

FACHHOCHSCHULE AACHEN, CAMPUS JÜLICH

FACHBEREICH 09 - MEDIZINTECHNIK UND TECHNOMATHEMATIK
STUDIENGANG ANGEWANDTE MATHEMATIK UND INFORMATIK

SEMINARARBEIT

Abbildung von Zirkularität in OptiWo

**Erarbeitung eines Modells zur Abbildung Zirkulärer Produktionsweisen
in Globalen Produktionsnetzwerken in OptiWo**

Autor:

Gian Eckert, ge2493s

Betreuer:

Prof. Dr. Philipp Rohde

Thilo Walter

Aachen, 19.12.2024

Abstract

Zirkuläre Produktion erfährt wird immer wichtiger. Ihre Ansätze ermöglichen eine Produktion, in der die Ressourceneffizienz stark verbessert werden kann, sodass Probleme der Nachhaltigkeit in eine resistenterere Wertschöpfung umgewandelt werden können.

Für eine initiale Analyse einer Produktion für globale Produktionssysteme hat das WZL, ein Institut der RWTH Aachen, das Web Tool OptiWo entwickelt. Dieses Tool unterstützt Unternehmen bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Umstrukturierung ihrer Produktionsnetzwerke. Da das ursprüngliche OptiWo-Modell jedoch für lineare Produktionsweisen konzipiert wurde, ist eine Erweiterung erforderlich, um auch zirkuläre Produktionsweisen abbilden zu können.

Zu Beginn dieser Arbeit wird daher grundlegendes Wissen über zirkuläre Produktionsweisen vermittelt, um darauf aufbauend ein Modell zu konzeptionieren, das es OptiWo ermöglicht, zirkuläre Kreisläufe darzustellen. Zunächst wird die Datenstruktur und Funktionsweise von OptiWo erläutert und eingeordnet. Im Anschluss werden mithilfe des 9R-Frameworks für Produktion wichtige Strategien identifiziert, die für die Modellierung zirkulärer Produktionsweisen erforderlich sind.

Das darauf aufbauende Modell kann folglich eine zirkuläre Produktionsweise darstellen, wobei durch spätere Erweiterungen auch die Analyse der abgebildeten Netzwerke möglich ist.

Die vorliegende Erweiterung von OptiWo zielt darauf ab, die Evaluierung diverser Möglichkeiten und Szenarien zu erleichtern, mit dem Ziel, eine Optimierung des Netzwerkes zu bewirken.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	1
2. Einleitung	2
2.1. Aufbau der Arbeit	2
3. Grundlagen	3
3.1. Was ist ein globales Produktionsnetzwerk?	3
3.2. Was ist eigentlich ‚Zirkulär‘?	3
3.2.1. Reverse Logistics	4
3.2.2. Wiederverwendung	5
3.2.3. 9R Framework	5
3.3. Anforderungen für OptiWo	6
4. Vorstellung: OptiWo	8
4.1. Das Modell hinter OptiWo	8
4.2. Zusammenfassung des Modells	10
5. Zirkuläre Produktion in OptiWo	11
5.1. Erweiterung	11
5.2. Müllverwertung	12
5.2.1. Verpackungsmüll	13
5.2.2. Unverwertbare Produkte	13
5.2.3. Zusammenfassung des Modells	13
5.2.4. Was geht verloren?	14
5.3. Anpassung des Datenmodells von OptiWo	14
5.3.1. Datenstrukturen für angepasste Teile	15
5.4. Zusammenfassung	15
5.5. Vergleich mit Modellierung von BAUMANN	15
5.5.1. Modell von BAUMANN	16
5.5.2. Unterschiede	17
5.6. Zusammenfassung und Auswahl des Modells	18
6. Fazit	19
Bibliographie	20

1. Motivation

Die Integration von zirkulären Prinzipien wie Wiederverwendung, Reparatur und Recycling ist eine wesentliche Voraussetzung für die Erreichung nachhaltigen Wirtschaftswachstums. Die Nutzung von Ressourcen in der Produktion, wie etwa Wasser in trockenen Gebieten, kann zu einer Verstärkung von Ressourcenknappheiten und einer steigenden Umweltbelastung führen. Dies macht eine Umstellung auf eine zirkuläre Wertschöpfung erforderlich. Das vorherrschende Modell der Produktion und des Konsums folgt häufig dem Prinzip „Take, Make, Dispose“. Lineare Produktionen haben daher zur Folge, dass Ressourcen nach einmaligem Gebrauch entsorgt werden. Diese Praxis ist nicht nur ineffizient, sondern trägt auch zur Verschärfung globaler Probleme bei.

Aus betrieblicher Sicht erscheint eine lineare Produktionsweise als vorteilhafter, da sie geradlinige Prozesse von der Beschaffung über die interne Produktion bis hin zum Kunden ermöglicht. Unternehmen sind jedoch gefordert, langfristig zu denken und die mit dieser Vorgehensweise einhergehenden Nachteile in Bezug auf Nachhaltigkeit und wirtschaftliche Resilienz zu erkennen. Aus diesen Gründen ergibt sich die Notwendigkeit für einen Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Unternehmen beginnen, ihre Geschäftsmodelle zu überdenken und nachhaltige Praktiken zu integrieren, um sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile zu realisieren.

Die zirkuläre Wirtschaft erfährt gegenwärtig einen Aufschwung und bietet Unternehmen neue Möglichkeiten. Die Abteilung *Globale Produktion* am WZL entwickelt das Tool „OptiWo“, welches den Assistenten bei der Entscheidungsfindung in Fragen der Unternehmensstruktur sowie der Standortfindung unterstützen soll. Das Tool ermöglicht die Schätzung von Kennzahlen wie den Kosten eines produzierenden Unternehmens und soll so eine quantitative Grundlage für unternehmerische Änderungen bieten.

Gegenwärtig ist lediglich eine lineare Produktionsweise in OptiWo abbildbar. Aus diesem Grund fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf die Erweiterung des Modells von OptiWo, um die Darstellung einer zirkulären Produktionsweise zu ermöglichen.

2. Einleitung

In heutigen Produktion werden lineare Produktionsweisen eingesetzt, bei denen Materialien aus der Natur gewonnen und anschließend weiterverarbeitet werden. Dies hat negative Auswirkungen auf die Umwelt, da es zur Ausbeutung der Natur und zu massiven Eingriffen in die Ökosysteme führt. Dies wiederum hat eine Bedrohung oder gar unumkehrliche Ausrottung vieler Tierarten zur Folge.

Zudem kann Grundwasser durch Bergbau verunreinigt werden, welches nicht nur der Landwirtschaft Probleme bereitet.

Um diese Umwelteinflüsse entgegenzuwirken, sind in den 1980er Jahren die ersten Ideen anderer Produktionsarten aufgekommen, welche die negativen Auswirkungen auf die Natur minimieren sollen.

Unter anderem wurde die Idee einer zirkulären Wirtschaft entwickelt, welche durch verschiedene Maßnahmen die Nutzung von Neumaterial effizienter gestalten soll. Zu den Ansätzen zählen die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten, die Wiederverwendung bereits gebrauchter Produkte sowie Sharing-, Miet- und Leasing-Konzepte, welche eine effizientere Nutzung von Produkten ermöglichen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf produzierenden Unternehmen und der Erarbeitung wichtiger Aspekte für eine zirkuläre Produktion sowie deren Beschreibung.

