



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria



## Diplomarbeit

# Studie zur anwendungsorientierten Reihenfolgeoptimierung für Remanufacturing- Produktionsplanungssysteme in der Kreislaufwirtschaft

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
(Dipl.-Ing.), eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Maschinenwesen  
und Betriebswissenschaften

**Barna Gal BSc**

Mat.Nr.: 01429521

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Mensch-Maschine-Interaktion,  
Fraunhofer Austria Research GmbH)

Dr. Viola Gallina

(Fraunhofer Austria Research GmbH, Bereich: Fabrikplanung und Produktionsmanagement)

Wien, Juli 2022

für Valentin,  
weil eigentlich du dieses Studium studieren wolltest

*Seit je hat Aufklärung im umfassendsten Sinn fortschreitenden Denkens das Ziel verfolgt, von den Menschen die Furcht zu nehmen und sie als Herren einzusetzen. Aber die vollends aufgeklärte Erde strahlt im Zeichen triumphalen Unheils.*

Adorno und Horkheimer (Dialektik der Aufklärung 1947)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

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, Juli 2022

---

Barna Gal

# Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Dr. Viola Gallina für die wunderbare Betreuung, all die gemeinsam gesammelten Erfahrungen im Rahmen dieser Diplomarbeit und ihren offenen menschlichen Umgang bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei Univ. Prof. Dr. Sebastian Schlund für die Betreuung, seinem konstruktivem Feedback und für seine Lehrveranstaltungen an der Technischen Universität Wien bedanken, die mir die Lust an der akademischen Forschung wieder bestärkten.

Mein Dank geht auch Dipl. Ing. Alexander Gaal, der mir das Thema Remanufacturing nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch näher brachte und immer wieder mit Erklärungen beistand.

Danke auch an Dr. Mathias Karner und Dr. Kardos Csaba, die mir beide Begeisterung und Mut gaben, mich mit anwendungsorientierten Optimierungen und deren Programmierung zu befassen.

Vielen Dank auch an Dipl. Ing. Thomas Edtmayr, der mir beruflich dabei vertraute mich mit dem Thema Remanufacturing auseinander zu setzen.

Als letztes geht mein Dank an meine Eltern, Ilona und Géza Gal, die mir emotional beistanden, mich bestärkten und sich immer wieder um mich sorgten, auch wenn die Nächte manchmal kein Ende fanden.

Vielen Dank, dass ich nicht allein auf Schultern von Riesen stehen muss, sondern in einer Gesellschaft bin, die mir so vieles ermöglicht!

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>  | <b>I</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1 Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition . . . . . | 3         |
| 1.2 Forschungsfrage und Ziel der Arbeit . . . . .                      | 4         |
| 1.3 Verwendete Methodik und Vorgehensweise . . . . .                   | 5         |
| 1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit . . . . .                           | 6         |
| <b>2 Theoretische Grundlagen</b>                                       | <b>8</b>  |
| 2.1 Klimakrise & Sustainable Development Goals . . . . .               | 8         |
| 2.1.1 Klimakrise . . . . .   | 8         |
| 2.1.2 Sustainable Development Goals . . . . .                          | 11        |
| 2.2 Kreislaufwirtschaft . . . . .                                      | 13        |
| 2.2.1 Definiton und Einführung . . . . .                               | 13        |
| 2.2.2 Planung in der Kreislaufwirtschaft . . . . .                     | 16        |
| 2.2.3 Transformation in eine Kreislaufwirtschaft . . . . .             | 18        |
| 2.3 Produktionsplanungssysteme . . . . .                               | 18        |
| 2.3.1 Definiton und Einführung . . . . .                               | 18        |
| 2.3.2 Reihenfolgeoptimierung . . . . .                                 | 19        |
| 2.3.3 Optimierungsmethoden in der Reihenfolgeoptimierung . . . . .     | 19        |
| 2.4 Remanufacturing . . . . .  | 21        |
| 2.4.1 Definitionen und Einführungen . . . . .                          | 21        |
| 2.4.2 Remanufacturing als Produktionsplanungssystem . . . . .          | 24        |
| 2.5 Motivation dieser Arbeit . . . . .                                 | 27        |
| <b>3 Systematische Literaturanalyse</b>                                | <b>28</b> |
| 3.1 Beschreibung der Methode . . . . .                                 | 28        |
| 3.1.1 Bibliometrische Analyse . . . . .                                | 28        |
| 3.1.2 Literatursuche . . . . .   | 29        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.1.3    | Literaturanalyse . . . . .                                   | 31        |
| 3.2      | Bibliometrische Analyse . . . . .                            | 33        |
| 3.3      | Systematische Literatursuche . . . . .                       | 36        |
| 3.4      | Systematische Literaturanalyse . . . . .                     | 37        |
| 3.4.1    | Demontagesequenzplanung . . . . .                            | 38        |
| 3.4.2    | Remanufacturing- Produktionsplanungssysteme . . . . .        | 41        |
| 3.4.3    | Aktuelle Bedarfe und Forschungslücken . . . . .              | 47        |
| <b>4</b> | <b>Entwicklung der Vorgehensweise</b>                        | <b>49</b> |
| 4.1      | Konzeption der Methode . . . . .                             | 52        |
| 4.2      | Formulierung der Vorgehensweise . . . . .                    | 55        |
| 4.3      | Umsetzung Proof-Of-Concept . . . . .                         | 59        |
| 4.3.1    | Umsetzung in Python . . . . .                                | 59        |
| 4.3.2    | Umsetzung in Anylogic . . . . .                              | 60        |
| 4.3.3    | Wechselwirkung zwischen Optimierung und Simulation . . . . . | 65        |
| 4.3.4    | Schnittstelle zwischen Python und Anylogic . . . . .         | 66        |
| 4.4      | Zusammenfassung . . . . .                                    | 66        |
| <b>5</b> | <b>Validierung der Vorgehensweise</b>                        | <b>67</b> |
| 5.1      | Validierung der Simulation . . . . .                         | 67        |
| 5.2      | Validierung der Optimierung . . . . .                        | 70        |
| 5.3      | Ergebnisse der Optimierung . . . . .                         | 71        |
| 5.4      | Zusammenfassung . . . . .                                    | 73        |
| <b>6</b> | <b>Diskussion und Ausblick</b>                               | <b>75</b> |
| 6.1      | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                          | 75        |
| 6.2      | Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse . . . . .         | 77        |
| 6.3      | Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung . . . . .    | 77        |
| 6.3.1    | Kurzfristige Änderungen . . . . .                            | 77        |
| 6.3.2    | Mittelfristige Änderungen . . . . .                          | 78        |
| 6.3.3    | Längerfristige Änderungen . . . . .                          | 79        |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | <b>87</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                 | <b>90</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                   | <b>91</b> |

# Kurzfassung

Obwohl die Produktionsplanung von Remanufacturing in der Forschung auf großes Interesse gestoßen ist, können nur wenig reale industrielle Anwendungen wahrgenommen werden. Zusätzlich sind industrielle Unternehmen mit der Herstellung mehrerer Produkte konfrontiert, wodurch die Produktionsplanung für die Remanufacturing-Produktionsplanungssysteme (RPS) weiter erschwert wird. Dadurch ist es notwendig, jene RPS zu optimieren, bei denen Hersteller mit der Wiederaufbereitung mehrerer Produkte gefordert sind. Zusätzlich sollten optimierte Systeme eine Reihe von Unsicherheiten berücksichtigen, wie z. B. unsichere Qualität, Zeit, Rücklauf und Nachfrage. Aufgrund dieser Unsicherheiten sind Hersteller heutzutage gezwungen kosten- und energieintensive Neuteile zu verwenden. Um eine Lösung anbieten zu können, wird in dieser Arbeit ein RPS vorgestellt und optimiert.

Zentral für die Forschungsfrage dieser Arbeit ist, wie durch den Einsatz eines genetischen Algorithmus (in der Programmiersprache Python) der Einsatz von energie- und kostenintensiven Neuteilen durch eine Optimierung des Produktionsablaufs minimiert werden kann. Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Verbrauchsreduzierung von energie- und kostenintensiven Neuteilen bei einem industriellen Wiederaufbereiter. Zusätzlich versucht diese Arbeit, die oben erwähnten Forschungslücken zu schließen, indem ein Verfahren entwickelt wird mit stärkerem Bezug zu industriellen Anwendungen und durch Einbeziehung von Unsicherheiten aus der Realität in die Optimierung. Als Hauptforschungsmethode wird das Prozessmodell von Peffers et al. (2007) verwendet, welches aus dem Phasenmodell von Hevner et al. (2004) aus der Design Science abgeleitet wurde. Zusätzlich gibt eine bibliometrische sowie systematische Literaturanalyse den Überblick des aktuellen Forschungsstandes wieder. Die Ergebnisse sind anhand eines realen industriellen Anwendungsfalles von einem Gasmotorenherstellers dargestellt. Eine diskrete Ereignissimulation (DES) in Anylogic wird zu Evaluierungszwecken nach der VDI 3633 (2020a) verwendet, wobei die Ergebnisse des Optimierers mit Benchmarks der aktuellen Produktionsplanung des Gasmotorenherstellers verglichen werden. Die Optimierung bringt eine Gesamtverbesserung des kosten- und energieintensiven Neuteilbedarfs von 46,44%.

# Abstract

Although production planning in remanufacturing systems has attracted great interest in the research community, only a couple of real industrial applications can be perceived. Additionally, in reality, companies are faced with manufacturing multiple products, which further complicates remanufacturing production planning (RPS). Therefore, there is a need to optimise RPS where manufacturers are involved in remanufacturing multiple products. Also optimized systems should consist of a number of uncertainties, such as uncertain quality, time, return and demand.

This paper presents a production plan scheduler for a remanufacturing system - focusing on disassembly, machining and reassembly of parts. From the above findings, the central research question for this work results in how to minimize the use of energy- and cost-intensive new parts by optimizing the production flow through the use of a genetic algorithm (in Python programming language). The main objective of this work is to develop an approach to optimize the RPS, under the uncertain quality of the returned products as well as the variety of variants. Secondly, this work attempts to fill the research gaps mentioned above by developing a method more related to industrial applications and by incorporating quantitative uncertainties coming from an industrial use case into the optimization. The main research method used is the process model of Peffers et al. (2007), which was derived from the phase model of Hevner et al. (2004) from Design Science. In addition, a bibliometric as well as systematic literature analysis gives the state of the art of research. The results are presented based on a real industrial use case from a gas engine manufacturer. A discrete event simulation (DES) in Anylogic is used for evaluation purposes according to VDI 3633 (2020a) and the results of the optimizer are compared to benchmarks of the gas engine manufacturer's current production scheduling. The optimization yields an overall improvement of 46,44% in the costly and energy-intensive need for new parts.

# 1 Einleitung

Die Menschheit benötigt derzeit das Äquivalent von 1,7 Planeten, um den Ressourcenverbrauch durch menschliche Aktivitäten zu kompensieren, wobei die verarbeitende Industrie zu den Hauptverbrauchern von Material- und Energieressourcen zählt und zusätzlich beträchtliche Mengen von Abfällen erzeugt (WWF (2019)). Aufgrund der Verknappung der Ressourcen ist das Konzept der Kreislaufwirtschaft auf der Basis von Remanufacturing zu einem wichtigen Ansatz für eine ressourcenschonende, nachhaltige Entwicklung geworden und stellt dabei einen der bedeutendsten Aspekte des Abfallmanagements dar (VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2021)). Remanufacturing wird am häufigsten als Verwertungsverfahren für gebrauchte Produkte bezeichnet, das die Sammlung, die Reparatur, die Demontage und den Austausch abgenutzter Komponenten umfasst, um die Produkte wieder auf das Qualitätsniveau von neu hergestellten Produkten zu bringen (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

## 1.1 Ausgangssituation: Problemstellung und Problemdefinition

Innerhalb von Remanufacturing ergeben sich besondere Herausforderungen für Produktionsplanungssysteme (PPS), die es in der traditionellen Fertigung nicht gibt (Guide Jr (2000)). Diese für das Remanufacturing einzigartigen Merkmale erfordern eine Änderung des Grundkonzepts der traditionellen PPS (Andrew-Munot et al. 2018). Um die Forschungslücken innerhalb von Remanufacturing-Produktionsplanungssystemen (RPS) für diese Diplomarbeit aufzuzeigen, werden die identifizierten Forschungsbedarfe aus zwei Literaturanalysen herangezogen. So stellen Suzanne, N. Absi et al. (2020) in einer Analyse von 160 wissenschaftlichen Journal-Publikationen fest, dass obwohl aus akademischer Sicht RPS auf großes Interesse gestoßen sind, nur schwache Verbindungen mit industriellen Anwendungen wahrgenommen werden können. Darüber hinaus wissen Ansari und Daxini (2021) in einer Analyse von 123 wissenschaftlichen Journal-Publikationen daraufhin, dass Unternehmen in realen Fällen mit der Herstellung mehrerer Produkte konfrontiert

sind, wodurch die Remanufacturing-Produktionsplanung weiter erschwert wird. Daher fordern sie, dass zukünftig solche Forschungsarbeiten zur Optimierung von RPS durchgeführt werden sollen, bei dem Hersteller an der Wiederaufbereitung mehrerer Produkte beteiligt sind und das System aus einer Reihe von Unsicherheiten besteht, wie z.B. unsichere Qualität, Zeit, Rückgabe und Nachfrage (Ansari und Daxini (2021)). Zusätzlich zu den Forschungsbedarfen aus der Wissenschaft, konnten in einem Remanufacturing Werk für Gasmotoren jene Herausforderungen, die in Andrew-Munot et al. (2018) dargestellt sind, beobachtet werden. In der vorliegenden Fertigung werden Gussgehäuse von rückgeführten Zylinderköpfen nach Erreichen des End-of-Life-Status zerlegt, bearbeitet und wieder montiert. Der unsichere Zeitpunkt sowie die Qualität und Wiederverwendbarkeit der rückgeführten Komponenten und Baugruppen stellen den Hersteller vor das Problem, dass der regelmäßige Einsatz von energie- und kostenintensiven Neuteilen in Kauf genommen werden muss.

## 1.2 Forschungsfrage und Ziel der Arbeit

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der zentralen Forschungsfrage, wie ein Vorgehen zur Optimierung von RPS entwickelt werden kann, unter Berücksichtigung der unsicheren Qualität der rückgeführten Produkte sowie deren Variantenvielfalt. Aus dieser Hauptfrage ergeben sich folgende Unterfragen für diese Arbeit:

- Wie sieht der Stand der Forschung bezüglich RPS aus?
- Welche Algorithmen werden zur Optimierung von RPS in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert?
- Wie kann durch die Verwendung eines genetischen Optimierungs-Algorithmus (GA) der Einsatz von energie- und kostenintensiven Neuteilen durch eine Produktionsplanungs-Reihenfolge-Optimierung minimiert werden?
- Wie kann die Anwendung eines GAs für RPS mit einem realen Produktionsplan eines Gasmotoren-Herstellers und einer diskreten Ereignissimulation (DES) validiert werden?

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Verbrauchsreduzierung von energie- und kostenintensiven Neuteilen bei einem industriellen Wiederaufbereiter. Dazu soll ein Vorgehen zur Optimierung von RPS, unter Berücksichtigung der unsicheren Qualität der rückgeführten Produkte sowie deren Variantenvielfalt, entwickelt werden. Untergeordnet versucht

diese Arbeit das Ziel auf die oben genannten Forschungslücken von Suzanne, N. Absi et al. (2020) und Ansari und Daxini (2021) Abhilfe zu leisten in dem durch die Entwicklung des Vorgehens:

- eine stärkere Verbindungen mit industriellen Anwendungen wahrgenommen sowie
- Unsicherheiten aus der Realität in die Optimierung miteingebunden werden sollen.

Als letztes Ziel dieser Arbeit wird eine Bereitstellung aller digitalen Daten der entworfenen Algorithmen und Simulationen an die Betreuungsseite vom Diplomanden vereinbart.

### 1.3 Verwendete Methodik und Vorgehensweise

Als Hauptmethode soll das Phasenmodell von Hevner et al. (2004) aus der Design Science herangezogen werden. Dies ist ein Problemlösungsansatz zum effizienteren und effektiveren Analysieren, Entwerfen, Implementieren und Nutzen von Informationssystem. Zusätzlich soll von Peffers et al. (2007) aus *Design Science Research Methode for Information Systems Research* ein Prozessmodell herangezogen werden, bei dem sechs Schritte zur Designwissenschaftsforschung vorgestellt werden. Diese beinhalten folgende Schritte:

- die Problemidentifikation und -motivation
- Definition der Ziele für eine Lösung
- Entwerfen und Entwickeln
- Demonstrieren
- Evaluierung und Publikation

Gleichzeitig soll auch eine Systematische Literaturanalyse den State-of-the-Art der Forschung zu diesem Thema aufzeigen, wobei eine genaue Dokumentation der Literatursuche nach Vom Brocke et al. (2009); Cooper (1988); Webster und Watson (2002), sowie Literaturauswahl nach Smith (2010) im Vordergrund stehen. In der systematischen Literatursuche werden vordefinierte Suchbegriffe in verschiedenen Kombinationen in wissenschaftlichen Datenbanken eingegeben und deren Suchtreffer unter vorgegebenen Kriterien auf ihre Relevanz für diese Arbeit untersucht. Die Dokumentation der Suche, deren Suchtreffer sowie der Kriterien bei der Analyse zeichnet die systematische Analyse in ihrer Transparenz und Nachvollziehbarkeit aus. Da allein der Suchbegriff "Remanufact\*" in der wissenschaftlichen Datenbank Scopus 6.785 Resultate aufbringt (Stand 13.06.2022), soll mittels einer

Bibliometrischen Analyse in R nach Aria und Cuccurullo (2017) in kurzer Form ein Grundüberblick über das Thema gegeben werden. Dazu werden die Suchtreffer unter vorgegeben Kriterien in einer wissenschaftlichen Datenbank als BibTex-File exportiert, welches unter der Verwendung des Programmes RStudio und der Erweiterung-Library Bilbiometrix analysiert werden kann. Aus dieser Analyse lassen sich quantitative Aussagen, wie z.B.: welche Journale, Autoren, wissenschaftliche Disziplinen am meisten publiziert haben ableiten. Aber auch qualitative Aussagen über die Reichweite von publizierten Artikel und deren Autoren. Um den Einsatz von energie- und kostenintensiven Neuteilen zu minimieren, soll mittels der Programmierung eines Genetischen Algorithmus (der am häufigsten in der Literatur für theoretische RPS verwendet wird Ansari und Daxini (2021) in der Programmiersprache Python entworfen werden. Dieser ist das Kernelement des RPS, welches durch eine Reihenfolgeoptimierung des Produktionsplan das notwendige Minimum erreicht und steuert. Die zur Validierung des Genetischen Algorithmus notwendige Simulation soll nach der VDI 3633 (2020b) Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemenerfolgen erfolgen. In dieser wird zur Durchführung einer Simulationsstudie folgendes Vorgehen vorgestellt:

- Aufgabendefinition
- Systemanalyse
- Modellformatierung
- Implementierung
- Experimente und Analyse
- Datenbeschaffung und Datenaufbereitung (parallel zu den anderen Phasen verlaufend)

Die Auswahl der Methoden für diese Arbeit begründet sich dadurch, dass diese wissenschaftlich validiert wurden und über Jahre durch ihren Einsatz in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen fundierte Erkenntnisse liefern konnten.

## 1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Nachdem nun in vorherigen Kapiteln die Ausgangssituation (Problemstellung und Problemdefinition), die Forschungsfrage und -ziele sowie die verwendeten Methoden erläutert wurden folgt diese Arbeit mit der Einführung in theoretische Grundlagen. In dieser

werden die Klimakrise, die Sustainable Development Goals sowie die Kreislaufwirtschaft als Ausgangsmotivation für diese Arbeit angeführt. Zusätzlich sind auch Produktionsplanungssysteme im Allgemeinen und in Gegenüberstellung zu Remanufacturing erklärt, um den Leser\*Innen ein Grundverständnis für den Fortlauf dieser Arbeit bereitzustellen. Die Wahl dieser drei Grundlagenthemen wurde bewusst so gewählt, um den Bogen der aktuellen Klimakrise zur Handlungsfähigkeit von Ingenieuren zu spannen und zu betonen, dass die technische Forschung auch eine gesellschaftliche Rolle einnimmt, wenn es um die Gestaltung zukünftiger Werkzeuge handelt, welche eigentlich, um es mit Adorno zu sagen *den verlängerten Arm des Menschen* darstellen sollten und nicht *als Selbstzweck* zu verstehen sind (Friedemann (1974)). Aus den Grundlagen folgt der Stand der Forschung, indem die ersten beiden Forschungsfragen Antwort finden, aber auch die aktuellen Methoden zu RPS sowie deren Forschungsbedarfe erläutert werden. Anschließend gibt die Grundidee der Optimierung den Grundstein für die weitere Implementierung und Umsetzung des genetischen Algorithmus in Python, wodurch diese in der Evaluierung mit einer diskreten Ereignissimulation in Anylogic einer Prüfung unterlaufen. Eine kritische Reflexion der Ergebnisse, sowie eine Aussicht auf weitere Forschungsmöglichkeiten schließen diese Arbeit ab.

## 2 Theoretische Grundlagen

Ausgehend von der ökologischen Klimakrise, in der wir uns befinden, können mittlerweile auf weiten Teilen des Planeten politische Aufrufe zur Veränderung beobachtet werden. Diese erfordern, neben den beschlossenen politischen Zielen und Gesetzen auch technische Umstellungen und Lösungen. Das Bewusstsein, dass Ökologie, Soziologie (Politik) sowie Technik gemeinsam an Lösungen arbeiten müssen wird unter der Tripple Bottom Line verstanden. Diesen Faden versucht auch dieses Kapitel zu ziehen, welches ausgehend von der dargelegten ökologischen Krise, über politische Maßnahmen zur Potentialdarlegung durch die Technik gelangt.

### 2.1 Klimakrise & Sustainable Development Goals

Obwohl die Klimakrise mittlerweile als generisches Wissen aufgefasst werden kann, sollen in dieser Einleitung kurz Zahlen, Daten und Fakten vom Weltklimarat IPCC und den Vereinten Nationen gebracht werden, um den Stand der aktuellen Situation in der Krise zu beschreiben.

#### 2.1.1 Klimakrise

Die hierzu Grunde liegenden Daten zur Klimakrise sind aus dem sechsten Bericht des Weltklimarates entnommen, wobei der Weltklimarat (im engl. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC) eine Institution der Vereinten Nationen ist. Weltweit befassen sich dabei Fachleute mit der Aufarbeitung wissenschaftlicher Untersuchungen, welche gebündelt als regelmäßige Berichte herausgebracht und als Grundlage für die Politik und andere Entscheidungsträger\*Innen gelten. Wichtig ist zu betonen dass der Weltklimarat unterschiedliche Handlungspositionen und deren Implikationen aufzeigt, jedoch ohne konkrete Lösungswege vorzuschlagen bzw. Handlungsempfehlungen zu geben (IPCC (2021)). In Abbildung 2.1 zeigt der Weltklimarat deutlich einen Anstieg der Weltoberflächentemperatur an, welcher von 1850-2020 gemessen werden konnte und im Vergleich zu den

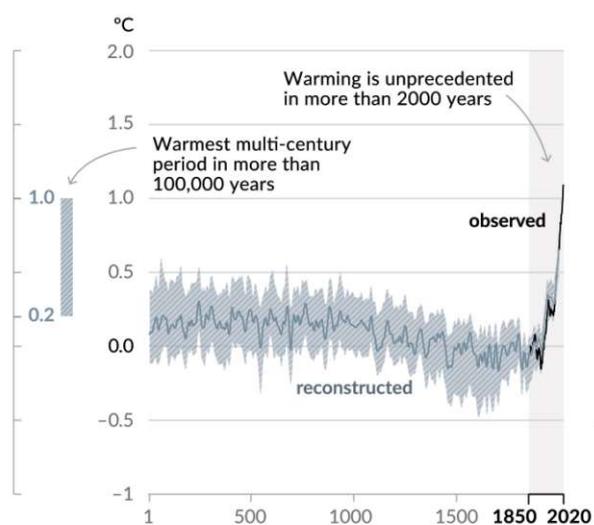


Abbildung 2.1: Oberflächentemperatur-Entwicklung der Erde aus IPCC (2021)

rekonstruierten Daten von Jahre 0 seit der Zeitwende bis 1850 ein heute herrschendes Maximum aufzeigt. Ebenfalls wird in diesem sechsten Bericht vom August 2021 des Weltklimarats der menschliche Einfluss im Vergleich zur natürlichen Entwicklung des Klimas simulativ in Abbildung 2.2 dargestellt (IPCC (2021)). Um die umfassenden Aussagen des Bericht zusammengefasst für diese Arbeit wiederzugeben wurden folgende Punkte aus IPCC (2021) als besonders bedeutend erachtet:

- Es ist unbestreitbar, dass der Mensch die Atmosphäre, die Ozeane und das Land erwärmt hat. Weitreichende und schnelle Veränderungen in der Atmosphäre, den Ozeanen, der Kryosphäre und der Biosphäre haben dadurch stattgefunden.
- Das Ausmaß der jüngsten Veränderungen im gesamten Klimasystem - und der gegenwärtige Zustand des Klimasystems - ist über viele Jahrhunderte bis Jahrtausende hinweg unvergleichbar.
- Der vom Menschen verursachte Klimawandel hat bereits Auswirkungen auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen auf dem gesamten Globus. Die Beweise für beobachtete Veränderungen bei Extremen wie Hitzewellen, Starkniederschlägen, Dürren und tropischen Wirbelstürmen, und insbesondere deren Zurückführung auf den menschlichen Einfluss, haben sich seit AR5 (vorheriger Bericht des Rates) verstärkt.
- Die globale Oberflächentemperatur wird unter allen betrachteten Emissionsszenarien bis mindestens Mitte des Jahrhunderts weiter ansteigen. Die globale Erwärmung

von 1,5°C und 2°C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, wenn nicht in den kommenden Jahrzehnten tiefgreifende Reduzierungen CO<sub>2</sub>- und andere Treibhausgasemissionen stark reduziert werden.

- Viele Veränderungen im Klimasystem werden in direktem Zusammenhang mit der zunehmenden globalen Erwärmung größer. Dazu gehören die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Hitzeperioden, marinen Hitzewellen, Starkniederschlägen, und, in einigen Regionen, landwirtschaftliche und ökologische Dürren.
- Viele Veränderungen, die auf vergangene und künftige Treibhausgasemissionen zurückzuführen sind, sind über Jahrhunderte bis Jahrtausende unumkehrbar, insbesondere Veränderungen der Ozeane, der Eisschilde und des globalen Meeresspiegels.
- Szenarien mit sehr niedrigen oder niedrigen Treibhausgasemissionen führen innerhalb weniger Jahre zu erkennbaren Auswirkungen auf die Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen und die Luftqualität, im Gegensatz zu Szenarien mit hohen und sehr hohen Treibhausgasemissionen. Bei diesen gegensätzlichen Szenarien würden sich innerhalb von etwa 20 Jahren erkennbare Unterschiede in den Trends der globalen Oberflächentemperatur von der natürlichen Variabilität abzeichnen, bei vielen anderen klimatischen Einflussfaktoren sogar über längere Zeiträume (hohes Vertrauen) (IPCC (2021)).

