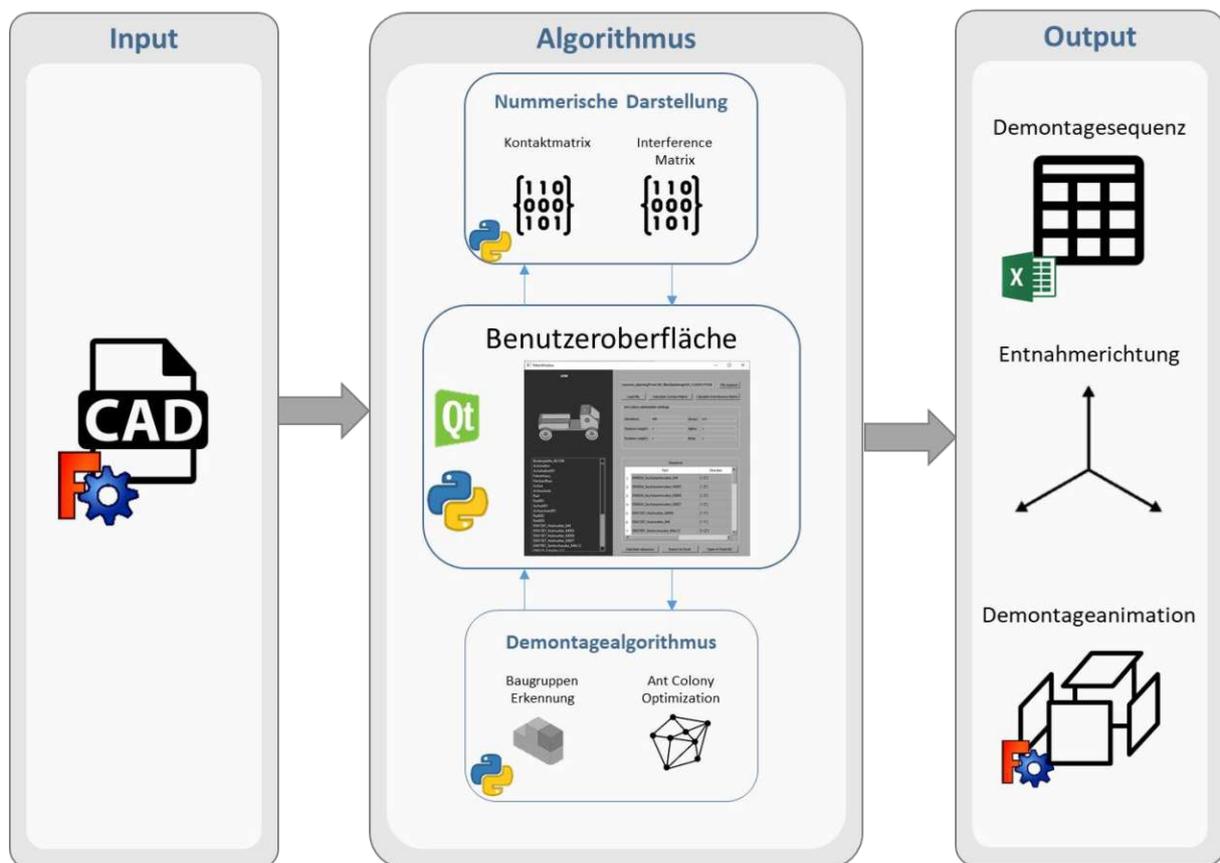


Abbildung 44: System Design¹⁶⁶

Alle Algorithmus-Komponenten können sowohl isoliert voneinander, also auch kombiniert verwendet werden. Kombiniert ergeben sie, wie in Abbildung 44 dargestellt, eine vollständiges Demontage-Programm. Mit Hilfe der Benutzeroberfläche ist es jedem möglich den Algorithmus zu bedienen. Die Erstellung einer numerischen Darstellung sowie der Demontage-Algorithmus werden beide von der Benutzeroberfläche aus angesteuert. Das 3D Modell wird in das Programm geladen, dann wird von dort eine Anfrage an das Modul „Numerische Darstellung“ gestellt, welche als Antwort die numerische Darstellung des 3D Modells liefert. Wird der Demontagealgorithmus ausgeführt, nimmt dieser sich die Numerische Darstellung und liefert eine Demontagesequenz samt Demontagerichtung zurück. Diese Sequenz kann im letzten Schritt als Excel Datei, oder als Animation ausgegeben werden. Für die Animation wird die FreeCAD API verwendet, welche die Visualisierung des 3D Objektes ermöglicht.

¹⁶⁶ Darstellung des Verfassers

5 Validierung der Vorgehensweise

Der im vorherigen Kapitel vorgestellte Algorithmus zur Erstellung einer Demontagesequenz wird nun anhand von zwei Beispielprodukten getestet und validiert. Dafür wird zuerst der Use Case beschrieben, dann die Durchführung erklärt und schlussendlich die Ergebnisse kritisch reflektiert.

5.1 Use Case Beschreibung

Für die Validierung der entwickelten Logik werden zwei Produkte herangezogen, welche anhand der vorgeschlagenen Demontagesequenz des Algorithmus zerlegt werden. Das erste Produkt, an welchem der Algorithmus getestet wird, ist ein Spielzeug LKW. Dieser LKW wird von Fraunhofer Austria verwendet, um Montage- und Demontage-Szenarien zu analysieren, wodurch sich dieses Beispiel sehr gut für die Validierung der Logik eignet. Der zweite Use Case behandelt ein Szenario, welches im privaten Bereich spielt. Es geht dabei um die zerstörungsfreie Zerlegung eines Regals von einer Person, die keine Details über das Produkt kennt. Diese beiden Produkte werden nun kurz beschrieben.

5.1.1 Spielzeug LKW

ID	Part
1	Achse
2	Achse001
3	Achshalter
4	Achshalter001
5	Achsschutz
6	Achsschutz001
7	Bodenplatte_661298
8	DIN125_Scheibe_4.004
9	DIN125_Scheibe_4.005
10	DIN125_Scheibe_4.006
11	DIN125_Scheibe_4.3
12	DIN1587_Hutmutter_M005
13	DIN1587_Hutmutter_M006
14	DIN1587_Hutmutter_M007
15	DIN1587_Hutmutter_M4
16	DIN7991_Senkschraube_M4x013
17	DIN7991_Senkschraube_M4x014
18	DIN7991_Senkschraube_M4x015
19	DIN7991_Senkschraube_M4x12
20	DIN934_Schexskantmutter_M005
21	DIN934_Schexskantmutter_M006
22	DIN934_Schexskantmutter_M007
23	DIN934_Schexskantmutter_M4
24	Fahrerhaus
25	Heckaufbau
26	Rad
27	Rad001
28	Rad002
29	Rad003

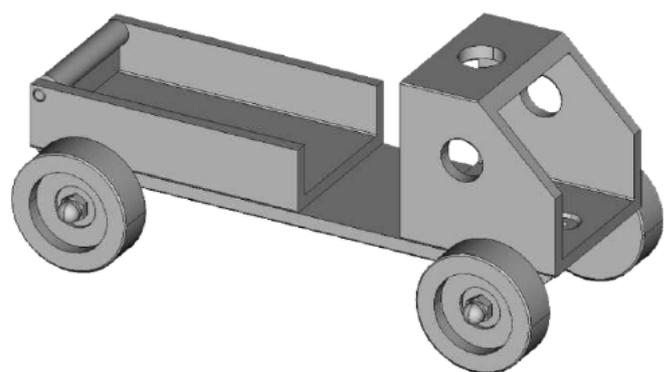


Abbildung 45: Spielzeug LKW

Tabelle 3: Stückliste Spielzeug LKW

Der LKW (Abbildung 45), an dem die Funktionsweise des Algorithmus demonstriert wird, besteht aus 29 Bauteilen (Tabelle 3). Er besitzt vier Rädern samt Achsen und Achshalter, welche jeweils mit Schrauben und Hutmuttern befestigt werden. Des Weiteren gibt es noch eine Bodenplatte und ein Fahrerhaus sowie einen Heckaufbau. Diese Komponenten werden alle mit Schrauben, Unterlegscheiben und Muttern aneinander befestigt. Die Demontage sollte daher zerstörungsfrei möglich sein.