Zu diesem Zweck soll die Software OptiWo dahingehend angepasst werden, dass sie die Abbildung von Kreislaufwirtschaften in globalen Produktionsnetzwerken ermöglicht. Die Software soll es ermöglichen, unterschiedliche Szenarien zu erstellen, zu modifizieren und zu evaluieren.

2.1. Aufbau der Arbeit

In diesem Kapitel werden zunächst in Abschnitt 3 die theoretischen Grundlagen für eine zirkuläre Produktionsweise erörtert, die als Grundlage für ein zirkuläres Modell dienen.

Im Anschluss daran wird OptiWo in Abschnitt 4 vorgestellt und auf das Modell in Abschnitt 4.1, welches zur Abbildung von Produktionsnetzwerken dient, eingegangen.

Im Anschluss werden in Abschnitt 3.3 Kriterien für die Benutzung von OptiWo erarbeitet, welche das Modell erfüllen soll, um eine solide Grundlage für eine erste Einschätzung eines globalen Produktionsnetzwerks zu schaffen. In diesem Zusammenhang wird auch auf eine bereits bestehende Arbeit eingegangen, die den Versuch unternimmt, Zirkularität in OptiWo zu implementieren.

In der Folge wird in Abschnitt 5.3 das modifizierte Modell mit dem linearen Modell verglichen, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten sowie Änderungen an dem aktuellen OptiWo-Modell zu erarbeiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zuvor aufgestellte Kriterien erfüllt bleiben.

Abschließend wird im Fazit auf die kommenden Änderungen und die Implementation eingegangen.

3. Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zunächst dargelegt, was unter einem globalen Produktionsnetzwerk zu verstehen ist und auf welche Weise zirkuläre Ansätze in die Produktion integriert werden können. Im weiteren Verlauf erfolgt eine grobe Darstellung der Software OptiWo. Darüber hinaus werden die bestehenden Lücken im Zusammenhang mit dem Thema der zirkulären Produktion erörtert.

3.1. Was ist ein globales Produktionsnetzwerk?

Es gibt keine einheitliche Definition was ein *Globales Produktionsnetzwerk* ist. Die jeweilige Interpretation hängt von der jeweiligen Perspektive ab.

Aus der Perspektive eines Unternehmensvorstands umfasst ein Produktionsnetzwerk unter Umständen sämtliche Unternehmensstandorte sowie externe Lieferanten, was der Auffassung von FELDMANN ET AL. entspricht. [1]

Ein Produktionsplaner hingegen sieht das Produktionsnetzwerk als das, was SYDOW ET AL. es definiert, nämlich als Zusammenschluss aller Kunden, Zulieferer und Konkurrenten. [2]

In OptiWo wird ein Produktionsnetzwerk als ein Verbund aus produzierenden Standorten, Zulieferern und Verkaufsstellen definiert, die gegenseitigen Produkte austauschen.

Diese Definition ist jedoch nicht eindeutig. So wäre beispielsweise jeder Teil eines Produktionsnetzwerks diesem gleichzusetzen.

Ein Beispiel hilft dem Verständnis: Standort *A* stellt Produkt *a* her und versendet es an Standort *B*, welches mithilfe von Produkt *a* Produkt *b* herstellt und dieses an Standort *C* verschickt. In diesem Fall ist die Verbindung zwischen *B* und *C* ebenfalls als eigenes Produktionsnetzwerk zu betrachten, wie es die Verbindung zwischen *A* und *B* ist.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht in der einfachen Handhabung: Liegen Informationen zu spezifischen Standorten sowie Verbindungen vor, können diese in OptiWo eingetragen und in die Analyse mit einbezogen werden.

Zudem besteht die Option, Zulieferer zu integrieren. Standorte, die von geringem Interesse sind, können hingegen ausgelassen werden.

Der Begriff *global* impliziert, dass die Standorte nicht auf nationale Grenze beschränkt sind, sondern sich auf der ganzen Welt verteilen dürfen.

Nichtsdestotrotz liegt bei globalen Produktionsnetzwerken der Fokus in der Regel auf einem Unternehmen und dessen Standorten. Das bedeutet, dass vor allem versucht wird, ein Unternehmensnetzwerk abzubilden, wodurch OptiWo eher mit der Auffassung von SYDOW ET AL. übereinstimmt, da es vor allem die Planung aus der Unternehmensperspektive unterstützen soll.

3.2. Was ist eigentlich ‚Zirkulär‘?

Die zirkuläre Produktion ist ein Konzept, das darauf abzielt, Ressourcen in einem geschlossenen Kreislaufsystem zu nutzen, um Abfall und Umweltverschmutzung zu minimieren.

Eine ideale zirkuläre Wertschöpfung sollte demnach keine neuen Materialien der Natur entnehmen, sondern sämtliche gebrauchte Materialien aus bereits verwendeten Produkten zurückgewinnen. Im Gegensatz zur linearen Produktionsweise, bei der Produkte hergestellt, verwendet und anschließend entsorgt werden, fördert die zirkuläre Produktion die Wiederverwendung. Dabei verändert diese den Umgang mit Materialien grundlegend. Die Steigerung der Ressourceneffizienz ist demnach ein wesentlicher Indikator für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft.

Ein entscheidender Faktor ist in diesem Zusammenhang der Designprozess, der die Demontage von Produkten vereinfachen und somit eine effizientere Wiederaufbereitung und Wiederverwertung ermöglichen kann.

Es existieren verschiedene Modelle, welche die zirkuläre Wertschöpfung eines Unternehmens beschreiben sowie bewerten können. In Abschnitt 3.2.3 wird das *9R*-Modell vorgestellt und dessen R-Strategien diskutiert, mit dem Ziel, Prozesse zirkulärer zu gestalten.

Die Wiederverwendung von Produkten sowie die Demontage dieser erfordert zunächst den Rückkauf dieser Produkte. Diese Aufgaben fällt in den Zuständigkeitsbereich des *Reverse Logistics*.

Die Reverse Logistics nimmt eine entscheidende Rolle im Prozess der Produktrückholung nach deren Nutzungsende ein und umfasst zudem die Demontage der zurückgeführten Produkte. Die so gewonnenen Teile werden anschließend in die bestehende Produktion oder in andere Produktionsprozesse reintegriert.

Diese Vorgehensweise ermöglicht es Unternehmen, aus bereits benutzten Produkten, welche ansonsten nutzlos entsorgt worden wären, Materialien zurückzugewinnen. Dies reduziert nicht nur den Bedarf an neuen Rohstoffen, sondern verringert auch den ökologischen Fußabdruck der Produktion erheblich.

3.2.1. Reverse Logistics

Im Rahmen von Reverse Logistics ist es von essenzieller Bedeutung, dass der Käufer das verwendete Produkt nach dessen *Nutzungsende* an das Unternehmen retourniert.

Es existieren verschiedene Techniken und Geschäftsmodelle von Unternehmen, die die Rückgabebereitschaft der Käufer stärken können [3].

Ein Beispiel ist der Rückkauf von Produkten am Ende ihres Nutzens, bei dem der Käufer eine Erstattung eines Teils des Verkaufspreises erhält und dazu motiviert wird, das Produkt zurückzugeben.