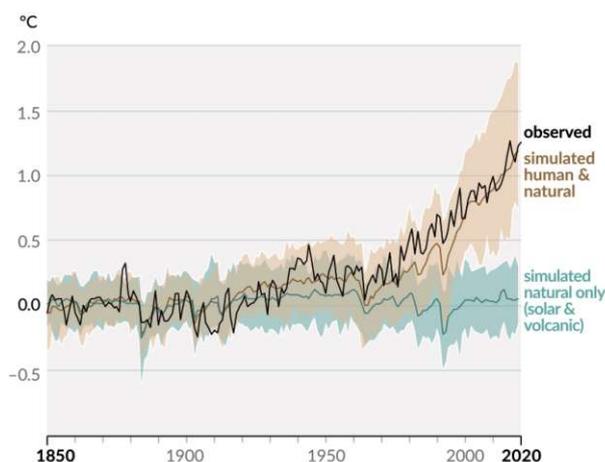


Abbildung 2.2: Menschlicher Einfluss auf die Oberflächentemperatur aus IPCC (2021)

## 2.1.2 Sustainable Development Goals

Neben der vorherrschenden Klimakrise gibt aber schon kooperative Bemühungen, um dieser entgegenzuwirken, welche sich unter anderem in den Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen wieder spiegeln. Dazu wurde 2015 die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung von allen Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen angenommen. Ziel dieser Agenda ist zum Handeln aller Länder - Industrie- und Entwicklungsländer - im Rahmen einer globalen Partnerschaft aufzurufen, um nachhaltige Entwicklungen zu fokussieren. Dabei bilden 17 Ziele das Kernstück dieser Agenda, die neben der aktuellen Klimakrise auch gesellschaftliche Notstände, wie weltweite Armut adressieren (United Nations (2022)). Graphisch dargestellt, können die 17 Ziele folgender Abbildung 2.3 entnommen werden FFG (2022):



Abbildung 2.3: Sustainable Development Goals

Die Ziele 11 *Nachhaltige Städte und Gemeinden*, 12 *nachhaltige/r Konsum und Produktion* sowie 13 *Maßnahmen zum Klimaschutz* adressieren hierbei Unternehmungen gegen den Klimawandel. Diese Ziele werden auch von der österreichischen Regierung versucht zu erreichen, indem sie unter anderem im Regierungsprogramm 2020-2024 verankert wurden. Konkreter formuliert, finden sich im Programm der Republik Österreich (2020) folgende vorgenommenen Herausforderungen:

- *Klimaneutralität in Österreich bis 2040*
- *Erarbeitung neues Klimaschutzgesetz mit verbindlichen Emissionsreduktionspfaden*
- *Gesamte Bundesregierung übernimmt Verantwortung im Klimaschutz*

- *Verpflichtender und unabhängiger Klimacheck für alle neuen und bestehenden Gesetze, Verordnungen und Bund-Länder-Vereinbarungen sowie Förderrichtlinien und Investitionen*

Letzterer Punkt wirkt sich auch auf die Fördergeber für die Forschung innerhalb Österreichs aus, wobei sich dies bei der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) beobachten lässt. Diese schreibt für ihre Ausschreibungen für zukünftige Ziele folgende Unternehmungen aus FFG (2022):

- *durch die SDGs neue, zukünftige Geschäftschancen erkennen*
- *den Nutzen unternehmerischer Nachhaltigkeit steigern*
- *Stakeholder-Beziehungen stärken und sich rechtzeitig auf zukünftige gesetzliche Anforderungen vorbereiten*
- *Gesellschaften und Märkte stabilisieren*

## 2.2 Kreislaufwirtschaft

### 2.2.1 Definiton und Einführung

Obwohl der Begriff der Kreislaufwirtschaft noch offen ist, existieren verschiedene Definitionen. Basierend auf den entsprechenden State-of-the-Art-Reviews, welche von Suzanne, N. Absi et al. (2020) untersucht worden sind, kann der Begriff der Kreislaufwirtschaft wie folgt nach Homrich et al. (2018) definiert werden:

*Die Kreislaufwirtschaft ist ein Wirtschaftssystem, das sich dem linearen System mit offenem Ende (produzieren, verbrauchen, entsorgen) entgegenstellt, mit dem Ziel, eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen, die gleichzeitig Umweltqualität, wirtschaftlichen Wohlstand und soziale Gerechtigkeit zum Nutzen der heutigen und künftigen Generationen schafft (Homrich et al. (2018)).*

Aufgrund ihrer Definition umfasst die Kreislaufwirtschaft die nachhaltige Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu gefährden (Keeble (1988)).

Neben den bereits angeführten Zielen der Vereinten Nationen und Österreich hat der Begriff der Kreislaufwirtschaft ein zunehmendes Interesse erfahren, insbesondere mit der Einführung von folgenden zusätzlichen Umweltvorschriften auf der ganzen Welt, darunter (Suzanne, N. Absi et al. (2020)):

- *in Europa die Abfallrahmenrichtlinie 1 (2008)*
- *in den USA die Verabschiedung des Resource Conservation and Recovery Act 2 (1984) und des Pollution Prevention Act 3 (geändert 2002)*
- *in China das Circular Economy Promotion Law 4 (2008)*
- *in Japan das Law for establishing a Material Cycles Society 5*
- *in Vietnam das Environmental Protection Law 6 (2005)*
- *in Korea das Waste Control Act 7 (geändert 2007) und das Act on Promotion of Resources Saving and Recycling 8 (geändert 2008)“*

Ein Nebeneffekt der zunehmenden Popularität des Konzepts der Kreislaufwirtschaft in Politik, Industrie und Wissenschaft ist der Mangel an Konsistenz in Bezug auf seine Definition und seinen Aktionsradius. Aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen stammende Forschungsströme haben zu unterschiedlichen Denkansätzen der Kreislaufwirtschaft geführt. Zu den im Produktions- und Betriebsmanagement angewandten Ansätzen gehören z. B.: Cradle-to-Cradle Baki et al. (2014) und Industrial Ecology (Genovese et al. (2017))

Im Bewusstsein der Geschäftsmöglichkeiten, die die Kreislaufwirtschaft bieten kann, unternimmt die Europäische Kommission erhebliche Anstrengungen, um den Übergang zu einer nachhaltigeren, kohlenstoffarmen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft zu unterstützen. In diesem Sinne wurden Einrichtungen wie das „Scottish Institute for Remanufacture“ (Vereinigtes Königreich) und das Institut „de l'Économie Circulaire“ (Frankreich) geschaffen, um den industriellen Akteuren bei der Übernahme dieses Konzepts in ihre Produktions- und Lieferketten zu helfen (Suzanne, N. Absi et al. (2020)). Zusätzlich forschen und publizieren das European Remanufacturing Network (ERN) und der Verein Deutscher Ingenieure (Zentrum Ressourcen Effizienz) (VDI-RZE) regelmäßig auf nationaler und internationaler Ebene.

Da die Produktionsprozesse während der gesamten Lebensdauer eines Produkts große Auswirkungen auf die Versorgung, die Ressourcennutzung und das Abfallaufkommen haben, sollen im Folgenden vier Hauptthemen in der Kreislaufwirtschaft unterschieden werden:

### **Rückwärtslogistik und Abfallwirtschaft**

Diese beziehen sich auf alle umweltfreundlichen Verfahren, die mit der Wiederverwendung von Produkten und Rohstoffen zusammenhängen. So hat die Europäische Kommission in Artikel 4 der Abfallrahmenrichtlinie 1 eine Rangfolge der Verwertungsverfahren (die so genannte fünfstufige Abfallhierarchie) festgelegt, die mit der bevorzugten Option der Abfallvermeidung beginnt, gefolgt von der Vorbereitung der Abfälle für die Wiederverwendung, dem Recycling und anderen Verwertungsverfahren (z. B. Verfüllung) und der Beseitigung (z. B. Deponierung) als letztem Mittel. Nach der Abfallvermeidung ist die Wiederverwendung von Abfällen die nächste wünschenswerte Option in der Hierarchie der Abfallbewirtschaftungsoptionen, die im Rahmen der Rechtsvorschriften der Europäischen Kommission festgelegt wurde. Wiederverwendung bedeutet die erneute Verwendung von

Produkten, die für den ursprünglichen Zweck kein Abfall sind und ohne strukturelle Veränderungen. Wiederverwendete Produkte werden in der Regel im Peer-to-Peer-Verfahren verkauft, ohne dass sie repariert oder geprüft werden (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

### **Vom Produkt zum rohstofflichen Recycling**

Gemäß Artikel 3 der Abfallrahmenrichtlinie 1 bedeutet Recycling: *jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Produkten, Werkstoffen oder Substanzen wiederaufbereitet werden, sei es für den ursprünglichen oder einen anderen Zweck*. In der Literatur werden Recyclingoptionen unter verschiedenen Begriffen wie Rekonditionierung, Wiederverwendung, Aufarbeitung und Wiederaufbereitung diskutiert. Indem sie dazu neigen, sich in ihrer Bedeutung gegenseitig zu überlagern, verschwimmen und vermischen sich die Definitionen dieser im Trend liegenden Konzepte. In der Literatur zur Produktionsplanung stechen vor allem zwei Recyclingbegriffe hervor, nämlich Refurbishment und Remanufacturing (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

### **Ko- und Nebenprodukte**

Die Begriffe Neben- und Ko-Produkte tauchen in jüngster Zeit bei Problemen der Lieferkettenoptimierung auf. Da sie von ähnlicher Bedeutung wie ein Hauptprodukt sind, werden Ko-Produkte zusammen mit einem Hauptprodukt erzeugt und haben ihre eigene Nachfrage, während Nebenprodukte in der Regel unerwartete Produkte aus einem Herstellungsprozess sind und einen geringeren wirtschaftlichen Wert haben als kontrollierbare Produktionsergebnisse (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

### **KLW-Optionen für Produkte**

Die VDI-RZE unterteilt die KLW noch deutlicher als Suzanne, N. Absi et al. (2020) in zehn Optionen für Produkte, welche im folgendenden Bild erläutert werden:

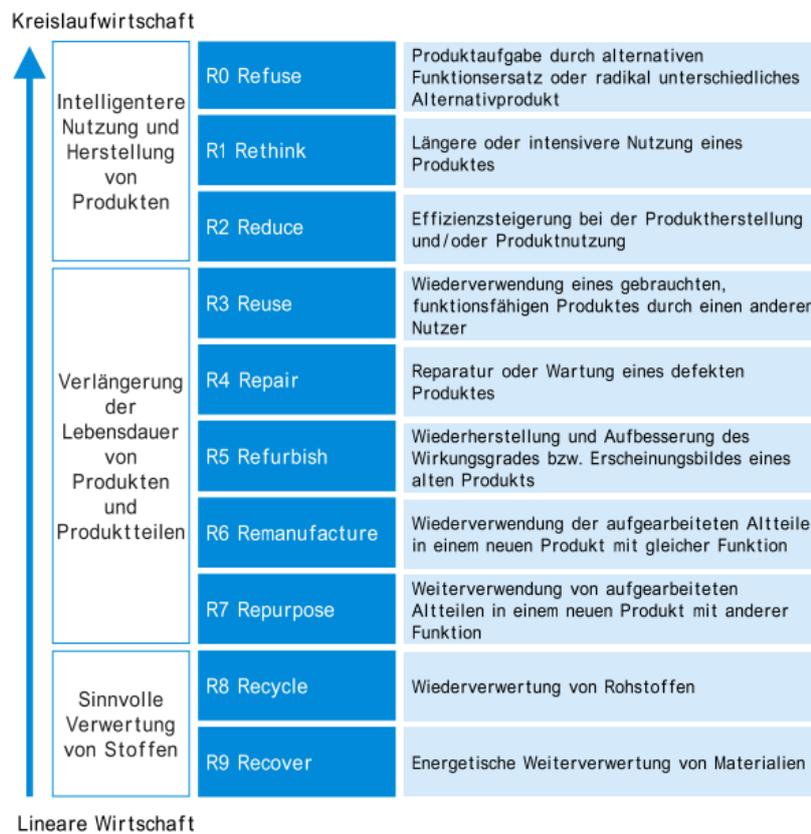


Abbildung 2.4: Kreislaufwirtschaftsoptionen nach VDI-RZE (2022)

### 2.2.2 Planung in der Kreislaufwirtschaft

Um zu verdeutlichen, wie die K LW den klassischen linearen Produktionsansatz umgestaltet, werden in Abbildung 2.5 die oben genannten fünf Abfallbewirtschaftungsoptionen in Produktionssystemen dargestellt. Die türkisen Rückwärtsbögen entsprechenden Produktionsaktivitäten im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft und verdeutlichen die Beziehungen zwischen ihnen (Govindan und Soleimani 2017). Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, wirkt sich die Interferenz zwischen den Rückwärts- und Vorwärtsflüssen auf den Produktionsplanungsprozess aus, der Folgendes umfasst (Suzanne, N. Absi et al. (2020)):

- die Planung der Rückgewinnung und der Beschaffung von Rohstoffen und
- die Planung der Produktionstätigkeiten, die erforderlich sind, um die Vormaterialien in Fertigerzeugnisse umzuwandeln, um die Nachfrage der Kunden zu befriedigen, wobei sowohl wiederaufgearbeitete als auch neue Produkte berücksichtigt werden (Dekker et al. 2013) und

- die Rückflüsse, die sich in unterschiedlichem Maße auf die Entscheidungsebenen von Produktionssystemen auswirken (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

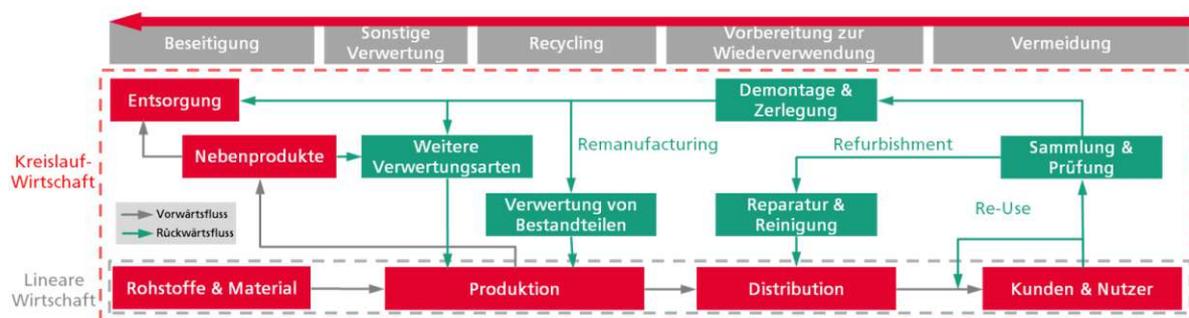


Abbildung 2.5: Kreislaufwirtschaftsmodell nach Suzanne et. al. (2020)

Die operativen Produktionsplanungsprobleme beziehen sich auf kurzfristige Entscheidungen, wie z. B. den Abgleich von Linien oder die Terminierung. Sobald der mittelfristige Bedarf ermittelt ist, können diese Entscheidungsprobleme in den meisten Fällen die umgekehrten Produktionsströme ohne zusätzliche Beschränkungen oder Kosten in den Zielfunktionen berücksichtigen (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

Die Probleme der mittelfristigen Produktionsplanung sollen Managern/Firmen auf taktischer Ebene helfen, zu entscheiden, wie viel und wann sie neue Güter produzieren und bestellen, (de-)montieren und (re-)produzieren sollen. Abgesehen von der Möglichkeit, Abfälle für die Wiederverwendung aufzubereiten, unterstützen drei weitere Kreisläufe die Zirkulation von Produktionsströmen in industriellen Systemen, ohne dass diese über die Verwertung von Produkten, Materialien und Produktionsrückständen in die Umwelt gelangen (siehe Abbildung 2.5). Alle diese KWL-orientierten Ströme verändern die Struktur des traditionellen linearen Produktionspfads, indem sie der mittelfristigen Produktionsplanung eine zusätzliche Komplexitätsebene hinzufügen (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

Im weiteren Sinne werden strategische Planungsprobleme auf der Ebene der Lieferkette durch die Integration von Beschaffungs-, Vertriebs- und Verwertungsentscheidungen gelöst. Obwohl die strategischen KWL-Entscheidungen von entscheidender Bedeutung und Investition sind, werden sie weniger häufig gestellt und getroffen und finden vor der Lieferkettenkonstitution statt (Moreno-Camacho et al. (2019)).

### 2.2.3 Transformation in eine Kreislaufwirtschaft

Geissdoerfer et al. (2017) betonen den Unterschied zwischen der Nachhaltigkeitsentwicklung im Allgemeinen und der Kreislaufwirtschaft. So kann in ihren Zielen der Nachhaltigkeitsentwicklung eine Vielzahl von offenen Zielen je nach dem betrachteten Akteur und seinen Interessen beobachtet werden, wobei in der Kreislaufwirtschaft ein geschlossener Kreislauf, welcher idealerweise alle Ressourceneinträge und -austritte aus dem System eliminiert (Geissdoerfer et al. (2017)).

Ghisellini et al. (2016) zeigen, dass der Erfolg der K LW in der Einbeziehung aller Akteure der Gesellschaft und ihrer Fähigkeit abhängt, wobei sich zu vernetzen und geeignete Kooperations- und Austauschmuster zu schaffen von großer Bedeutung sind. Erfolgsgeschichten weisen auch auf die Notwendigkeit einer wirtschaftlichen Rentabilität hin, um Unternehmen und Investoren zu motivieren, wodurch sich zusammenfassend sagen lässt, dass der Übergang zu K LW gerade erst begonnen hat (Ghisellini et al. (2016)).

## 2.3 Produktionsplanungssysteme

### 2.3.1 Definiton und Einführung

Als grundlegende Definition von PPS dient in dieser Arbeit das Aachner PPS Model von Schuh und Stich (2012), welches die zentrale Aufgabe eines PPS in der Beplanung von Ressourcen und Produktionsprozesse sieht, wobei es am Betrachtungsansatz des ganzheitlichen Produktionssystems festhält. Die Wertschöpfung von Ressourcen und Prozessen durch ein Unternehmen, aber auch die Zulieferer müssen dabei auf den Nutzen des Kunden orientiert sein. Weiters differenziert das Aachner PPS Modell zwischen Produktionsplanung und Produktionssteuerung. Erstere sieht die Arbeitsvorbereitung, Fertigungsauftragsterminierung, Losgrößenberechnung und Kapazitätsplanung als Aufgaben. Die Produktionssteuerung hingegen deckt im kurzfristigen Zeithorizont unterschiedliche abgegrenzte Fertigungsberichte für Inseln, Gruppen oder Einzelarbeitsplätze ab (Schuh und Stich (2012)). Darüber hinaus stehen die Vermeidung von Verschwendung, im Sinne eines Lean Managements sowie auch die Optimierung des gesamten PPS zugunsten des Kundennutzen als zentrale Elemente des Aachner PPS. Dazu gehören die Darstellung aller Konzepte, Methoden und Werkzeuge, welche in ihrer Integration die Effektivität und Effizienz des gesamten Produktionsablaufes gestalten. Aufgrund erweiterter Planungsaufgaben und den daraus erwachsenen Anforderungen ist nun das ursprüngliche Aachner PPS Modell um Netzwerkaufgaben erweitert worden, um dem Aufgabenmodell verschie-

dene „Referenzsichten“ zu ermöglichen und unterschiedliche Blickrichtungen auf die netzwerkweite Produktionsplanung und -steuerung abzubilden. Die Prozesssicht unterscheidet dabei folgende Auftragsabwicklungen (Schuh und Stich (2012)):

- Auftragsfertiger
- Rahmenauftragsfertiger
- Variantenfertiger
- Lagerfertiger

### 2.3.2 Reihenfolgeoptimierung

Die Terminplanung oder Reihenfolgeoptimierung (im Englischen „scheduling“) ist ein Entscheidungsprozess, welcher regelmäßig in vielen Produktions- und Dienstleistungsbranchen angewendet wird. Dabei befasst sich diese mit der Zuweisung von Ressourcen zu Aufgaben über bestimmte Zeiträume hinweg, wobei die Optimierung einer oder mehrerer Zielesetzungen eine wichtige Rolle spielt (Pinedo (2016)). Bei der Reihenfolgeoptimierung steht die zentrale Frage „Wann wird ein Auftrag A an Maschine M bearbeitet? Die Terminplanung erfolgt häufig interaktiv über ein Entscheidungsunterstützungssystem, das auf einem PC oder einer Arbeitsstation installiert ist, die mit dem ERP-System kommunikationsfähig ist (Pinedo 2016). Der Informationsfluss zur und von der Terminierung in einer produzierenden Umgebung kann entsprechend Abbildung 2.6 entnommen werden.

### 2.3.3 Optimierungsmethoden in der Reihenfolgeoptimierung

Optimierungsmethoden in der Reihenfolgeoptimierung weisen einen sehr hohen Komplexitätsgrad auf, begründet durch die vielen Möglichkeiten, die ein Produktionsplan aufweisen kann, wenn seine Reihenfolge in veränderten Kombinationen untersucht wird. Somit werden neben sehr leistungsstarken Rechnern zur Berechnung unzähliger Möglichkeiten auch verschiedene Optimierungsverfahren in der Literatur dafür diskutiert. Hierbei sei angemerkt, dass bei ganzzahligen Problemen, welche selbst von den rechenstärksten Rechnern nicht mehr gelöst werden können, die Rede von NP-harten bzw. NP-vollständigen Problemen ist. Deshalb weisen die exakten Lösungsmethoden in der Optimierung von PPS nur einen geringen Anteil auf, verglichen zu den approximierten Lösungsmethoden (Karner (2019)).

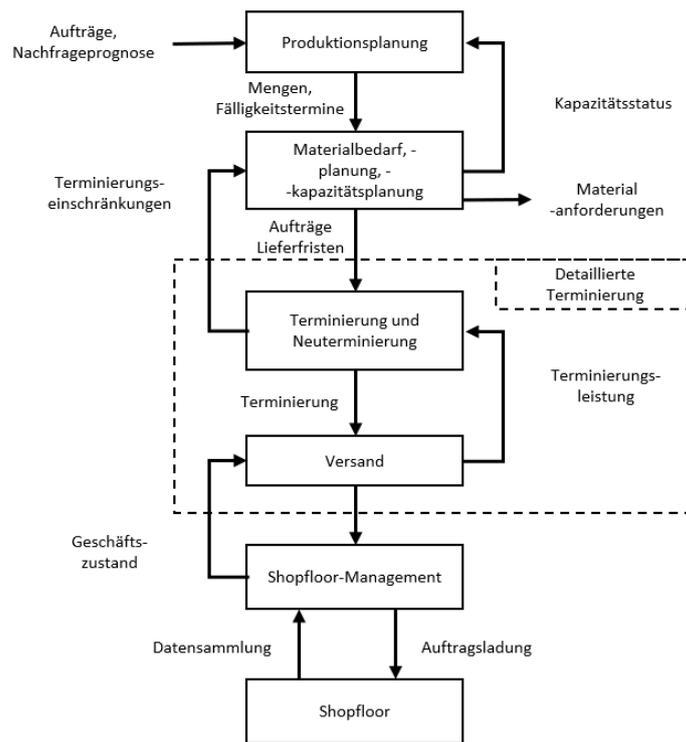


Abbildung 2.6: Informationsfluss der Terminierung nach Pinedo (2016)

Demgegenüber haben Metaheuristiken eine breite Anwendung in der Lösung von PPS-Problemen gefunden. Eine Meta-Heuristik ist formal definiert als ein iterativer Generierungsprozess, der eine untergeordnete Heuristik anleitet, indem er auf intelligente Weise verschiedene Konzepte zur Erkundung und Ausnutzung des Suchraums (globale und lokale Suche) kombiniert. (Ansari und Daxini (2021)).

Im Allgemeinen lassen sich Meta-Heuristiken in zwei Hauptklassen einteilen: auf Einzellösungen basierende und populationsbasierte Verfahren. Bei der ersten Klasse (z. B. Simulated Annealing) beginnt der Suchprozess mit einem einzigen Lösungskandidaten. Dieser einzelne Lösungskandidat wird dann im Laufe von Iterationen verbessert. Populationsbasierte Metaheuristiken hingegen führen die Optimierung anhand einer Menge von Lösungen (Population) durch. In diesem Fall beginnt der Suchprozess mit einer zufälligen Ausgangspopulation (mehrere Lösungen), und diese Population wird im Laufe der Iterationen verbessert. Populationsbasierte Metaheuristiken haben einige Vorteile im Vergleich zu Algorithmen, die auf Einzellösungen basieren (Mirjalili (2014)):

- Mehrere Lösungskandidaten teilen Informationen über den Suchraum, was zu plötzlichen Sprüngen in Richtung des vielversprechenden Teils des Suchraums führt.

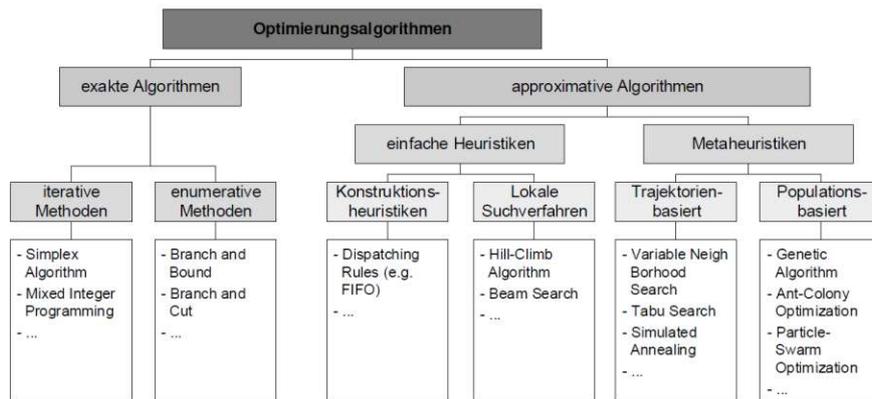


Abbildung 2.7: Einteilung der Optimierungsmethoden nach Karner (2019)

- Mehrere Lösungskandidaten unterstützen sich gegenseitig, um lokal optimale Lösungen zu vermeiden.
- Populationsbasierte Metaheuristiken verfügen im Allgemeinen über eine größere Exploration im Vergleich zu Algorithmen, die auf Einzellösungen basieren (Mirjalili (2014)).

Um einen Überblick über die vorhandenen Lösungsmethoden zu geben wird auf Karner (2019) und dessen Überblicksdarstellung in Abbildung 2.7 verwiesen.

Für diese Arbeit, insbesondere bei dem Stand der Forschung zählen die iterativen Methoden unter den exakten Algorithmen, die Konstruktionsheuristiken unter den einfachen Heuristiken sowie Populationsbasierte Optimierungsverfahren unter den Metaheuristiken eine besondere Rolle.

## 2.4 Remanufacturing

### 2.4.1 Definitionen und Einführungen

In der Literatur werden Recyclingoptionen unter verschiedenen Begriffen wie Rekonditionierung, Wiederverwendung, Aufarbeitung und Wiederaufbereitung diskutiert. Indem sie dazu neigen, sich in ihrer Bedeutung gegenseitig zu überlagern, verschwimmen und vermischen sich die Definitionen dieser im Trend liegenden Konzepte. In der Literatur zur Produktionsplanung stehen vor allem zwei Recyclingbegriffe hervor, nämlich Refurbishment (Aufbereitung) und Remanufacturing (Wiederaufbereitung) (Suzanne, N. Absi et al. (2020)). **Aufarbeitung** ist ein Verwertungsprozess, bei dem Abfälle gesammelt, ge-

prüft, repariert, gereinigt und als gebrauchte, funktionstüchtige Produkte weiterverkauft werden, ohne dass sie zerlegt wurden. Aufgearbeitete Produkte werden häufig wieder in die Garantie aufgenommen. In der Zwischenzeit wird die **Wiederaufbereitung** am häufigsten als Verwertung gebrauchter Produkte bezeichnet, die die Sammlung, die Reparatur, die Demontage und den Austausch abgenutzter Komponenten umfasst, um die Produkte wieder auf das Qualitätsniveau von neu hergestellten Produkten zu bringen. Die Hauptbesonderheit der Wiederaufbereitung liegt in der Demontage des Produkts, dem ersten und wichtigsten Schritt auf den Märkten für Ersatzteile oder Wiederaufbereitungsvorgänge in der Produktion (Suzanne, N. Absi et al. (2020)). Die Anzahl bzw. Durchführung der Prüfschritte variiert je nach Produkt und Unternehmen. So ist bei der Aufarbeitung von elektrischen oder elektronischen Produkten eine Eingangsfunktionsprüfung sinnvoll und wird von Freiburger als notwendiger erster Schritt des Remanufacturing-Prozesses erachtet von insgesamt acht Fertigungsschritten, von denen der erste, der fünfte und der achte Prüfprozesse sind (Dunkel (2008)). Steinhilper vermeidet jedoch die Nennung der Eingangs- oder Endkontrolle bzw. eines Testlaufs der Regenerate als eigenen Fertigungsschritt. Vielmehr sieht er die Qualitätssicherung als einen integralen Bestandteil des gesamten Remanufacturing-Prozesses Steinhilper (1999). Die folgende Abbildung 2.8 veranschaulicht dies.



Abbildung 2.8: Remanufacturingprozess nach Steinhilper (1999) (Seifert, (2017))



Abbildung 2.9: Beispiele für Alt- und Austauscherteile (Seifert 2017)

Auch wird im Remanufacturing-Prozess häufig ein Hard- oder Softwareupgrade durchgeführt, um die Regenerate dem neusten Technikstand anzugleichen (Steinhilper (1999)). In folgender Abbildung 2.9 soll der Unterschied zwischen Alt- und Wiederaufgearbeiteten-Teilen gezeigt werden.

Im Folgenden sollen die einzelnen Prozessschritte des Remanufacturing-Prozesses, in dem die Altteile regeneriert werden beschrieben werden.