5.1.2 Regal

ID	Part
1	Pin_Right_02
2	Pin_Right_01
3	Pin_Left_02
4	Pin_Left_01
5	Left_Side
6	Top
7	Right_Side
8	Screw_Top_01
9	Screw_Top_02
10	Screw_Bottom_01
11	Screw_Bottom_02
12	Screw_Bottom_03
13	Screw_Bottom_04
14	Screw_Top_03
15	Screw_Top_04
16	Short_Top
17	Pin_Middle_01
18	Pin_Top_01
19	Pin_Top_02
20	Middel
21	Pin_Middle_02
22	Pin_Bottom_01
23	Pin_Bottom_02
24	Bottom
25	Short_Bottom

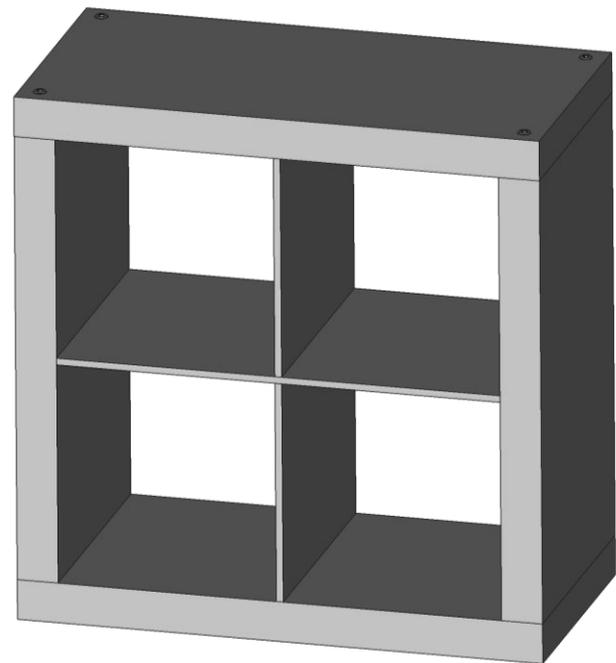


Abbildung 46: Regal

Tabelle 4: Stückliste Regal

Das zweite Beispiel, anhand dessen der Algorithmus validiert wurde, ist ein Regal (Abbildung 46). Dieses hat insgesamt 25 Bauteile bestehend vier Außenwände, die jeweils mit Acht Schrauben befestigt sind und drei Innenplatten welche zusammengebaut die Regalbretter ergeben. Diese Innenwände werden mit Hilfe von Dübeln, welche von außen nicht sichtbar sind, zusammengehalten. Die Stückliste ist in (Tabelle 4) dargestellt.

5.2 Durchführung der Vorgehensweise

Für die Durchführung wurden STEP Dateien der beiden Beispielprodukte verwendet. Im ersten Schritt wurden diese in FreeCAD geladen, um zu überprüfen ob alle Informationen vorhanden sind und die einzelnen Komponenten der Teile als unabhängige Parts dargestellt werden. Da dies der Fall war, wurde für beide Produkte über die Benutzeroberfläche eine Demontagesequenz generiert.

5.2.1 Demontage Regal

Level	Part	Direction
1	Screw_Bottom_03	['-Z']
	Screw_Bottom_04	['-Z']
	Screw_Bottom_02	['-Z']
	Screw_Bottom_01	['-Z']
	Screw_Top_02	['+Z']
	Screw_Top_01	['+Z']
	Screw_Top_03	['+Z']
	Screw_Top_04	['+Z']
2	Top	['+Z']
	Right_Side	['+X']
	Bottom	['-Z']
	Left_Side	['-X']
3	Pin_Left_02	['-X']
	Pin_Top_02	['+Z']
	Pin_Top_01	['+Z']
	Pin_Right_01	['+X']
	Pin_Right_02	['+X']
	Pin_Bottom_02	['-Z']
	Pin_Bottom_01	['-Z']
	Pin_Left_01	['-X']
4	Short_Bottom	['-Z']
	Short_Top	['+Z']
5	Pin_Middle_01	['+Z', '-Z']
	Middel	['+Z', '-Z']
	Pin_Middle_02	['+Z', '-Z']

Tabelle 5: Demontagerihenfolge Regal

Die Demontagesequenz wurde in 5 Iterationen berechnet und das Produkt hat keine selbsthemmenden Teile. Dadurch war es nicht nötig Unterbaugruppen zu erstellen und die Sequenzgenerierung konnte sequenziell erfolgen. Innerhalb eines Levels kann man die Reihenfolge beliebig ändern. Deshalb wurde, um die Demontagezeit minimal zu halten, sowohl innerhalb der Level als auch Level übergreifend mit Hilfe der Ant Colony Optimization optimiert.

Das Ergebnis, welches in Tabelle 5 dargestellt ist, gibt sowohl die Reihenfolge der Teile als auch die Achsrichtung, in der das Teil entnommen werden kann, an. Im ersten Schritt werden die zugänglichen Schrauben entfernt. Dadurch sind die Seitenwände lose und können ebenfalls im zweiten Schritt demontiert werden. Nach den Seitenwänden werden die Pins, welche zwischen Seiten- und Innenwänden liegen, entfernt. Es bleiben nur noch die inneren Regalbretter übrig, die mit Pins in der Mitte zusammengehalten werden. Die obere und untere Regalwand kann nun einfach weggenommen werden. Im Letzten Schritt sind nur noch Mittelbrett und Pins übrig, welche in Z-Richtung voneinander getrennt werden können.

5.2.2 Demontage LKW

Level	Part	Direction
1	DIN934_Schraube_M007	['-Z']
	DIN934_Schraube_M006	['-Z']
	DIN934_Schraube_M005	['-Z']
	DIN934_Schraube_M4	['-Z']
	DIN1587_Hutmutter_M4	['-Y']
	DIN1587_Hutmutter_M006	['-Y']
	DIN7991_Senkschraube_M4x015	['+Z']
	DIN7991_Senkschraube_M4x014	['+Z']
	DIN7991_Senkschraube_M4x013	['+Z']
	DIN7991_Senkschraube_M4x12	['+Z']
	DIN1587_Hutmutter_M005	['+Y']
	DIN1587_Hutmutter_M007	['+Y']
2	Rad002	['+Y']
	Achse001	['+Y', '-Y']
	Rad003	['-Y']
	Rad	['-Y']
	Achse	['+Y', '-Y']
	Rad001	['+Y']
	DIN125_Scheibe_4.004	['-Z']
	DIN125_Scheibe_4.3	['-X', '-Z']
	Heckaufbau	['-X', '+Z']
	Fahrerhaus	['+X', '+Z']
	DIN125_Scheibe_4.006	['+X', '-Z']
DIN125_Scheibe_4.005	['-Z']	
3	Achsschutz	['-X', '+Y', '-Y', '-Z']
	Bodenplatte_661298	['+Y', '-Y', '+Z', '-Z']
	Achshalter	['-X', '+Y', '-Y', '+Z']
	Achshalter001	['+X', '+Y', '-Y', '+Z']
	Achsschutz001	['+X', '+Y', '-Y', '-Z']

Tabelle 6: Demontagerihenfolge LKW

Wie in Tabelle 6 dargestellt erfolgt die Demontage in drei Iterationen und auch hier kommt keine Selbsthemmung vor. Deshalb können die Teile sequenziell entnommen werden ohne Unterbaugruppen zu bilden.

Im ersten Schritt werden wieder die Schrauben und Muttern entfernt. Nachdem diese alle gelöst sind, können die Räder und Achsen, sowie das Fahrerhaus und der Heckaufbau demontiert werden. Zuletzt können die Achshalter und die Bodenplatte entnommen werden.

5.3 Kritische Reflexion der Ergebnisse

Der Demontagealgorithmus wurde auf einem Windows 10 Laptop mit Intel(R) Core (TM) i5-8250U CPU und 8GB RAM getestet. Um ein konstantes Ergebnis zu

gewährleisten, wurden beide Produkte zehn Mal demontiert. Aufgrund der Stochastik der Ant Colony Optimization gab es leicht unterschiedliche Reihenfolgen innerhalb der Levels, welche jedoch alle technisch machbar waren. Die Unterschiede beziehen sich beispielsweise auf die erste Schraube, welche bei dem Regal demontiert wird. Basierend auf der Wahl der ersten Schraube wird die Reihenfolge der anderen Komponenten angepasst. Bei dem Vergleich der einzelnen Sequenzen konnte jedoch keine bevorzugte Reihenfolge ausgewählt werden, da diese sich nur durch die Wahl des Anfangspunktes unterscheiden. Für die Validierung der Machbarkeit wurde das Regal nach der Reihenfolge, welche in Tabelle 5 abgebildet ist, zerstörungsfrei zerlegt.