Darüber hinaus können auch nicht-monetäre Motivationen geschaffen werden. Ein Beispiel ist das *New for Old* Modelle, bei dem alte Produkte gegen neue oder preisreduzierte Produkte eingetauscht werden können. Darüber hinaus sind Mietprogramme möglich, in deren Rahmen eine Rückgabe des Produktes nach Ende der Miete vereinbart wird.

Die Retouren können entweder postalisch an die Firma zurückgesendet werden [4] oder gemeinsam von einer zentralen Sammelstelle abgeholt und zurück verfrachtet werden [5].

In beiden Fällen werden die Produkte zunächst an einem Ort zusammengeführt und anschlie-

ßend zur Weiterverarbeitung wieder in das Produktionsnetzwerk versandt, wie es Abbildung 1 dargestellt wird.

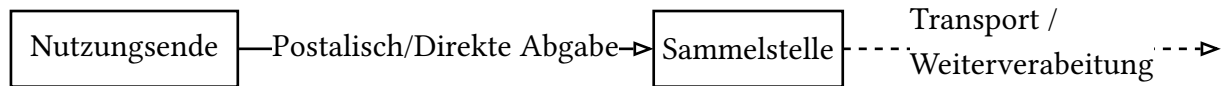


Abbildung 1: Visualisierung einer Rückholung von Produkten

Der Prozess beinhaltet nach diesem Transport einen zentralen Aspekt der Zirkularität und der Reverse Logistic, der den Unterschied zwischen zirkulärer und linearer Logistik bedeutet. Die Wiederverwendung von Produkten:

3.2.2. Wiederverwendung

Produkte nach ihrem Nutzungsende auf verschiedene Weisen wiederzuverwenden ist der Zentrale unterschied zwischen linearen und zirkulären Produktionen.

Das 9R-Framework bietet verschiedene Strategien, wie ein Produkt wiederverwendet werden kann.

3.2.3. 9R Framework

Das 9R Framework möchte Ansätze zur Förderung von Nachhaltigkeit sowie Ressourcenschonung, durch die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und Abfalls, erreichen [6]. Die Zehn R Strategien sollen dabei helfen, Materialien so lange wie möglich im Nutzungskreislauf zu halten. Der Name dieses Konzepts kommt von der einfachsten Strategie, welche von einer Linearen zu einer Zirkulären Produktion gegangen werden kann, die Strategie R9-Recover nach welcher durch Verbrennung Energierückgewinnung erzielt werden soll.

Diese Strategien sind hierarchisch angeordnet, wobei die prioritären Ziele darin bestehen, Ressourcenverbrauch zu vermeiden und die Nutzungsdauer von Produkten zu verlängern (Refuse, Rethink, Reduce). Die Strategien am Ende (Recycle, Recover) sind weniger effizient, da sie mehr Energie benötigen und weniger Wert aus den Materialien ziehen.

Die zehn Strategien sind dabei die Folgenden:

- R0 **Refuse (Ablehnen)**: Vermeidung unnötigen Konsums, indem Produkte oder Materialien abgelehnt werden, die nicht wirklich benötigt werden. Dies reduziert den Ressourcenverbrauch bereits am Anfang der Wertschöpfungskette.
- R1 **Rethink (Überdenken)**: Überdenken der Art und Weise, wie Produkte genutzt werden. Dies kann bedeuten, Nutzungsmodelle zu ändern, z. B. vom Besitz zur gemeinsamen Nutzung (Sharing Economy), um Ressourcen effizienter zu nutzen.
- R2 **Reduce (Reduzieren)**: Verringerung des Material- und Energieverbrauchs bei der Herstellung und Nutzung von Produkten. Dies kann durch effizientere Prozesse oder das Design leichter Produkte erreicht werden.
- R3 **Reuse (Wiederverwenden)**: Verlängerung der Lebensdauer von Produkten durch mehrfache Nutzung ohne substanzielle Veränderung. Zum Beispiel das Wiederverwenden von Glasflaschen oder Einkaufstüten.

- R4 **Repair (Reparieren)**: Instandsetzung defekter oder beschädigter Produkte, um deren Nutzungsdauer zu verlängern, anstatt sie zu ersetzen. Dies fördert die Wartung und Reparaturfähigkeit von Produkten.
- R5 **Refurbish (Aufarbeiten)**: Aufbereitung und Verbesserung gebrauchter Produkte, um sie in einen guten Zustand zurückzusetzen. Dies kann das Austauschen von Komponenten oder das Aktualisieren von Software umfassen.
- R6 **Remanufacture (Wiederaufbereiten)**: Industrielle Wiederherstellung eines gebrauchten Produkts zu einem neuwertigen Zustand. Dies beinhaltet oft eine komplette Demontage und Wiederzusammenbau mit erneuerten Teilen.
- R7 **Repurpose (Umnutzen)**: Verwendung eines ausgedienten Produkts oder seiner Komponenten für einen neuen Zweck. Zum Beispiel die Umwandlung alter Reifen in Spielplatzböden.
- R8 **Recycle**: Rückgewinnung von Materialien aus Produkten, um sie für die Herstellung neuer Produkte zu verwenden. Dies beinhaltet das Zerlegen und Verarbeiten von Materialien wie Metallen, Glas oder Kunststoffen.
- R9 **Recover (Energierückgewinnung)**: Rückgewinnung von Energie aus Materialien, die nicht recycelt werden können, durch Verbrennung oder andere thermische Verfahren. Dies ist die letzte Option vor der Deponierung.

Das 9R-Framework unterstützt Unternehmen dabei, nachhaltigere Entscheidungen zu treffen, indem es Wege aufzeigt, Ressourcen effizienter zu nutzen und Abfall zu minimieren.

Es stellt in dieser Arbeit den Grundpfeiler zirkulären Handelns dar. Es werden aber nicht alle zehn Strategien betrachtet, sondern vor allem auf die eingegangen, welche in einem Verarbeitungskontext am besten angewandt werden können: Diese sind Refurbish, Remanufacture, Recycle, und in einem kleineren Maße, Repair.

Die Strategien Refuse, Rethink, Reduce versuchen, eine effizientere Ressourcennutzung durch Einbeziehung des Designschrittes zu erreichen. Dies wird hier ausgelassen, da OptiWo vor allem bestehende globale Produktionsnetzwerke darstellen soll.

Reuse kann durch bestimmte Geschäftsmodelle erreicht werden [7], welche aber außerhalb des Einflusses von globalen Produktionsnetzwerken sind.

Repurpose wird nicht beachtet, da dieses sich außerhalb des globalen Produktionsnetzwerkes befindet und so nicht oder schlecht von diesem beeinflusst werden kann.

Repair kann zwar innerhalb des globalen Produktionsnetzwerkes passieren, wird aber als das Refurbishment eines Produktes erachtet, nicht als Reparatur Vorort oder in einer Unternehmenswerkstatt. Dabei sind Möglichkeiten zur Selbstreparatur mit eingeschlossen, da diese einfach als verkaufte Produkte modelliert werden können.

3.3. Anforderungen für OptiWo

OptiWo ist ein Tool, welches es möglichst einfach machen soll, ein Produktionsnetzwerk darzustellen. Dafür sollen nur so viele Daten, wie nötig, verwendet werden.