- **Demontage:** In der Demontage wird das ungereinigte Altteil in Einzelteile bzw. Komponenten zerlegt und nach Wiederverwendbarkeit vorsortiert, wobei Verschleißteile wie Dichtungen und Lager aussortiert werden und später in der Aufarbeitung bzw. Wiedermontage durch Neuteile ersetzt werden (Seifert (2017)).
- **Reinigung:** Alle Bauteile werden chemisch und/oder mechanisch gereinigt, wobei dieser Fertigungsschritt am häufigsten einen Engpass darstellt, da Maschinen mit festen Zykluszeiten und begrenzter Kapazität eingesetzt werden (Seifert (2017)).
- **Prüfung und Sortierung:** Bei der Prüfung werden die Bauteile zerstörungsfrei auf Schäden und auf ihre Wiederverwendbarkeit überprüft. Wenn ein Bauteil verschlissen oder beschädigt ist, wird es entweder dem Fertigungsschritt Bauteilaufarbeitung zugeführt oder entsorgt (Steinhilper (1999)).
- **Bauteilaufarbeitung:** Bei der Bauteilaufarbeitung (kurz „Aufarbeitung“) werden hauptsächlich spanende Verfahren eingesetzt, um die Bauteile wieder auf ein Qualitätsniveau gleich dem Neuteil zu bringen (Seifert (2017)).
- **Wiedermontage:** Bei der Wiedermontage werden unter Einsatz von Neuteilen die Austauschprodukte bzw. Regenerate erzeugt. Dieser Fertigungsschritt weicht am

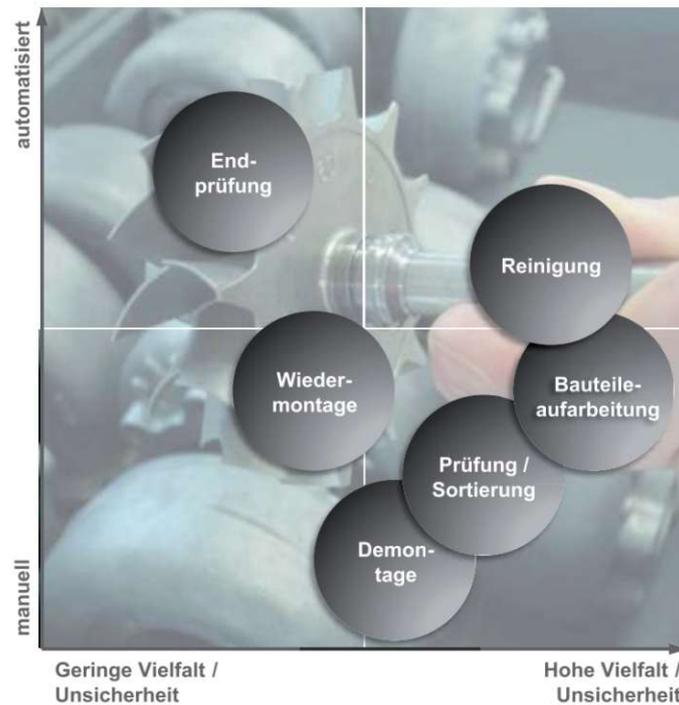


Abbildung 2.10: qualitative Einordnung der Fertigungsschritte nach Vielfalt und Automatisierungsgrad (Seifert 2017)

geringsten von der Neuproduktion ab, weist jedoch tendenziell einen höheren manuellen Anteil auf (Köhler, D., C. und Haumann (2010)).

Die nachfolgende Abbildung 2.10 zeigt eine qualitative Einordnung der Fertigungsschritte nach Vielfalt und Automatisierungsgrad (Seifert (2017)):

Als Abschluss dieser allgemeinen Einführung zeigen Steinhilper und Weiland (2015) aus der Industrie betrachtet, dass Remanufacturing im Automobilssektor am stärksten vertreten ist und auf den rund zwei Drittel des weltweiten Remanufacturing- Geschäftsvolumens entfallen. Doch lohnt sich auch ein Blick auf andere Industriezweige, wie dem Konsumentenmarkt und dem Investitionsanlagenmarkt.

## 2.4.2 Remanufacturing als Produktionsplanungssystem

Im Unterschied zu herkömmlichen PPS, wo eine Prognose der Produktionsmenge durch Absatzzahlen Abhilfe leisten kann, weisen RPS spezifische Probleme, die sich aus den Unsicherheiten der Rückführung ergeben. Folglich wurden folgende Hauptprobleme erfasst in dem sich ein RPS von einem PPS unterscheidet (Guide Jr (2000)):

- der unsichere Zeitpunkt und die Qualität der Erträge

- die Notwendigkeit, Rendite und Nachfrage in Einklang zu bringen
- die Demontage von zurückgegebenen Produkten
- die Ungewissheit der aus zurückgegebenen Artikeln wiedergewonnenen Materialien
- der Bedarf an einem Rücknahmelogistiknetz
- die Komplikation der Beschränkung des Materialabgleichs
- die Problematik stochastischer Arbeitspläne für Materialien und stark variierender Bearbeitungszeiten

### **Losgrößenproblem im Remanufacturing**

In dem Bestreben, industrielle Kontexte besser zu definieren, hat die akademische Gemeinschaft verschiedene Varianten des Losgrößenproblems mit Remanufacturing (LSR) untersucht. Wichtig sind dabei Kapazitätsrestriktionen von Anlagen, welche einen wesentlichen Einflussfaktor in der Produktionsplanung und -steuerung darstellen und unter dem Begriff der kapazitiven Losgrößenprobleme bekannt sind. Jene Probleme, welche kapazitive Grenzen außer Acht lassen, werden unter dem Ausdruck der unkapazitiven Problemen behandelt Volland (2012). Abgesehen von den klassischen kapazitiven und unkapazitiven Fällen des Losgrößenproblems sollen noch weitere auf Wiederaufarbeitung ausgerichtete Merkmale dieses Problems betrachtet werden.

### **Gemeinsame oder getrennte Aufstellungen**

Herstellung und Wiederaufarbeitung werden in zwei getrennten Prozessen durchgeführt, die jeweils ihre eigenen Rüstkosten haben. Dieses Problem wird gemeinhin als Losgrößenbestimmung mit Wiederaufarbeitung und separaten Rüstungen bezeichnet. Akademische Problemdefinitionen bevorzugen Produktionskonfigurationen mit getrennten Rüstungen (Suzanne, N. Absi et al. (2020)). Fertigung und Wiederaufarbeitung teilen sich die gleichen Produktionswege und haben gemeinsame Rüstkosten. Unter dieser Annahme wird das Problem als Losgrößenbestimmung mit Wiederaufarbeitung und gemeinsamen Rüstungen bezeichnet (Sahling (2013)).

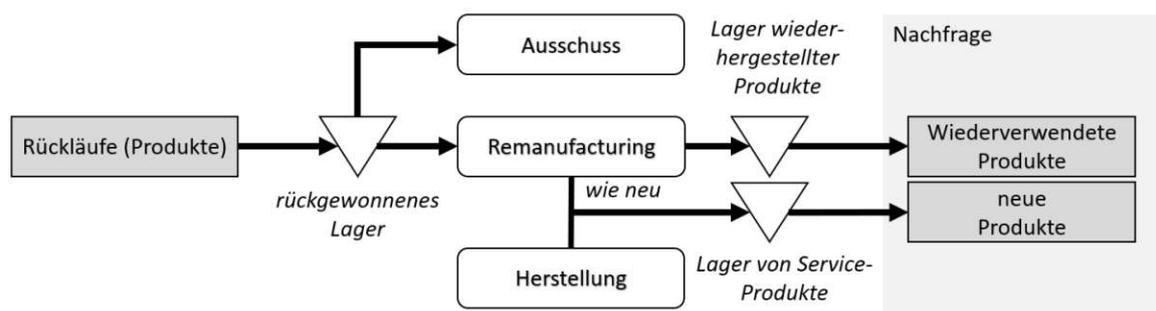


Abbildung 2.11: Darstellung von Remanufacturing mit Herstellung nach Suzanne et al. (2020)

### Bestandsmanagement

Wie in Abbildung 2.11 dargestellt, wirkt sich die Integration von Produktrückläufen und wiederaufbereiteten Gütern in die Produktionsumgebung auf das traditionelle Bestandsmanagement aus (Ilgin und Gupta 2010). In dieser Hinsicht sind Entscheidungen in Bezug auf die verwertbaren (zurückgegebenen), verwendbaren (identisch hergestellten und wiederaufgearbeiteten Produkte) und wiederaufgearbeiteten Bestände für eine geeignete Koordinierung zwischen den regulären Beschaffungs- und Wiederaufbereitungsstrategien mit LSR-Problemen verbunden (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

### Mit oder ohne Produktsubstitution

Im Gegensatz zum klassischen Losgrößenproblem liegt eine der Hauptbesonderheiten von LSR in der Nachfrage, die aus einem einzigen Strom gebrauchsfähiger Produkte befriedigt werden kann oder in zwei Kategorien von neu produzierten und wiederaufgearbeiteten Produkten aufgeteilt werden kann. Auch wenn in der Regel nicht zwischen hergestellten und wiederaufgearbeiteten Produkten unterschieden wird, gibt es einige Studien, die den Markt in neue und wiederaufgearbeitete Segmente unterteilen (Chen und Abrishami (2014); Koken, Raghavan et al. (2018a); Koken, Seok et al. (2018b); Zhang et al. (2011)).

Pinedo (2016) gehen noch weiter und lassen die Substitution von wiederaufbereiteten Produkten durch neue Produkte zu, um die Schwankungen in der Menge der Produktrückgaben aufzufangen.

## Mathematische Formulierung

Die allgemeine Form des Losgrößenproblems mit Wiederaufarbeitung, zeitabhängigen Parametern und getrennten Aufstellungen kann formal wie in Retel Helmrich et al. (2014) definiert werden.

$$F_t = \underset{\text{minimize}}{\sum_{t=0}^T} (p_t * X_t + \hat{p}_t * \hat{X}_t + f_t * Y_t + \hat{f}_t * \hat{Y}_t + h_t * I_t + \hat{h}_t * \hat{I}_t) \quad (2.1)$$

Der Planungshorizont sei über T Perioden verteilt. Der zugehörige industrielle Prozess ist mit folgenden Kosten verbunden: Produktionsstückkosten für die Herstellung (Wiederaufarbeitung)  $p_t$  ( $\hat{p}_t$ ), Rüstkosten für die Herstellung (Wiederaufarbeitung)  $f_t$  ( $\hat{f}_t$ ), Lagerhaltungsstückkosten für gebrauchsfähige Produkte  $h_t$  und Retouren  $\hat{h}_t$ ,  $\forall t \in [1, T]$ .  $X_t$  ( $\hat{X}_t$ ) sei die Menge der hergestellten (wiederaufgearbeiteten) Produkte und  $Y_t$  ( $\hat{Y}_t$ ) der binäre Indikator für die Herstellung (Wiederaufarbeitung) in Periode  $t \in [1, T]$ . Die Variablen  $I_t$  und  $\hat{I}_t$  werden verwendet, um die Lagerbestände an gebrauchsfähigen Produkten bzw. an Retouren auszudrücken. Unter Verwendung der oben genannten Notationen, kann das Losgrößenproblem mit zeitabhängigen Parametern und getrennten Aufstellungen formuliert werden. Die Zielfunktion  $F_t$  minimiert die Summe der Produktions-, Rüst- und Vorhaltekosten, die mit den Herstellungs- und Wiederaufbereitungsprozessen verbunden sind (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).

## 2.5 Motivation dieser Arbeit

Ausgehend von der bisherigen Darlegung, dass schon technische Lösungen zu nachhaltigeren Produktionen existieren, wie die Kreislaufwirtschaft und Remanufacturing und diese mitunter eine Antwort auf die von der Politik geforderten Ziele zur Bewältigung der Klimakrise sind, sieht diese Arbeit die Hauptmotivation darin, die CO<sub>2</sub>-Reduktions-Potentiale, die durch Remanufacturing erreicht werden könnten, mehr zu bestärken.

Dazu dient einerseits das in Kapitel 4 vorgestellte Vorgehen, welches zu weiteren Bemühungen zur Transformation in eine zirkulieren Produktion und deren Optimierung ermutigen soll. Andererseits sollen auch die Ergebnisse durch das Vorgehen aufzeigen, dass CO<sub>2</sub>-Reduktionen durch die zielgerichtete Motivation technischer Lösungen bereits erreichbar sind.

# 3 Systematische Literaturanalyse

## 3.1 Beschreibung der Methode

### 3.1.1 Bibliometrische Analyse

Da allein der Suchbegriff *Remanufact\** in der wissenschaftlichen Datenbank Scopus 6.785 Resultate aufbringt (Stand 13.06.2022), soll mittels einer Bibliometrischen Analyse in R nach Aria und Cuccurullo (2017) in kurzer Form ein Grundüberblick über das Thema gegeben werden. Eine schematische Darstellung des Ablaufs einer bibliometrischen Analyse nach Aria und Cuccurullo (2017) kann Abbildung 3.1 entnommen werden.

#### 1. Datenerfassung: bibliometrix unterstützt die folgende Unterphase:

- Laden der Daten und Konvertierung in einen R-Datenrahmen

#### 2. Datenanalyse gliedert in drei Teilschritte:

- Deskriptive Analyse eines bibliographischen Datenrahmens
- Erstellung von Netzwerken für bibliografische Kopplungs-, Kozitations-, Kollaborations- und Co-Occurrence-Analysen
- Normalisierung

#### 3. Visualisierung der Daten:

- Abbildung der konzeptuellen Struktur
- Netzwerkabbildung (Aria und Cuccurullo (2017))

Das bibliometrix R-Paket (<http://www.bibliometrix.org>) bietet eine Reihe von Werkzeugen für die quantitative Forschung in der Bibliometrie und Szientometrie. Es ist in der Sprache R geschrieben, die eine Open-Source-Umgebung und ein Ökosystem ist. Das Vorhandensein umfangreicher, effektiver statistischer Algorithmen, der Zugang zu qualitativ

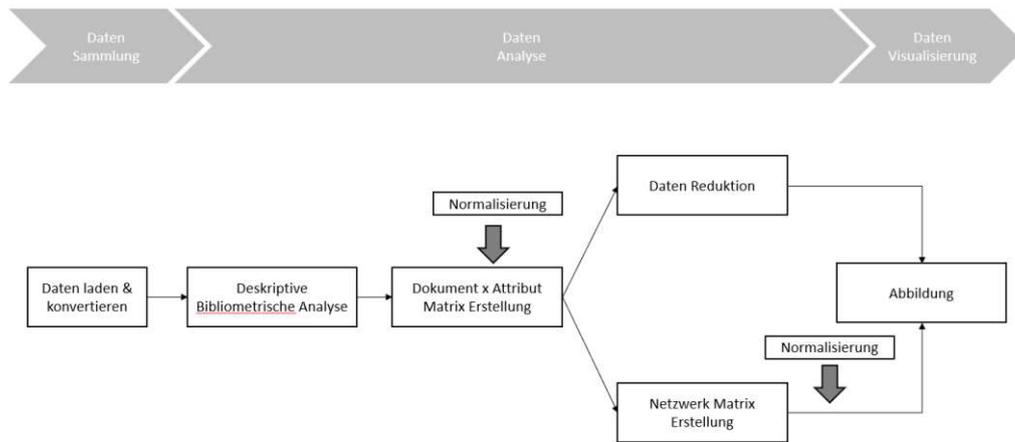


Abbildung 3.1: Bibliometrische Analyse nach Aria und Cuccurullo (2017)

| Charakterisitiken |                   | Kategorien           |                    |                       |                   |
|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| (1)               | Fokus             | Forschungsergebnisse | Forschungsmethoden | Theorien              | Anwendungen       |
| (2)               | Ziel              | Integration          | Kritik             |                       | Zentrale Probleme |
| (3)               | Organsiation      | Historisch           | Konzeptionel       |                       | Methodisch        |
| (4)               | Perspektive       | Neutral              |                    | Reviewer bezogen      |                   |
| (5)               | Publikum          | Experten             | Studenten          | Entscheider/Politiker | Breites Publikum  |
| (6)               | Grad d. Abdeckung | Umfassend            | umfassend selektiv | repräsentativ         | zentrale Aussagen |

Abbildung 3.2: Taxonomie nach Cooper 1988

hochwertigen numerischen Routinen und integrierte Datenvisualisierungswerkzeuge sind vielleicht die stärksten Qualitäten, die dafürsprechen, R gegenüber anderen Sprachen für wissenschaftliche Berechnungen vorzuziehen(Aria und Cuccurullo (2017)) .

### 3.1.2 Literatursuche

Vom Brocke et al. (2009) stellen zu systematischen Literatursuchen ein fünf Phasenmodell vor, bei dem auch Anwendungen aus Cooper (1988) und Webster und Watson (2002) mit- eingebunden werden. Die dazu vorgeschlagenen Phasen können wie folgt aus Vom Brocke et al. (2009) zusammengefasst werden:

#### Phase 1: Umfang der Literaturrecherche

In der Phase 1 soll zunächst der Umfang der Literaturrecherche definiert werden. Vom Brocke et al. (2009) sehen in diesem Schritt die größte Herausforderung der Literaturrecherche und empfehlen, für diese Phase die Taxonomie nach Cooper (1988) anzuwenden, welcher in Abbildung 3.2 als morphologischer Kasten vorgestellt ist und im weiteren ge-

nauer beschrieben werden soll.

- **Fokus (1)** beschreibt den Schwerpunkt, welcher in der Literaturrecherche gelegt wird. Der Fokus kann auf Forschungsergebnisse, Forschungsmethoden, Theorien oder Anwendung der Theorie gelegt werden.
- **Ziele (2)** der Literaturrecherche sind z.B. die Integration (Vergleich der Arbeiten verschiedener Autoren), das Kritisieren (Abgleich der gefundenen Literatur im einem vorher definierten Satz an Kriterien) sowie die Identifikation zentraler Herausforderungen.
- **Organisation (3)** beschreibt die Art der Darstellung der untersuchten Literatur, z.B. chronologisch oder konzeptuell bzw. methodisch.
- **Perspektive (4)** meint, dass Arbeiten mit ähnlichen oder gleichen Methoden gemeinsam betrachtet werden. Weiterhin kann die Literaturrecherche aus zwei verschiedenen Perspektiven, einer neutralen und einer auf den Reviewer bezogenen, durchgeführt werden. Die neutrale Position lässt so wenig wie möglich persönliche Interpretation zu.
- **Publikum (5)** meint, für welche Leser\*innen die vorgelegte Arbeit verfasst worden ist. Dabei ist zu beachten, dass Definitionen und aktuelle Diskussionen genauer anzuführen sind, je weniger Vorwissen das zu adressierte Publikum aufweist.
- **Grad der Abdeckung (6)** Hierbei wird die gesamte Literatur zu einem Themengebiet bei der vollständigen Abdeckung untersucht. Vollständig selektiv meint, dass die gesamte Literatur erfasst, aber nur ein Teil der Literatur im Detail vorgestellt wird. Neben der vollständigen Abdeckung kann auch nur ein Teil der Literatur untersucht werden. Bei der repräsentativen Abdeckung wird Literatur untersucht, die größere Themengruppen repräsentiert. Die zentrale Abdeckung erfasst nur Literatur, die für dieses Themengebiet als besonders relevant gilt (Cooper (1988)).

## Phase 2: Konzeptionalisierung

In der zweiten Phase folgt die Konzeptualisierung. Dort muss berücksichtigt werden, welches Wissen bereits über die Thematik existiert. Dazu empfehlen vom Brocke et al., sich

zunächst einen Überblick über dieses Thema zu verschaffen. Dadurch können dann Schlüsselwörter für die Literaturrecherche festgelegt werden (Vom Brocke et al. (2009)).

### **Phase 3: Literatursuche**

Phase drei beinhaltet die eigentliche Literatursuche. Dabei können auch eine Rückwärts- und Vorwärtssuche (Backward and Forward Search) durchgeführt werden. Bei der Rückwärtssuche werden Referenzen in der jeweiligen Literatur untersucht. Um Literatur zu identifizieren, die die jeweiligen Beiträge zitiert, kann die Vorwärtssuche angewendet werden. Vom Brocke et al. (2009) empfehlen dazu die Vorgehensweise nach Cooper (1988) Vom Brocke et al. (2009). Demnach soll zunächst mit der Untersuchung von Journals (hoher wissenschaftlicher Relevanz) begonnen werden. In den wissenschaftlichen Datenbanken kann anschließend mithilfe der in Phase zwei definierten Schlüsselwörter gesucht werden.

### **Phase 4: Evaluierung**

Mit der Evaluation soll die identifizierte Literatur hinsichtlich der Relevanz selektiert werden. Vom Brocke et al. (2009) empfehlen dabei den Titel, den Abstrakt oder (bestenfalls) den Volltext zu untersuchen (Vom Brocke et al. (2009)).

### **Phase 5: Analyse**

Nach der Sammlung wird die gefundene Literatur in der nächsten Phase analysiert. Dazu eignet sich die von Webster und Watson (2002) entwickelte und angepasste Konzeptmatrix.

### **3.1.3 Literaturanalyse**

Smith (2010) stellen Leitlinien, die den Überprüfungsprozess strukturieren sollen vor, welche in klare Phasen eingeteilt werden können und den Forscher\*innen einen Rahmen bieten, anhand dessen ein Zeitplan mit Aktivitäten und Meilensteinen entwickelt werden kann. Teilweise überdecken sich hier die Methoden von Smith (2010)) und Vom Brocke et al. (2009), wobei hier im speziellen die Schritte 1-3 betroffen sind. Folglich soll aber das gesamte Konzept von Smith (2010) zusammengefasst wieder gegeben werden, welches wie folgt aussieht:

#### **1. Definition einer Forschungsfrage**

Dies erfordert eine klare Aussage zu den Zielen der Überprüfung, der Intervention oder des

interessierenden Phänomens, der relevanten Gruppen und Teilpopulationen (und manchmal der Settings, in denen die Intervention durchgeführt wird), der Arten von Nachweisen oder Studien, die zur Beantwortung der Frage beitragen, sowie der geeigneten Ergebnisse. Diese Details werden rigoros verwendet, um Studien zur Aufnahme in die Überprüfung auszuwählen (Smith (2010)).

### **2. Durchsuchen der Literatur**

Die veröffentlichte und unveröffentlichte Literatur wird sorgfältig nach den erforderlichen Studien zu einer Intervention oder Aktivität durchsucht (zu den richtigen Gruppen, mit den richtigen Ergebnissen usw.). Für eine unvoreingenommene Bewertung muss diese Suche die gesamte Literatur abdecken und darf nicht nur aus Bequemlichkeit auf Datenbanken, Websites oder Zeitschriften beschränkt sein. In Wirklichkeit sollte eine bestimmte Anzahl von Datenbanken mit Hilfe eines standardisierten oder maßgeschneiderten Suchfilters durchsucht werden. Darüber hinaus wird die graue Literatur (Material, das nicht offiziell veröffentlicht wird, wie z. B. institutionelle oder technische Berichte, Arbeitspapiere, Konferenzberichte oder andere Dokumente, die normalerweise keiner redaktionellen Kontrolle oder Peer-Review unterzogen werden) mit Hilfe spezieller Datenbanken oder Websites durchsucht (Smith (2010)).

### **3. Bewertung der Studien**

Sobald alle möglichen Studien identifiziert sind, sollten sie auf folgende Weise bewertet werden. Jede Studie muss anhand der Einschlusskriterien auf ihre Zulässigkeit. In dieser Phase werden in der Regel alle Volltexte der Studien, die die Einschlusskriterien erfüllen, abgerufen. Nach einer Volltextauswahl werden die verbleibenden Studien anhand eines kritischen Beurteilungsrahmens auf ihre methodische Qualität geprüft. Schlechte Studien von schlechter Qualität werden ausgeschlossen, aber in der Regel diskutiert. Von den verbleibenden Studien werden die berichteten Ergebnisse in ein Datenextraktionsformular übertragen und anschließend eine Liste der eingeschlossenen Studien erstellt (Smith (2010)).

### **4. Kombinieren der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der einzelnen Studien werden kombiniert, um eine Gesamtzusammenfassung der Ergebnisse zu erstellen. Diese Kombination der Ergebnisse wird als Evidenzsynthese bezeichnet und die Daten werden in der Regel in Tabellenform dargestellt (Smith (2010)).

## 5. Einordnung der Ergebnisse in den Kontext

Die Ergebnisse der Zusammenfassungsstudien müssen diskutiert werden, um sie in einen praktischen Kontext zu stellen. Dabei werden Fragen wie die Qualität und die Streuung der eingeschlossenen Studien, die wahrscheinlichen Auswirkungen von Verzerrungen sowie die Anwendbarkeit der Ergebnisse angesprochen (Smith (2010)).

## 3.2 Bibliometrische Analyse

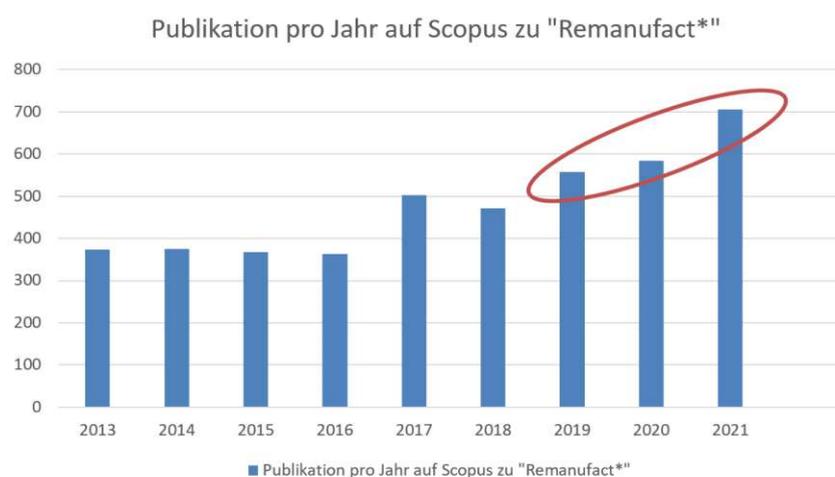


Abbildung 3.3: Publikationen auf Scopus unter dem Begriff "Remanufactur\*\*"

Betrachten wir zuallererst nur die rein quantitativ erfassten Publikationen auf Scopus kann entsprechend Abbildung 3.3 ein aufwärts Trend beobachtet werden. Da dieser ab dem Jahr 2019 signifikant wird und Scopus beim Download eines Bibtext Files maximal nur 2000 Einträge erlaubt limitiert sich die folgende Bibliometrische Analyse auf die Jahre von 2019-2021 mit dem Suchbegriff „Remanufactur\*\*“, wobei insgesamt 1855 der 6785 Artikel im Weiteren analysiert werden.

Hierbei fällt auf, dass wenn nur rein quantitativ gemessen wird Publikationen aus China in einer Vielzahl gegenüber Indien und westlichen Ländern wie den USA, Großbritannien sowie Canada überwiegen.

Qualitativ lässt sich der rein aus China kommende Trend nicht beobachten, wenn Publikationen aufgrund ihrer Zitierungen analysiert werden.

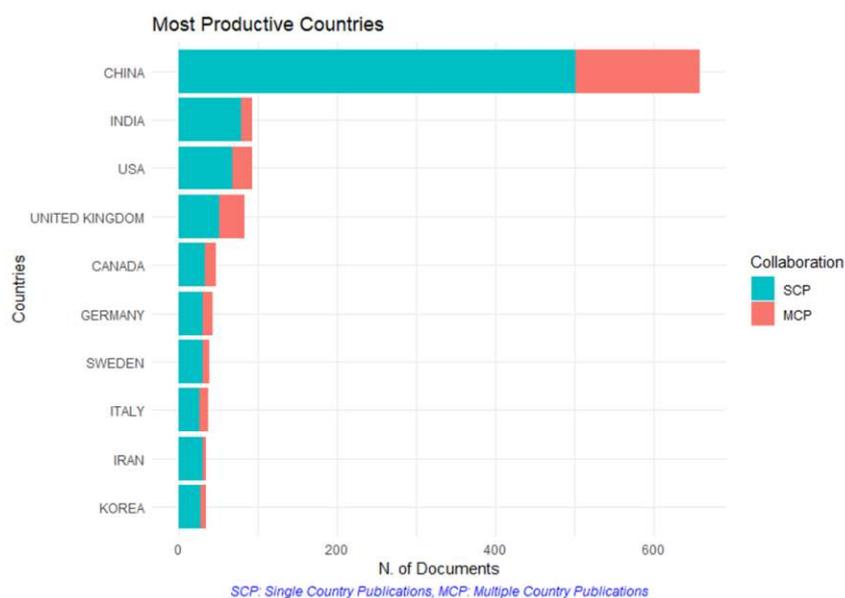


Abbildung 3.4: Publikationenverteilung auf Länder bezogen auf

| Publikationen         | Zitierungen pro Jahr | Zitierungen insgesamt |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Ldeke & Freund (2019) | 54,5                 | 218                   |
| Saidani (2019)        | 54,2                 | 217                   |
| Morseletto (2020)     | 52,7                 | 158                   |
| Chen (2019)           | 33,8                 | 135                   |
| Meng (2021)           | 64,5                 | 129                   |
| He (2019)             | 29,5                 | 118                   |
| Kristensen (2020)     | 38                   | 114                   |
| Tian (2019)           | 26,5                 | 106                   |
| Kerin (2019)          | 24                   | 96                    |
| Tang (2019)           | 24                   | 96                    |

Tabelle 3.1: meist zitiertesten Publikationen

Die wichtigsten Journals zum Thema Remanufacturing lauten wie folgt:

| Journal   | Publikationen von 2019-2021 |
|---|-----------------------------|
| Journal of Cleaner Production                   | 143                         |
| Sustainability (Switzerland)                    | 81                          |
| International Journal of Production Research    | 51                          |
| Computers & Industrial Engineering              | 44                          |
| Procedia CIRP                                   | 43                          |
| Journal of Remanufacturing                      | 41                          |
| International Journal of Production Economics   | 37                          |
| Procedia Manufacturing                          | 28                          |
| International Journal of Advanced Manufacturing | 27                          |
| Computer Integrated Manufacturing Systems       | 26                          |

Tabelle 3.2: wichtigsten Journale zu Remanufacturing

Das „*Journal of Cleaner Production*“ erlebt in den letzten Jahren einen generellen Zuwachs, seit dem auch zunehmend mehr Publikationen Nachhaltigkeitsaspekte beinhalten und ist somit auch für die Forschung in Remanufacturing von größer werdender Relevanz.