Bei der Analyse der Laufzeit werden die beiden Module numerische Darstellung und Demontagealgorithmus getrennt voneinander betrachtet. Durch die Aufteilung in unterschiedliche Level und die Optimierung dieser mit einem heuristischen Algorithmus, ist es möglich, die Laufzeit der Demontage gering zu halten. Bei zehn Durchläufen betrug die Laufzeit des Demontagealgorithmus für das Regal im Schnitt 1,12 Sekunden. Die Berechnung der Demontagesequenz des LKWs ist im Vergleich ein bisschen aufwendiger. Der LKW besitzt mehr Einzelteile und die Teile, die er besitzt, haben auch eine komplexere Geometrie als jene vom Regal. Die durchschnittliche Laufzeit für den Demontagealgorithmus beträgt auf dem Testsystem 2,13 Sekunden.

LKW	Regal
2.25	1.22
2.41	1.11
2.15	1.12
2.19	1.10
1.99	1.11
1.96	1.11
1.91	1.12
2.18	1.10
2.17	1.11
2.10	1.10
2.13	1.12

Tabelle 7: Laufzeit Demontagealgorithmus

Die Laufzeit für die Berechnung der Matrizen ist etwas länger, da dieser Algorithmus mit 3D Modellen arbeitet. Dabei ist die Kollisionserkennung jene Funktion, welche am aufwendigsten ist und daher am Längsten dauert. Die Komplexität der einzelnen Teile beeinflusst nur die Generierung der Matrizen, jedoch nicht den eigentlichen Demontagealgorithmus. Ist eine Baugruppe einmal numerisch dargestellt, hat die Form der Einzelteile keinen Einfluss mehr auf den Demontagealgorithmus. Die Laufzeit des Demontagealgorithmus hängt nur von der Anzahl an Teilen ab, die Generierung der numerischen Darstellung zusätzlich auch von der Komplexität der Einzelteile. Aus diesem Grund wird empfohlen, Normteile wie Schrauben, simpel

darzustellen, also das Gewinde nicht zu modellieren. Mit diesen Voraussetzungen beträgt die Laufzeit für die Generierung der numerischen Darstellung für den LKW im Durchschnitt 17,51 Sekunden und für das Regal 4,16 Sekunden.

LKW	Regal
17.53	4.28
17.46	4.13
18.55	4.16
18.90	4.17
17.08	4.14
17.03	4.16
17.36	4.17
17.07	4.15
17.07	4.15
17.05	4.15
17.51	4.16

Tabelle 8: Laufzeit Numerische Darstellung

6 Schlussfolgerung und Ausblick

6.1 Ergebnis

Das Ergebnis dieser Diplomarbeit ist eine voll funktionsfähige Demontagesoftware. Als Input wird nur eine CAD Datei des zu demontierenden Produktes im STEP Format benötigt. Aus dieser CAD Datei kann die Kontaktmatrix sowie die Kollisionsmatrix berechnet werden. Anhand eines iterativen heuristischen Algorithmus wird dann, basierend auf den Matrizen, eine Demontagesequenz generiert. Diese Sequenz wird mit der Ant Colony Optimization auf Weg- und Zeitminimierung optimiert. Um dieses Programm einfach zu bedienen, wurde eine Benutzeroberfläche erstellt, welche es erlaubt, den Algorithmus auszuführen. Die optimale Sequenz kann sowohl als Excel Datei exportiert, als auch als Animation in FreeCAD abgespielt werden.

6.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Die Fragen „Wie kann die optimierte Planung von Demontageprozessen zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft beitragen?“ kann mit Hilfe dieser Arbeit beantwortet werden. Die Demontage ist ein Grundpfeiler der Kreislaufwirtschaft. So gut wie alle Maßnahmen, welche sich mit der Verlängerung der Lebensdauer eines Produktes beschäftigen, beginnen mit der Demontage. Selbst mit geringer Effizienzsteigerung könnte man demnach viele Bereiche verbessern. Um den Einstieg in die Kreislaufwirtschaft zu wagen, brauchen Unternehmen oft eine wirtschaftliche Motivation. Durch eine optimale Demontage ist es möglich, viel Zeit und dadurch Geld einzusparen. Zusätzlich zu der Demontagezeit, welche durch eine optimale Planung verringert werden kann, kann die Planungszeit durch einen automatisierten Algorithmus ebenfalls verringert werden. Durch die Unterstützung von solchen Demontagetools wird der Einstieg für Unternehmen, welche sich bisher noch nicht mit Demontage beschäftigen, einfacher, was wiederum den Einstieg in eine Kreislaufwirtschaft begünstigt.

Die zweite Forschungsfrage „Wie kann eine optimierte Demontagerihenfolge von diskreten Produkten automatisiert generiert werden?“ wurde anhand des Kapitels 4 ausführlich beantwortet. Es wurde dargelegt, dass für komplexe Produkte mehrheitlich heuristische Algorithmen verwendet werden und Brute Force Methoden immer seltener.

Die Anforderungen, welche an ein Produkt gestellt werden, um es zerstörungsfrei zu demontieren sind vielseitig. Schon bei dem Zusammenbau sollte darauf geachtet werden, reversible Montagemethoden zu verwenden. Produkte, welche geschweißt oder verklebt worden sind, können nur mit sehr großem Aufwand zerstörungsfrei demontiert werden und sind mit dem entworfenen Algorithmus nicht demontierbar. Um

den in dieser Arbeit entwickelten Algorithmus verwenden zu können, muss die CAD Datei im STEP Format oder mit der Software FreeCAD kompatibel sein und aus separaten Teilen bestehen.

Hierbei ist hervorzuheben, dass jeweils nur die geometrischen Daten des Produktes benötigt werden, was bedeutet das Zwangsbedingungen zwischen den Teilen nicht existieren müssen. Die Komponenten in der CAD Datei müssen jedoch eigenständige Bauteile mit fixer Position sein. Um die Performance beim Berechnen der Kollisionsmatrix nicht zu beeinflussen, sollten Normteile wie Schrauben eine glatte Oberfläche haben, das bedeutet, die Gewinde sollten nicht eingezeichnet sein.

Die Unterfrage nach den Optimierungskriterien wurde in Kapitel 4.3.3 mit der Beschreibung der Zeitmatrix beantwortet. Diese besteht aus der Rotationszeit und der Verschiebezeit zwischen den einzelnen Komponenten, könnte in weiteren Entwicklungen aber auch noch erweitert werden.

Die Logik des entwickelten Algorithmus basiert auf einem iterativen Ansatz. Dabei werden in jeder Iteration alle Teile, welche ohne Kollision entfernt werden können, identifiziert. Die Reihenfolge dieser wird dann anhand der Ant Colony Optimization optimiert. Ist es nicht möglich, Einzelteile zu entfernen, werden trennbare Unterbaugruppen erstellt, welche separat demontiert werden. Durch die Demontage in Iterationen und die Optimierung mit Hilfe der heuristischen Ant Colony Optimization ist es möglich, die Laufzeit des Algorithmus gering zu halten.

6.3 Einschränkungen des Ansatzes

Es wurde versucht, einen möglichst universell einsetzbaren Algorithmus mit guter Performance zu entwickeln für dessen Anwendung keine Vorkenntnisse notwendig sind. Da nur eine CAD-Datei als Input notwendig ist, können beispielsweise keine Aussagen über die Demontagewerkzeuge gemacht werden. Auch Baugruppen, die geklebt oder geschweißt wurden, können nicht mit diesem Algorithmus analysiert werden, dazu fehlen Informationen betreffend der Montage.

Eine weitere Einschränkung, welche getroffen wurde, ist die Limitierung der Entnahmerichtung auf die sechs Achsen eines kartesischen Koordinatensystems. Liegt ein Bauteil schräg kann es mit diesem Algorithmus nicht entnommen werden.

Durch die Verwendung eines heuristischen Algorithmus ist zwar die Laufzeit gering, jedoch wird eine Lösung vorgeschlagen, welche sich lediglich der Optimalen annähert und deshalb nicht zwangsläufig immer die Beste ist. Durch die Auswahl anhand von berechneten Wahrscheinlichkeiten ist es möglich, leicht unterschiedliche Ergebnisse für ein und dasselbe Produkt zu bekommen. Durch die Erhöhung der Iterationen beim Ameisenalgorithmus wird die Genauigkeit jedoch erhöht.

Weiters ist festzuhalten, dass der Algorithmus auf einem CAD-Modell des zu demontierenden Produktes beruht, was bedeutet, dass das Ergebnis von der Genauigkeit dieses abhängt. Hat ein Produkt Deformationen oder Abnutzungen, welche nicht in dem CAD Modell eingezeichnet sind, kann der Algorithmus diese auch nicht berücksichtigen und die Demontagesequenz kann möglicherweise nicht angewendet werden. Dieses Problem kann nur mit der Hilfe von externen Sensoren, wie Kameras, welche den Demontageprozess durchgehend beobachten und ständig Input liefern behoben werden.