Um dies zu erreichen, sollte das Modell mit so wenig Daten wie möglich auskommen sollen. Sind jedoch mehr Daten vorhanden, sollten diese mit verwendet werden können, um die Modellgenauigkeit zu erhöhen, sofern dies erforderlich ist.

Die Möglichkeit, Fahrzeuge zunächst ohne die Einbeziehung einer Treibstoffquelle zu definieren, ermöglicht eine anfängliche Approximation. Zwar wird auf diese Weise anfänglich eine CO₂-Quelle nicht berücksichtigt, jedoch kann dennoch eine sinnvolle Approximation berechnet werden.

Daraus lassen sich folgende Kriterien erstellen:

- Sinnvolle Vereinfachungen: das Modell muss auch bei fehlenden Daten sinnvolle Standardwerte wählen oder gröbere Approximationen liefern können.
- Fehler Robustheit: Kleine Fehler in der Eingabe sollen nicht zu großen Fehlern führen.
- Leichte Datenaggregation: Überdies versucht dieses Tool erste Zahlen zu liefern, damit ein „Bauchgefühl“ entstehen kann, und eine generelle Richtung erkannt werden kann.

Dafür darf das Modell selber nicht zu kompliziert sein, da es sonst unhandlich wird zu gebrauchen.

4. Vorstellung: OptiWo

OptiWo ist ein Tool, das dazu dient, globale Produktionsnetzwerke zu visualisieren und die Konsequenzen von Netzwerkänderungen zu analysieren.

Zur Abschätzung der Folgen wird ein Modell verwendet, welches ein Produktionsnetzwerk darstellt. Es werden dabei einige Vereinfachungen angenommen, um die volle Komplexität eines solchen Netzwerkes nicht darstellen zu müssen.

Es sei darauf hingewiesen, dass derartige Darstellungen keine perfekten Prognosen generieren können, sondern lediglich ein Bauchgefühl vermitteln können.

4.1. Das Modell hinter OptiWo

Die vorliegenden Datenstrukturen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Diese sind *Einheiten* sowie *Verbindungen*.

Die Kategorie *Einheiten* umfasst Definitionen von Typen, die eine erneute Verwendung ermöglichen. Als Daumenregel gilt, dass Einheiten Orte, Gegenstände oder Definitionen repräsentieren. Ein Beispiel ist ein Fahrzeug, das als Transportfahrzeug beschrieben wird und dessen Energieverbrauch pro Strecke angegeben wird. Ein Energietyp gibt einer Energiequelle einen Namen, sodass Maschinen konfiguriert werden können, aus welchen Quellen sie ihren Strom beziehen, wie zum Beispiel Kohle oder Windenergie. Die Darstellung von Energiequellen erfolgt durch ihre Emissionen und ihren Energiegehalt pro Einheit, was eine Rückschließung auf den CO₂-Fußabdruck ermöglicht.

Verbindungen hingegen setzen sich aus Einheiten oder anderen Verbindungen zusammen. Als Daumenregel gilt hier, dass Verbindungen Dienstleistungen oder Anforderungen repräsentieren. Ein Beispiel für eine Verbindung ist der Transport von Produkten von Punkt A nach Punkt B. Dadurch wird eine Strukturierung und effiziente Abbildung komplexer Prozesse und Dienstleistungen ermöglicht.

Die folgende Tabelle präsentiert eine Übersicht über die verschiedenen Datenstrukturen. Dies versuchen, Daten, welche ein Prozess charakterisieren, darzustellen.

Einheit	Verbindung
EnergyType: Definiert eine Energiequelle mit ihren Emissionen mit der dazugehörigen Datenquelle.	Machine Shift: Stellt eine Schicht für eine Maschine dar. Verbindet daher eine Maschine mit einer Schicht.
Location: Stellt einen Standort dar. Dabei wird zwischen Zulieferern (Supplier), Produzierenden Standorten (Production Sites) und Verkaufsstellen (Sales Region) unterschieden. Diese werden durch die Koordinaten ihres Standortes charakterisiert. Somit können diese auf einer Karte dargestellt werden.	Facility: Ist ein Teil von einem Standort. Man kann es sich vorstellen als ein Bürogebäude oder weiteren neben der Produktionshalle. Dabei wird einen wird noch eine Skalierungsmethode gespeichert werden, welche angibt, wonach eine Facility wächst. Diese können entweder keine Skalierung sein, oder eine Skalierung nach..

Einheit	Verbindung
Zusätzlich speichern dieser ihre Energiequellen für Elektrizität, Kühlung, Heizen sowie Dampf. Dabei könne auch die Anzahl von Emissions-Zertifikaten gespeichert, falls auch CO2 beachtet werden soll. Um bei Arbeitern den Überblick zu behalten werden noch die Anzahl von Mitarbeitern den stündlichen Lohn dieser und die Kosten der Büroräume pro Meter gespeichert. Die maximale Fläche wird verwendet, damit ein Standort nicht unendliche groß werden kann.	• Anzahl an Maschinen • Maschinen Fläche • Büro Fläche • Totale Fläche • direkte Angestellte • indirekte Angestellte • alle Angestellte • Produktionsstunden • anzahl der Produzierten Produkte
Product: Stellt ein Produkt mit seinem Gewicht und seiner Transportart dar. Der Transport von Produkten ist unterschiedlich effizient, je nachdem, ob diese in Masse oder einzeln transportiert werden. Diese Transportart unterscheidet zwischen <i>durchschnittlich</i>, <i>schwer</i> oder <i>leicht</i>.	Shift: Eine Schicht abstrahiert die Arbeitszeiten und verknüpft eine Location sowie einen <i>Schichtfaktor</i>. Der <i>Schicht Faktor</i> soll die unterschiedliche Vergütung für verschiedene Schichten darstellen. Bspw. werden Arbeiter an Sonntagen besser vergütet.
Vehicle: Stellt ein Transportfahrzeug dar. Ein Fahrzeug wird durch den gebrauchten Energietypen, sowie den verbrauch für <i>Durchschnittliche</i>, <i>Masse</i> und <i>leichte</i> Transporte.	Transport Route: Eine Transportroute verbindet zwei Standorte mit ihrer ProcessChain. Dabei wird zusätzliche die Distanz, die Stückkosten und Zeit, für den Transport, gespeichert.
Indirect Function: Diese Datenstruktur soll speicher, wie das Verändern von der, Standortgröße, Anzahl der direkten und indirekten Mitarbeiter die Kosten verändern. Für diese Abstraktion wird der Standort, welche diese modifiziert, die Anzahl von Vollbeschäftigten und indirekten Mitarbeitern an dort sowie wie die Basis Kosten, gespeichert.	GlobalDemand: Dies ist das Herzstück und bringt alles zusammen. Mit dieser Struktur wird eine Transportroute mit dem Zoll kosten, Anzahl der versendeten Produkte, die Produktionskosten und Verkaufspreise des gesamten Produktionsnetzwerks in Verbindung gebracht.
Machine: Prozessschritte verwenden die Maschinen und die Schichten, die dieser zugeteilt sind, um eine Auslastung der Maschinen zu schätzen.	Bill Of Material: Die Stückliste, welche angibt, aus welchen anderen Produkten ein Produkt hergestellt wird. Diese speichert al-

