



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Diplomarbeit

Entwicklung einer Methodik zur Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transporttechnologien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Mensch-Maschine-Interaktion)

Univ.Lektor Dipl.-Ing. BSc Nikolaus Kremslehner

(Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Martin Caldonazzi, BSc

Matr.Nr. 11815150

Wien, April 2025

Martin Caldonazzi



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an 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, April 2025

Martin Caldonazzi

Danksagung

Zunächst möchte ich allen meinen herzlichen Dank aussprechen, die mich sowohl fachlich als auch persönlich bei der Verfassung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund, der mir es ermöglicht hat, diese Arbeit am Institut für Managementwissenschaften der Technischen Universität Wien zu verfassen.

Ebenso bedanke ich mich bei meinem Betreuer Univ.Lektor Dipl.-Ing. BSc Nikolaus Kremslehner, für seine wertvolle wissenschaftliche Unterstützung und die Möglichkeit, an diesem spannenden Forschungsprojekt der Fraunhofer Austria Research GmbH mitzuwirken. Außerdem gilt ihm ein spezieller Dank für die aufgebrauchte Zeit sowie den hilfreichen Ratschlägen und Anmerkungen, die wesentlich zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen haben.

Zudem möchte ich meiner Freundin und allen Freunden für die motivierenden Worte und fachlichen Anregungen während der Entstehung dieser Arbeit, sowie für ihren Rückhalt und ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanken.

Anschließend gebührt meiner Familie Dank, die mich nicht nur während meines Studiums, sondern auf meinem ganzen Lebensweg unterstützt und gestärkt hat.

Gender Erklärung

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Diplomarbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

Kurzfassung

Die zunehmende Flächenknappheit und steigenden Anforderungen an eine effiziente Nutzung industrieller Produktions- und Lagerflächen fordert Unternehmen dazu auf, ihre Materialflusssysteme verstärkt in die vertikale Richtung zu planen. Während derzeit überwiegend horizontal angeordnete Fabriklayouts vorhanden sind, gewinnen mehrstöckige Fabriken zunehmend an Bedeutung, da sie eine effizientere Raumnutzung begünstigen. Bestehende Ansätze zur Auswahl innerbetrieblichen Transportmittel fokussieren sich jedoch primär auf Förderprozesse in einer Ebene, sodass bislang keine Methode identifiziert werden kann, welche spezifisch die Auswahl geeigneter Transporttechnologien für den stockwerksübergreifenden Materialfluss adressiert. Angesichts der zusätzlichen Herausforderungen bei der Planung und Integration vertikaler Transportmittel im Vergleich zum Materialtransport in der Ebene, besteht daher ein dringender Bedarf an einer strukturierten Methode, welche die Entscheidungsfindung passender Lösungen bereits in frühen Planungsphasen erleichtert.

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, eine systematische Auswahlmethodik für innerbetriebliche vertikale Transportmittel zu entwickeln, die Unternehmen bei der Planung ihrer Materialflusskonzepte unterstützt. Hierzu gilt es relevante Parameter zur Technologieauswahl bereitzustellen, welche anhand der jeweiligen Ausgangssituation spezifisch ausgewählt und berücksichtigt werden. Durch eine strukturierte und anwenderfreundliche Vorgehensweise soll die Planung im frühen Stadium erleichtert werden. Darüber hinaus ist es ein Ziel dieser Arbeit, die entwickelte Auswahlmethodik in einem realen Fallbeispielen zu validieren und ihre praktische Anwendbarkeit zu demonstrieren.

Zur Zielerreichung wird anhand einer umfassenden Literaturanalyse ein strukturiertes Vorgehensmodell entwickelt, welches mithilfe verschiedener Hilfsmittel eine Bewertung des technischen Nutzens und der Wirtschaftlichkeit ermöglicht. Die Methodik stellt eine Auswahl relevanter Kriterien und Parameter der Technologieauswahl aus der Literatur zur Verfügung, um eine individuelle anwendungsspezifische Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Neben den technischen Aspekten werden insbesondere die auftretenden Herausforderungen bei der Planung und Integration vertikaler Transportmittel sowie wirtschaftliche Parameter berücksichtigt. Die Validierung der vorliegenden Methodik erfolgt anhand vier unterschiedlicher experimenteller Anwendungsbeispiele, sowie einer anschließenden Auswertung der Fachexperten mittels eines standardisierten Fragebogens.