6.4 Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Eine Weiterentwicklung, welche die Einsatzmöglichkeiten erhöhen würde, ist es, die Einschränkung auf die sechs Achsen des Koordinatensystems aufzuheben. Dies könnte beispielsweise durch die Einführung eines variablen Koordinatensystems geschehen. Dadurch könnten auch Teile, welche schräg zu den Achsen liegen, entnommen werden, was zu einer Erweiterung der Anwendbarkeit führt.

Die hier entwickelte Software schlägt effiziente Demontagesequenzen vor. Um jedoch großen Einfluss auf die Demontageindustrie zu haben, muss diese Software mit Hardware kombiniert werden. Das langfristige Ziel sollte es also sein, eine Demontagezelle zu entwickeln, welche mit einem Roboter und Demontagewerkzeugen ausgestattet ist. Diese Demontagezelle zerlegt beliebige Baugruppen vollkommen automatisiert in ihre Einzelteile.

Im Moment schlägt der Algorithmus nur eine Demontagerihenfolge vor. Diese müsste um Werkzeuge sowie eine Roboter-Pfad-Planung erweitert werden. Des Weiteren bräuchte es noch Backup-Maßnahmen, falls sich ein Produkt nicht zerlegen lässt. Um so etwas zu bewerkstelligen, sind externe Sensoren notwendig. Der Status der Demontage müsste immer überwacht werden, um die Demontagerihenfolge gegebenenfalls neu zu berechnen. So eine voll automatisierte Zelle bräuchte keine menschliche Interaktion mehr und könnte in eine vollkommen digitalisierte Fabrik eingegliedert werden.

Der hier vorgeschlagene Algorithmus ist jedoch nicht für die automatisierte Roboterdemontage geeignet. Er soll eine Hilfestellung für den Demonteur sein und ihn bei seiner Arbeit unterstützen. Mit der Ausrichtung in Richtung einer Kreislaufwirtschaft und der fortschreitenden Digitalisierung ist es jedoch nur noch eine Frage der Zeit, bis der Demontageprozess vollkommen automatisiert werden kann.

7 Literaturverzeichnis

Ababneh Mohammad; Oqeili Saleh; Rawan A. Abdeen (2006): Occurrences Algorithm for String Searching Based on Brute-force Algorithm.

Aguinaga, Iker; Borro, Diego; Matey, Luis M. (2007): Generation and Application of Precedence Information for the Planning of Assembly and Disassembly Procedures. In: 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics. 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Vienna, Austria, 23.06.2007 - 27.06.2007: IEEE, S. 219–224.

Andrews, Deborah (2015): The circular economy, design thinking and education for sustainability. In: *Local Economy* 30 (3), S. 305–315. DOI: 10.1177/0269094215578226.

Asunción Álvarez; Tom Ritchey (2015): Applications of General Morphological Analysis. From Engineering Design to Policy Analysis.

Avikal, Shwetank; Mishra, P. K.; Jain, Rajeev (2014): A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems. In: *International Journal of Production Research* 52 (5), S. 1306–1317. DOI: 10.1080/00207543.2013.831999.

Bahubalendruni, M. V. A. Raju; Varupala, Vara Prasad (2021): Disassembly Sequence Planning for Safe Disposal of End-of-Life Waste Electric and Electronic Equipment. In: *Natl. Acad. Sci. Lett.* 44 (3), S. 243–247. DOI: 10.1007/s40009-020-00994-0.

Bahubalendruni, M.V.A. Raju; Gulivindala, Anil; Kumar, Manish; Biswal, Bibhuti Bhusan; Annepu, Lakshumu Naidu (2019): A hybrid conjugated method for assembly sequence generation and explode view generation. In: *AA* 39 (1), S. 211–225. DOI: 10.1108/AA-01-2018-014.

Bressanelli, Gianmarco; Perona, Marco; Sacconi, Nicola (2019): Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: a literature review and a multiple case study. In: *International Journal of Production Research* 57 (23), S. 7395–7422. DOI: 10.1080/00207543.2018.1542176.

Cong, Liang; Zhao, Fu; Sutherland, John W. (2019): A Design Method to Improve End-of-Use Product Value Recovery for Circular Economy. In: *Journal of Mechanical Design* 141 (4). DOI: 10.1115/1.4041574.

Cooper, Timothy (2011): Peter Lund Simmonds and the political ecology of waste utilization in Victorian Britain. In: *Technology and culture* 52 (1), S. 21–44. DOI: 10.1353/tech.2011.0003.

Dini, G.; Failli, F.; Santochi, M. (2001): A disassembly planning software system for the optimization of recycling processes. In: *Production Planning & Control* 12 (1), S. 2–12. DOI: 10.1080/09537280150203924.

Dong, Tianyang; Zhang, Ling; Tong, Ruofeng; Dong, Jinxiang (2006): A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product. In: *Int J Adv Manuf Technol* 30 (5-6), S. 507–520. DOI: 10.1007/s00170-005-0036-7.

Ellen MacArthur Foundation (2013): *Towards_A_Circular_Economy*.

European Commission (2015): *Closing the loop – An EU action plan for the circular economy*.

European Urban Knowledge Network (EUKN) (2015): *The Circular City. Lessons from Europe Factsheet for Policy Lab Netherlands*.

Friedrich, Christian; Lechler, Armin; Verl, Alexander (2016): A planning system for generating manipulation sequences for the automation of maintenance tasks. In: 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Fort Worth, TX, USA, 21.08.2016 - 25.08.2016: IEEE, S. 843–848.

Galantucci, L. M.; Percoco, G.; Spina, R. (2004): Assembly and Disassembly Planning by using Fuzzy Logic & Genetic Algorithms. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 1 (2), S. 7. DOI: 10.5772/5622.

Geissdoerfer, Martin; Savaget, Paulo; Bocken, Nancy M.P.; Hultink, Erik Jan (2017): The Circular Economy – A new sustainability paradigm? In: *Journal of Cleaner Production* 143, S. 757–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

Giri, R.; Kanthababu, M. (2015): Generating complete disassembly sequences by utilising two-dimensional views. In: *International Journal of Production Research* 53 (17), S. 5118–5138. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005249.

Hadj, Riadh Ben; Belhadj, Imen; Gouta, Chiheb; Trigui, Moez; Aifaoui, Nizar; Hammadi, Moncef (2018): An interoperability process between CAD system and CAE applications based on CAD data. In: *Int J Interact Des Manuf* 12 (3), S. 1039–1058. DOI: 10.1007/s12008-017-0445-5.

Haupt, Melanie; Zschokke, Mischa (2017): How can LCA support the circular economy?—63rd discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland, November 30, 2016. In: *Int J Life Cycle Assess* 22 (5), S. 832–837. DOI: 10.1007/s11367-017-1267-1.

Hongbo Shan; Shuxia Li; Jing Huang; Zhimin Gao and Wei Li (2007): *Ant Colony Optimization Algorithm-Based Disassembly Sequence Planning*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center.

Huang, Weijun; Xu, Qinchao (2017): Automatic generation and optimization of stable assembly sequence based on ACO algorithm. In: 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu, Japan, 06.08.2017 - 09.08.2017: IEEE, S. 2057–2062.

International Federation of Robotics (IFR) (2018): Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots.

Jani, Yahya; Hogland, William (2014): Waste glass in the production of cement and concrete – A review. In: *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2 (3), S. 1767–1775. DOI: 10.1016/j.jece.2014.03.016.

Jin, Guoqing; Li, Weidong; Wang, Sheng; Gao, Shuming (2017): A systematic selective disassembly approach for Waste Electrical and Electronic Equipment with case study on liquid crystal display televisions. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 231 (13), S. 2261–2278. DOI: 10.1177/0954405415575476.

JingRong Li; QingHui Wang; Ping Huang; HongZhou Shen (2009): A novel connector-knowledge-based approach for disassembly precedence constraint generation. DOI: 10.1007/s00170-009-2384-1.

Kheder, Maroua; Trigui, Moez; Aifaoui, Nizar (2017): A disassembly Sequence Planning Approach for maintenance. In: Benoit Eynard, Vincenzo Nigrelli, Salvatore Massimo Oliveri, Guillermo Peris-Fajarnes und Sergio Rizzuti (Hg.): *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 81–89.

Kheder, Maroua; Trigui, Moez; Aifaoui, Nizar (2018): A Disassembly Sequence Planning Approach Based on Particle Swarm Optimization. In: Mohamed Haddar, Fakhre Chaari, Abdelmajid Benamara, Mnaouar Chouchane, Chafik Karra und Nizar Aifaoui (Hg.): *Design and Modeling of Mechanical Systems—III*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 1017–1025.