Einheit	Verbindung
Daherkommend halten die Maschinen ihren Standort • Fläche • OEE Faktor ▸ Overall Efficiency • Anzahl der Mitarbeiter pro Maschine • Energietyp für ihren Verbrauch	so Produkte sowie deren Stückzahl, um ein weiteres Produkt zu herzustellen.
	Process Chain: Diese verbindet ein Produkt mit den Kosten pro Stück sowie einen Transport Faktor, welcher angibt, wie schwer es ist dieses Produkt zu transportieren, im Vergleich zu anderen Produkten.
	Cost: Diese Datenstruktur enthält die Kosten, sowie einen Typen, auf welche sich die Kosten beziehen. Diese Kosten können bedeuten: • Einfache Kosten • Stundenkosten pro Maschine • Fixkosten für eine Maschine • Fixkosten für einen Standort • Stückkosten für einen jeweiligen Prozessschritt

In OptiWo existieren zusätzliche Datenstrukturen, die jedoch primär der Klassifizierung von Daten in die Kategorien *Projektdaten* oder *Szenariodaten* dienen. Die Daten der Szenarien werden dabei aus den Projekten übernommen, sodass ein manuelles Eintragen in jedes Szenario nicht erforderlich ist.

In der vorliegenden Untersuchung wird diese Unterscheidung jedoch außer Acht gelassen, da sie nicht zum Modell eines globalen Produktionsnetzwerks beiträgt, sondern eine vereinfachte Handhabung ermöglicht.

4.2. Zusammenfassung des Modells

Das Modell zeigt einen einfachen Zusammenhang zwischen Verkäufern, Produktion innerhalb des Netzwerkes sowie Verkauf. Die Berechnung der Kosten gestaltet sich demnach als relativ einfach. Die Kosten sind dabei die Summe der Kosten aller verkauften Produkte, d. h. die Herstellung- und Transportkosten. Der Gewinn ist die Summe der Verkaufspreise der verkauften Produkte.

Die erfassten Daten werden in tabellarischer Form in Excel Dateien hochgeladen.

5. Zirkuläre Produktion in OptiWo

Das zuvor präsentierte Datenmodell ist das Resultat einer rudimentären Vorstellung eines Datenmodells. Gemäß dieser wird ein Erzeugnis aus seinen Rohmaterialien produziert und später erworben.

Die in Abbildung 2 dargestellte Produktion kann als mehrstufiger Prozess verstanden werden, bei dem Komponenten innerhalb eines Produktionsstandorts mehrfach die Maschine wechseln oder im Unternehmensnetzwerk zwischen verschiedenen Standorten versendet werden, bevor das resultierende Produkt an einen Kunden vertrieben wird

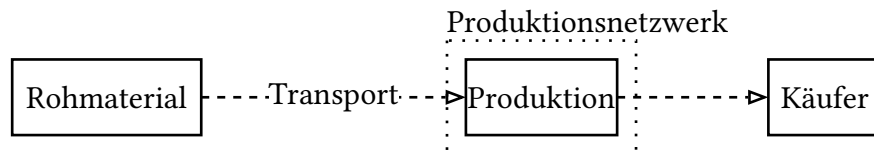


Abbildung 2: Lebenslauf eines Produkts

Dabei werden in dem Datenmodell für OptiWo nur *Produktion* und *Transport* mithilfe von Daten abgebildet. *Rohmaterial* sind Produkte welche von anderen Unternehmen eingekauft werden und können als Transport von den Verkäufern zu den Produktion-Standorten dargestellt werden. Im Unterschied zu ihrem Namen, muss es sich bei *Rohmaterial* nicht um von der Natur direkt entnommenen Materialien handeln, wie beispielsweise *Eisenerz*, sondern kann auch schon andere, fertige Produkte bezeichnen.

Cube kauft beispielsweise die Ketten für ihre Fahrräder bei *Shimano* ein, in diesem Kontext sind aber diese Ketten ein *Rohmaterial*.

5.1. Erweiterung

OptiWo ist ein Tool, welches auf die Produktion innerhalb eines Netzwerkes abgestimmt ist. Aufgrund dessen wird hier vor allem auf die *R*-Strategien *Recycle*, *Remanufacture* und *Refurbish* eingegangen, da diese direkt an die Produktion anknüpfen. Strategien wie *Rethink*, *Reduce* und *Refuse* sind zwar im Gesamtkontext der Zirkularität von Bedeutung, sind jedoch nicht mit direkt an die Produktion gebunden.

Die Strategien *Repair*, *Reuse* sowie *Repurpose* tragen zwar zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei, jedoch geschieht dies außerhalb der Produktion und Produktionsnetzwerks. Für ein auf die Produktion zugeschnittenes Modell ist dies von geringer Relevanz.

Recover hat wenig mit einem wiedereinführen von Produkten in die Produktion zu tun. Auch hier ist es uninteressant für eine Modellierung mit Fokus auf einem Produktionsnetzwerk wie in OptiWo nicht von Interesse.

Die Strategie *Recover* führt das Produkt nicht in das Produktionsnetzwerk zurück, ist. Auch hier ist die Modellierung dieser Strategie in ein Modell mit Fokus auf ein Produktionsnetzwerk nicht zielführend.

Um Reverse Logistics Modellieren zu können, muss eine Anpassung des OptiWo-Modells vorgenommen werden. Hierfür sind Standorte erforderlich, von welchen Produkte am Ende ihres Nutzens eingesammelt werden können.

Zudem ist eine Überprüfung der Eignung erforderlich, um die drei oben ausgewählten Strategien abbilden zu können.

Schließlich ist eine Reinigung der Produkte erforderlich, die auch eine Ausbesserung kleinerer Probleme mit den Teilen umfassen kann.

Alle drei *R*-Strategien ähnlich sind, da Sie jeweils versuchen ein Produkt an seinem Nutzungsende wieder in die Produktion rückführen. Dabei unterscheiden diese sich in ihrer Granularität, wie Produkt nach einer rückführung bearbeitet wird.

- Recycling zielt darauf ab, Produkte in Rohmaterialien umzuwandeln, die anstatt der ursprünglich aus der Natur entnommenen Rohmaterialien verwendet werden können. Das auf diese Weise gewonnene Material ist am einfachsten wiederverwendbar und am vielfältigsten einsetzbar.
- Remanufacturing zielt hingegen auf die Rückführung des Produktes in seinen ursprünglichen Zustand ab. Zu diesem Zweck ist eine Demontage des Produktes und der Austausch der verbrauchten Komponenten erforderlich. Im Fokus steht die Reduktion des Einsatzes von Neumaterial, wobei nur diejenigen Komponenten ausgetauscht werden, die zur Erfüllung der Funktion des Produkts zwingend ausgetauscht werden müssen
- Refurbishment geht einen Schritt weiter als das Remanufacturing. Anstatt zu versuchen das Produkt in den Originalzustand zurückzuführen versucht das Produkt mit so wenig aufwand wie möglich so nah wie möglich an den Originalzustand zurückzuführen. Es stellt einen Kompromiss dar, in welcher Qualitätseinbuße gegen geringeren Material aufwand eingetauscht wird.

Kurz: Diese drei tauschen sukzessiv die benötigte Energie zur Wiederverwertung gegen eine verringerte Einsatzmöglichkeiten des Entstehenden Material/Produktes ein.