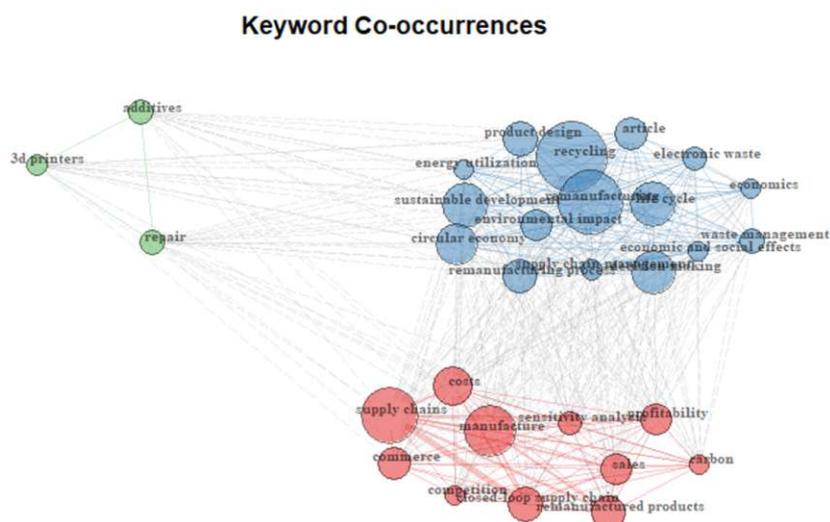


Abbildung 3.5: Suchbegriff-Korrelationen

In der Keyword-Trendanalyse können drei Gruppen beobachtet werden, eine rote eine grüne und eine Blaue. Die grüne Gruppe widerspiegelt den durch die Keywords „3d printers“ und „additives“ und „repair“ das Remanufacturing aufgrund der Additiven Fertigung,

welche für diese Recherche nicht von Bedeutung ist. Ebenfalls weniger von Interesse symbolisiert die rote Gruppe Keywords für diese Recherche, welche „Supply Chains“ und die Kostenseite von remanufacturing abdecken gekennzeichnet durch Keywords wie „profitability“, „sales“, „costs“. Die blaue Gruppe, welche auch die größte Gruppe ist weißt mit Begriffen, wie „sustainable development“, „remanufacturing“ und „circular economy“ mehr ein Augenmerk für diese Recherche auf, wobei die Keywords „Remanufacturing“ und „Circular Economy“ als Hauptbegriffe für die weitere Suche verwendet werden und zusätzlichen spezifischen Suchbegriffen kombiniert werden um den Produktionsplanungsansatz herauszufiltern.

### 3.3 Systematische Literatursuche

Phase 1 – Umfang der Literaturrecherche von Vom Brocke et al. (2009) nach Cooper (1988)

| Charakteristiken |                   | Kategorien           |                    |                       |                   |
|------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| (1)              | Fokus             | Forschungsergebnisse | Forschungsmethoden | Theorien              | Anwendungen       |
| (2)              | Ziel              | Integration          | Kritik             |                       | Zentrale Probleme |
| (3)              | Organisation      | Historisch           | Konzeptionel       |                       | Methodisch        |
| (4)              | Perspektive       | Neutral              |                    | Reviewer bezogen      |                   |
| (5)              | Publikum          | Experten             | Studenten          | Entscheider/Politiker | Breites Publikum  |
| (6)              | Grad d. Abdeckung | Umfassend            | umfassend selektiv | repräsentativ         | zentrale Aussagen |

Abbildung 3.6: Taxonomie nach Cooper (1988) für diese Literatursuche

#### Phase 2: Konzeptualisierung

Um eine umfassende Vorstellung davon, was über das Thema bekannt ist und in welchen Bereichen möglicherweise noch Wissen benötigt wird festzustellen wurden zeitnahe Literaturreviews zu Beginn dieser Arbeit herangezogen, um erstens die Forschungsfrage zu definieren und zweitens einen Überblick zu erhalten, was zu diesem Thema bekannt ist. Zusätzlich wird zu den beiden Reviews noch zwei weitere in der Recherche herangezogen, um das Wissen zu vertiefen.

#### Phase 3: Literatursuche

Zur Literatursuche wurden folgende Begriffe in UND-Kombination laut Tabelle 3.7 miteinander in der wissenschaftlichen Datenbank Scopus recherchiert. Zusätzlich wurden nur die letzten fünf Jahre von 2017-2022 betrachtet, um den aktuellen Stand der Forschung abzubilden.

| Suchbegriff 1    | Suchbegriff 2              | Suchbegriff 3     | Suchtreffer (max) | Suchtreffer nach 1. Filterung | Suchtreffer nach 2. Filterung |
|------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Remanufactur*    | sequence optimization      | -                 | 5                 | 5                             | 5                             |
|                  | metaheuristic optimization | -                 | 1                 | 1                             | 1                             |
|                  | production planning        | -                 | 266               | 0                             | 0                             |
|                  | production                 | plan              | 117               | 0                             | 0                             |
|                  | metaheuristic              | optimization      | 12                | 12                            | 7                             |
|                  | production planning        | genetic algorithm | 7                 | 7                             | 6                             |
|                  | production planning        | optimization      | 30                | 30                            | 7                             |
|                  | production planning        | Lot-sizing        | 11                | 11                            | 2                             |
| Circular economy | sequence optimization      | -                 | 1                 | 1                             | 1                             |
|                  | metaheuristic optimization | -                 | 0                 | 0                             | 0                             |
|                  | production planning        | -                 | 24                | 24                            | 2                             |
|                  | production                 | plan              | 153               | 0                             | 0                             |
|                  | metaheuristic              | optimization      | 1                 | 1                             | 1                             |
|                  | production planning        | genetic algorithm | 0                 | 0                             | 0                             |
|                  | production planning        | optimization      | 6                 | 6                             | 0                             |
|                  | production planning        | Lot-sizing        | 4                 | 4                             | 4                             |
|                  |                            |                   | 638               | 102                           | 36                            |

Abbildung 3.7: Suchbegriffe und deren Suchtreffer dieser Literatursuche

#### Phase 4: Evaluierung

Wie in Tabelle 3 erkennbar wird zweimal gefiltert, wobei die erste Filterung Suchen die über 50 Artikel als Suchergebnisse findet als zu ungenau einstuft und sie damit auf 0 Treffer setzt. In der zweiten Filterung wird nach Analyse von Titel und Abstrakt entschieden, ob diese Publikationen für die gegebene Recherche von Relevanz sind.

#### Phase 5: Analyse mit Konzeptmatrix von Webster Watson (2002)

Da dieser Schritt schon in die Analyse vorgreift, wird die Konzeptmatrix in 3.4 präsentiert.

### 3.4 Systematische Literaturanalyse

Wie bereits erwähnt, überdecken sich die Prozessschritte „1. Definition einer Forschungsfrage“. „2. Durchsuchen der Literatur“ und „3. Bewertung der Studien“ von Smith (2010) mit denen von Vom Brocke (2007) und sind deshalb schon behandelt.

#### 4. Kombinieren der Ergebnisse (Smith (2010))

Hierfür werden die gefundenen Studien analysiert und in Kategorien eingeteilt. Dazu wird die Demontagesequenzierung von den RPS und den Literaturanalysen (Reviews) getrennt betrachtet. Anschließend werden die Studien in ihre verwendeten Lösung Ansätze unterteilt und diskutiert, wobei insgesamt unter folgende vier unterschieden wird:

- Gemischte ganzzahlige Optimierungen (Mixed-Integer Programming) (MIP)

- Konstruierte Heuristiken (KH)
- Populationsalgorithmen (PO)
- Andere Algorithmen

Für eine schnelle und übersichtliche Darstellung soll Abbildung 3.8 sorgen, welche auch nach der Konzeptmatrix von Webster und Watson (2002) gestaltet ist:

| Quelle                             | Demontageplanung | RPS | industrielle Symbiose | Review | verwendeter Algorithmus |                 |          |              |
|------------------------------------|------------------|-----|-----------------------|--------|-------------------------|-----------------|----------|--------------|
|                                    |                  |     |                       |        | MIP                     | KH              | PA       | Andere       |
| Akbalik und Pochet (2007)          |                  | x   |                       |        |                         | Fluss           |          |              |
| Aljuneidi und Bulgak (2017)        |                  | x   |                       |        | linear                  | Relax-Fix       |          |              |
| Ansari und Daxini (2022)           |                  |     |                       | x      |                         |                 |          |              |
| Assid et al. (2021)                |                  | x   |                       |        |                         | Kontrolltheorie |          |              |
| Bensmain et al. (2019)             |                  | x   |                       |        | n. linear               |                 |          |              |
| Bouazza et al. (2022)              | x                |     |                       |        |                         |                 | PSO      |              |
| Cécilia Daquin et al. (2019)       |                  |     | x                     |        |                         |                 |          | math. Modell |
| Chiadamrong und Tangchaisuk (2021) |                  | x   |                       |        |                         |                 | PSO + GA |              |
| Lahmar et al. (2022)               |                  | x   |                       |        |                         |                 | GA       |              |
| Li et al. (2019)                   | x                |     |                       |        |                         |                 | PSO      |              |
| Liu et al. (2019a)                 |                  | x   |                       |        |                         | Min Max         |          |              |
| Liu et al. (2019b)                 |                  | x   |                       |        |                         |                 | ACA      |              |
| Martinez et al. (2021)             |                  | x   |                       |        | linear                  |                 |          |              |
| Quezada et al. (2021)              |                  | x   |                       |        | n. linear               |                 |          |              |
| Ren et al. (2018)                  | x                |     |                       |        |                         |                 | GA       |              |
| Ren et al. (2021)                  | x                |     |                       |        |                         |                 | ABC      |              |
| Sathish und Jayaprakash (2017)     |                  | x   |                       |        |                         |                 | ABC      |              |
| Suzanne et al. (2020b)             |                  | x   |                       |        |                         | dyn. Prog.      |          |              |
| Suzanne et al. (2021)              |                  |     | x                     |        |                         |                 |          | Lagrange     |
| Suzanne et al. (2020)              |                  |     |                       | x      |                         |                 |          |              |
| Thies et al. (2019)                |                  |     |                       | x      |                         |                 |          |              |
| Torkaman et al. (2018)             |                  | x   |                       |        |                         |                 | SA + GA  |              |
| Wen et al. (2017)                  |                  | x   |                       |        |                         |                 | NN+GA    |              |
| Yuan et al. (2022)                 | x                |     |                       |        |                         |                 | FOA      |              |
| Zarte et al. 2019a                 |                  |     |                       | x      |                         |                 |          |              |
| Zhao et al. (2021)                 | x                |     |                       |        |                         |                 |          | Deep-Q       |

Abbildung 3.8: Konzeptmatrix nach Webster und Watson (2002)

## 5. Einordnung der Ergebnisse in den Kontext (Smith (2010))

Nun sollen die gefundenen Studien diskutiert werden, wobei sie anschließend mit den gefundenen Studien aus den gefundenen Meta-Literaturanalysen ergänzt werden und zum Abschluss die aktuellen gefundenen Forschungsbedarfe aus dieser Suche angeführt werden.

### 3.4.1 Demontagesequenzplanung

Die Reihenfolge der Demontage hat erhebliche Auswirkungen auf die Leistung der Wiederaufbereitung und des Recyclings von gebrauchten oder ausrangierten Produkten. Studien zur Optimierung der Demontagerihenfolge haben sich weitgehend auf die sequenzielle Demontage konzentriert. Bei großen oder komplexen Produkten nimmt die sequenzielle Demontage jedoch viel Zeit in Anspruch und ist ziemlich ineffizient, da jeweils nur ein Teil oder eine Unterbaugruppe entfernt wird und nur ein Mitarbeiter mit der Demontage

eines Produkts betraut ist.

Die Demontage ist eine der wichtigsten Tätigkeiten bei der Wiederaufbereitung. Die Planung der Demontagereihenfolge (DSP) ist ein kombinatorisches Optimierungsproblem und wird bereits von vielen Forschern untersucht. Herkömmliche DSP-Techniken konzentrieren sich auf die sequentielle Demontageplanung (SDP), bei der nur ein Manipulator verwendet wird, um ein einzelnes Teil oder eine Unterbaugruppe zu einem bestimmten Zeitpunkt zu entfernen, was bei der Demontage großer oder komplexer Produkte ineffizient ist.

Bouazza et al. (2022) entwickeln ein Zwei-Ziel-Problem für die Demontagesequenzierung, das darauf abzielt, den Gewinn aus der Demontage zu maximieren und den Energieverbrauch zu minimieren. Dieser Ansatz basiert auf der Anpassung des Petri-Netzes als Modellierungswerkzeug, das es ermöglicht, alle möglichen Demontagesequenzen unter Verwendung des erweiterten Prozessgraphen, der Demontangepriorität und der Inzidenzmatrizen darzustellen. Im Anschluss wird ein Partikelschwarmoptimierungs-Algorithmus (PSO) angewendet, um eine optimale Demontagesequenz zu bestimmen, die den geringsten Energieverbrauch und den maximalen Gewinn gewährleistet (Bouazza et al. (2022)).

Li et al. (2019) entwickeln ein Modell zur Optimierung der Demontagereihenfolge unter Berücksichtigung der Qualitätsunsicherheit von EOL-Produkten. Dabei wird von ihnen die verbleibende Lebensdauer jeder Komponente eines EOL-Produkts unter Verwendung der Weibull-Verteilung und künstlicher neuronaler Netze berechnet, um dann Demontageverfahren entsprechend ihrer Qualitätsbedingungen auszuwählen. Zusätzlich wird ein Modell zur Optimierung der Demontagesequenz mit mehreren Zielen erstellt, das die minimale Demontagezeit und die minimalen Kosten zum Ziel hat, und einen PSO zur Lösung dieses Modells einsetzt (Li et al. (2019)).

Yaping Ren et al. (2018) schlagen eine asynchrone parallele Demontageplanung (aPDP) vor, die die Synchronisationsanforderung eliminiert. Zusätzlich zu den Prioritätsbeschränkungen ist aPDP stark von der Betriebszeit abhängig. Um dies zu bewältigen, entwickeln sie eine effiziente Kodierungs- und Dekodierungsstrategie für den Demontageprozess. Zusätzlich wird ein metaheuristischer Ansatz auf der Grundlage eines genetischen Algorithmus entwickelt, um das aPDP-Problem zu lösen (Yaping Ren et al. (2018)).

Y. Ren et al. (2021) schlagen eine auf dem Modell der Wertrückgewinnung und Ener-

gieeinsparung basierende Mehrziel-Demontageplanung vor, die sich von den bestehenden Demontageplanungs-Modellen dadurch unterscheidet, dass sie sich eher auf die verkörperte Energie als auf den Energieverbrauch während der Demontage konzentriert. Ein angepasster multiobjektiver künstlicher Bienenvolk-Algorithmus (ABC) wird entwickelt, um die Pareto-Lösungen für das Mehrziel-Modell zu identifizieren (Y. Ren et al. (2021)).

Yuan et al. (2022) präsentieren ein kapazitives Fuzzy-Demontageplanungsmodell mit Zykluszeit und Umweltkosten als Parameter, das in der Wiederaufarbeitung und vielen anderen Produktionssystemen breite Anwendung findet. Sie schlagen ein gemischt-ganzzahliges mathematisches Programmiermodell vor, um die Zykluszeit und die Umweltkosten zu minimieren, während ein metaheuristischer Ansatz auf der Grundlage eines Fruchtfliegen-Optimierungsalgorithmus (FOA) entwickelt wird, um ein Fuzzy-Demontageplanungsschema zu finden (Yuan et al. (2022)).

Die Planung selektiver Demontagesequenzen (sDP) gilt als effiziente Strategie zur Bestimmung optimaler Demontagesequenzen für die Entnahme von Zielteilen aus komplexen EOL-Produkten. Die bisherige Forschung geht davon aus, dass alle EOL-Produkte die gleiche Struktur haben und die optimalen selektiven Demontagesequenzen gegeben sind, bevor die EOL-Produkte entfernt werden. Zhao et al. (2021) zeigen auf, dass die Produkte jedoch während ihrer Nutzungsphase unterschiedliche Betriebszustände aufweisen, was zu einer hohen Strukturunsicherheit von EOL-Produkten führt. Die Strukturunsicherheit von EOL-Produkten macht die vorgegebenen selektiven Demontagesequenzen oft unpraktisch, um die Demontagezeit zu minimieren und den Demontagegewinn zu maximieren (Zhao et al. (2021)).

Dazu entwickeln sie ein mehrstufiges selektives Demontage-Hybridgraphenmodell, um die Kontakt-, Vorrang- und Stufenbeziehungen zwischen den Teilen darzustellen. Weiters formulieren sie die Planung selektiver Demontagesequenzen als endlicher Markov-Entscheidungsprozess und entwickeln eine auf Deep-Q-Netze basierende selektive Demontagesequenzplanung (Zhao et al. (2021)).

## 3.4.2 Remanufacturing- Produktionsplanungssysteme

### Integrierte Fertigungs-/Wiederaufbereitungssysteme

Im Folgenden werden Publikationen zusammengefasst, welche das Problem der kapazitätsbezogenen dynamischen Losgrößenbestimmung in integrierten Fertigungs-/ Wiederaufbereitungssystemen behandeln. Diese Produktionssysteme sind so konzipiert, dass sie die Nachfrage nach verschiedenen Klassen von Einzelprodukten nicht nur durch die Herstellung von neuen Produkten, sondern auch durch die Wiederaufarbeitung von zurückgegebenen Produkten befriedigen. Eine einzige Maschine mit einer begrenzten Kapazität in jedem Zeitraum wird sowohl für die Herstellung als auch für die Wiederaufbereitung, also mit geteilten Rüstkosten verwendet.

### Gemischt ganzzahlige Optimierung (Mixed Integer Programming)

Martínez et al. (2021) stellen eine Erweiterung des ökonomischen Losgrößenproblems vor, um die Wiederaufarbeitung zu behandeln, bei der zusätzlich zu den traditionellen ökonomischen Kosten auch Umweltkosten in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Separate Kosten für Emissionen, Wasser- und Energieverbrauch werden für die Herstellungs- und Wiederaufbereitungsaktivitäten sowie für die Führung positiver Lagerbestände sowohl von gebrauchten als auch von gebrauchsfähigen Produkten angenommen. Sie stellen eine gemischt-ganzzahlige lineare Programmierungsformulierung für das Problem zur Verfügung und schlagen mehrere Lösungsverfahren vor, die auf der Tabu-Search-Metaheuristik basieren (Martínez et al. (2021)).

Bensmain et al. (2019) befassen sich mit der Entwicklung eines integrierten Ansatzes zur gemeinsamen Optimierung des Produktionsplans, des Wiederaufbereitungsplans und der Qualität der bei jeder Wiederaufbereitungsmaßnahme verwendeten Ersatzteile. Um die Gesamtkosten während des Produktionshorizonts zu minimieren, wird ein gemischt-ganzzahliges nichtlineares Programm (MINLP) entwickelt. Das Optimierungsproblem wird mit einem hybriden genetischen Algorithmus auf der Grundlage einer Fix-and-Relax-TE-Heuristik gelöst (Bensmain et al. (2019)).

Aljuneidi und Bulgak (2017) präsentieren rekonfigurierbare zellulare Fertigungssysteme und hybride Fertigungs- und Wiederaufbereitungssysteme (HMRS), wobei ein integrierter Ansatz in Bezug auf Designoptimierung, Analyse und Prozessplanung vorgeschlagen

wird, um eine große Anzahl von Designfragen für nachhaltige Fertigungssysteme zu lösen. Es wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Programmiermodell (MILP) entwickelt, das ein klassisches Zellbildungsproblem in zellularen Fertigungssystemen (CMS) mit einem Produktionsplanungsproblem in hybriden Fertigungs- und Wiederaufbereitungssystemen verbindet und gleichzeitig Fragen der Rekonfiguration des CMS für verschiedene Produktionsperioden berücksichtigt (Aljuneidi und Bulgak (2017)).

### Konstruktions-Heuristiken

Um dieses Problem optimal in einer angemessenen Zeitspanne zu lösen, schlagen Abdolreza Roshani et al. (2017) eine Entspannungs- und Fixierungsmethode vor. Um die Effizienz des vorgeschlagenen Algorithmus zu evaluieren, werden einige experimentelle Ist-Werte generiert und gelöst, wobei die erzielten Ergebnisse die Effektivität dieses vorgeschlagenen Algorithmus zeigen (Roshani et al. (2017)).

Assid et al. (2021) befassen sich mit dem Problem zentrale Entscheidungen zur Optimierung der langfristigen Gesamtkosten von hybriden RPS zu finden. Das Hauptziel besteht darin, sowohl die Produktionsraten für die Wiederaufarbeitung als auch für die Herstellung zu finden, sowie die Politik, die verwendet wird, um zwischen den Wiederaufarbeitungsmodi von Rückgaben mit unterschiedlichen Qualitätsbedingungen zu wechseln. Die Charakterisierung der optimalen Kontrollpolitik erfolgt durch die Kombination von optimaler Kontrolltheorie und numerischen Techniken. Solche Strategien bestehen aus Absicherungspunkten und lagerbasierten Umschaltentscheidungen, welche wirksame Lösungen zur Unterstützung von Entscheidungsträgern bieten, bei der gleichzeitigen Steuerung von Wiederaufbereitungs-, Fertigungs- und Umstellungsvorgängen, um die Ressourcenauslastung, die Bestände und die Produktivität angemessen zu verwalten (Assid et al. (2021)).

Die Optimalitätsbedingungen werden mit Hilfe der Theorie der optimalen Kontrolle auf der Grundlage der stochastischen dynamischen Programmierung entwickelt. Zur Lösung des optimalen Steuerungsproblems wird ein auf numerischen Methoden basierender Rechenalgorithmus verwendet. Die Struktur der optimalen Kontrollpolitik wird in Abhängigkeit vom Wert der Kosten und der Parameter erörtert, und es werden Erweiterungen auf komplexere Rückwärtslogistiknetze diskutiert (Kenné et al. (2012)).

Liu et al. (2019) entwickeln ein Optimierungsmodell, um die geplanten Durchlaufzeit zu bestimmen, die die Lagerhaltungs- und Fehlmengenkosten minimieren. Angesichts der unbekanntenen Verteilung der Wiederherstellungszeit, mit bekannten ersten und zweiten Momenten, wird dieses Modell durch einen Min-Max-Ansatz gelöst, der Verteilungen mit denselben ersten und zweiten Momenten erfassen kann (Liu et al. (2019)).

Quezada et al. (2021) betrachten einen mehrstufigen Ansatz der stochastischen ganzzahligen Programmierung und verwenden Szenariobäume zur Darstellung einer unsicheren Informationsstruktur. Sie führen eine neue dynamische Programmierungsformulierung ein, die sich auf eine teilweise verschachtelte Zerlegung des Szenariobaums stützt und schlagen dann eine neue Erweiterung des kürzlich veröffentlichten stochastischen dualen dynamischen ganzzahligen Programmieralgorithmus vor, der auf dieser partiellen Zerlegung basiert (Quezada et al. (2021)).

In diesem Zusammenhang formalisieren Suzanne, Nabil Absi et al. (2020) ein Modell für das Problem der Losgröße eines einzelnen Artikels, das die Verwaltung unvermeidbarer Produktionsrückstände, die als Nebenprodukte klassifiziert werden, einbezieht. Während des Produktionsprozesses eines Hauptprodukts fällt ein Nebenprodukt an, das in einer begrenzten Kapazität gelagert und mit festen Transportkosten transportiert wird. Dieses Problem wird für zwei Fälle der Nebenprodukt-Lagerkapazität untersucht: zeitabhängig und konstant. Sie beweisen, dass das Problem mit Lagerkapazitäten NP-schwer ist. Um es optimal zu lösen, entwickeln sie einen pseudo-polynomialen Algorithmus für dynamische Programmierung (DP). Für den Fall mit stationären Lagerkapazitäten wird ein polynomialer Algorithmus zur dynamischen Programmierung vorgeschlagen. (Suzanne, Nabil Absi et al. (2020))

### Populations-Algorithmen

Lahmar et al. (2022) untersuchen ebenfalls wie Assid et al. (2021) ein Produktionsplanungsproblem um die Gesamtkosten (Anlauf- und Produktionskosten für neue und wiederaufbereitete Produkte, Lagerkosten für neue und zurückgegebene Produkte und Entsorgungskosten) und die Kohlenstoffemissionen (neue Produkte, wiederaufbereitete Produkte und entsorgte Produkte) zu minimieren. Sie entwickeln im Vergleich ein mathematisches Mehrzielmodell und ein auf einem genetischen Algorithmus (NSGA-II) basierenden Ansatz mit nicht dominanter Sortierung (Lahmar et al. (2022)).

Ein Ameisenkolonie-System-Algorithmus mit Zufallsstichprobenverfahren (ACS-RSM) wird von W. Liu et al. (2019) vorgeschlagen, um die erwarteten Gesamtkosten des hybriden RPS zu minimieren. Schließlich werden das vorgeschlagene Modell und der ACS-RSM-Algorithmus auf den Fall eines Autogenerators angewandt, wobei die Auswirkungen der Rückgewinnungsrate für gebrauchte Produkte und der Losgrößen von neuen und wiederaufbereiteten Produkten auf die erwarteten Gesamtkosten analysiert werden. In der praktischen Fallstudie gibt es zwei wichtige Ergebnisse. Die erste Erkenntnis ist, dass die erwarteten Gesamtkosten des hybriden RPS mit zunehmender Verwertungsrate der gebrauchten Produkte bis zu einem bestimmten Punkt drastisch sinken. Die zweite Erkenntnis ist, dass mit zunehmender Losgröße des neuen und des wiederaufbereiteten Produkts die erwarteten Gesamtkosten deutlich anstiegen und die Laufzeit des ACS-RSM-Algorithmus monoton abnimmt (W. Liu et al. (2019)).

Sathish, T., Jayaprakash, J. (2017) stellen eine Methodik für das Remanufacturing von EOL-Produkten im Hinblick auf einen optimalen Planungsalgorithmus vor, wobei die optimale Anzahl von wiederverwendbaren EOL-Produkten für die Demontage auf Bestellung gefunden wird. Die Verwendung des ABC-Algorithmus als die vorgeschlagene Methode bietet eine verbesserte Leistung gegenüber den bestehenden Planungsalgorithmen (Sathish, T., Jayaprakash, J. (2017)).

Chiadamrong und Tangchaisuk (2021) verwenden einen simulationsbasierten Optimierungsansatz, der Unsicherheiten in Bezug auf die Ankunft der Teile und die Betriebsbedingungen berücksichtigt mit einer Umsetzung im Simulationsprogramm ARENA. Sie setzen verschiedene hybride und eigenständige Optimierungsalgorithmen ein, um die optimalen Lösungen zu finden. Die PSO und der GA werden aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit bei der Suche nach einer optimalen Lösung als Optimierungsalgorithmen für diese Studie ausgewählt (Chiadamrong und Tangchaisuk (2021)).

Torkaman et al. (2018) stellen einen hybriden Simulated Annealing (SA) Algorithmus vor, um das Losgrößenproblem zu lösen, wobei sie mit Hilfe eines GA eine geeignete Anfangslösung versuchen zu finden (Torkaman et al. (2018)).