Abstract

The increasing shortage of space and the rising demands for efficient utilisation of industrial production- and storage areas are pushing companies to plan their material flow systems more vertically. While factory layouts are currently mostly horizontal, multi-level factories are becoming increasingly important as they favour a more efficient use of space. However, existing approaches for selecting internal means of transport focus primarily on conveying processes in one floor. No method has yet been identified that specifically addresses the selection of suitable transport technologies for a multi-floor material flow. Considering the additional challenges involved in planning and integrating vertical means of transport compared to material transport on one level, there is an urgent need for a structured method that simplifies the decision-making process for suitable solutions in the early planning phases.

The aim of this scientific work is to develop a systematic selection methodology for internal vertical means of transport that supports companies in planning their material flow concepts. This involves providing relevant parameters for technology selection, which are specifically selected and taken into account based on the respective initial situation. A structured and user-friendly approach is intended to facilitate planning at an early stage. In addition, an objective of this work is to validate the developed selection methodology in a real use case and to demonstrate its practical applicability.

In order to achieve this goal, a structured approach model is developed on the basis of a comprehensive literature analysis. This method enables various tools to evaluate both the technical usefulness and cost-effectiveness of the technologies. The methodology provides a selection of relevant criteria and parameters from existing literature in order to enable an individual application-specific decision-making for technology selection. In addition to the technical aspects, the challenges that arise when planning and integrating vertical means of transport and economic factors are also taken into account. The present methodology is validated through four different experimental use-cases, followed by an expert evaluation using a standardised questionnaire.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	3
1.3	Definition der Forschungsmethodik	4
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit	6
2	Theoretische Grundlagen	8
2.1	Transportlogistik Grundlagen und Begriffsdefinition	8
2.1.1	Intralogistik	8
2.1.2	Transporteinheit	10
2.1.3	Transportmittel	11
2.1.4	Innerbetriebliche vertikale Transportmittel	13
2.1.5	Transportprozess	21
2.2	Mehrstöckige Produktion	22
2.2.1	Fabrikplanung	22
2.2.2	Entwicklung mehrstöckiger Produktion	24
2.2.3	Neubau von Geschossbauten	25
2.2.4	Vertikale Gebäudeerweiterung	26
2.2.5	Integration von Produktionsprozesse in Bestandsgebäude	28
2.2.6	Best Practices	30
2.2.7	Herausforderungen bei der Planung vertikaler Transportmittel	32
2.3	Ansätze zur Entscheidungsfindung	36
2.3.1	Analytische Ansätze	36
2.3.2	Induktive Ansätze	41
2.4	Zusammenfassung des Kapitels	43
3	Systematische Literaturanalyse	45
3.1	Vorgehensweise der Literaturanalyse	45
3.2	Auswertung	46
3.3	Forschungslücke	51
4	Entwicklung der Auswahlmethode	53
4.1	Anforderungen an die Methode	53
4.2	Vergleich der Methoden	55