5.2. Müllverwertung

Das Ziel einer Kreislaufwirtschaft ist es, den entstehenden Abfall durch die Produktion zu verringern. Dadurch wird es vorallem wichtig zu wissen, wieviel Müll trotz der Wiederverwendung entsteht.

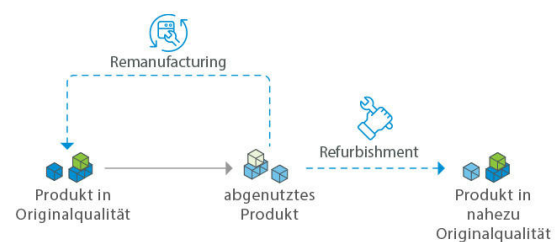


Abbildung 3: Unterschied zwischen Remanufacturing und Refurbishment [8]

- Verpackungsmüll: Müll, welcher durch die Verpackung von Produkten entsteht. Dieser fällt innerhalb des Produktionsnetzwerkes vor allem bei dem Transport von Produkten auf.
- Unverwertbare Produkte: Dies sind Produkte, welche nicht mehr in einen Wiederverwendungsprozess aufgenommen werden können. Dazu zählt auch der Rest eines Produktes, welcher in einem Demontageschritt von allen wiederverwendbaren Komponenten befreit wurde.

Verpackungsmüll können pro Transportschritt definiert werden. Der Verpackungsmüll für einen Transport ist der Aggregierte Müll der einzelnen Transportschritte. Dabei muss bekannt sein, wie viel Verpackungsmüll pro transportiertem Produkt anfällt. Dies kann eine Mengenangabe in mehreren Produkten sein, so wird eine Palette, mit dutzenden Produkten nur einmal verpackt.

Diese müssen zuerst überprüft werden, bevor diese weiter verwendet werden können. Nachdem aber ihre Unverwertbarkeit festgestellt wurde, müssen auch diese entsorgt werden.



Fügt man die besprochenen, fehlenden, Teile dem OptiWo Modell hinzu, kann dieses wie folgt in Abbildung 5 werden:



- 13

5.2.4. Was geht verloren?

Dieses Modell ist jedoch nicht in der Lage, die zirkuläre Produktionsweise in ihrer gesamten Komplexität adäquat abzubilden. So wurden bereits die meisten *R*-Strategien ausgeschlossen, da diese nicht von einem globalen Produktionsnetzwerk beeinflusst werden können.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass weitere Aspekte in dieser Darstellung verloren gehen.

Schließlich ist diese Analyse als Momentaufnahme zu betrachten, wodurch der zeitliche Verlauf nicht berücksichtigt wird, sondern lediglich Momentaufnahmen erfasst werden. Diese Herangehensweise bedeutet, dass dynamische Veränderungen oder Trends über die Zeit hinweg nicht in die Bewertung einfließen. Ferner werden Ausfälle und Disruptionen im Prozessablauf nicht berücksichtigt. Solche Ereignisse könnten jedoch entscheidende Abweichungen oder Unregelmäßigkeiten aufzeigen, die in der Analyse unentdeckt bleiben.

Ein weiterer Aspekt ist die potenzielle Ungenauigkeit der Daten für die Analyse selbst. Die Analyse beschränkt sich auf Durchschnittswerte, sodass Abweichungen, die durch weitere Einflussfaktoren bedingt sein könnten, nicht berücksichtigt werden können. Dies erschwert eine differenzierte Betrachtung.

Schließlich erfolgt keine Überprüfung auf semantische Fehler der Daten. Diese werden als konsistent angenommen. In Anbetracht dieser Aspekte ist eine vorsichtige Interpretation der Ergebnisse zu empfehlen.

5.3. Anpassung des Datenmodells von OptiWo

Das Datenmodell von OptiWo, welches bereits im Abschnitt 4.1 erörtert wurde, erweist sich als überraschend universell anwendbar und eignet sich in hohem Maße für die Anwendung in diesem Produktionsmodell.

Dadurch können einige Teile schon gut dargestellt werden:

- So kann Rezyklat als von einem Zulieferer stammendes Produkt behandelt werden, dessen Preis sich im Vergleich zu direkt aus der Natur entnommenen Materialien unterscheidet.
- Des Weiteren ist Refurbishment als ein Produktionsprozess zu betrachten, bei dem die Verwendung von Teilen, die aus anderen Produkten stammen, zur Herstellung neuer Produkte erfolgt. Dabei ist es irrelevant, ob die entsprechenden Teile aus der Produktion oder der Demontage stammen.
- Der durch die Käufer anfallende Müll muss nicht in das Datenmodell aufgenommen werden. Dieser kann approximativ aus der Differenz der eingesammelten Produkte zu den hergestellten Produkten ermittelt werden.

Es besteht jedoch noch Anpassungsbedarf bei anderen Teilen.

- Einerseits sind die Sammelstellen als eigenständiger Standorttyp zu betrachten. Zudem ist es essenziell, die Menge der eingesammelten Produkte zu kennen. Es ist zu ermitteln, ob die Anzahl der wieder eingesammelten Produkte proportional von den verkauften Produkten abhängt oder ob sie vollständig unabhängig von dieser ist. Es sollte eine Differenzierung

zwischen einem Retourenquotienten und der einfachen Anzahl der Produkte pro Sammelstelle erfolgen.

- Eine Prüfung zur Klassifizierung der Produkte hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit ist erforderlich.
- Die Demontage kann abstrahiert werden, indem ein Produkt in mehrere verwendbare Teilprodukte aufgeteilt und der Rest entsorgt wird.
- Die Transportschritte müssen die bei diesen pro Transport anfallende Menge an Verpackungsmüll berücksichtigen.

Für die Erfassung der anfallenden Abfallmengen ist eine entsprechende Angabe erforderlich.

5.3.1. Datenstrukturen für angepasste Teile

Die Datenstrukturen müssen wie folgt erweitert werden, um dem vorgestellten Modell zu entsprechen.

5.3.1.1. Sammelstellen

Für Sammelstellen wird ein neuer Typ eingeführt. Sammelstellen enthalten die Anzahl an angefallenen genutzten Produkte.

5.3.1.2. Prüfen

Die Prüfung kann auch an einem Standort durchgeführt werden und muss nicht ein eigener Standort sein. Dabei verbindet eine Prüfung ein Produkt mit einer Wiederverwendungsquote $\in [0, 1]$ welche beschreibt, wie viele Produkte die Prüfung beziehungsweise, wie viele das nicht tun.

5.3.1.3. Müll

Müll wird durch ein Produkt beschrieben, sowie seinen Entsorgung-Kosten. Bei negativen Werten bedeutet dies, dass das Teilprodukt gewinnbringend entsorgt werden kann.

5.3.1.4. Demontage

Hierbei wird ein Produkt, mit seinen wiederverwendbaren Teilprodukten und einem Restprodukt, welches nicht verwertet werden kann und entsorgt werden muss, in Verbindung gebracht.

5.3.1.5. Transportschritt

Ein Transportschritt werden zwei neue Attribute hinzugefügt. Das erste Attribut bestimmt den Müll, welcher durch die Verpackungen entstehen, sowie die Menge der Verpackungen, welche pro Transport anfallen.