Wen et al. (2017) stellen ein integriertes Optimierungsmodell für die Produktionsplanung und -terminierung mit Beschränkungen durch birandomische Variablen auf. Dann ent-

wickeln sie einen hybriden intelligenten Algorithmus, der zufällige Simulationstechniken, neuronale Netze und genetische Algorithmen umfasst, um ein integriertes Produktionsplanungs- und Terminierungssystem für die Wiederaufarbeitung zu optimieren. Darüber hinaus generieren sie eine Zufallsvariablen-Matrix mit Hilfe der Zufallssimulationstechnik, und ein trainiertes neuronales Netz welches in den genetischen Algorithmus integriert wird. (Wen et al. (2017))

Bei der arbeitsintensiven Chargenproduktion stellen Chiadamrong und Tangchaisuk (2021) fest, dass ein sorgfältiges Gleichgewicht zwischen den Umverteilungskosten und den Bestandskosten, den Chargenumsetzungskosten und den Rüstkosten sowie den Arbeitskosten und den Leerlaufkosten wichtig ist, um die beste Betriebspolitik zu wählen. Ebenfalls zeigen sie, dass die hybriden Algorithmen die eigenständigen Algorithmen in Bezug auf Lösungsqualität und Berechnungseffizienz übertreffen. In ihrer Studie verwenden sie den PSO-Algorithmus als Hauptoptimierungswerkzeug und einen GA, um die Suchvielfalt zu verbessern und einem lokalen Optimum zu entgehen (Chiadamrong und Tangchaisuk (2021)).

### Industrielle Symbiose

Neben den oben beschriebenen Optimierungen, die jeweils ein Losgrößenproblem eines einzigen RPS behandeln werden in der Literatur auch Ansätze zu industriellen Symbiose zwischen zwei RPS diskutiert, wodurch sich neue Herausforderungen ergeben. Unter industrielle Symbiose wird eine nachhaltige Form verstanden, mit der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen und der Umwandlung unvermeidlicher Produktionsrückstände in nützliche Produkte mit Mehrwert (E. Suzanne et al. (2021)).

Daquin et al. (2019) entwickeln ein kollaboratives Losgrößenproblem als Teil einer industriellen Symbiose. Zwei Akteure, die verschiedenen Lieferketten angehören, arbeiten zusammen, um gemeinsam die besten Produktionspläne zu bestimmen, um ihre Gesamtkosten zu minimieren. Sie schlagen das erste zentralisierte Planungsmodell für 2 Akteure vor, die innerhalb einer industriellen Symbiose zusammenarbeiten. Eine weitere Perspektive für Daquin et al. (2019) ist die Erweiterung auf 3, 4, ... oder n Akteure, die an der industriellen Symbiose beteiligt sind, um die Kette zu erweitern.

In weiteren Zusammenhang führen E. Suzanne et al. (2021) ein neues Produktionspla-

nungsproblem ein, das zwischen zwei Produktionseinheiten (PU) innerhalb einer industriellen Symbiose entsteht. Während des Produktionsprozesses eines Hauptprodukts fällt in der ersten PU ein Produktionsrückstand an, der anschließend entweder von der zweiten PU als Rohstoff verwendet oder entsorgt wird. Die zweite PU kann auch Rohstoffe von einem externen Lieferanten beziehen. Das sich daraus ergebende kombinierte Produktionsplanungsproblem wurde von E. Suzanne et al. (2021) als zweistufiges Losgrößenproblem für einzelne Artikel formuliert. Sie beweisen, dass dieses Problem NP-hart ist, unabhängig davon, ob es sich um nicht lagerfähige oder lagerfähige Produktionsrückstände mit begrenzter Kapazität handelt. Um dieses Problem effizient zu lösen, wird eine Heuristik vorgeschlagen, die auf der Lagrangeschen Dekomposition basiert.

### Entscheidungsfindung für einen GA

Aus der Analyse von Ansari und Daxini (2021) geht neben der Analyse dieser Arbeit hervor, dass populationsbasierte Algorithmen wie GA, ABC, PSO und ACS im Vergleich zu den auf Einzellösungen basierenden Algorithmen wie SA der beliebteste Ansatz für die Suche nach nahezu optimalen Lösungen sind. Bei den populationsbasierten Algorithmen ist GA die am häufigsten verwendete Meta-Heuristik.

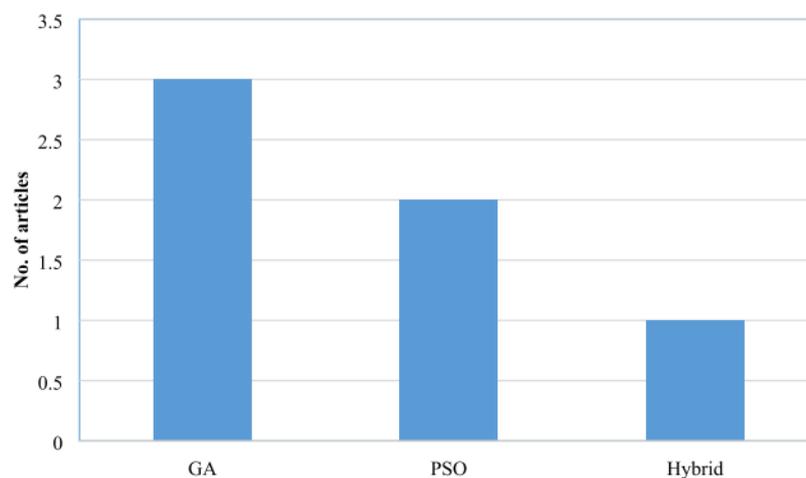


Abbildung 3.9: verwendete Metaheuristiken im Vergleich aus Ansari (2022)

Der GA wird am häufigsten verwendet, weil er (Ansari und Daxini 2022):

- einfach in der Anwendung und effizient bei der Lösung von Problemen großen Umfangs ist.
- in der Lage, eine Vielzahl von kombinatorischen und stochastischen Einzel- und Mehrzieloptimierungsproblemen zu lösen ist.
- die Fähigkeit hat qualitativ hochwertige Lösungen für Optimierungs- und Suchprobleme durch Operatoren wie Fitnessstest, Crossover und Mutation zu erzeugen.
- weit verbreitet für die Optimierung von eingeschränkten wie auch von nicht eingeschränkten Problemen ist.
- den Vorteil hat, dass keine lineare Formulierung erforderlich ist, um Lösungen zu generieren.
- auch den Vorteil hat, dass es keine umfangreichen Kenntnisse über die Einschränkungen und Regeln des eigentlichen Problems erfordert. Vielmehr konvergiert es schnell zu verbesserten Lösungen, die dann in einen Vektor von Entscheidungsvariablen übersetzt werden können, der eine Lösung für das eigentliche Problem darstellt.

Es ist auch festzustellen, dass eine beträchtliche Anzahl von Forschungsartikeln hybride Metaheuristiken verwendet haben. In den veröffentlichten Artikeln, die hybride Metaheuristiken verwendet haben, ist der GA die am häufigsten mit anderen Techniken kombinierte Technik zur Lösung der auf Wiederaufbereitung basierenden Optimierungsproblemen (Ansari und Daxini (2021)).

Aus diesen Vorteilen resultiert die Entscheidung für eine Optimierung durch einen GA in dieser Arbeit.

### 3.4.3 Aktuelle Bedarfe und Forschungslücken

Aus Abschluss dieser Literaturanalyse sollen die gefundenen Forschungsbedarfe und -Lücken zur Dokumentation aufgelistet werden, auch wenn sie nicht alle in dieser Arbeit behandelt werden.

Insgesamt werden vier Meta-Literaturanalysen Thies et al. (2019); Zarte et al. (2019); Ansari und Daxini (2021); Suzanne, N. Absi et al. (2020) aus den letzten fünf Jahren herangezogen. Diese behandeln insgesamt 549 Papers und heben folgende Herausforderungen hervor, welche für RPS und dem Übergang zu einem zirkulären Ansatz durch Schließen von Materialkreisläufen aus heutiger Sicht noch erschweren:

- Ausgehend von den drei Säulen der Nachhaltigkeit, Ökologie, Ökonomie und Soziologie (Triple Bottom Line oder auch als TBL oder 3BL bezeichnet) ergeben aktuelle Untersuchungen, dass auf operativer Ebene Entscheidungsfindungen hauptsächlich von der Integration von Umwelt und Ökonomie getrieben wird (Thies et al. (2019)).
- Die meisten Studien fokussieren die Reduzierung des Energieverbrauchs und der Energiekosten, nur wenige haben die Reduzierung von Emissionen und Abfällen als Ziel (Zarte et al. (2019)).
- Integration qualitativer und semi-quantitativer (sozialer) Indikatoren sowie gleichzeitige Berücksichtigung globaler und lokaler Nachhaltigkeitsziele bleiben aus (Thies et al. 2019).
- Obwohl theoretische Methoden in einer Vielzahl diskutiert und publiziert wurden, stellt die Identifizierung und Auswahl von Nachhaltigkeitsindikatoren für PPS eine ungelöste Herausforderung dar (Zarte et al. (2019)).
- Es herrscht ein Mangel an exakten Lösungsmethoden für das Losgrößenproblem in der Produktionsplanung mit Remanufacturing, als auch zu wenig theoretische und praktische Aufmerksamkeit für die Koordination zwischen Zerlegung, Wiederaufbereitung und Wiederausammenbau (Ansari und Daxini 2021).
- Es wurden nur schwache Verbindungen mit industriellen Anwendungen wahrgenommen, wodurch nur wenige reale Anwendungen zu finden sind (Ansari und Daxini (2021)).

## 4 Entwicklung der Vorgehensweise

Nachdem nun ein Einblick in die theoretischen Grundlagen ein Verständnis für die Begriffe sowie der Stand der Forschung einen Überblick über die Anwendungen aus der akademischen Literatur vorhanden ist, soll im Folgenden die genaue Vorgehensweise zur Beantwortung der weiteren Forschungsfragen geschildert werden.

### Leitlinien von Hevner et al. (2004)

Um die Anforderungen an diese Forschung zu erläutern, welche eine verstärkte Bindung zur Industrie fokussiert, sollen die sieben Leitlinien aus Hevner et al. (2004) angeführt werden:

- **Leitlinie 1: Design als Artefakt**  
Designwissenschaftliche Forschung muss ein brauchbares Artefakt in Form eines Konstrukts, eines Modells, einer Methode oder einer Anwendung hervorbringen.
- **Leitlinie 2: Problemrelevanz**  
Ziel der designwissenschaftlichen Forschung ist es, technologiebasierte Lösungen für wichtige und relevante Unternehmensprobleme zu entwickeln.
- **Leitlinie 3: Bewertung des Designs**  
Der Nutzen, die Qualität und die Wirksamkeit eines Design-Artefakts müssen durch gut durchgeführte Evaluierungsmethoden rigoros nachgewiesen werden.
- **Leitlinie 4: Beiträge der Forschung**  
Wirksame designwissenschaftliche Forschung muss klare und überprüfbare Beiträge in den Bereichen Design-Artefakt, Design-Grundlagen und/oder Design-Methoden liefern.

- **Leitlinie 5: Strenge der Forschung**

Designwissenschaftliche Forschung stützt sich auf die Anwendung strenger Methoden sowohl bei der Konstruktion als auch bei der Bewertung des Design-Artefakts.

- **Leitfaden 6: Design als Suchprozess**

Die Suche nach einem wirksamen Artefakt erfordert den Einsatz der verfügbaren Mittel, um die gewünschten Ziele zu erreichen und gleichzeitig den Gesetzen des Problemumfelds gerecht zu werden.

- **Leitlinie 7: Kommunikation der Forschung**

Designwissenschaftliche Forschung muss sowohl für technologieorientierte als auch für managementorientierte Zielgruppen effektiv präsentiert werden.

### Prozessmodell von Peffers et al. (2007)

Um diesen sieben Leitlinien gerecht zu werden orientiert sich das Vorgehen an dem vom Peffers et al. (2007) entwickelten 6-Schritte Prozessmodell, welches ebenfalls aus diesen Leitlinien entstand. Bevor die Umsetzung dieser Schritte erläutert wird, sollen noch die Schritte selbst, sowie Peffers et al. (2007) es vorschlägt beschrieben werden:

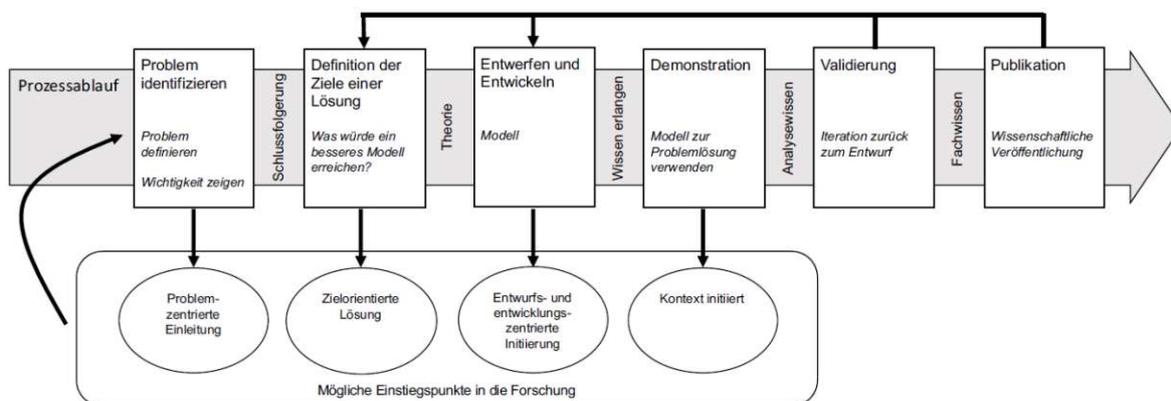


Abbildung 4.1: Prozessmodell nach Peffers et. al. 2007

- **Schritt 1: Problemidentifizierung**

Hierbei wird das spezifische Forschungsproblem definiert und der Wert einer Lösung begründet. Da die Problemdefinition zur Entwicklung eines Artefakts verwendet wird, welche eine effektive Lösung bieten kann, kann es nützlich sein, das Problem konzeptionell zu atomisieren, damit die Lösung seine Komplexität erfassen kann. Die Begründung des Wertes einer Lösung erfüllt zwei Zwecke: Sie motiviert den

Forscher und das Publikum der Forschung, die Lösung zu verfolgen und die Ergebnisse zu akzeptieren, und sie hilft, die mit dem Verständnis des Forschers für das Problem verbundene Argumentation zu verstehen. Zu den Ressourcen, die für diese Tätigkeit erforderlich sind, gehören Kenntnisse über den Stand des Problems und die Bedeutung seiner Lösung.

- **Schritt 2: Definition der Ziele einer Lösung**

Aus der Problemdefinition und dem Wissen darüber werden Ziele einer Lösung abgeleitet. Die Ziele können quantitativ sein, z.B. Bedingungen, unter denen eine wünschenswerte Lösung besser wäre als die derzeitige, oder qualitativ, z.B. eine Beschreibung, wie ein neues Artefakt Lösungen für bisher nicht behandelte Probleme unterstützen soll. Die Ziele sollten rational aus der Problemspezifikation abgeleitet werden. Zu den dafür erforderlichen Ressourcen gehören Kenntnisse über den Stand der Probleme und der derzeitigen Lösungen, falls vorhanden, sowie deren Wirksamkeit.

- **Schritt 3: Entwerfen und Entwicklung**

Erstellen von Artefakten, welche potenziell Konstrukte, Modelle, Methoden sein können. Konzeptionell kann ein Artefakt der Designforschung jedes gestaltete Objekt sein, bei dem ein Forschungsbeitrag in das Design eingebettet ist. Diese Tätigkeit umfasst die Bestimmung der gewünschten Funktionalität und der Architektur des Artefakts und die anschließende Erstellung des eigentlichen Artefakts. Zu den Ressourcen, die auf dem Weg von den Zielen zum Entwurf und zur Entwicklung benötigt werden, gehört auch das Wissen über die Theorie, die in eine Lösung einfließen kann.

- **Schritt 4: Demonstration**

Demonstration der Verwendung des Artefakts zur Lösung eines oder mehrerer Fälle des Problems. Dies könnte die Verwendung in Experimenten, Simulationen, Fallstudien, Beweisen oder anderen geeigneten Aktivitäten beinhalten. Zu den für die Demonstration erforderlichen Ressourcen gehören effektive Kenntnisse über die Verwendung des Artefakts zur Lösung des Problems.

- **Schritt 5: Validieren**

Beobachten und messen, wie gut das Artefakt eine Lösung des Problems unterstützt. Diese Aktivität beinhaltet den Vergleich der Ziele einer Lösung mit den tatsächlich beobachteten Ergebnissen der Nutzung des Artefakts in der Demonstration. Sie erfordert Kenntnisse der relevanten Metriken und Analysetechniken. Je nach Art des

Problembereichs und des Artefakts kann die Bewertung viele Formen annehmen. Sie könnte z.B. einen Vergleich der Funktionalität des Artefakts mit den Lösungszielen aus Aktivität zwei oben, objektive quantitative Leistungsmessungen, wie Budgets oder produzierte Artikel, die Ergebnisse von Zufriedenheitsumfragen, Kundenfeedback oder Simulationen beinhalten. Sie könnte auch quantifizierbare Maßstäbe für die Systemleistung enthalten, wie z.B. die Reaktionszeit oder die Verfügbarkeit. Konzeptionell könnte eine solche Bewertung jeden geeigneten empirischen Nachweis oder logischen Beweis beinhalten. Am Ende dieser Aktivität können die Forscher entscheiden, ob sie zu Schritt drei zurückkehren, um zu versuchen, die Effektivität des Artefakts zu verbessern, oder ob sie mit der Kommunikation fortfahren und die weitere Verbesserung späteren Projekten überlassen. Die Art des Forschungsortes kann bestimmen, ob eine solche Iteration durchführbar ist oder nicht.

- **Schritt 6: Publikation**

Kommunikation des Problems und seiner Bedeutung, des Artefakts, seines Nutzen und seiner Neuartigkeit, die Strenge seines Designs und seiner Effektivität gegenüber Forschern und anderen relevanten Zielgruppen.

### 4.1 Konzeption der Methode

Wie die einzelnen oben beschriebenen Prozessschritte von Peffers (2007) in dieser Arbeit umgesetzt sind, soll folglich erklärt werden:

#### Problemidentifikation

Die Problemidentifikation erfolgt beim Erstellen des Exposé mit einer Literaturanalyse von Suzanne, N. Absi et al. (2020); Ansari und Daxini (2021) in der, wie bereits erwähnt folgende Forschungslücken bearbeitet werden möchten:

- RPS weisen in der wissenschaftlichen Literatur eine schwache Verbindungen mit industriellen Anwendungen auf (Suzanne, N. Absi et al. (2020)).
- Optimierungen von RPS sollen durchgeführt werden sollen, bei der Hersteller an der Wiederaufbereitung mehrerer Produkte beteiligt sind und das System Unsicherheiten berücksichtigt (Ansari und Daxini (2021)).

### **Definition der Ziele**

Auch dieser Schritt wurde bereits in 1.3 Forschungsfrage und Forschungsziele beschrieben, wobei das Hauptziel dieser Arbeit die Verbrauchsreduzierung von energie- und kostenintensiven Neuteilen bei einem industriellen Wiederaufbereiter darstellt.

Zudem soll ein Vorgehen zur Optimierung von RPS, unter Berücksichtigung der unsicheren Qualität der rückgeführten Produkte sowie deren Variantenvielfalt, entwickelt werden.

Untergeordnet versucht diese Arbeit:

- eine stärkere Verbindungen mit industriellen Anwendungen wahrzunehmen sowie
- Unsicherheiten aus der Realität in die Optimierung mit einzubinden.

### **Entwickeln und Entwerfen**

In diesem Schritt findet die Frage Antwort, wie durch einen genetischen Algorithmus ein Produktionsplan optimiert werden kann. Dabei werden die vom Algorithmus typischen Formen der Abänderung des Produktionsplanes untersucht, welche in „Mutation“ und „Einzelkreuzung“ unterteilt werden können. In diesem Schritt wird ausgehend von Li (2019) im folgenden Kapitel 4.2 ein Algorithmus gestaltet, welcher nach dem Prinzip des genetischen Algorithmus funktioniert und auf den Fall der gegebenen Remanufacturing Anlage adaptiert wird.

### **Demonstrieren**

Hier wird die Ausformulierung in Python des genetischen Algorithmus unternommen, sowie auch die diskrete Simulation in Anylogic erstellt. Weiters wird auch die Kommunikation unter den beiden Programmiersprachen erörtert, sodass eine Validierung des genetischen Algorithmus im nächsten Schritt erfolgen kann.

### **Validierung**

In der Validierung werden die Ergebnisse der Optimierung mit jenen aus der Realität gegenübergestellt, um eine Verbesserung der kosten- und energieintensiven Neuteilen für den realen Industriefall festzustellen. Zu genaueren Erläuterung der Validierung wird eine Simulation von einem realen RPS erstellt, welche ebenfalls einer Validierung nach VDI 3633 durchläuft, ehe sie mit dem GA verbunden wird. Es finden in dieser Arbeit daher zwei voneinander unabhängige Validierungen statt, nämlich jene der Simulation, die zur weiteren für Validierung dient und die Validierung des GAs.

## Publizieren

Neben der Publikation dieser Diplomarbeit über die Technische Universität Wien wird auch eine Kurzfassung der vorgestellten Vorgehensweise sowie deren erbrachte Ergebnisse auf der „*Global Conference of Sustainable Manufacturing (GCSM) 2022*“ in Berlin eingereicht. Die GCSM 2022 wird gewählt, da sie als globales Forum für Akademiker, Forscher und Fachleute aus Universitäten, Forschungsinstituten und der Industrie auf der ganzen Welt dient, die sich mit Themen der nachhaltigen Fertigung befassen. Diese Konferenz zeichnet sich durch die Integration der Perspektiven des Wirtschaftsingenieurwesens, nachhaltiger Fertigungsanwendungen in Schwellen- und Entwicklungsländern sowie der Ausbildung und Entwicklung von Arbeitskräften zur Förderung der nachhaltigen Produktion aus.

Zusammengefasst kann das Vorgehen aus Tabelle 4.1 entnommen werden:

| Schritte von Peffers et al.2007 | Umsetzung  |
|---------------------------------|--|
| i) Problemidentifikation        | RPS haben nur schwache Verbindungen zu industriellen Anwendungen und die Optimierungen von RPS, bei der Hersteller an der Wiederaufbereitung mehrerer Produkte beteiligt sind und das System aus einer Reihe von Unsicherheiten besteht, wie z.B. unsichere Qualität |
| ii) Definition der Ziele        | Verbrauchsreduzierung von energie- und kostenintensiven Neuteilen bei einem industriellen Wiederaufbereiter  |
| iii) Entwickeln und Entwerfen   | einen GA für den gegebenen industriellen Anwendungsfall formulieren  |
| iv) Demonstrieren               | Implementierung des GAs in Python mit Anylogic Simulation  |
| v) Validierung & Publizieren    | Validierung des GAs mit Simulationen und industriellen Realdaten   |
| vi) Publizieren                 | Veröffentlichung der Ergebnisse  |

Tabelle 4.1: Umsetzung des Phasenmodells nach Peffers et. al (2007)

## 4.2 Formulierung der Vorgehensweise

Auf der Grundlage der Evolutionstheorie und der Darwin'schen Theorie des Überlebens des Stärkeren wurde das Konzept des GAs von Holland (1975) vorgeschlagen.

GAs sind seither weitverbreitet und auf kombinatorische sowie andere Optimierungsprobleme, wie z.B. Planungsprobleme, angewandt worden. Einer der bemerkenswerten Vorteile von GAs besteht darin, dass sie schnell und effizient eine gute Lösung für eine Zielfunktion in einem komplexen Lösungsraum finden, jedoch, und das ist ihr Nachteil, GAs möglicherweise in einem lokalen Optimum gefangen bleiben, was als vorzeitige Konvergenz bezeichnet wird (Li et al. (2019)). Wie in 2.2.3 Optimierungsalgorithmen in der PPS erwähnt, zählen GAs zu den Populationsalgorithmen, bei denen eine Population modifiziert wird um in der Optimierung iterativ voranzukommen. Traditionelle GAs bestehen im Allgemeinen aus drei genetischen Operatoren, die Selektions-, Kreuzungs- und Mutationsoperatoren, die eine wichtige Rolle für die Leistung des Algorithmus spielen (Li et al. (2019)).

In diesem Vorgehen wird ein Monatsproduktionsplan des Gasmotorenherstellers als Population P1 (siehe Abbildung 4.2) definiert, wobei jedes Produkt (in Abbildung 4.2 mit  $A_1, B_1, C_1$  gekennzeichnet) in diesem Plan ein einzelnes Chromosom des GAs darstellt (Ding et al. (2019)). Fitness ist dabei ein Maß für die Anpassungsfähigkeit einer Art an ihren Lebensraum. Die Größe der individuellen Fitnesswerte bestimmt die Stärke der eigenen Qualität, das heißt, je größer die Fitness ist, desto besser ist die Qualität des Chromosoms, mit anderen Worten, das Chromosom ist näher an der Lösung des Problems.

Zum grundsätzlichen Ablaufs einer GA Iteration zählt die Initialisierung einer Population, welche eine zufällige Startreihenfolge des Planes aufweist. Anschließend wird durch eine Zielfunktion der Fitnesswert dieser Startpopulation erörtert. Danach erfolgt die erste GA-Operation, nämlich die Kreuzung. Hierbei wird an einer zufälligen Stelle des Produktionsplan ein „Schnitt“ durchgeführt und der Anfangs und Endteil werden vertauscht.

In Li et al. (2019)) und auch in weiterer Literatur werden oft zwei Populationen miteinander gekreuzt, wie es auch in der Natur bei zwei Elternteilen der Fall ist, wenn sie Nachwuchs generieren. In dieser Arbeit wird eine einfache Kreuzung einer Population mit sich selber formuliert, was mit einem Zwitterverhalten, wie es auch Schnecken aufweisen, vergleichbar ist.

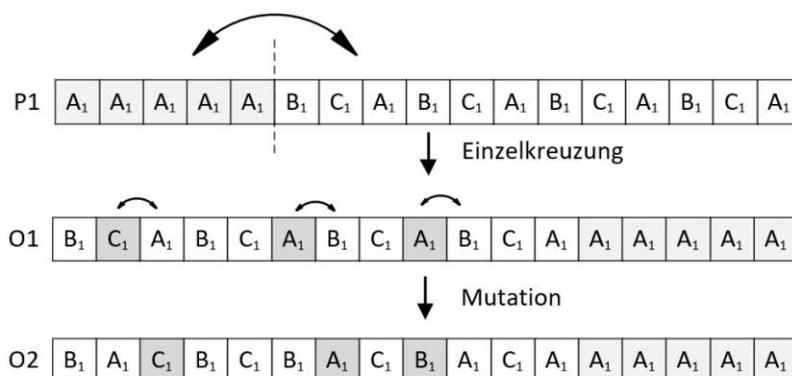


Abbildung 4.2: Einzelkreuzung und Mutation einer Population (GA-Operatoren)

Nach der Kreuzung folgt die Mutation, bei der abhängig von einer Mutationsrate zufällig Chromosomen aus dem Produktionsplan entnommen werden und mit ihren nächstgelegenen Nachbarn vertauscht werden. Anschließend wird durch die Zielfunktion ein neuer Fitnesswert dieser neuen modifizierten Population O1 und O2 (O aus dem Englischen von *Offspring* bezeichnet und *Nachwuchs* bedeutend) erstellt. In der Selektion werden nun die Fitnesswerte der Populationen verglichen, wobei wenn es sich um eine Minimierungsfunktion handelt. Jene Populationen mit den geringsten Fitnesswerten „gewinnen“. Dieser allgemeine Ablauf des GAs, angelehnt an Li et al. (2019) kann in Abbildung 4.3 zur besseren Veranschaulichung entnommen werden.

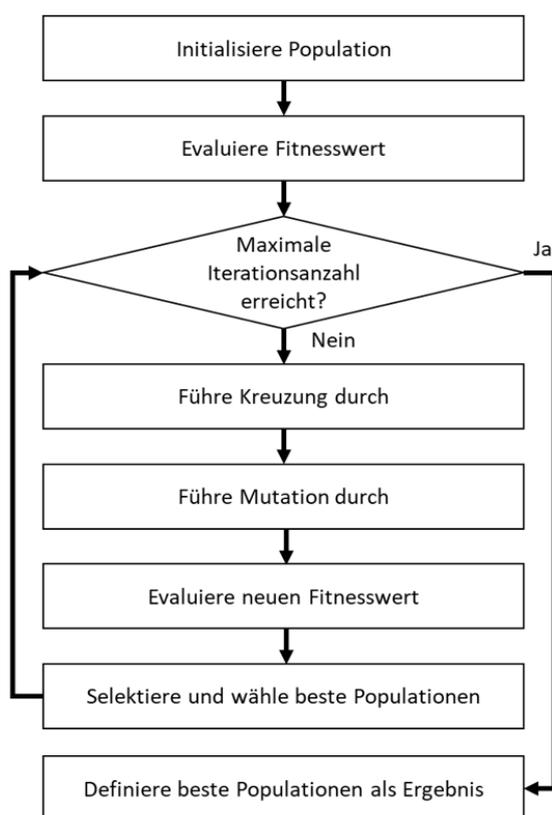


Abbildung 4.3: allgemeines GA-Ablaufdiagramm

Da in dieser Arbeit der Fitnesswert von einer diskreten Ereignissimulation (DES) berechnet wird, bedarf es einer ausführlicheren Beschreibung als nur den allgemeinen Ablaufplan in Abbildung 4.3. Dieser Fall tritt auch häufig vor und wird in der VDI 3633 (2020) (S. 5) unter „Optimierung folgt der Simulation“ folglich beschrieben:

*„In diesem Fall steht ein exaktes Optimierungsmodell zur Verfügung, aber es umfasst Parameter, die nicht direkt verfügbar sind, sondern zuvor mithilfe eines Simulationsmodells ermittelt werden müssen. Bei der zweiten Variante, der hierarchischen Verknüpfung, wird während des Ablaufs der Optimierungs- oder Simulationskomponente die Simulations- oder Optimierungskomponente als Unterkomponente aufgerufen“ (VDI 3633 (2020a))*

Bevor auf die Verknüpfung des GAs und der DES eingegangen wird, soll noch eine kurze Erklärung von DES gegeben werden. In der DES wird ein Modell aufgebaut, bei dem Prozesse in diskrete Ereignisse unterteilt werden und durch eine interne Simulationsuhr ablaufkontrolliert erfolgen (Page, (1991)). Neben DES kann auch eine agentenbasierte Simulation (ABS) als Modellaufbau dienen, wobei hier ein Modells als Multiagentensystem

formuliert wird, d.h. als ein System mit interagierenden, autonomen Entitäten (Agenten) in einer Umwelt, die ebenfalls Teil des Modells ist Law (2013).