Kirchherr, Julian; Reike, Denise; Hekkert, Marko (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: *Resources, Conservation and Recycling* 127, S. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Krajewski, Markus (2014): The great lightbulb conspiracy. In: *IEEE Spectr.* 51 (10), S. 56–61. DOI: 10.1109/MSPEC.2014.6905492.

Kranert, Martin (2017): *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Laili, Yuanjun; Tao, Fei; Pham, Duc Truong; Wang, Yongjing; Zhang, Lin (2019): Robotic disassembly re-planning using a two-pointer detection strategy and a super-

fast bees algorithm. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 59, S. 130–142. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.04.003.

Lan F.; Wang Y.; Pham D.T.; Liu J.; Huang J.; Ji C. et al.: Interlocking Problem in Automatic Disassembly Planning and Two Solutions.

McGovern, S. M.; Gupta, S. M. (2003): Greedy algorithm for disassembly line scheduling. In: SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483). SMC '03 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Washington, DC, USA, 5-8 Oct. 2003: IEEE, S. 1737–1744.

McGovern, Seamus M.; Gupta, Surendra M. (2006): Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives. In: *Int J Adv Manuf Technol* 30 (5-6), S. 481–496. DOI: 10.1007/s00170-005-0037-6.

Morseletto, Piero (2020): Targets for a circular economy. In: *Resources, Conservation and Recycling* 153, S. 104553. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104553.

Neb, Alexander; Göke, Joshua (2021): Generation of assembly restrictions and evaluation of assembly criteria from 3D assembly models by collision analysis. In: *Procedia CIRP* 97, S. 33–38. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.201.

Oishi, Meeko (Hg.) (2020): Disassembly Sequence Planning Considering Human-Robot Collaboration. Sheraton Denver Downtown Hotel, Denver, CO, USA. Unter Mitarbeit von Santosh Devasia. American Automatic Control Council. Piscataway, NJ: IEEE. Online verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9140048>.

Osti, Francesco; Ceruti, Alessandro; Liverani, Alfredo; Caligiana, Gianni (2017): Semi-automatic Design for Disassembly Strategy Planning: An Augmented Reality Approach. In: *Procedia Manufacturing* 11, S. 1481–1488. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.279.

Pan, Chunxia; Smith, Shana S.-F.; Smith, Gregory C. (2005): Determining Interference Between Parts in CAD STEP Files for Automatic Assembly Planning. In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 5 (1), S. 56–62. DOI: 10.1115/1.1861473.

Percoco, Gianluca; Diella, Marialuisa (2013): Preliminary Evaluation of Artificial Bee Colony Algorithm When Applied to Multi Objective Partial Disassembly Planning. In: *RJASET* 6 (17), S. 3234–3243. DOI: 10.19026/rjaset.6.3628.

Pham, Duc Truong; Lan, Feiying; Wang, Yongjing; Liu, Jiayi; Huang, Jun; Ji, Chunqian et al. (2018): Automatic Detection of Subassemblies for Disassembly Sequence Planning, S. 94–100. DOI: 10.5220/0006906600940100.

- Poschmann, Hendrik; Brüggemann, Holger; Goldmann, Daniel (2020): Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation. In: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (4), S. 341–359. DOI: 10.1002/cite.201900107.
- Potting, J.; Hekkert, M. P.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017): Circular economy: measuring innovation in the product chain. In: *PBL Publishers* (2544).
- Rechenberg, Peter (2000): Was ist Informatik? 3. Auflage: Hanser-Verlag (33).
- Reike, Denise; Vermeulen, Walter J.V.; Witjes, Sjors (2018): The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. In: *Resources, Conservation and Recycling* 135, S. 246–264. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.027.
- Scopus (2019): GlobalResearch Factsheet. Online verfügbar unter https://www.elsevier.com/__data/assets/pdf_file/0017/114533/Scopus_GlobalResearch_Factsheet2019_FINAL_WEB.pdf.
- Shannon, Sean; Dahmus, Jeffrey; Guzzo, Rob; Rujanavech Charissa; Lessard, Joe; Chandler, Sarah (2016): Liam - An Innovation Story.
- Shimizu, Yoshiaki; Tsuji, Kyohei; Nomura, Masayuki (2007): Optimal disassembly sequence generation using a genetic programming. In: *International Journal of Production Research* 45 (18-19), S. 4537–4554. DOI: 10.1080/00207540701440261.
- Stahel, Walter R. (2019): The circular economy. A user's guide. London, New York: Routledge Taylor & Francis.
- Surendra, Gupta; Charles, McLean (1996): Disassembly of Products. In: *Computers & Industrial Engineering* (Volume 31, Issues 1–2), S. 225–228. DOI: 10.1016/0360-8352(96)00146-5.
- Tao, Fei; Bi, Luning; Zuo, Ying; Nee, A. Y. C. (2018): Partial/Parallel Disassembly Sequence Planning for Complex Products. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 140 (1). DOI: 10.1115/1.4037608.
- Tranfield, David; Denyer, David; Smart, Palminder (2003): Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. In: *Br J Management* 14 (3), S. 207–222. DOI: 10.1111/1467-8551.00375.
- Victor Papanek (1985): Design for the Real World. Human Ecology and Social Change. London: Thames & Hudson.
- Wang, Yongjing; Lan, Feiying; Liu, Jiayi; Huang, Jun; Su, Shizhong; Ji, Chunqian et al. (2020): Interlocking problems in disassembly sequence planning. In: *International Journal of Production Research*, S. 1–13. DOI: 10.1080/00207543.2020.1770892.
- WWF (2012): Living Planet Report 2012. Biodiversity, biocapacity and better choices.

Zhang, Wenlei; Ma, Mingxu; Li, Haiyan; Yu, Jiapeng (2017): Generating interference matrices for automatic assembly sequence planning. In: *Int J Adv Manuf Technol* 90 (1-4), S. 1187–1201. DOI: 10.1007/s00170-016-9410-x.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lineare Wirtschaft.....	7
Abbildung 2: Kreislaufwirtschaft.....	9
Abbildung 3: Ziele und Strategien der Kreislaufwirtschaft	11
Abbildung 4: Anzahl der Artikel über Kreislaufwirtschaft in Scopus.....	16
Abbildung 5: Montage/Demontageprozess.....	21
Abbildung 6: Destruktive und nicht-destruktive Demontage	22
Abbildung 7: Algorithmus.....	27
Abbildung 8: Matrix.....	30
Abbildung 9: Graph.....	31
Abbildung 10: Baum	31
Abbildung 11: Aufgestellter Suchterm	35
Abbildung 12: Verlauf der Literaturlauswahl	37
Abbildung 13: Interference Matrix.....	38
Abbildung 14: Ausprägungen des morphologischen Kastens	45
Abbildung 15: Erweiterung des PYTHONPATHS	46
Abbildung 16: Morphologischer Kasten	49
Abbildung 17: Demontagelogik.....	50
Abbildung 18: Beispielprodukt	51
Abbildung 19: Kontaktmatrix.....	52
Abbildung 20: Flow Chart Kontaktmatrix	53
Abbildung 21: Beschreibung der Kollisionsmatrix	54
Abbildung 22: Kollisionsmatrix des Beispielproduktes	54
Abbildung 23: Kollisionsmatrix in alle Achsrichtungen.....	55
Abbildung 24: 2D Projektion einer 3D Baugruppe	56
Abbildung 25: Projektion auf yx und zx Ebene	56
Abbildung 26: Kollisionserkennung im dreidimensionalen Raum	57
Abbildung 27: Kollisionserkennung mit variabler Schrittweite.....	58
Abbildung 28: Flow Chart Kollisionsmatrix.....	59
Abbildung 29: Flow Chart Demontagealgorithmus	60
Abbildung 30: Kollisionsmatrix in alle Achsrichtungen.....	61
Abbildung 31: Matrixanalyse.....	62
Abbildung 32: Kollisionsmatrix Level 2	62
Abbildung 33: Matrixanalyse Level 2	63
Abbildung 34: Beispielprodukt mit trennbaren Paaren.....	63
Abbildung 35: Beispielprodukt mit nicht trennbaren Paaren	64
Abbildung 36: Trennbare Komponenten identifizieren	65
Abbildung 37: Pseudocode.....	67
Abbildung 38: Wege zwischen C1 und C2.....	68
Abbildung 39: Wege zwischen C1 und C5.....	69

Abbildung 40: Ameisenalgorithmus	71
Abbildung 41: Pseudocode ACO	74
Abbildung 42: GUI	75
Abbildung 43: Demontagesequenz in FreeCAD	77
Abbildung 44: System Design.....	78
Abbildung 45: Spielzeug LKW	79
Abbildung 46: Regal	80
Abbildung 47: Publikationen nach Jahren	98
Abbildung 48: Publikationen nach Ländern	99
Abbildung 49: Publikationen nach Organisationen	100
Abbildung 50:Publikationen nach Autoren.....	101
Abbildung 51:Publikation nach Fachgebiet.....	102