5.4. Zusammenfassung

Die Erweiterung des Datenmodells erhöhen den zusätzlich Daten bedarf die Berechnung eines Szenarios. Doch ist es möglich mit diesen Änderungen zirkuläre Produktionen darzustellen.

5.5. Vergleich mit Modellierung von BAUMANN

Bereits im Jahr 2021 wurde eine Arbeit zur Modellierung von Zirkularität in OptiWo erarbeitet. Die Arbeit von BAUMANN [9] hat diese Arbeit motiviert.

In diesem Kapitel wird das zuvor erarbeitete Modell mit dem Modell von BAUMANN verglichen. Der Fokus liegt hierbei auf dem Vergleich der beiden Modelle, da beide eine Abbildung der Zirkularität in OptiWo darstellen. Am Ende des Kapitels werden die Vor- und Nachteile der Modelle beschrieben und eine Empfehlung dargelegt, welches Modell bei der Nutzung von OptiWo verwendet werden soll.

5.5.1. Modell von BAUMANN

Die von BAUMANN durchgeführte Arbeit basiert auf einem alternativen Modell, welches in einer Publikation der ALLEN MACARTHUR FOUNDATION [10] erarbeitet wurde. In dieser Publikation werden Kennzahlen zur Bewertung der Zirkularität eines bereits bestehenden globalen Produktionsnetzwerks ermittelt. Dieses Modell wird von BAUMANN auf das Produktionsnetzwerk OptiWo übertragen.

Ziel ist es, weitere R-Strategien abbildbar zu machen. Diese Strategien sind: Recycling, Remanufacturing, Refurbishment, Reuse, Composting sowie Recovery.

Dabei muss erwähnt werden, dass die Strategie des Compostings nicht im 9R Framework berücksichtigt wird. Diese Strategie zielt darauf ab, den Umgang mit biologischem Abfall zu adressieren. Durch den Einsatz von biologisch abbaubaren Materialien kann die Erzeugung von Biogas zur Energiegewinnung realisiert werden, anstatt die Materialien zu entsorgen.

Darüber hinaus werden weitere Indikatoren für die Produktion berücksichtigt, wie beispielsweise Energieverbräuche und CO₂-Emissionen. Die Berechnung der CO₂-Emissionen erfolgt dabei auf Basis des Energieverbrauchs. Die Berücksichtigung des CO₂-Faktors ist durch die Weiterentwicklung von OptiWo bereits ermöglicht. Darüber hinaus werden weitere Faktoren für die Produktion berücksichtigt, darunter: Der Wasserverbrauch pro Produkt und der anfallende gefährliche Müll, welcher nicht auf reguläre Art entsorgt werden darf, werden berücksichtigt.

Diese werden für die Berechnung von Zirkularitätsindikatoren verwendet, wie beispielsweise dem *Linear Flow Index* (LFI).

Die Darstellung des Modells erfolgt durch Abbildung 6. Die Pfeile stellen den Fluss der Produkte innerhalb eines Produktionsnetzwerkes dar. Dabei werden die Produkte von einem Bereich zum nächsten transportiert.

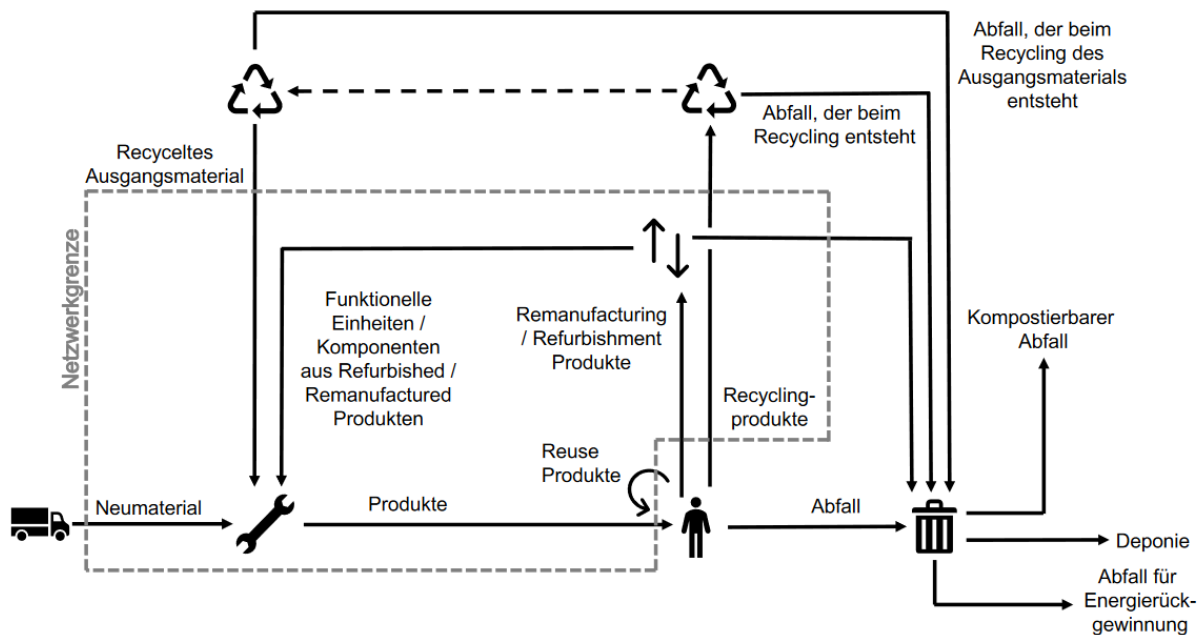


Abbildung 6: Fluss von Produkten in einem Produktionsnetzwerk

In der Produktion werden Neumaterial sowie in die Produktion zurückgeführtes Rezyklat, Refurbished sowie Remanufactured Teile zu Produkten weiterverarbeitet.

Das Recycling findet außerhalb des Produktionsnetzwerkes statt und wird zu einem späteren Zeitpunkt wieder in das Netzwerk eingeführt. Die Remanufacture/Refurbishprozesse hingegen finden innerhalb des Netzwerkes statt.

Die außerhalb des Produktionsnetzwerkes anfallenden Abfälle werden weiterverarbeitet und entweder einer Kompostierung zugeführt, zur Energierückgewinnung verwendet oder auf einer Deponie entsorgt.

Mit diesem Modell erreicht BAUMANN das Ziel, die Indikatoren aus dem Paper der ALLEN MACARTHUR FOUNDATION [10], wie den *Linear Flow Index (LFI)* oder den *Material Circularity Indicator*, in OptiWo zu berechnen.

Das Modell von Baumann könnte folglich ein globales Produktionsnetzwerk in seiner Gänze darstellen und die vorgestellten Indikatoren berechnen. Darüber hinaus ermöglicht dies einen Vergleich von Produktionsnetzwerken oder unterschiedlichen Szenarien eines einzigen Produktionsnetzwerkes und ermöglicht so detailliertere Analysen.

5.5.2. Unterschiede

Das Modell von BAUMANN umfasst eine Vielzahl von Faktoren. In diesem Zusammenhang werden auch Produktions- sowie Wiederverwendungsschritte berücksichtigt, die außerhalb des unternehmensspezifischen Produktionsnetzwerkes ausgeführt werden.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Recycling in der Praxis oft von externen Anbietern übernommen wird.