Folgend soll vorweg ein Einblick in den Aufbau der Programmierung gegeben werden, welcher im Detail im kommenden Kapitel 4.3 Umsetzung beschrieben wird.

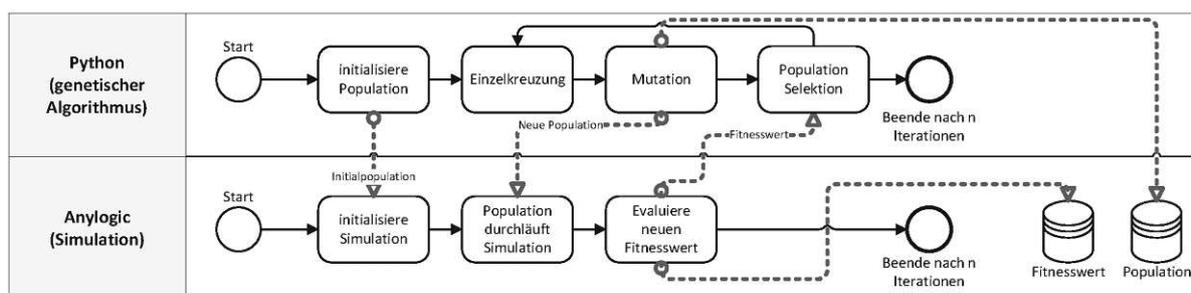


Abbildung 4.4: detaillierter GA-Ablauf

In Abbildung 4.4 ist der detaillierte Ablauf zwischen GA und DES dargestellt und soll zusätzlich zum bereits bekannten allgemeinen Ablauf eine Erweiterung zum besseren Verständnis dienen, wie die Simulation konzeptionell den Fitnesswert berechnet. Wichtig an der Stelle ist die räumliche Trennung der Prozesse „Populationsinitialisierung“, „Einzelkreuzung“ „Mutation“ von der Fitnesswertevaluierung, welche auch in der Umsetzung eine Schnittstelle zwischen den Programmiersprachen Python und Java (auf welcher die Simulationsumgebung Anylogic aufgebaut ist) bedeutet, wodurch in der Umsetzung gewisse Herausfordernden für diese Arbeit aufgrund ihrer unterschiedlichen Grundkonzipierung entstehen. Der Grund jedoch, warum diese Herausforderungen dennoch in Kauf genommen werden, ist die Verwendung der jeweiligen Stärken der einzelnen Programmiersprachen. So bietet Anylogic eine sehr übersichtliche Darstellung von DES. Wenn die DES vom Umfang ein gewisses Maß (z.B: mehr als nur eine Produktionslinie) übersteigen, sind sie in Python (z.B: mit der Bibliothek Simpy umgesetzt) sehr aufwendig auf ihre Aussagekräftigkeit zu prüfen sind. Hingegen bei der Implementierung eines GAs zeigt Python aufgrund der Open Source Philosophie, welche viele Beispiele für GAs bereits auffinden lässt und auch eine einfachere Handhabung von den Datentypen aufweist, Vorteile gegenüber Anylogic. Um die Beschreibung des GA Ablaufs abzurunden, soll zusammengefasst festgehalten werden, dass dieser grundsätzlich dem Ablauf entspricht, welcher in Abbildung 4.3 dargestellt ist und eine DES-Erweiterung für die Berechnung des Fitnesswertes besitzt.

Um ein Bild von der genaueren Implementierung zu geben wird in folgenden Kapitel 4.3 Umsetzung der GA in Kombination mit der DES im Detail beschrieben.

## 4.3 Umsetzung Proof-Of-Concept

### 4.3.1 Umsetzung in Python

Für die Umsetzung in Python wurde die PyCharm Community Edition 2020.3 IDE verwendet. Zusätzlich werden am Anfang des Programmcodes die Zusatzbibliotheken `numpy` und `random` importiert, da auf ihre Funktionen zugegriffen wird. Wie oben beschrieben, werden für die Implementierung des GAs die jeweiligen Vorteile von Python und Anylogic ausgenutzt, weswegen es hier auch zu einer Schnittstelle zwischen zwei Programmiersprachen kommt. Bevor das Schnittstellenproblem im genaueren erklärt wird, sollen die GA-Operatoren der Populationsinitialisierung, Einzelkreuzung und Mutation beschrieben werden.

#### Initialisierung der Startpopulation

Bevor der GA iterativ versucht ein Optimum in der Produktionsplanungsreihenfolge zu finden, muss ihm eine zufällige Startpopulation bereitgestellt werden.

Dazu wurde der Produktionsplan so wie er vom Hersteller bekannt ist, einmal zufällig in seiner Reihenfolge vertauscht. Dazu wurde dieser in Microsoft Excel geöffnet und mit der Excel-eigenen Funktion der zufälligen Vertauschung durchlaufen.

#### Einzelkreuzung

Vorausgesetzt die Population des Produktionsplanes ist bereits in einem Array das Python lesen kann, wird der Schnitt innerhalb des Population an einer zufälligen Stelle gewählt. Dies wird bewerkstelligt, indem eine Zufallszahl gewählt wird, welche sich zwischen zwei angegebenen Grenzen befindet. Diese dürfen in unserem Fall Null und die Maximalanzahl der Chromosomen in der Population nicht unter-/ bzw. überschreiten. Ist die Zufallszahl gefunden, so wird an dieser Stelle der vordere Teil mit dem hinteren Teil des Produktionsplanes vertauscht und als neue Population definiert. Im folgendem Pseudocode kann diese Einzelkreuzung zusammenfasst werden:

---

**Algorithm 1:** Pseudocode für Einzelkreuzung

---

```

function EINZELKREUZUNG(pop, Grenze1, Grenze2)
  x = Zufallszahl(Grenze1, Grenze2)
  pop gekreuzt = pop[bis x] + pop[von x]
  return pop gekreuzt
end function

```

---

**Mutation**

Bei der Mutation muss zuerst eine Mutationsrate bestimmt werden. Diese kann im Verlauf der Iterationen des GAs verringert bzw. vergrößert werden, wenn zu einem Optimum hin iteriert werden soll bzw. von einem lokalen Optimum wegiteriert werden soll.

Ähnlich wie bei der Einzelkreuzung spielt auch bei der Mutation die Zufälligkeit der Positionen eine wichtige Rolle, nur sind es bei der Mutation nun nicht nur eine, sondern entsprechend der Mutationsrate *mr*-viele Stellen die zufällig im Produktionsplan ausgewählt werden. Im Anschluss werden diese Stellen mit ihren Nachbarn vertauscht und als mutierte Population zurückgegeben.

Im folgendem Pseudocode kann diese Mutation zusammenfasst werden:

---

**Algorithm 2:** Pseudocode für Mutation

---

```

mr = Mutationsrate in Prozent

function MUTATION(pop, mr)
  ausgewählteStellen = wähle mr Positionen an zufälligen Stellen von pop
  for i in Länge von ausgewählteStellen do
    pop mutiert = vertausche ausgewählteStellen mit Nachbarsstellen

  return pop mutiert
end function

```

---

Bevor auf das Schnittstellenproblem zwischen Python und Anylogic eingegangen wird, soll im Folgenden noch die DES in Anylogic beschrieben werden.

### 4.3.2 Umsetzung in Anylogic

Da die Simulation eigentlich zur Validierung des GAs dient und diese erst im späteren Kapitel 5 folgt, der Aufbau der Simulation dennoch stark mit der Umsetzung und dem GA

verbunden ist wird hier nun etwas vorgegriffen, um die DES im Detail zu beschreiben. In Kapitel 5 folgt anschließend die Beschreibung der tatsächlichen Validierungsdurchführung, wobei die Simulation als Werkzeug dabei schon vorausgesetzt wird. Ebenfalls wird auch erst dort die Validierung der Simulation selbst beschrieben, um hier genügend Raum für die Implementierung in Anylogic vorzunehmen. Bei der Erstellung der Simulation wird das Vorgehen nach der Richtlinie der VDI 3633 (2020b) gewählt, welche bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Simulationsstudien zur Untersuchung von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen dient. Diese Richtlinie beinhaltet dabei folgende Schritte (VDI (2020b)):

- Aufgabendefinition
- Systemanalyse
- Modellformalisierung
- Implementierung
- Experimente und Analyse
- Datenbeschaffung und Datenaufbereitung

### **Aufgabendefinition**

Diese wurde schon des Öfteren erwähnt und behandelt zweckdienlich die Validierung des GAs. Zudem wird aus der Realität ein Remanufacturing Werk eines Gasmotorenherstellers simulativ abgebildet.

### **Systemanalyse**

In der vorliegenden Fertigung werden Gussgehäuse von rückgeführten Zylinderköpfen nach Erreichen des End-of-Life-Status zerlegt, bearbeitet und wieder montiert. Dadurch entstehen neue aufbereitete Zylinderköpfe, die essenzielle Baugruppen darstellen, um Gasmotoren zu überholen und können für eine maximale Dauer von vier Produktlebenszyklen in Gasmotoren genutzt werden. Der unsichere Zeitpunkt sowie die Qualität und Wiederverwendbarkeit der rückgeführten Komponenten und Baugruppen stellen den Hersteller vor besondere Probleme. Um Angebot und Nachfrage im Gleichgewicht zu halten, muss sowohl erhöhte Lagerhaltung, Vorhaltung von erhöhten und kurzfristig verfügbaren Produktionskapazitäten sowie der regelmäßige Einsatz von kostenintensiven Neuteilen in Kauf genommen werden. Dadurch entstehen für den Hersteller monetäre Verluste und Verschwendungen in der Produktion sowie Engpässe bei der Materialbereitstellung für

die Gasmotorenmontage.

Die durchlaufenen Produkte sind dabei Zylinderköpfe, welche in drei verschiedenen Baureihen und in insgesamt elf verschiedenen Varianten produziert werden. Jeder dieser Zylinderköpfe kann maximal dreimal in einer Maschine verbaut werden, ehe er als Schrott ausgeschieden wird. Für jede Baureihe der Zylinderköpfe gibt eine eigene Linie in der Remanufacturing Halle, wobei diese Linien nicht ident sind. Die grundsätzlichen Prozesse dieser Remanufacturing-Anlage sind die Zerlegung, Bearbeitung, Waschung und Montage. Die Linien B und C wie unter der Modellformalisierung in Abbildung 4.5 erkennbar ist teilen sich die Bearbeitung sowie die Montage, wobei die Zerlegung und die Waschmaschine wird von allen drei Baureihen geteilt.

Die Fertigung arbeitet dabei in einem Zweischichtmodell wobei die Zerlegung, Bearbeitung und Waschmaschine in einem zweimal acht Stunden Schicht Betrieb fährt und die Montage in einen einmal acht Stunden Betrieb.

Wie in den Forschungszielen abgebildet ist die Unsicherheit gegenüber dem Zustand in welchem der Zylinderkopf im Werk ankommt ungewiss. Dies wird erst nach der Zerlegung bzw. auch der Bearbeitung klar, weswegen hier zwei Aussortierstellen den Schrott von den wiederverwendbaren Zylinderköpfen trennen.

Um den monatlichen Bedarf an zu produzierenden Gasmotoren decken zu können, werden vor der Montage Neuteile eingespeist, da die reine Verwendung von wiederverwendbaren Zylinderköpfen den Bedarf nicht deckt und die Montage auf voller Auslastung betrieben wird. In der Remanufacturing Halle durchlaufen die Maschinen nicht einzelne Zylinderköpfe, sondern sie werden gebündelt, wobei sich die Bündelgröße bei der Linie A und bei Linie B und C unterscheiden.

Die Zerlegung arbeitet im vier Takt-Rhythmus wie auch die Montage der Linie A und die Montage von Linie B und C montiert in einem drei Takt-Rhythmus. Die einzelnen Takt- und Prozessschrittzeiten, sowie die Ausschussrate des Schrotts wurden von dem Gasmotorenhersteller zur Verfügung gestellt.

## Modellformalisierung

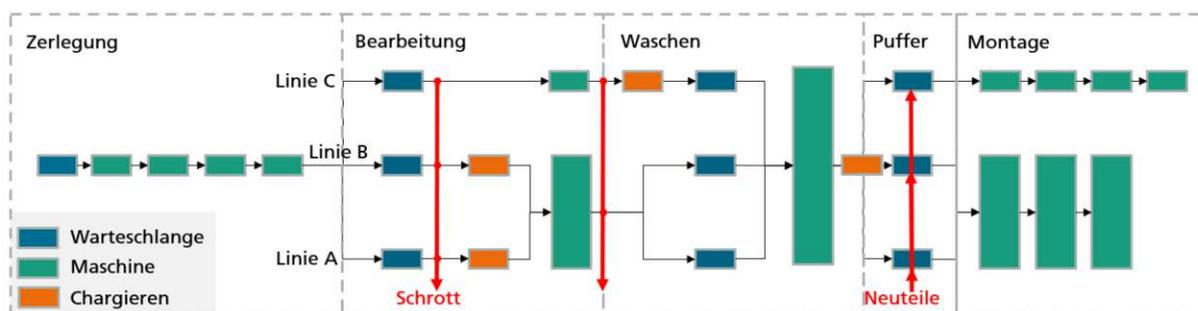


Abbildung 4.5: schematisches Simulationsmodell

Die oben beschriebene Systemanalyse wurde, wie in Abbildung 4.5 erkennbar formalisiert und schematisch dargestellt.

## Implementierung

Für die Implementierung der Simulation wurde die Anylogic Voll-Version 8.7.11, verwendet, welche kostenpflichtig zu erwerben ist.

Anylogic bietet die Möglichkeit vordefinierte Bausteine für die Simulation zu verwenden, wobei diese noch zusätzlich erweiterbar sind. Für diese Arbeit werden die Bausteine der Warteschlangen, Services (für Maschinen), Gabelungen (für die Aussortierung des Schrottes) sowie Verknüpfungen verwendet. Zusätzlich enthält die Simulation Funktionen, Variablen, Listen, Schnittstellen zu Excel und Python sowie Ereignisse. Die Maschinen, welche in Abbildung 4.5 grün dargestellt sind, können als Ressourcen angesehen werden, welche unter den gegebenen Schichtzeiten zur Verfügung stehen. Außerhalb der Schichtzeiten stehen sie, wie in der Realität still. Die Modellierung der Schichtzeiten ist ebenfalls von Anylogic als fertige Funktion vordefiniert und es bedarf nur der jeweiligen Zeiten zur Eingabe.

Das schematische Modell in Abbildung ist als DES aufgebaut, wobei einzelne Zylinderkopf-Agenten diese Umgebung durchlaufen. Diese Agenten wissen bestimmte Parameter, wie etwa Baureihe und Prozesszeiten auf, die sich von Variante zu Variante unterscheiden. Das DES-System weist hingegen die Unsicherheiten der zufälligen Ausschussrate auf, welche sich prozentuell über den gesamten Monat betrachtet mit den Angaben des Herstellers decken.

Zusammengefasst können die Agenten und Systemparameter Tabelle 4.2 entnommen werden.

| Zylinderkopfvarianten             | A <sub>1</sub>   | A <sub>2</sub>   | A <sub>3</sub>   | B <sub>1</sub>   | B <sub>2</sub>   | B <sub>3</sub>   | C <sub>1</sub>   | C <sub>2</sub>   | C <sub>3</sub>   | C <sub>4</sub>   | C <sub>5</sub>   |
|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Menge                             | n <sub>A1</sub>  | n <sub>A2</sub>  | n <sub>A3</sub>  | n <sub>B1</sub>  | n <sub>B2</sub>  | n <sub>B3</sub>  | n <sub>C1</sub>  | n <sub>C2</sub>  | n <sub>C3</sub>  | n <sub>C4</sub>  | n <sub>C5</sub>  |
| Bearbeitungszeiten                | t <sub>mA1</sub> | t <sub>mA2</sub> | t <sub>mA3</sub> | t <sub>mB1</sub> | t <sub>mB2</sub> | t <sub>mB3</sub> | t <sub>mC1</sub> | t <sub>mC2</sub> | t <sub>mC3</sub> | t <sub>mC4</sub> | t <sub>mC5</sub> |
| Montagezeiten                     | t <sub>aA1</sub> | t <sub>aA2</sub> | t <sub>aA3</sub> | t <sub>aB1</sub> | t <sub>aB2</sub> | t <sub>aB3</sub> | t <sub>aC1</sub> | t <sub>aC2</sub> | t <sub>aC3</sub> | t <sub>aC4</sub> | t <sub>aC5</sub> |
| Ausschussrate<br>nach Zerlegung   | srd <sub>A</sub> | srd <sub>A</sub> | srd <sub>A</sub> | srd <sub>B</sub> | srd <sub>B</sub> | srd <sub>B</sub> | srd <sub>C</sub> |
| Ausschussrate<br>nach Bearbeitung | srm <sub>A</sub> | srm <sub>A</sub> | srm <sub>A</sub> | srm <sub>B</sub> | srm <sub>B</sub> | srm <sub>B</sub> | srm <sub>C</sub> |

Tabelle 4.2: Agenten- u. Systemparameter der Simulation

Eine Abbildung der Simulationsoberfläche in Anylogic kann Abbildung 4.6 entnommen werden.

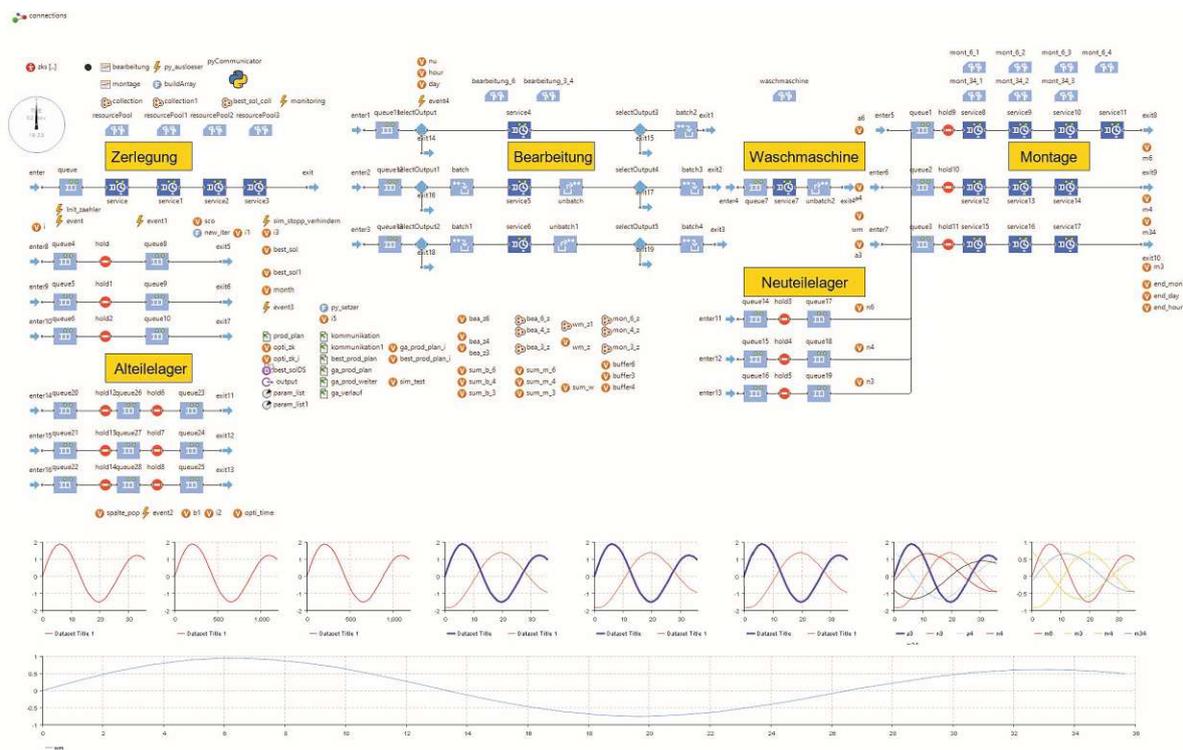


Abbildung 4.6: Anylogic Simulationsmodell

Neben den Beschrieben abgebildeten Prozessen sind in Abbildung 4.6 unten Diagramme ersichtlich die zur Überprüfung der Vertrauenswürdigkeit der Simulation beim Erstellen

gelten. Die Daten aus der Simulation werden weiter unten aufgearbeitet angeführt und erklärt. Die Prozessschritte „Experimente und Analyse“ und „Datenbeschaffung und Datenaufbereitung“ werden in Kapitel 5. Validierung behandelt.

### 4.3.3 Wechselwirkung zwischen Optimierung und Simulation

Um nun eine bessere Idee zu geben, wie die Simulation durch die Optimierung verbessert werden kann soll im Folgenden die Simulation in drei Stränge gedacht werden, welche aufgrund der Prozesszeiten unterschiedliche Geschwindigkeiten in ihrem Ablauf haben. Diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten resultieren aus den unterschiedlichen Bearbeitungszeiten der Maschine, sowie auch den unterschiedlichen Schichten, in denen sie arbeiten. Am schnellsten ist dabei der Fluss der Neuteile, welcher die Montage mit Neuteilen substituiert, falls der Bearbeitungsstrang zu langsam ist. Am zweitschnellsten ist die Montage selber, da diese den monatlichen Bedarf auf Volllast fahrend zu decken versucht. Zuletzt bleibt der Bearbeitungsstrang welche am langsamsten von den drei Strängen ist. Da dieser auch den Flaschenhals in dieser Produktion darstellt, soll die Optimierung genau diesen durch eine verbesserte Produktionsreihenfolge beschleunigen, um damit auch den Bedarf an Neuteilen zu entlasten. Die Montagegeschwindigkeit bleibt aufgrund der Volllastung von der Optimierung unberührt.

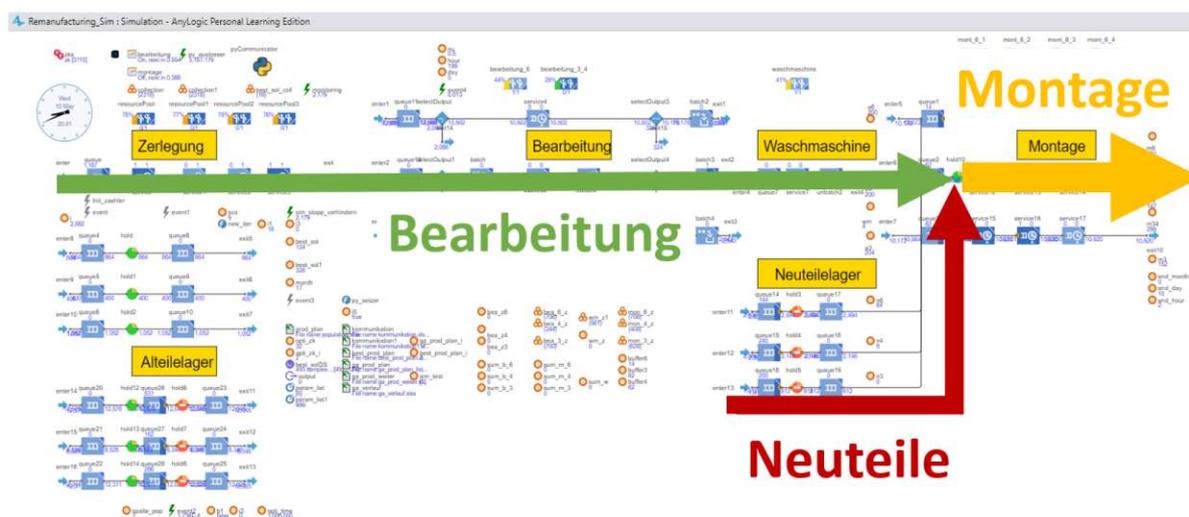


Abbildung 4.7: Optimierungseinfluss auf die Simulation

Zusammengefasst kann (geometrisch ausgedrückt und in Abbildung 4.7 dargestellt) gesagt werden, dass ein Teil der Neuteilegeschwindigkeit auf den Teil der Bearbeitungs geschwindigkeit übergeht und somit die Optimierung in der Simulation eine Verbesserung

hervorruft.

#### 4.3.4 Schnittstelle zwischen Python und Anylogic

Peyman et al. (2021) geben eine Beschreibung wie die Zusatzbibliothek „Pypline“ installiert und verwendet werden kann. Da es unterschiedliche Arten gibt, welche Umgebung wie aufgerufen werden kann, soll hier nochmal betont sein, dass Anylogic Funktionen von Python aufruft und ausführt. Python ist also Anylogic untergeordnet. Es gibt hierzu unterschiedliche Arten wie Anylogic Python aufruft, nämlich solche wo ganze Programmskripte von Python durch Anylogic ausgeführt werden und solche wo Python im Hintergrund der Anylogic Simulation mitläuft und interaktiv zu verstehen ist. Je nach Aufrufbefehl können beide Weisen angesteuert werden (Peyman et al. (2021)). Aufgrund der unterschiedlichen Arten wie Variablen und Arrays in den verschiedenen Programmiersprachen Java und Python definiert werden ergibt sich bei dieser Schnittstelle eine besondere Herausforderung, welche sich auch im Ausmaß der Lösungsfindung für diese Arbeit zeigte. Die Zusatzbibliothek Pypline bietet dazu eine Funktion *toJson* welche Datentypen unterschiedlicher Art in JSON Formate umwandelt. Dieses Format lässt sich von beiden Sprachen gut lesen, ohne dabei auf die unterschiedlichen Variabel-Konventionen anzuecken. Im Anhang dieser Arbeit ist die genaue Syntax in Java an Python für die Übergabe und das Einlesen von Arrays zwischen den beiden Sprachen aufzufinden.

### 4.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend wird in diesem Kapitel ein Vorgehen vorgeschlagen, welches sich an Peffers et al. (2007) und Li und Wang (2019) orientiert, um mit einer GA-Optimierung den Einsatz von energie- und kostenintensiven Neuteilen durch eine Produktionsplan-Reihenfolge-Optimierung zu minimieren. Gleichzeitig wird auch mittels der VDI 3633 (2020b) ein Vorgehen zur Validierung präsentiert, um festzustellen ob das vorgeschlagene Vorgehen auch die erwünschten Ergebnisse bereitstellt.

Somit ist auf die letzten beiden Forschungsfragen dieser Arbeit ein Konzept entwickelt, welches im folgenden Kapitel auf seine Eignung überprüft werden soll.

# 5 Validierung der Vorgehensweise

## 5.1 Validierung der Simulation

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben stehen noch die Prozessschritte der VDI 3633 „Experiment und Analyse“ sowie „Datenbeschaffung und Datenaufarbeitung“ offen, welche hier nun beschrieben werden sollen.

### **Experimente und Analyse (VDI 3633 (2020b))**

Zur Validierung der Simulation wird ein Monatsproduktionsplan des Herstellers herangezogen, in dem die genauen Stückzahlen der produzierten Varianten bekannt sind. Da es drei verschiedenen Baureihen (A, B, C) gibt, werden die verschiedenen Varianten innerhalb der Baureihe zusammengefasst betrachtet, wobei zwischen Neuteilen und Altteilen unterschieden wird. Diese Unterscheidung ist wichtig, da sie als Bewertungsgrundlage für die spätere Minimierung der kosten- und energieintensiven Neuteile durch den GA dient. Der GA ist in dieser Validierung von der Simulation entkoppelt, sodass nur die Simulation allein Ergebnisse liefert, um eine Verfälschung seitens einer verfrühten Optimierung auszuschließen.