9 Formelverzeichnis

Formel 1: Überschneidungsprüfung	57
Formel 2: Benachbarte Teile suchen	66
Formel 3: Berechnung der Zeitmatrix	70
Formel 4: Zeitmatrix.....	71
Formel 5: Wahrscheinlichkeit.....	73
Formel 6: Pheromonkonzentration	73
Formel 7: Änderung der Pheromone	73
Formel 8: Änderung der Pheromone für Ameise k	73

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien.....	36
Tabelle 2: Vollständige Demontagesequenz	69
Tabelle 3: Stückliste Spielzeug LKW	79
Tabelle 4: Stückliste Regal	80
Tabelle 5: Demontagereihenfolge Regal	81
Tabelle 6: Demontagereihenfolge LKW	82
Tabelle 7: Laufzeit Demontagealgorithmus	83
Tabelle 8: Laufzeit Numerische Darstellung	84
Tabelle 9: Bewertungstabelle	105
Tabelle 10: Kontaktmatrix Regal.....	106
Tabelle 11: Kollisionsmatrix Regal.....	107
Tabelle 12: Kollisionsmatrix LKW	108
Tabelle 13: Kontaktmatrix LKW	109

11 Anhang

11.1 Analyse der ausgewählten Literatur

In diesem Abschnitt wird die Literatur, welche für die Analyse ausgewählt wurde, analysiert. Dabei werden Metadaten der final ausgewählten Artikel wie Publikationsjahr, Publikationsland, Fachrichtung und Autor der einzelnen Texte gegenübergestellt.

Publikationen nach Jahren

Die in die Analyse einbezogenen Artikel wurden alle zwischen 2000 und 2021 veröffentlicht. Das Jahr 2021 wurde zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht beendet, deshalb wurden nur Publikationen berücksichtigt welche bis inklusive 21.06.2021 auf Scopus veröffentlicht wurden. Am meisten Texte, nämlich acht, wurden 2017 veröffentlicht, dicht gefolgt von 2018. Sieht man sich den Trend über die letzten zwanzig Jahre an ist ersichtlich, dass das Thema der automatisierten Demontage Sequenz in der Wissenschaft zunehmend an Interesse gewinnt.



Abbildung 47: Publikationen nach Jahren¹⁶⁷

Publikationen nach Ländern

Schaut man sich die Verteilung der Publikationen nach Ländern an ist klar ersichtlich, dass China führt. Mit 23 Veröffentlichungen hat China fast doppelt so viele wie der

¹⁶⁷ Darstellung des Verfassers

Zweitplatzierte USA mit lediglich 12. China und USA zusammen sind für zirka die Hälfte aller Publikationen in diesem Gebiet verantwortlich. Aus Afrika gibt es zwar nur zwei Länder mit Veröffentlichungen, auffällig ist jedoch Tunesien, welches mit sechs Publikationen auf Platz drei der Rangliste liegt. Die meisten Artikel wurden in wirtschaftlich starken Ländern wie China und USA sowie in Europa veröffentlicht.

Publikationen nach Ländern

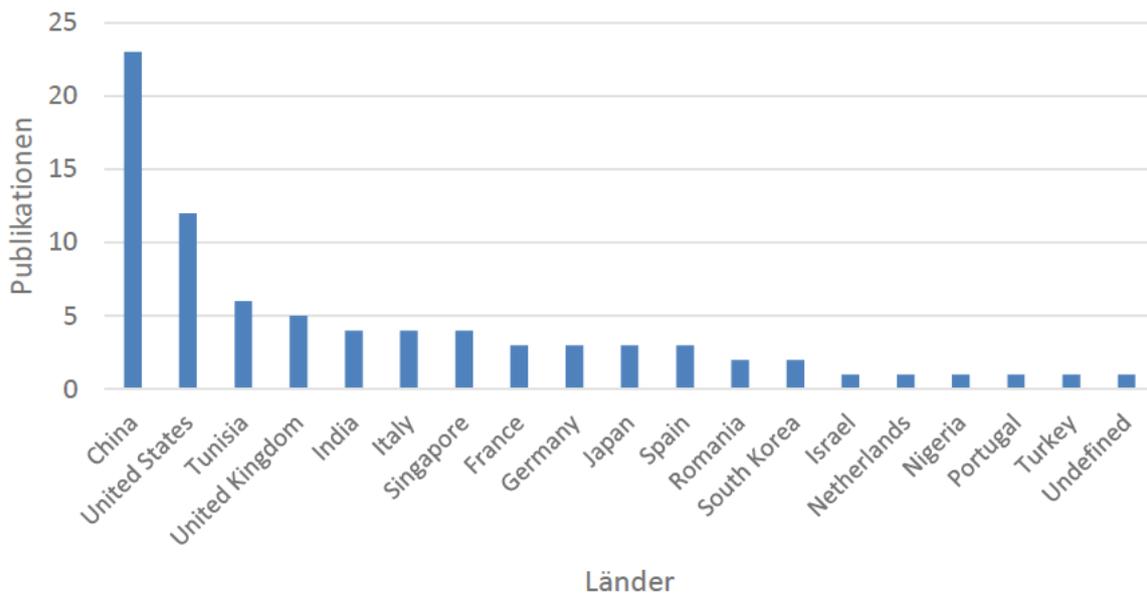


Abbildung 48: Publikationen nach Ländern¹⁶⁸

Publikationen nach Organisationen

Insgesamt waren 80 unterschiedliche Organisationen an den Publikationen beteiligt. Einige Artikel wurden auch von mehreren Organisationen zusammen veröffentlicht. 59 Organisationen haben dabei nicht mehr als eine Publikation. So gut wie alle Veröffentlichungen kommen von Universitäten. Die meisten, nämlich jeweils sechs Beiträge kommen von der „University of Birmingham“ sowie der „Université de Monastir“. Die „Beihang University“ und die „Northeastern University“ haben jeweils vier, für diese Literaturanalyse relevanten Artikel beigesteuert. Alle anderen Universitäten haben drei oder weniger Titel publiziert.

¹⁶⁸ Darstellung des Verfassers

Publikationen nach Organisationen

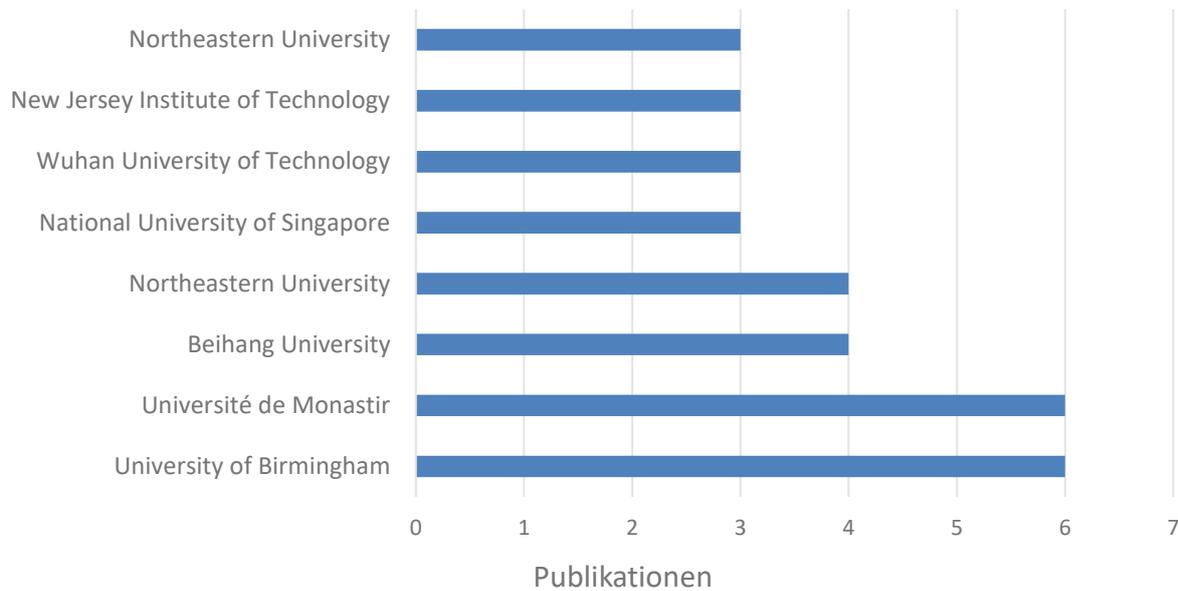


Abbildung 49: Publikationen nach Organisationen¹⁶⁹

Publikationen nach Autoren

Die relevante Literatur wurde von 160 unterschiedlichen Autoren verfasst. Die meisten dieser haben nur an einem Werk mitgearbeitet. Fünfunddreißig Autoren sind jedoch an mehr als einem Artikel beteiligt gewesen. Aifaoui N., Trigui M. sowie Wang Y. haben jeweils an sechs Publikationen gearbeitet und sind damit die Autoren mit der meisten Erfahrung in diesem Gebiet. Aifaoui und Trigui haben dabei alle ihre Artikel gemeinsam geschrieben und sind beide an der Université de Monastir tätig. Wang hingegen hat seine Artikel auf der University of Birmingham mit jeweils unterschiedlichen Kollegen veröffentlicht. Die restlichen Autoren haben nicht mehr als vier Publikationen, welche für diese Literaturrecherche in Erwägung gezogen wurden, veröffentlicht.