Die Modellierung von BAUMANN eines Kreislaufsystems ist umfassender und berücksichtigt eine größere Anzahl von Faktoren als das in dieser Arbeit entwickelte Modell. Dies erhöht die

Aussagekraft der berechneten Kennzahlen und ermöglicht die Berechnung weiterer Indikatoren, wie den Linear Flow Index [10].

Jedoch resultiert aus der gesteigerten Aussagekraft ein erhöhter Datenbeschaffungsaufwand, da Daten einbezogen werden, die außerhalb der Grenzen des unternehmensspezifischen Produktionsnetzwerks liegen.

5.6. Zusammenfassung und Auswahl des Modells

Das Modell von BAUMANN sowie das in dieser Arbeit geschaffene Modell weisen eine gewisse Ähnlichkeit auf, wurden jedoch für unterschiedliche Anwendungsbereiche konzipiert.

Das Modell von BAUMANN zielt darauf ab, eine präzise Abschätzung eines zirkulären Produktionsnetzwerks zu ermöglichen. Zusätzlich kann dieses mit weiteren zirkulären Indikatoren auch eine Bewertung ganzer Produktionsnetzwerke ermöglichen und so Aussagen über die Zirkularität dieser Produktionsnetzwerke treffen. Es ist jedoch anzumerken, dass dies mit einem erhöhten Datenbeschaffungsaufwand einhergeht.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell zielt darauf ab, die Darstellung des Produktionsnetzwerks eines Unternehmens zu vereinfachen.

Dies geht mit einer verringerten Aussagekraft der berechneten Kennzahlen einher, verringert jedoch auch die Anzahl der Daten und den damit verbundenen Aufwand der Beschaffung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beide Modelle den Versuch unternehmen, ein zirkuläres Produktionsmodell zu repräsentieren, wobei sie dies jedoch aus unterschiedlichen Perspektiven tun.

Das Modell nach BAUMANN zielt darauf ab, ein umfassendes Bild zu liefern, das insbesondere für Forschungsanwendungen von Nutzen ist.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell wiederum zielt darauf ab, Unternehmen die Erfassung eines nahezu vollständigen Bildes ihres Netzwerkes zu erleichtern, wobei es insbesondere Entscheidungen von Änderungen eines Produktionsnetzwerkes eine nötige Grundlage geben soll.

6. Fazit

In dieser Arbeit wurde ein umfassendes Modell zur Darstellung globaler zirkulärer Produktionsnetzwerke in der firmeninternen Software OptiWo erarbeitet. Der Fokus der Untersuchung lag auf der Entwicklung eines spezifischen Modells für produzierende Unternehmen, das die verschiedenen Aspekte der Zirkularität in der Verarbeitung von Produkten abdeckt.

Die Anwendung des 9R Frameworks ermöglichte die Abbildung spezifischer Strategien wie Recycling, Remanufacturing und Refurbishing. Die Anwendung dieses Modells ermöglicht es Unternehmen, ihre Produktionsprozesse zu modellieren und zirkuläre Strategien zu evaluieren, um durch informierte Entscheidungen eine Richtung für die Fortentwicklung nachhaltiger Praktiken zu erarbeiten.

Das Modell berücksichtigt dabei den Kostenfaktor des entstehenden Mülls sowie den erhöhten logistischen Aufwand, der durch die notwendigen Rücktransporte in das Produktionsnetzwerk entsteht. Diese Aspekte sind entscheidend für die wirtschaftliche Bewertung zirkulärer Ansätze.

Des Weiteren wurde das in dieser Arbeit entwickelte Modell mit dem Modell von BAUMANN verglichen, welches die Anwendungsfälle dieser beschreibt.

Die Implementierung der vorgestellten Modelle erlaubt eine anschließende Analyse der entstehenden Kosten sowie eine Schätzung der zirkulären Kennzahlen des Netzwerkes.

Anhand dieser können mehrere Szenarien entwickelt und bewertet werden, um präzisere Schätzungen zu ermöglichen.

Darüber hinaus wäre eine Verbindung der vorgestellten Modelle denkbar, welche die Stärken beider kombinieren, um ein jeweils präziseres oder einfacheres Bild der globalen zirkulären Produktionsnetzwerke eines Unternehmens zu analysieren.

Bibliographie

- [1] A. Feldmann, J. Olhager, und F. Persson, „Designing Manufacturing Networks – An Empirical Study“, 2007, *Springer US*.
- [2] J. Sydow und G. Möllering, „Produktion in Netzwerken make, buy & cooperate / von Jörg Sydow ; Guido Möllering“, 2004, *Vahlen*.
- [3] M. P. de Brito, S. D. P. Flapper, und R. Dekker, „Reverse Logistics: a review of case studies“, 2002, *Econometric*.
- [4] „Amazon Trade-In-Programm“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.amazon.de/Trade-In/b?node=21262011031>
- [5] „Deposit Refund Schemes: ENSURING THAT POLLUTERS PAY“, European Commission, Okt. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://environment.ec.europa.eu/document/download/82cfd431-afd6-4cd1-aed4-70edd7a23dfa_en?filename=Deposit%20Refund%20Schemes.pdf
- [6] José Potting, Marko Hekkert, Ernst Worrel, und Aldert Hanemaaijer, „CIRCULAR ECONOMY: MEASURING INNOVATION IN THE PRODUCT CHAIN“, Januar 2017, *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*.
- [7] J. Jonker, N. Faber, und T. Haaker, „Quick Scan Circular Business Models“, 2022, *Ministry of Economic Affairs and Climate Policy The Hague, The Netherlands*. [Online]. Verfügbar unter: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/quick-scan-circular-business-models_ebook.pdf
- [8] „Kreislaufführung von Produkten und Bauteilen“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislauffuehrung-im-verarbeitenden-gewerbe/kreislauffuehrung-von-produkten-und-bauteilen/>
- [9] Paula Baumann, „Datenbasierte Beschreibung und Modellierung von Circular Economy Aktivitäten in globalen Produktionsnetzwerken“, 2021.
- [10] James Goddin, Kim Marshall, Ana Pereira, und Sven Herrmann, „An approach to measuring circularity Published 2015 adapted 2019“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://emf.thirdlight.com/link/3jtevhkbuks-9of4s4/@/preview/1?o>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visualisierung einer Rückholung von Produkten	5
Abbildung 2: Lebenslauf eines Produkts	11
Abbildung 3: Unterschied zwischen Remanufacturing und Refurbishment [8]	12
Abbildung 4: Modellierung von Müll.	13
Abbildung 5: Lebenslauf von Produkten in einer Zirkulären Produktion	13
Abbildung 6: Fluss von Produkten in einem Produktionsnetzwerk	17

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre verbindlich, dass die vorliegende Seminararbeit von mir selbstständig erstellt wurde und im Sinne der Prüfungsordnung erstellt wurde. Die als Arbeitshilfe genutzten Unterlagen sind in der Arbeit vollständig aufgeführt. Ich versichere, dass der vorgelegte Ausdruck mit dem Inhalt der von mir erstellten digitalen Version identisch ist. Weder ganz noch in Teilen wurde die Arbeit bereits als Prüfleistung vorgelegt. Mir ist bewusst, dass jedes Zuwiderhandeln als Täuschungsversuch zu gelten hat, der die Anerkennung der Seminararbeit als Prüfungsleistung ausschließt.

Aachen, 19.12.2024