Als Referenzwerte werden die Stückzahlen der Realität nach einem Monat mit denen der Simulation verglichen und die insgesamte Durchlaufzeit dabei gemessen, wobei die Simulation so lange läuft, bis die Stückzahlen aus der Realität erreicht sind. Die Produktionsreihenfolge stützt sich dabei auf die des Herstellers, wodurch gleichverteilt (sprich A,B,C,A,B,C,A,...) auf alle drei Linien produziert wird.

Als erste Hypothese soll hier angemerkt werden, dass aufgrund der unterschiedlichen Stückzahlen, welche die Baumreihen aufweisen, eine Gleichverteilung auf die Linien kein Optimum der Gesamtanlage bedeuten kann. Durch die Streuung der verschiedenen Bearbeitungszeiten, wird diese Hypothese noch bestärkt, wobei einen Beweis erst die Validierung des GAs liefert.

|            | $A_{neu}$ | $B_{neu}$ | $C_{neu}$ | $A_{alt}$ | $B_{alt}$ | $C_{alt}$ | $Sum_{Monat}$ | $Sum_{neu}$ |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-------------|
|            | (Stk)         | (Stk)       |
| Realität   | 200       | 240       | 150       | 480       | 220       | 620       | 1910          | 590         |
| Simulation | 200       | 240       | 150       | 480       | 220       | 620       | 1910          | 590         |

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Simulation gegenüber den Industrie-Daten

In der Validierung der Simulation ist ein Unterschied in der Gesamtdauer beim Durchlauf aller Zylinderköpfe zu bemerken, wodurch die Simulation langsamer als die Realität ist. Insgesamt benötigt die Simulation 22 Stunden (auf den Monat betrachtet) länger als die Realität. Dies bedeutet eine Verzögerung um 4,44% bei 496 Betriebsstunden. Diese Betrachtung bezieht sich auf einen Monat, bei einem zweimal acht Stunden-Schichtbetrieb. Dieser geringe Unterschied validiert das DES-Modell, womit es weiter für die Validierung des GAs verwendet, werden kann.

### Datenerfassung und Aufbereitung (VDI 3633 (2020b))

In diesem letzten Prozessschritt sollen noch die Verläufe der Simulation, die aus Anylogic dokumentiert worden sind, gezeigt und erläutert werden.

Abbildung 5.1 zeigt drei Graphen, wobei die orangenen Graphen den Neuteilebedarf zeigen (von links nach rechts gesehen die Linien C, B, A) und die blauen Graphen den Altteilebedarf. Diese Graphen sind von Interesse, da sie zeigen, wann der Bedarf an Neuteilen auf den unterschiedlichen Linien stattfindet, da sich diese untereinander unterscheiden. Dieser Unterschied resultiert durch unterschiedlichen Prozesszeiten sowie Quantitäten, welche die Linien untereinander aufweisen sowie die gleichzeitige Verwendung von Maschinen, wie etwa der Waschmaschine.

In Anbetracht der Graphen fällt auf, dass die Linie C und A anfangs einen stärkeren Bedarf an Neuteilen aufweisen, welcher danach abklingt. Linie C weist dabei einen so starken Bedarf auf, dass sie jenen der Altteile übertrifft, wodurch für kurze Zeit mehr Neuteile montiert werden als Altteile. Dies ist abzuleiten an dem steileren Anstieg von der orangenen gegenüber der blauen Kurve.

Bei Linie B ist der Bedarf an Neuteilen über den Monat betrachtet konstanter als bei C und A, jedoch sind bei B auch am wenigsten Zylinderköpfe im Umlauf, nämlich nur ein Drittel von dem was auf Linie C und A produziert wird. Es könnte sein, dass sich bei höherer Quantität der B-Köpfe ein zu C und A ähnlicher Bedarfsverlauf ergeben würde.

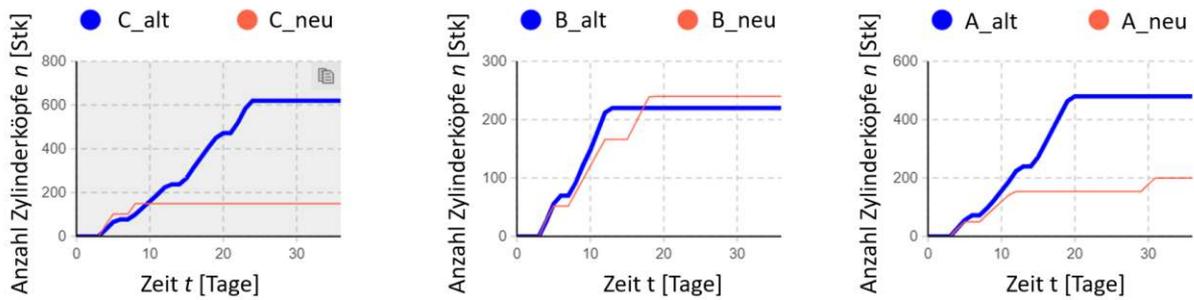


Abbildung 5.1: Alt- zu Neuteilverhältnis

In Abbildung 5.2 ist eine Gegenüberstellung von der Montage zu sehen wobei hier einerseits die montierten Zylinderkopf-Verläufe einzeln dargestellt sind und andererseits Linie A und B zusammengefasst dargestellt ist, da sich diese die Montage teilen. Interessant hier war die Überprüfung der Vollauslastung, welche durch den ähnlich steilen Anstieg von Linie C und B+A und keiner groben Unterbrechung gegen ist. Die regelmäßig auftretenden Plateaus symbolisieren die Wochenenden, an denen nicht gearbeitet wird.

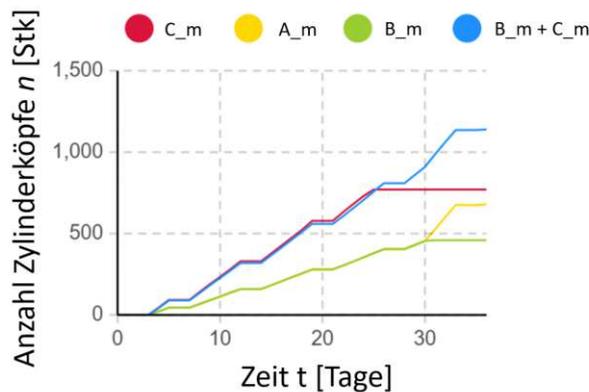


Abbildung 5.2: Montagekennlinien

In Abbildung 5.3 wird die Datenaufbereitung der Waschreihenfolge je Baureihe der Zylinderköpfe dargestellt. Der Graph ist so zu lesen, dass der Wert 6 einen Waschvorgang bei Linie C darstellt, der Wert 4 einen Waschvorgang auf Linie B und der Wert 3 einen Waschvorgang bei Linie A. Hier fällt auf, dass anfangs gleichmäßig unter den drei Linien gewaschen wird, wobei gegen Ende nur mehr zwischen A und C gewechselt wird. Das Fehlen von Linie B in diesem Abschnitt ist auf die schon bereits abgearbeitete Stückzahl zurückzuführen.

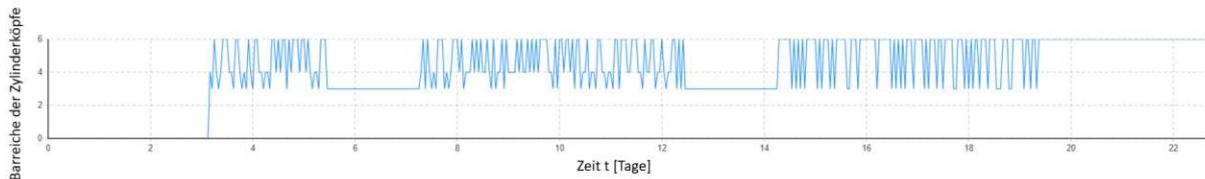


Abbildung 5.3: Reihenfolge der Waschmaschine

## 5.2 Validierung der Optimierung

Zur Validierung der Optimierung wird nun der GA laut Kapitel 4.1 mit der Simulation gekoppelt, wobei die Simulationsdauer innerhalb der Simulation auf 3500 Iteration eingestellt wird und, in Realzeit gemessen, 20 Minuten lang läuft.

Für diesen Zweck wird die Simulation, im Unterschied zur Validierung der reinen Simulation in eine Endlosschleife mit Abbruchkriterium formuliert. Für diese Umformulierung ist ein zusätzliches Altteil-Lager, welches in der Realität nicht auftritt, programmiert worden, um die Zylinderkopf-Agenten nach dem Durchlauf der DES virtuell lagern zu können. Dieser virtuelle Prozessschritt ist mit keiner Wartezeit innerhalb der Simulation verbunden, womit auch keine Verzögerung der Gesamtdurchlaufsdauer der Simulation auftritt.

Um eine Neuteile-Minimierung innerhalb der Simulation zu ermöglichen, ohne dabei die Gesamtanzahl der montierten Zylinderköpfe innerhalb der Baureihen zu verändern, kann der GA mehr Altteile als in der Realität einplanen. Dies ist notwendig, um das Verhältnis zwischen Altteilen und Neuteilen zugunsten der Altteilverwendung zu optimieren.

Die Mutationsrate ist auf 0,05 eingestellt und als konstant über alle Iterationen festgelegt. Da die Einzelkreuzung eine sehr große Veränderung des Produktionsplanes mit sich führt, wird diese nicht bei jeder Iteration durchgeführt, sondern nur bei jeder 10 Iteration, wenn zehnmal hintereinander kein besserer Fitnesswert gefunden wird. Der Fitnesswert ist anfangs auf 700 Neuteile festgelegt, womit ein schlechterer Wert als in der Realität angenommen wird, um ihn in Folge der Optimierung zu unterbieten.

Bei diesem Validierungsprozess werden folgende Daten gespeichert:

- die jeweiligen Produktionspläne, sofern sie einen vorherigen Fitnesswert unterbieten
- die Anzahl an benötigten Neu – und Altteilen je Variante
- der Verlauf des Fitnesswertes je Iteration
- die Gesamtanzahl der montierten Zylinderköpfe zur Überprüfung des durchlaufenen Produktionsplanes

Im Folgenden werden die Ergebnisse mit jenen der Simulation bzw. den realen Industriedaten verglichen und gegenübergestellt.

### 5.3 Ergebnisse der Optimierung

Bei den Ergebnissen wird nun die Frage behandelt, ob der GA den kosten- und energieintensiven Neuteilebedarf minimieren kann. Zudem werden wie erwähnt, die Neuteile je nach Variante und Iteration gezählt. Der beste Durchlauf, den der GA gefunden hat, soll im Folgenden dargelegt werden. Unter Tabelle 5.2 finden sich die Ergebnisse dieses besten Durchlaufs, der insgesamt 3500 Iterationen:

|                 | $A_{neu}$<br>(Stk) | $B_{neu}$<br>(Stk) | $C_{neu}$<br>(Stk) | $A_{alt}$<br>(Stk) | $B_{alt}$<br>(Stk) | $C_{alt}$<br>(Stk) | $Sum_{Monat}$<br>(Stk) | $Sum_{neu}$<br>(Stk) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| Industrie-Daten | 200                | 240                | 150                | 480                | 220                | 620                | 1910                   | 590                  |
| Simulation      | 200                | 240                | 150                | 480                | 220                | 620                | 1910                   | 590                  |
| GA              | 76                 | 204                | 36                 | 600                | 260                | 734                | 1910                   | 316                  |

Tabelle 5.2: Ergebnisse des GAs gegenüber der Simulation und den Industrie-Daten

Hierbei fällt eine deutliche Reduktion von 46,44% (1-[316 Stk./590 Stk.]) der benötigten Neuteile auf, womit der GA erfolgreich ist. Auf die jeweiligen Baureihen betrachtet, kann festgestellt werden das in Baureihe A die Anzahl an benötigten Neuteilen von 200 auf 76 zurückgegangen ist. Dies entspricht einer Reduktion von 62% (1-[76 Stk./200 Stk.]), also mehr als um die Hälfte. Auf Baureihe C bezogen kann die deutlichste Reduktion beobachtet werden, nämlich um 76% (1-[36 Stk./150 Stk.]). In Baureihe B ist der niedrigste Rückgang am Neuteilebedarf erkennbar mit nur 36 Neuteilen weniger. Aus

dieser Gegenüberstellung ist ersichtlich, dass die Reduktion des Neuteilebedarfs mit der insgesamten Menge an benötigten Stückzahlen (Neuteile und Alteile gemeinsam) einen Zusammenhang in der Optimierung zeigt. So werden in Baureihe A die meisten Zylinderköpfe benötigt und auch die meisten Neuteile reduziert im Vergleich zu Baureihe C, wo genau das Umgekehrte beobachtet werden kann. Die Hypothese, welche am Ende von der Simulations-Validierung steht und eine Gleichverteilung auf die Linien als Produktionsplan in Frage stellte, kann somit als bestätigt betrachtet werden. Eine graphische Darstellung, der in diesem Absatz beschriebenen Erkenntnisse kann in Abbildung 5.4 abgelesen werden.

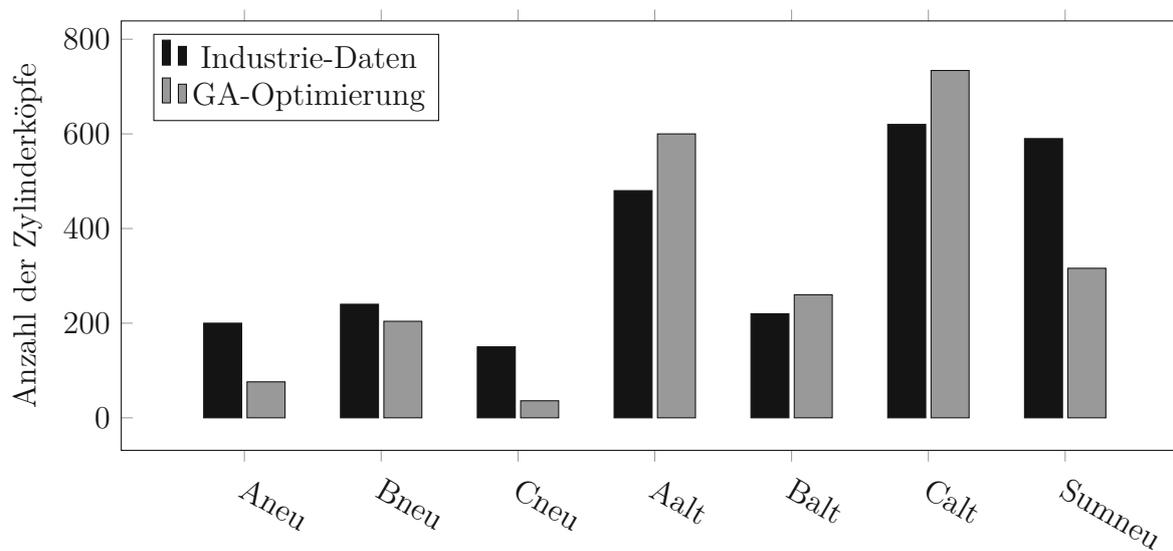


Abbildung 5.4: Graphische Darstellung der Neuteilebedarfsreduzierung je Baureihe

In Abbildung 5.5 ist nun der Verlauf des Fitnesswertes gezeigt. Bei diesem ist zu beobachten, dass der GA nach 366 Iterationen eine Lösung findet, welche dann die nächsten 3000 Iterationen nicht unterbietet werden kann, bis zur 3355 Iteration, wo noch zweimal ein besserer Wert gefunden wird.

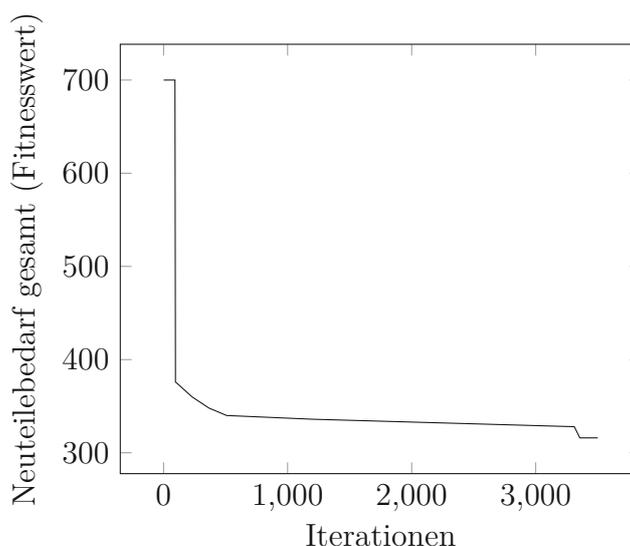


Abbildung 5.5: Fitnesswert-Verlauf der GA-Optimierung

## 5.4 Zusammenfassung

Ob das in Kapitel 4. vorgestellte Vorgehen auch valide ist, kann in diesem Kapitel festgestellt werden. So ist hier die Simulation für sich, sowie die Optimierung in Kombination mit der Simulation den realen Industriedaten gegenübergestellt und als valide festgestellt. Wodurch eine Antwort auf die letzten beiden Forschungsfragen dieser Arbeit sichergestellt ist.

Die Verschiebung von insgesamt 46,44% Neuteilen zu Altteilen durch die Optimierung lässt dem Hersteller nicht nur eine Kosteneinsparung zu, sondern auch eine Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung, da nun kein neuer Zylinderkopf in Form geschmolzen und bearbeitet werden muss, sondern ein bereits vorhandener wieder verwendet wird.

Leider konnten keine Zahlen bezüglich der CO<sub>2</sub>-Tonnen Einsparung je wiederverwendeten Zylinderkopf in dieser Arbeit erörtert werden, jedoch ist bekannt, dass der Gasmotorenhersteller allein durch sein Remanufacturing-Programm im Jahr 2021 1100 Tonnen CO<sub>2</sub> and 1510 Tonnen Material sparen konnte. Die derzeitige Gesamt-Remanufacturing-Rate beträgt im Jahr 2021 53%, wobei der Hersteller bis zum Jahr 2030 diesen Wert auf über 90% erhöhen möchte.

Die derzeitige Remanufacturing-Rate der Zylinderköpfe beträgt laut dem oben präsentierten Produktionsplan 69,11% (1-[590 Stk./1910 Stk.]). Durch die in dieser Arbeit vorgeschlagene GA-Optimierung kann der Wert weiter auf 83,46% (1-[316 Stk./1910 Stk.]) er-

hört werden. Die Differenz der beiden Remanufacturing-Raten entspricht 14,365% (83,46% - 69,11%) und kann nicht nur als Handlungsempfehlung dem Unternehmen gegenüber, als Möglichkeit der eigenen Zielverwirklichung für das Jahr 2030 präsentiert werden, sondern dient auch der Bemühung, CO<sub>2</sub> in der verarbeitenden Materialindustrie insgesamt zu reduzieren, um so durch technische Lösungen der Klimakrise entgegen zu wirken.

# 6 Diskussion und Ausblick

In diesem letzten Kapitel sind noch zusammenfassende Reflexionen der Ergebnisse zu finden, welche unter der Durchführung der Umsetzung, sowie deren Validierung auftraten. Um auch die Möglichkeiten für zukünftige Untersuchungen zu ebnet, schließt das letzte Kapitel mit Konzepten zur Weiterentwicklung dieses Vorgehens.

## 6.1 Diskussion der Ergebnisse

Um eine objektive Diskussion der Ergebnisse zu ermöglichen, sollen im Folgenden ausgehend von den Forschungsfragen die Ergebnisse reflektiert werden, um über die Erreichung der Forschungsziele eine Aussage treffen zu können. So unterteilte sich diese Arbeit auf folgende vier Forschungsfragen

1. Wie sieht der Stand der Forschung bezüglich RPS aus?
2. Welche Algorithmen werden zur Optimierung von RPS in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert?
3. Wie kann durch die Verwendung eines genetischen Optimierungs-Algorithmus (GA) der Einsatz von energie- und kostenintensiven Neuteilen durch eine Produktionsplanungs-Reihenfolge-Optimierung minimiert werden?
4. Wie kann die Anwendung eines GAs für RPS mit dem realen Produktionsplan eines Gasmotoren-Herstellers und einer diskreten Ereignissimulation (DES) validiert werden?

Auf *Frage 1* ist mit einer systematischen Literaturliteraturanalyse in Kapitel 3. ein Überblick über die aktuellen Forschungsvorhaben und ihre Vorgehen gegeben. Dabei ist zusammenfassend zu sagen, dass sich zahlreiche Bemühungen um das Losgrößenproblem einzelner Akteure sowie die Symbiose mehrerer Akteure zu lösen, ergeben, aber auch die Demontagesequenzierung in RPS einen erheblichen Anteil darstellt.

Überleitend auf *Frage 2* ist zu sagen, dass sich die gefundenen Algorithmen in den Kategorien der Gemischt ganzzahligen Optimierung, der konstruierten Heuristiken, der Populationsbasierten Optimierern sowie auch anderen Lösungsmethoden befinden. Wie auch in einer Literaturanalyse von Ansari und Daxini (2021) kann auch in dieser Suche der Genetische Algorithmus als der am häufigsten aufgefunderer Algorithmus beobachtet werden. Eine Liste aller gefunderer Algorithmen ist aus der Konzeptmatrix nach Webster und Watosn in Kapitel 3.3 abzulesen.

Für die *Frage 3* ist ein Vorgehen nach Peffers et al. (2007) entwickelt und implementiert, welches einem GA ermöglicht mit einer DES zu interagieren und diese auch zu optimieren. Die Umsetzung erfolgt dabei in einer Verkettung von Python und Anylogic, wobei die Stärken der jeweiligen Programmierung genutzt werden.

Um das vorgeschlagene Vorgehen zu validieren und auch eine Antwort auf *Frage 4* zu finden, werden die Simulation und der GA getrennt und in Kombination einem realen Industriefall gegenübergestellt und validiert. Bei dieser ist es wichtig, dass sich verschiedene Varianten des Produktes in der Simulation abbilden sowie auch Unsicherheiten aus der Realität, wie die unsichere Qualität der rückgeführten Produkte. Bei der durchgeführten Validierung, welche mit einem vorgegebenen Monatsproduktionsplanes des Herstellers durchlaufen ist, kann eine tatsächliche Verbesserung von 46,44% in den kosten- und energieintensiven Neuteilen für diesen Monat festgestellt werden.

Somit ist das Hauptziel dieser Arbeit, ein Vorgehen zur Optimierung von RPS, unter Berücksichtigung der unsicheren Qualität der rückgeführten Produkte sowie deren Variantenvielfalt zu entwickeln, erfüllt.

Zusätzlich versucht diese Arbeit aus den oben genannten Forschungslücken von Suzanne et al. (2020) und Ansari und Daxini (2021) Unterziele zu adressieren, welche durch die Entwicklung des Vorgehens

- eine stärkere Verbindungen mit industriellen Anwendungen wahrnehmen
- und Unsicherheiten aus der Realität in die Optimierung miteinbinden.

Da die Validierung des Vorgehens mit Daten aus der Industrie anstatt einem konstruiertem Use Case vollzogen ist und die Simulation die Unsicherheiten der rückgeführten Produkte mitberücksichtigt können auch die untergeordneten Ziele dieser Arbeit als erfüllt betrachtet werden.

## 6.2 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

Eine Obergrenze an verfügbaren Gussgehäuse für die Bearbeitung, wie in der Realität, ist für diese Simulation nicht eingeführt, um so die maximale Produktionskapazität der Linien feststellen zu können. Auch die Verlangsamung der Simulation, welche unter der Validierung der Simulation festgestellt ist, kann eine Abweichung der Optimierung gegenüber der realen Umsetzung bedeuten.

## 6.3 Nächste mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

In diesem letzten Abschnitt sollen Möglichkeiten präsentiert werden, wie die aktuelle Optimierung verbessert werden kann. Dazu werden die Verbesserungsmaßnahmen in kurzfristige Änderungen, mittelfristige Änderungen und langfristige Änderungen unterteilt. Diese unterscheiden sich je nach ihrem Aufwand in ihrer Umsetzung

### 6.3.1 Kurzfristige Änderungen

In diesen Möglichkeiten stellen die Parameter der schon vorhandenen Optimierungen einen Ansatz zur Verbesserung des Ergebnisses dar. Dabei kann der Mutationsparameter linear abklingen, um bessere Optima zu finden bzw. nichtlineare Funktionen seiner Variation annehmen. Diese würden weitere Untersuchungen voraussetzen.

Einen zweiten Parameter zur kurzfristigen Verbesserung, stellt die Populationsgröße dar. Obwohl die Erhöhung dieser sehr schnell auch zu einer stark erhöhten Rechnerleistung führt, ist sie eine Möglichkeit, um bessere Optima zu finden, da der mögliche Suchhorizont innerhalb der Optimierung vergrößert wird.

Die verbesserten Werte, welche nach 3000 Iterationen auftreten, lassen auch noch offen, dass eine Erhöhung der Iteration weitere Optima findet.

Zusätzlich könnten praxisrelevante Herangehensweisen das bereits bestehende Vorgehen mit zusätzlichen anderen Produktionsplänen des Herstellers, um Rückschlüsse auf die Flexibilität des Verfahrens zu schließen.

### 6.3.2 Mittelfristige Änderungen

Diese betreffen nun die GA-Operatoren in ihrem inneren Aufbau. So kann eine mögliche Verbesserung darin liegen, die Einzelkreuzung zu einer Multiplen-kreuzung zu gestalten. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten, nämlich die Kreuzungsschnitte innerhalb der Population zu erhöhen und die Kreuzungspartner, bei erhöhter Populationszahl. Eine bildliche Darstellung liefern Li et al. (2019) in Abbildung 6.1.

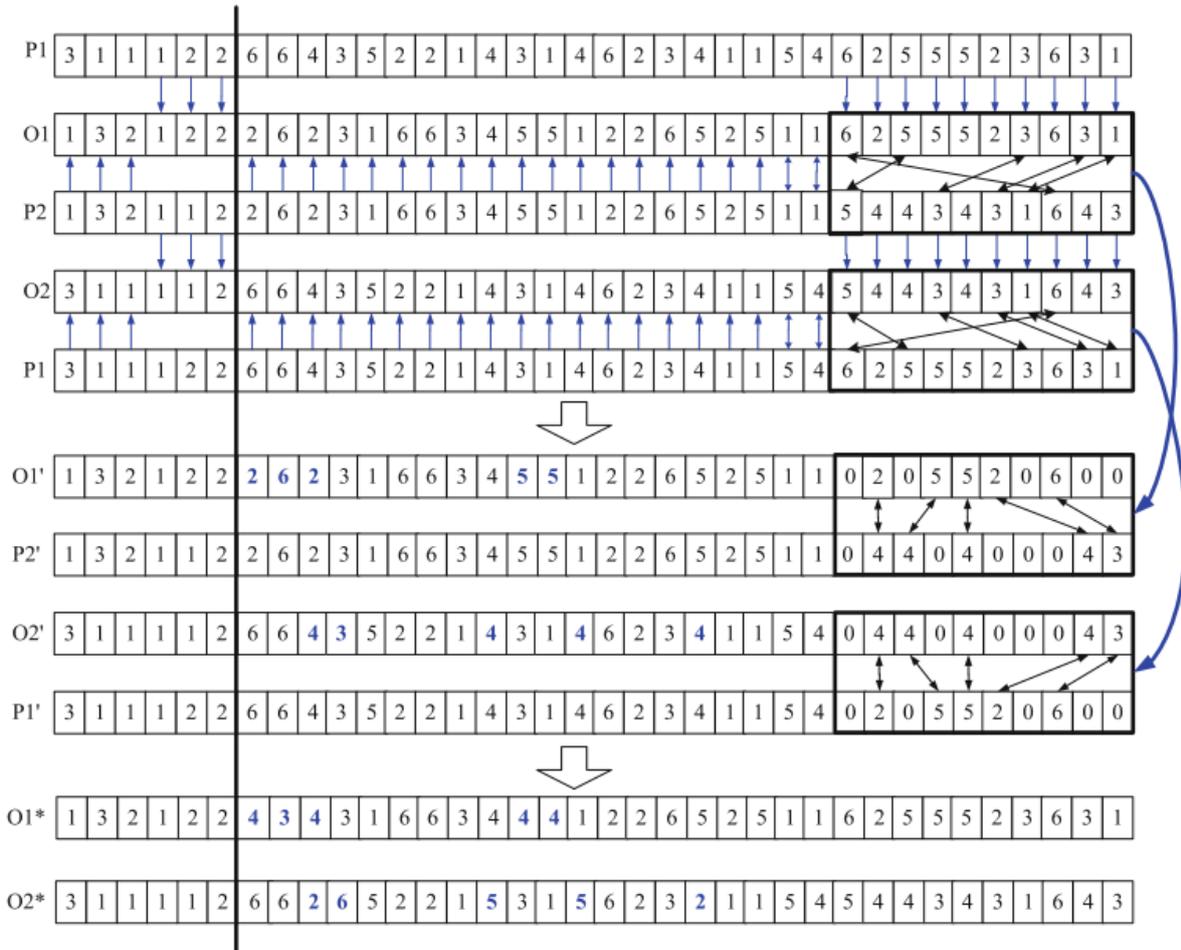


Abbildung 6.1: GA Erweiterung nach Li und Wang (2019)

Ebenfalls eine mittelfristige Änderung liegt in der Selektion der Populationen. Hierbei kann eine Möglichkeit darin liegen, nicht nur jene mit dem besten Fitnesswert zu wählen, sondern die besten drei (bzw. besten n). Wenn eine Betrachtung der Fitnesswertentwicklung mehrerer Populationen über mehrere Iterationen stattfindet, ist die Wahrscheinlichkeit höher die bessere Population zu finden, da sie nicht nur punktuell (also einmal je Iteration) bewertet wird. Hierbei würden verschiedene Population immer wieder gegen-

einander antreten.