¹⁶⁹ Darstellung des Verfassers

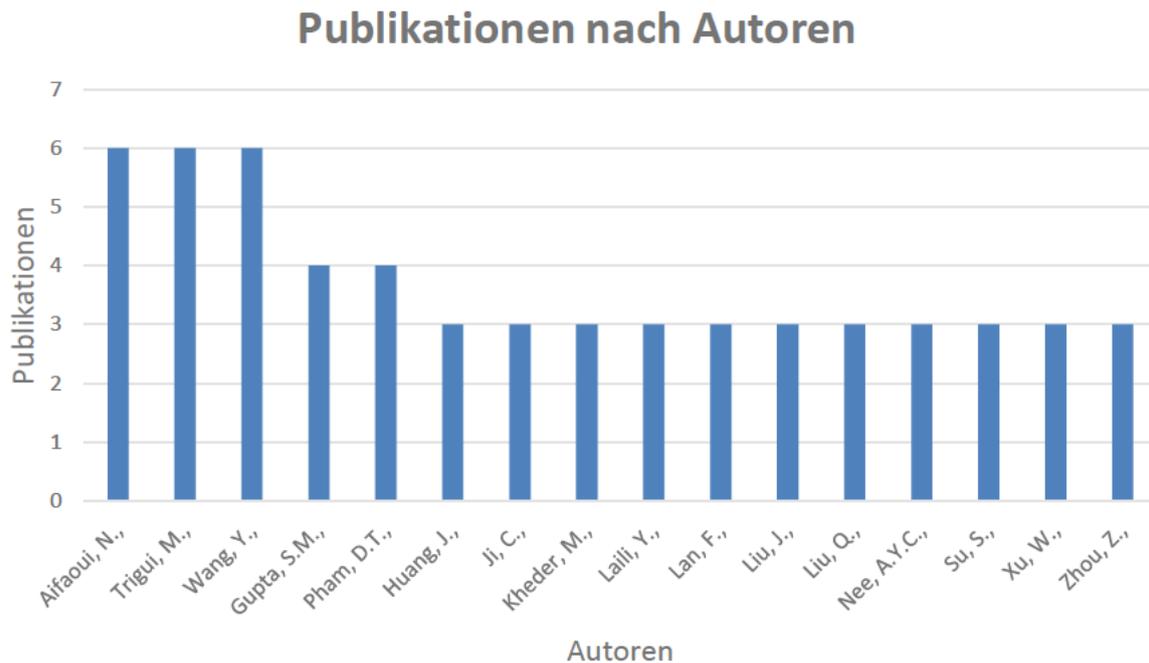


Abbildung 50: Publikationen nach Autoren¹⁷⁰

Publikationen nach Fachgebiet

Die relevante Literatur ist auf fünf Fachgebiete aufgeteilt. Dabei ist mit mehr als 50% Engineering am meisten vertreten. 63 Publikationen sind in diesem Gebiet veröffentlicht worden. Einige Artikel wurden nicht nur in einem einzelnen Fachgebiet, sondern in mehreren publiziert. 26% der relevanten Literatur ist der Fachrichtung Computer Science zugeordnet. Die restlichen vier Fachgebiete „Decision Sciences“, „Business, Management and Accounting“, „Mathematics“ und „Materials Science“ sind in Summe in weniger als 25% der Artikel vertreten.

¹⁷⁰ Darstellung des Verfassers

Publikationen nach Fachgebiet

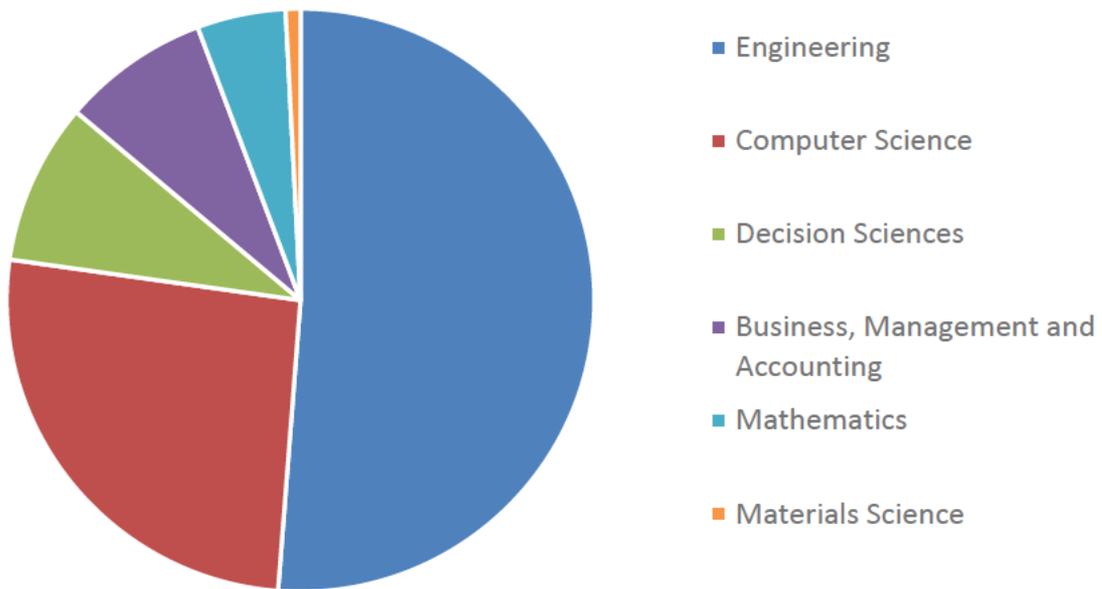


Abbildung 51: Publikation nach Fachgebiet¹⁷¹

11.2 Bewertungstabelle

¹⁷¹ Darstellung des Verfassers

Titel	Autor	Jahr	Input				Output					Darstellung			Optimierungs algorithmus							Demontagekatego			Typ						
			Geometrische Eigenschaften	Externer Sensor	Verbindungsstelle / Verbindungsart	Externe Datenbank	Demontagezeiten	Optimale Reihenfolge	Mögliche Reihenfolge	Richtungen	Numerische Repräsentation	Werkzeuge	Explosionszeichnung	Matrix	Tree	Graph	Brute Force	Baugruppen Erkennung	Rekursiv	Vereinfachung	Ant Colony Optimization	Greedy	Petri nets	Generic Algorithmus	Bee Algorithmus	Heuristik Algorithmus	Vollständige Demontage	Partielle Demontage	Selektive Demontage	Montage	Demontage
A contact relation analysis approach to assembly sequence planning for assembly models	Tao S., Hu M.,	2017	1					1				1			1												1			1	
A disassembly planning software system for the optimization of recycling processes	Dini G., Failli F., Santochi M.,	2001			1	1		1	1			1			1	1											1			1	
A disassembly sequence planning approach based on particle swarm optimization	Kheder M., Trigui M., Aifaoui N.,	2018			1			1				1			1							1	1			1			1		
A disassembly sequence planning approach for maintenance	Kheder M., Trigui M., Aifaoui N.,	2017			1			1		1		1							1				1	1		1			1		
A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems	Avikal S., Mishra P.K., Jain R.,	2014			1	1		1				1	1									1	1		1			1		1	
A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product	Dong T., Zhang L., Tong R., Dong J.,	2006	1					1					1		1	1	1									1			1		
A method of partial exploded view generated automatic based on disassembly sequence planning	Xing Y.-F., Zhang W.-L.,	2012	1					1	1		1	1							1				1	1		1			1		
A novel connector-knowledge-based approach for disassembly precedence constraint generation	Li J., Wang Q., Huang P., Shen H.,	2010			1							1	1		1			1											1		
A planning system for generating manipulation sequences for the automation of maintenance tasks	Friedrich C., Lechler A., Verl A.,	2016		1		1							1		1											1			1	1	
An automated computer aided procedure for exploded view generation	Sharma G.V.S.S., Bahubalendruni	2017	1								1	1			1											1			1		
An interoperability process between CAD system and CAE applications based on CAD data	Hadj R.B., Belhadj I., Gouta C., Trigui	2018			1				1			1			1														1		
Ant colony optimization algorithm-based disassembly sequence planning	Shan H., Li S., Huang J., Gao Z., Li	2007			1			1	1	1		1							1							1			1		
Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives	McGovern S.M., Gupta S.M.,	2006			1	1		1	1	1									1												
Approach of composing disassembly model based on the CAD information for end of life product	Wu Z.R., Dai G.H., Zhou Z.Q.,	2014			1				1			1										1	1		1				1		
AR-guided Product Disassembly for Maintenance and Remanufacturing	Chang M.M.L., Ong S.K., Nee A.Y.C.,	2017		1				1	1			1			1											1			1	1	
Assembly and disassembly planning by using Fuzzy Logic & Genetic algorithms	Galantucci L.M., Percoco G., Spina	2004	1					1	1			1									1					1			1	1	
Assembly sequence generation based on the CAD model simplification	Ben Hadj R., Bel Hadj I., Trigui M.,	2018			1			1	1										1							1			1		
Assembly sequences plan generation using features simplification	Hadj R.B., Belhadj I., Trigui M.,	2018	1		1			1	1			1							1							1			1		
Assembly/disassembly task planning and simulation using expert Petri nets	Zha X.F., Lim S.Y.E.,	2000												1							1		1						1	1	
Automated contact and non-contact constraint generation for disassembly feasibility and planning	Alrufaifi H., Kumar B., Rickii J.L.,	2019	1						1				1		1														1		
Automated disassembly sequence planning and optimization	Agrawal D., Nallamothu P.T.,	2013			1			1	1			1									1					1			1		
Automatic detection of subassemblies for disassembly sequence planning	Wang Y., Lan F., Pham D.T., Liu J.,	2018	1					1	1			1					1									1			1		
Automatic determination of transition matrices in optimal disassembly sequence generation	Lambert A.J.D.	2001			1				1				1		1											1			1		