Zusätzlich zu Erweiterung der Optimierung könnten auch mehrere Monate bzw. Jahre von der Simulation und der Optimierung durchlaufen werden. Hierbei könnten z.B. drei Monate in einem simuliert werden und mit Zahlen verglichen werden, bei der derselbe Monat dreimal-raufskaliert wird.

### 6.3.3 Längerfristige Änderungen

Die erste längerfristige Änderung würde die Gestaltung mehrerer GAs betreffen, die jeweils unterschiedliche Spezifikationen, wie Mutationsraten oder Operatoren aufweisen. Diese würden gegeneinander antreten, womit der mögliche Suchhorizont nicht nur auf mehrere Populationen untereinander erweitert worden wäre, sondern auf mehrere unterschiedliche Optimierer.

Zusätzlich könnte der GA mit neuen Operatoren modifiziert werden. Ein Beispiel dazu stellt die Verknüpfung von Chaos-Ansätzen dar. Der chaotische Optimierungsalgorithmus hat die Eigenschaften der intrinsischen Zufälligkeit, der langfristigen Unvorhersehbarkeit, der Empfindlichkeit und Abhängigkeit von den Anfangswerten, der Universalität usw. . Daher werden die Chaosfaktoren im Evolutionsprozess des genetischen Algorithmus verschmolzen. Mit anderen Worten, ein Teil der Individuen mit einem niedrigeren Fitnesswert nach der Crossover- und Mutationsoperation im genetischen Algorithmus wird in die chaotische Interferenz eingeführt. Dies erhöht die Empfindlichkeit und Vielfalt der Chromosomen, was dazu führen kann, dass sich die Population an den optimalen Körper mit größerem Fitnesswert anpasst (Ding et al. (2019)).

Da die Simulation mit der gegebenen Schnittstelle zu Python in dieser Arbeit gestaltet ist, können auch weitere Optimierer, wie der Ameisenkolonien-Algorithmus, der Schwarm-Algorithmus bzw. auch andere Metaheuristiken einzeln sowie auch in Kombination mit dem hier implementierten GA getestet werden.

Zusätzlich könnte auch die Simulation mit weiteren Prozessen des Herstellers erweitert werden bzw. in seinem jetzigen Umfang detaillierter (sofern es die Daten des Herstellers erlauben) programmiert werden. Hierbei könnte auch die Fitnessfunktion mit mehr Einflussfaktoren ausgestattet werden, wie z.B. dem Instandhaltungsplan der verwendeten Bearbeitungsmaschinen oder zusätzlichen Lager- und Flächenkapazitäten der Anlage.

# Literatur

- Aljuneidi, T. und A. A. Bulgak (2017). “Designing a Cellular Manufacturing System featuring remanufacturing, recycling, and disposal options: A mathematical modeling approach”. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 19(3), S. 25–35. ISSN: 17555817. DOI: 10.1016/j.cirpj.2017.04.005.
- Andrew-Munot, M. et al. (2018). “Analysis of production planning activities in remanufacturing system”. In: *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 12(2), S. 3548–3565.
- Ansari, Z. N. und S. D. Daxini (2021). “A State-of-the-Art Review on Meta-heuristics Application in Remanufacturing”. In: *Archives of Computational Methods in Engineering* 232(20), S. 1465. ISSN: 1134-3060.
- Aria, M. und C. Cuccurullo (2017). “bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis”. In: *Journal of Informetrics* 11(4), S. 959–975. ISSN: 17511577. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- Assid, M., A. Gharbi und A. Hajji (2021). “Production planning and control of unreliable hybrid manufacturing-remanufacturing systems with quality-based categorization of returns”. In: *Journal of Cleaner Production* 312, S. 127800. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127800.
- Baki, M., B. Chaouch und W. Abdul-Kader (2014). “A heuristic solution procedure for the dynamic lot sizing problem with remanufacturing and product recovery”. In: 43, S. 225–236.
- Bensmain, Y. et al. (2019). “Preventive remanufacturing planning of production equipment under operational and imperfect maintenance constraints: A hybrid genetic algorithm based approach”. In: *Reliability Engineering & System Safety* 185(17), S. 546–566. ISSN: 09518320. DOI: 10.1016/j.ress.2018.09.001.

- Bouazza, S. et al. (2022). “Disassembly Sequence Optimization for Profit and Energy Consumption Using Petri Nets and Particle Swarm Optimization”. In: *Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing II*. Hrsg. von Mounir Ben Amar et al. Bd. 22. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer International Publishing: Cham, S. 267–276. ISBN: 978-3-030-84957-3. DOI: 10.1007/978-3-030-84958-0{\textunderscore}29.
- Chen, M. und P. Abrishami (2014). “A mathematical model for production planning in hybrid manufacturing-remanufacturing systems”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71(5-8), S. 1187–1196.
- Chiadamrong, Navee und Chayanan Tangchaisuk (2021). “Hybrid Simulation-Based Optimization for Production Planning of a Dedicated Remanufacturing System”. In: *International Journal of Knowledge and Systems Science* 12(3), S. 53–79. ISSN: 1947-8208. DOI: 10.4018/IJKSS.2021070103.
- Cooper, H. M. (1988). “Organizing Knowledge Syntheses”. In: *Knowledge in Society* 104(1).
- Daquin, C. et al. (2019). “Collaborative Lot-Sizing problem for an Industrial Symbiosis \*\*This research comes from the ENCETRE project (<https://www.lgi2a.univ-artois.fr/spip/fr/projets/>) and receives a financial support from the BPI France and the Hauts de France region.” In: *IFAC Papers On Line* 52(13), S. 1325–1330.
- Ding, C., L. Chen und B. Zhong (2019). “Exploration of intelligent computing based on improved hybrid genetic algorithm”. In: *Cluster Computing* 22(S4), S. 9037–9045. ISSN: 1386-7857. DOI: 10.1007/s10586-018-2049-7.
- Dunkel, M. (2008). *Methodenentwicklung für Lean Remanufacturing*. Shaker Verlag: Aachen.
- FFG (2022). *Sustainable Development Goals*. URL: <https://www.ffg.at/sdg>.
- Friedemann, G. (1974). *Adornos Philosophie in Grundbegriffen: Auflösung einiger Deutungsprobleme*. Suhrkamp: Frankfurt am Main. URL: [http://www.wyss-sozialforschung.ch/kommentare/kommentare\\_einzeln/k0020/k0020menschenbild.html](http://www.wyss-sozialforschung.ch/kommentare/kommentare_einzeln/k0020/k0020menschenbild.html).
- Geissdoerfer, M. et al. (2017). “The Circular Economy – A new sustainability paradigm?” In: *Journal of Cleaner Production* 143(6), S. 757–768. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

- Genovese, A. et al. (2017). “Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications”. In: *Omega* 66, S. 344–357.
- Ghisellini, P., C. Cialani und S. Ulgiati (2016). “A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems”. In: *Journal of Cleaner Production* 114(206), S. 11–32. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
- Guide Jr, V.D.R (2000). “Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs”. In: *Journal of Operations Management* 18, S. 467–483.
- Hevner, A. R. et al. (2004). “Design Science in Information Systems Research”. In: *MIS Quarterly* 28, S. 75–105.
- Homrich, A. S. et al. (2018). “The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways”. In: *Journal of Cleaner Production* 175, S. 525–543. ISSN: 09596526.
- IPCC (2021). “AR6 Working Group I Summary for Policymakers”. In.
- Karner, M. (2019). “Phasenmodell zur Entwicklung einer werkzeug- und maschinenzustandsbedingten Produktionsreihenfolgeoptimierung: Dissertation”. In: *Technische Universität Wien*.
- Keeble, B. R. (1988). “The brundtland report: Our common future”. In: *Medicine and War* 4(1), S. 17–25.
- Kenné, J. P., P. Dejax und A. Gharbi (2012). “Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain”. In: *International Journal of Production Economics* 135(1), S. 81–93. ISSN: 09255273. DOI: 10.1016/j.ijpe.2010.10.026.
- Köhler, D., C. und M. Haumann (2010). “Managing complexity, flexibility and risk”. In: *ReMaTecNews*, S. 27–29.
- Koken, P., V. A. Raghavan und S. W. Yoon (2018a). “A genetic algorithm based heuristic for dynamic lot sizing problem with returns and hybrid products”. In: *Computers & Industrial Engineering* 119, S. 453–464. ISSN: 03608352.

- Koken, P., H. Seok und S. W. Yoon (2018b). “A simulated annealing algorithm with neighbourhood list for capacitated dynamic lot-sizing problem with returns and hybrid products”. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31(8), S. 739–747. ISSN: 0951-192X.
- Lahmar, H. et al. (2022). “Production planning optimisation in a sustainable hybrid manufacturing remanufacturing production system”. In: *Procedia Computer Science* 200(6), S. 1244–1253. ISSN: 18770509. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.325.
- Li, S. et al. (2019). “Multi-objective disassembly sequence optimization aiming at quality uncertainty of end-of-life product”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 631(3), S. 032015. ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-898X/631/3/032015.
- Liu, Wenjie et al. (2019). “Production planning for stochastic manufacturing/remanufacturing system with demand substitution using a hybrid ant colony system algorithm”. In: *Journal of Cleaner Production* 213(2), S. 999–1010. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.205.
- Liu et al. (2019). “Increased CO<sub>2</sub> concentrations increasing water use efficiency and improvement PSII function of mulberry seedling leaves under drought stress”. In: *Journal of Plant Interactions* 14(1), S. 213–223. ISSN: 1742-9145. DOI: 10.1080/17429145.2019.1603405.
- Martínez, Paula et al. (2021). “Production Planning with Remanufacturing and Environmental Costs”. In: *Production Research*. Hrsg. von Daniel Alejandro Rossit, Fernando Tohmé und Gonzalo Mejía Delgadillo. Bd. 1408. Communications in Computer and Information Science. Springer International Publishing: Cham, S. 89–101. ISBN: 978-3-030-76309-1. DOI: 10.1007/978-3-030-76310-7<sub>7</sub>.
- Mirjalili, S. (2014). “Grey Wolf Optimizer”. In: *Advances in Engineering Software* 69, S. 41–61.
- Moreno-Camacho, C. A. et al. (2019). “Sustainability metrics for real case applications of the supply chain network design problem: A systematic literature review”. In: *Journal of Cleaner Production* 231(1), S. 600–618. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.278.

- Peffers, K. et al. (2007). “A Design Science Research Methodology for Information System Research”. In.
- Peyman, M. et al. (2021). “A Tutorial on how to Connect Python with Different Simulation Software to Develop Rich Simheuristics”. In: S. 1–12. DOI: 10.1109/WSC52266.2021.9715511.
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling*. Springer International Publishing: Cham. ISBN: 978-3-319-26578-0. DOI: 10.1007/978-3-319-26580-3.
- Quezada, Franco, Céline Gicquel und Safia Kedad-Sidhoum (2021). “A Partial Nested Decomposition Approach for Remanufacturing Planning Under Uncertainty”. In: *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*. Hrsg. von Alexandre Dolgui et al. Bd. 631. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer International Publishing: Cham, S. 663–672. ISBN: 978-3-030-85901-5. DOI: 10.1007/978-3-030-85902-2{\textunderscore}71.
- Ren, Y. et al. (2021). “A Multiobjective Disassembly Planning for Value Recovery and Energy Conservation From End-of-Life Products”. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 18(2), S. 791–803.
- Ren, Yaping et al. (2018). “An asynchronous parallel disassembly planning based on genetic algorithm”. In: *European Journal of Operational Research* 269(2), S. 647–660. ISSN: 03772217. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.01.055.
- Republik Österreich (2020). “Aus Verantwortung für Österreich: Regierungsprogramm 2020-2024”. In.
- Retel Helmrich, M. J. et al. (2014). “Economic lot-sizing with remanufacturing: Complexity and efficient formulations”. In: *IIE Transactions* 46(1), S. 67–86.
- Roshani, A., D. Giglio und M. Paolucci (2017). “A relax-and-fix heuristic approach for the capacitated dynamic lot sizing problem in integrated manufacturing/remanufacturing systems”. In: *IFAC Papers On Line* 50(1), S. 9008–90013.
- Sahling, F. (2013). “A column-generation approach for a short-term production planning problem in closed-loop supply chains.” In: *Business Research* 6(1), S. 55–75.

- Sathish, T., Jayaprakash, J. (2017). "Optimizing the Supply Chain in Reverse Logistics". In: *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* 7(6), S. 551–560.
- Schuh, G. und V. Stich (2012). *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-25422-2. DOI: 10.1007/978-3-642-25423-9.
- Seifert, S. (2017). *Komplexitätsmanagement in der Refabrikation: Dissertation*. Shaker Verlag: Aachen.
- Smith, M. F. (2010). *Research Methods in Sport*. 1. Aufl. Sage Publications Ltd: Newbury Park.
- Steinhilper, Rolf (1999). *Produktrecycling: Vielfachnutzung durch Mehrfachnutzung*. Fraunhofer-IRB-Verlag: Stuttgart.
- Steinhilper, Rolf und Fernand Weiland (2015). "Exploring New Horizons for Remanufacturing an Up-to-date Overview of Industries, Products and Technologies". In: *Procedia CIRP* 29(5), S. 769–773. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.041.
- Suzanne, N. Absi und V. Borodin (2020). "Towards circular economy in production planning: Challenges and opportunities". In: *European Journal of Operational Research* 287(1), S. 168–190. ISSN: 03772217.
- Suzanne, Nabil Absi et al. (2020). "A single-item lot-sizing problem with a by-product and inventory capacities". In: *European Journal of Operational Research* 287(3), S. 844–855. ISSN: 03772217. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.05.017.
- Suzanne, Elodie et al. (2021). "Lot-sizing for industrial symbiosis". In: *Computers & Industrial Engineering* 160(6), S. 107464. ISSN: 03608352. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107464.
- Thies, Christian et al. (2019). "Operations research for sustainability assessment of products: A review". In: *European Journal of Operational Research* 274(1), S. 1–21. ISSN: 03772217. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.04.039.
- Torkaman, S., S.M.T. Fatemi Ghomi und B. Karimi (2018). "Hybrid simulated annealing and genetic approach for solving a multi-stage production planning with sequence-

- dependent setups in a closed-loop supply chain”. In: *Applied Soft Computing* 71, S. 1085–1104. ISSN: 15684946. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.10.019.
- United Nations (2022). *Sustainable Development Goals*. URL: <https://sdgs.un.org/goals>.
- VDI 3633 (2020a). “Grundlagen”. In: *VDI-Richtlinien*.
- VDI 3633 (2020b). “Simulation und optimierung”. In: *VDI-Richtlinien*.
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2021). “Studie VDI ZRE: Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz”. In.
- Volland, S. (2012). “Produktionslosgrößen und logistische Kennlinien in der Hybridfertigung: Dissertation”. In: *Montanuniversität Leoben*.
- Vom Brocke, J. et al. (2009). “Reconstructing the giant”. In: *European Conference on Information Systems (ECIS)*.
- Webster, J. und T. R. Watson (2002). “Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a literature Review”. In: *MIS Quarterly* 25(3).
- Wen, Haijun et al. (2017). “An optimization algorithm for integrated remanufacturing production planning and scheduling system”. In: *Chaos, Solitons & Fractals* 105, S. 69–76. ISSN: 09600779. DOI: 10.1016/j.chaos.2017.10.012.
- WWF (2019). *EU overshoot day living beyond nature’s limits, World Wide Fund for Nature*. URL: [https://www.wwf.at/de/view/files/download/showDownload/?tool=12&feld=download&sprach\\_connect=3371..](https://www.wwf.at/de/view/files/download/showDownload/?tool=12&feld=download&sprach_connect=3371..)
- Yuan, Gang et al. (2022). “Capacitated multi-objective disassembly scheduling with fuzzy processing time via a fruit fly optimization algorithm”. In: *Environmental science and pollution research international*. DOI: 10.1007/s11356-022-18883-y.
- Zarte, Maximilian, Agnes Pechmann und Isabel L. Nunes (2019). “Decision support systems for sustainable manufacturing surrounding the product and production life cycle – A literature review”. In: *Journal of Cleaner Production* 219(4), S. 336–349. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.092.

- Zhang, J., X. Liu und Y. L. Tu (2011). “A capacitated production planning problem for closed-loop supply chain with remanufacturing”. In: *International The Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54(5), S. 757–766.
- Zhao, Xikun et al. (2021). “Reinforcement Learning-Based Selective Disassembly Sequence Planning for the End-of-Life Products With Structure Uncertainty”. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 6(4), S. 7807–7814. DOI: 10.1109/LRA.2021.3098248.

---

|                |   |
|----------------|---|
| <b>RPS</b>     | Remanufacturing-Produktionsplanungssystem   |
| <b>PPS</b>     | Produktionsplanungssystem                   |
| <b>KLW</b>     | Kreislaufwirtschaft                         |
| <b>IPCC</b>    | Weltklimarat                                |
| <b>SDG</b>     | Sustainable Development Goals               |
| <b>VDI</b>     | Verein Deutscher Ingenieure                 |
| <b>FFG</b>     | Forschungsförderungsgesellschaft Österreich |
| <b>ERN</b>     | European Remanufacturing Network            |
| <b>EOL</b>     | End Of Life                                 |
| <b>ERP</b>     | Enterprise Resource Planing                 |
| <b>GA</b>      | Genetischer Algorithmus                     |
| <b>MIP</b>     | Mixed Integer Programming                   |
| <b>KH</b>      | Konstruierte Heuristik                      |
| <b>PO</b>      | Populationsbasierte Optimierung             |
| <b>DSP</b>     | Demontagereihenfolgeplanung                 |
| <b>SDP</b>     | sequentielle Demontageplanung               |
| <b>aPDP</b>    | asynchrone parallele Demontageplanung       |
| <b>ABC</b>     | künstlicher Bienenvolk-Algorithmus          |
| <b>FOA</b>     | Fruchtfliegen-Optimierungsalgorithmus       |
| <b>sDP</b>     | selektiver Demontagesequenzen               |
| <b>CMS</b>     | zellularen Fertigungssystemen               |
| <b>NSGA-II</b> | verbesserter Genetischer Algorithmus        |
| <b>ACS</b>     | Ameisenkolonie-System-Algorithmus           |

---

|                |   |
|----------------|---|
| <b>ACS-RSM</b> | Ameisenkolonie-System-Algorithmus mit Zufallsstichprobenverfahren |
| <b>PSO</b>     | Partikelschwarmoptimierung  |
| <b>SA</b>      | Simulated Annealing   |
| <b>PU</b>      | Produktionseinheiten  |
| <b>TBL</b>     | Triple Bottom Line  |
| <b>DES</b>     | Diskrete Ereignissimulation                                       |
| <b>Stk</b>     | Stk   |

# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Oberflächentemperatur-Entwicklung der Erde aus IPCC (2021) . . . . .   | 9  |
| 2.2  | Menschlicher Einfluss auf die Oberflächentemperatur aus IPCC (2021) . . .  | 10 |
| 2.3  | Sustainable Development Goals . . . . .  | 11 |
| 2.4  | Kreislaufwirtschaftsoptimen nach VDI-RZE (2022) . . . . .  | 16 |
| 2.5  | Kreislaufwirtschaftsmodell nach Suzanne et. al. (2020) . . . . .   | 17 |
| 2.6  | Informationsfluss der Terminierung nach Pinedo (2016) . . . . .  | 20 |
| 2.7  | Einteilung der Optimierungsmethoden nach Karner (2019) . . . . .   | 21 |
| 2.8  | Remanufacturingprozess nach Steinhilper (1999) (Seifert, (2017)) . . . . .   | 22 |
| 2.9  | Beispiele für Alt- und Austauschteile (Seifert 2017) . . . . .   | 23 |
| 2.10 | qualitative Einordnung der Fertigungsschritte nach Vielfalt und Automa-<br>tisierungsgrad (Seifert 2017) . . . . . | 24 |
| 2.11 | Darstellung von Remanufacturing mit Herstellung nach Suzanne et. al. (2020)  | 26 |
| 3.1  | Bibliometrische Analyse nach Aria und Cuccurullo (2017) . . . . .  | 29 |
| 3.2  | Taxonomie nach Cooper 1988 . . . . .   | 29 |
| 3.3  | Publikationen auf Scopus unter dem Begriff "Remanufactur*" . . . . .   | 33 |
| 3.4  | Publikationenverteilung auf Länder bezogen auf . . . . .   | 34 |
| 3.5  | Suchbegriff-Korrelationen . . . . .  | 35 |
| 3.6  | Taxonomie nach Cooper (1988) für diese Literatursuche . . . . .  | 36 |
| 3.7  | Suchbegriffe und deren Suchtreffer dieser Literatursuche . . . . .   | 37 |
| 3.8  | Konzeptmatrix nach Webster und Watson (2002) . . . . .   | 38 |
| 3.9  | verwendete Metaheuristiken im Vergleich aus Ansari (2022) . . . . .  | 46 |
| 4.1  | Prozessmodell nach Peffers et. al. 2007 . . . . .  | 50 |
| 4.2  | Einzelkreuzung und Mutation einer Population (GA-Operatoren) . . . . .   | 56 |
| 4.3  | allgemeines GA-Ablaufdiagramm . . . . .  | 57 |
| 4.4  | detaillierter GA-Ablauf . . . . .  | 58 |
| 4.5  | schematisches Simulationsmodell . . . . .  | 63 |
| 4.6  | Anylogic Simulationsmodell . . . . .   | 64 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.7 | Optimierungseinfluss auf die Simulation . . . . .                           | 65 |
| 5.1 | Alt- zu Neuteilverhältnis . . . . .   | 69 |
| 5.2 | Montagekennlinien . . . . .   | 69 |
| 5.3 | Reihenfolge der Waschmaschine . . . . .                                     | 70 |
| 5.4 | Graphische Darstellung der Neuteilebedarfsreduzierung je Baureihe . . . . . | 72 |
| 5.5 | Fitnesswert-Verlauf der GA-Optimierung . . . . .                            | 73 |
| 6.1 | GA Erweiterung nach Li und Wang (2019) . . . . .                            | 78 |

## Tabellenverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | meist zitiertesten Publikationen . . . . .                                    | 34 |
| 3.2 | wichtigsten Journale zu Remanufacturing . . . . .                             | 35 |
| 4.1 | Umsetzung des Phasenmodells nach Peffers et. al (2007) . . . . .              | 54 |
| 4.2 | Agenten- u. Systemparameter der Simulation . . . . .                          | 64 |
| 5.1 | Ergebnisse der Simulation gegenüber den Industrie-Daten . . . . .             | 68 |
| 5.2 | Ergebnisse des GAs gegenüber der Simulation und den Industrie-Daten . . . . . | 71 |

# Anhang

Im folgenden Anhang sind noch die Schnittstellen-Programmierung zwischen Anylogic und Python unter der Verwendung von Pypline zu finden.

Ebenfalls ist noch ein Abbild der Anylogic Simulation in größerer Darstellung angehängt.

| Name                  | Value                    |
|-----------------------|--------------------------|
| Array                 | false                    |
| Default value         | new int[]{0, 2, 4, 6, 8} |
| Type                  | int[]                    |
| Show at runtime       | true                     |
| Show name             | true                     |
| Value editor          |                          |
| Editor control        | Text                     |
| Advanced              |                          |
| System dynamics units | false                    |
| Save in snapshot      | true                     |

## Parameter: param\_list1

| Name                  | Value |
|-----------------------|-------|
| General               |       |
| Array                 | false |
| Default value         | 999   |
| Type                  | int   |
| Show at runtime       | true  |
| Show name             | true  |
| Value editor          |       |
| Editor control        | Text  |
| Advanced              |       |
| System dynamics units | false |
| Save in snapshot      | true  |

## Function: new\_iter

| Name            | Value   |
|-----------------|---|
| General         |   |
| Return type:    | Just action (returns nothing)   |
| Show at runtime | true  |
| Show name       | true  |
| Function body   |   |
| Body            | <pre> /* pyCommunicator.run("collection = []"); double[] collection = pyCommunicator.runResults(  double[].class, String.format("collection.clear()") ); */  month = i1;  best_sol = n3+n4+n6; best_sol_coll.add(best_sol);  if((best_sol &lt; best_sol1) &amp;&amp; (month &gt; 5) &amp;&amp; (best_sol &gt; 10)){ best_sol1 = best_sol; collection1=collection; sco = 0;  for (int i = 3; i &lt; collection.size()+3; i++) { </pre> |

| Name | Value   |
|------|---|
|      | <pre> best_prod_plan.setCellValue(collection.get(i-3),1,i,best_prod_plan_i); best_prod_plan.setCellValue(best_sol,1,1,best_prod_plan_i); }  best_prod_plan_i++;  }  for (int i = 3; i &lt; collection.size()+3; i++) { ga_prod_plan.setCellValue(collection.get(i-3),1,i,ga_prod_plan_i); ga_prod_plan.setCellValue(best_sol,1,1,ga_prod_plan_i); }  ga_prod_plan_i++; //Von Anylogic ArrayList in Python einlesen String pycode = "collection = " + pyCommunicator.toJson(collection); pyCommunicator.run(pycode);  //String.format("plotter.append(%s, %s, %s)", X, Y, Z)  //pyCommunicator.run(String.format("mutate(%s, %s)",collection, nu)); pyCommunicator.run("mutate(collection)");  if(sco &gt; 1){ pyCommunicator.run("single_crossover(collection)"); }  //Von Python ArrayList an Anylogic übergeben ArrayList newcollection = pyCommunicator.runResults(ArrayList.class, "json.dumps(collection)"); collection = newcollection;  //pyCommunicator.run(String.format("A_ub = np.array([%s])", param_list1));  kommunikation.setCellValue(a3,1,i1,1); kommunikation.setCellValue(a4,1,i1,2); kommunikation.setCellValue(a6,1,i1,3);  kommunikation.setCellValue(n3,1,i1,5); kommunikation.setCellValue(n4,1,i1,6); kommunikation.setCellValue(n6,1,i1,7); kommunikation.setCellValue(i1,1,1,1);  kommunikation1.setCellValue(n3,1,1,spalte_pop); kommunikation1.setCellValue(n4,1,2,spalte_pop); kommunikation1.setCellValue(n6,1,3,spalte_pop);  ga_verlauf.setCellValue(best_sol1,1,i1,1); ga_verlauf.setCellValue(n6,1,i1,2); ga_verlauf.setCellValue(n4,1,i1,3); ga_verlauf.setCellValue(n3,1,i1,4); ga_verlauf.setCellValue(a6,1,i1,5); ga_verlauf.setCellValue(a3,1,i1,6); ga_verlauf.setCellValue(a4,1,i1,7);  ga_verlauf.setCellValue(nu,1,i1,9); ga_verlauf.setCellValue(best_sol,1,i1,10); ga_verlauf.setCellValue(day,1,i1,11); ga_verlauf.setCellValue(hour,1,i1,12);  //best_sol1 = n3+n4+n6;  //nu = nu-0.01; i1++; m6=0; m34=0; </pre> |

| Name                  | Value  |
|-----------------------|--|
|                       | <pre>m4=0; a6=0; a4=0; a3=0; n6=0; n4=0; n3=0; hold9.unlock(); hold10.unlock(); hold11.unlock(); hold12.unlock(); hold13.unlock(); hold14.unlock(); sco++; day=0; hour=0;  b1=true; opti_time = 1;</pre> |
| Advanced              |  |
| Access type           | default  |
| System dynamics units | false  |

## Function: py\_setzer

| Name                  | Value  |
|-----------------------|--|
| General               |  |
| Return type:          | Just action (returns nothing)  |
| Show at runtime       | true   |
| Show name             | true   |
| Function body         |  |
| Body                  | <pre>/* i4++; pyCommunicator.runFile("Evaluation.py"); i3++; pyCommunicator.runFile("single_crossover.py"); */</pre> |
| Advanced              |  |
| Access type           | default  |
| System dynamics units | false  |

## Function: buildArray

| Name            | Value   |
|-----------------|---|
| General         |   |
| Return type     | double[]  |
| Return type:    | Returns value   |
| Show at runtime | false   |
| Show name       | true  |
| Function body   |   |
| Body            | <pre>double[] matrix = new double[sim_test.length]; for (int i = 0; i &lt; sim_test.length; i++) {  matrix[i] = sim_test[i];  }</pre> |