11.3 Use-Case Ergebnisse

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
8	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
18	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
24	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0

Tabelle 10: Kontaktmatrix Regal

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	0000	0010	0100	0000	0100	0000	1011	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0111	0100	0000	0000	0000	0000
2	0000	0000	0000	0100	0100	0000	1011	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0100	0000	0000	0111	0000	0000	0000	0000	0000
3	1000	0000	0000	0010	0111	0000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1011	1000	0000	0000	0000	0000
4	0000	1000	0001	0000	0111	0000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1000	0000	0000	1011	0000	0000	0000	0000	0000
5	1000	1000	1011	1011	0000	0000	1000	1111	1111	1111	1111	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0000
6	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1111	1111	0000	0000	0000	0000	1111	1111	0000	0000	1111	1111	0000	0000	0000	0000	0000	0000
7	0111	0111	0100	0100	0100	0000	0000	0100	0100	0100	0100	1111	1111	1111	1111	0100	0100	0100	0100	0100	0100	0100	0100	0000	0100
8	0000	0000	0000	0000	1111	1111	1000	0000	0001	0000	0000	0000	0000	1000	0000	1000	0000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
9	0000	0000	0000	0000	1111	1111	1000	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1000	1000	0000	0000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
10	0000	0000	0000	0000	1111	0000	1000	0000	0000	0000	0010	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1000	1111
11	0000	0000	0000	0000	1111	0000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1000	1111	1000
12	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1111	0000	0000	0000	0000	0000	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0100	1111	0100
13	1000	0000	0000	0000	0100	0000	1111	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0100	1111	0100
14	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1111	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
15	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	1000	1000	0000	1111	1111	1111	0000	0000	0000	0000	0000
16	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
17	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
18	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
19	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
20	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
21	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
22	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
23	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
24	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
25	0000	0000	0000	0000	0100	0000	1000	0100	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000

Tabelle 11: Kollisionsmatrix Regal

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0000	0100	1000	0000	0000	0000	0000	0001	0010	0000	0000	0010	0001	0000	0000	0000	0000	0100	0000	0000	1111	0000	0000	1111	0000	0000	1000	0000	0000
0000	0000	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
1000	0000	1000	0000	0000	1100	0000	1101	1110	1000	0000	1000	1000	0001	0010	0000	0000	1111	0011	0011	1000	0000	0000	1000	0000	0000	1000	0000	0000
0000	0100	0000	0000	0000	0100	0000	0100	0000	0100	0000	1110	1101	0000	0000	0001	0010	0100	0000	0000	0100	0000	0000	0100	0000	0000	1111	0011	0011
0000	0000	0000	0000	0100	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0010	0001	0000	0000	0000	0000	0100	0000	0000	0000	0100	0000	0000	1111	0000	0000	1111	0000
0000	0000	0000	1000	0000	0000	0000	0001	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1111	0000	0000	1111	0000	0000	1000	0000	0000	1000	0000	0000
0000	1100	1000	0000	0000	0000	1100	1100	1100	1000	1000	1000	1000	1101	1110	1000	1000	0100	0000	0000	1000	0000	0000	1000	0000	0000	1000	0000	0000
0000	0000	0000	0000	0000	1100	0000	0001	0010	1000	1000	0000	0000	0001	0010	0000	0000	0100	0000	0100	1000	0000	1000	1000	0000	1000	1000	1000	0000
0010	1110	1000	0000	0010	1100	0010	0000	0010	1000	0000	0000	1000	1101	0010	1000	0000	0010	0010	0010	0010	0010	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000
0001	1101	1000	0000	0001	1100	0001	0001	0000	1000	0000	1000	0000	0001	1110	0000	1000	0001	0001	0001	0001	0001	0001	0000	0000	0000	0000	0000	0000
0000	0100	1100	0000	0000	0100	0100	0100	0100	0000	1100	1100	1100	0100	0100	0100	1101	1110	0100	0000	0000	0100	0000	0000	0100	0000	0000	1000	0000
0000	0000	0000	0000	0000	0100	0100	0000	0000	1100	0000	0010	0001	0000	0000	0001	0010	0100	0000	0100	0100	0000	0100	0100	0000	0100	1000	1000	0000
0001	0100	1101	0001	0000	0100	0000	0000	0100	1100	0001	0000	0001	0000	0100	0001	1110	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0001	0001	0001	0001	0001
0010	0100	1110	0010	0000	0100	0000	0100	0000	1100	0010	0010	0000	0100	0000	0000	1101	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0010	0010	0010	0010	0010
0000	0010	0000	0000	0000	1110	0010	1110	0010	1000	0000	0000	1000	0000	0010	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
0000	0001	0000	0000	0000	1101	0001	0001	1101	1000	0000	1000	0000	0001	0000	0000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
0000	0000	0010	0000	0000	0100	0000	0100	0000	1110	0010	0010	1110	0100	0000	0000	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
0000	0000	0001	0000	0000	0100	0000	0000	0100	1101	0001	1101	0001	0000	0100	0001	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
1000	1111	1000	1000	1111	1000	1000	0001	0010	1000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1111	1111	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0000	0011	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1111	0000	0000	1000	1000	0000	1000	1000	0000	1000	0000	1000
0000	0011	0000	0000	0000	0000	1000	0001	0010	0000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	1111	0000	0000	1000	0000	1000	1000	0000	1000	1000	1000	0000
1111	0100	1000	1000	1111	0100	0100	0001	0010	1000	1000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0100	0100	0100	0000	0000	1111	1111	1000	1000	1000	1000	1000
0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0100	0100	0000	1111	0000	0000	1000	1000	0000	1000	0000
0000	0000	0000	0000	0000	0000	0100	0000	0000	0000	1000	0010	0001	0000	0000	0000	0000	0100	0100	0100	0000	0100	0100	0000	1111	0000	0000	1000	0000
0100	0100	1111	1111	0100	0100	0100	0000	0000	0100	0100	0010	0001	0000	0000	0000	0000	0100	0100	0100	0100	0100	0100	0100	0100	0100	0000	1110	1111
0000	0000	0011	0000	0000	0000	0100	0000	0000	0000	0100	0010	0001	0000	0000	0000	0000	0100	0000	0100	0100	0000	0100	0100	0000	0100	1101	0000	0000
0000	0000	0011	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0010	0001	0000	0000	0000	0000	0100	0100	0000	0100	0100	0000	0100	0100	0000	1111	0000	0000
0000	0000	0010	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	10	01	00

Tabelle 12: Kollisionsmatrix LKW

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
2	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	
5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
24	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
27	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
29	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Tabelle 13: Kontaktmatrix LKW