4.3	Kriterien zur Transportmittelauswahl	58
4.3.1	KO-Kriterien	61
4.3.2	Zusätzliche Kriterien	63
4.4	Standardkennwerte vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel.....	67
4.5	Gesamtbild der Methode	68
4.6	Vorgehensweise	70
4.6.1	Schritt 1: Analyse der Ausgangssituation.....	71
4.6.2	Schritt 2: Anforderungsanalyse	77
4.6.3	Schritt 3: Identifikation möglicher Alternativen	80
4.6.4	Schritt 4: Bewertungsvorbereitung	81
4.6.5	Schritt 5: Technologische Bewertung.....	86
4.6.6	Schritt 6: Kommerzielle Bewertung	89
4.6.7	Schritt 7: Analyse und Entscheidung	97
5	Experimentelle Anwendung und Validierung der Methode.....	99
5.1	Vorgehensweise der Evaluierung	99
5.2	Fallbeispiel 1: Medizintechnik.....	102
5.3	Fallbeispiel 2: Reifenproduzent	107
5.4	Fallbeispiel 3: Möbelbeschläge Hersteller	111
5.5	Fallbeispiel 4: Holzverarbeitung	117
5.6	Erkenntnisse und Fazit.....	121
6	Diskussion und Ausblick	126
6.1	Diskussion der Ergebnisse	126
6.2	Ausblick	132
7	Literaturverzeichnis	134
8	Abbildungsverzeichnis	146
9	Formelverzeichnis	147
10	Tabellenverzeichnis	148
11	Abkürzungsverzeichnis	151
12	Anhang	152

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Industrie stellt mit 30% des Bruttoinlandsproduktes ein essenzielles Rückgrat der österreichischen Wirtschaft dar und ist somit maßgeblich am Wirtschaftswachstum beteiligt (Statistik Austria, 2023). Derzeit verzeichnet Österreich mehr als 82.000 Industrie- und Lagergebäude, wobei jährlich über 1000 neu gegründete Industrieunternehmen bewilligt werden (Statistik Austria, 2024). Diese spielen nicht nur bei der Beschaffung von Arbeitsplätzen eine bedeutende Rolle, sondern tragen auch zur Steigerung des nationalen Wohlstands bei. Trotz dieses anhaltenden Wachstums stehen Industrieunternehmen und Gemeinden vor der zunehmenden Herausforderung, Flächen effizient für Produktions-, Lager- und Logistikzwecke zu nutzen, da diese industriellen Einrichtung abgesehen von Wohnsiedlungen bedeutende Treiber der Flächeninanspruchnahme in Österreich sind (ÖROK, 2023). Oftmals wird zur Errichtung solcher Industriebauten mit horizontalen Produktions- und Lagerprozessen wertvoller neuer Boden versiegelt (Stengler, 2012). Eine Lösung könnte darin bestehen, die zahlreichen brachliegenden Industrie- und Gewerbeflächen im Land wieder zu nutzen oder bestehende Fabriken vertikal aufzustocken (Enzinger, 2022). Laut (König, 2017) stößt ein Gebäude bis zur Fertigstellung bereits 40-70% der CO₂-Emissionen aus, die es im gesamten Lebenszyklus verursacht. Sanierungen und Umbauten sollten daher den Vorzug gegenüber Abriss und Neubau haben. In Anbetracht dieser Tatsache und der Begrenzung weiterer Flächenversiegelung, sind Maßnahmen zur effizienten Nutzung der Bodenressourcen von entscheidender Bedeutung (Enzinger, 2022). Einer überschlägigen Schätzung aus dem Jahre 2017 zufolge gibt es 5.000 bis 10.000 brachliegenden Industrie- und Gewerbestandorte, welche ein Potenzial zur Nachnutzung bieten würden (Enzinger, 2017). Oftmals stehen diese leer, weil die Gebäude zu klein oder die Maschinen zu alt geworden sind und der Standort somit zukünftig nicht für die Produktion ausreichend ist. Auch die strukturellen Veränderungen in der österreichischen Industrie trugen in den letzten Jahren immer mehr dazu bei, dass durch Unternehmensfusionen, rasch voranschreitende Digitalisierungsprozesse oder der Rückkehr von produzierenden Unternehmen in das städtische Gebiet, vermehrt industrielle Brachflächen entstanden (Haselsteiner et al., 2023). Die Online-Enzyklopädie „Enzyklo.de“ definiert den Begriff Industriebranche folgendermaßen: „Industriebranche ist eine Branche, die nach der Aufgabe der industriellen Nutzung von Industrieanlagen entsteht. Die Gebäude und Anlagen werden dann dem Verfall preisgegeben und/oder auch rückgebaut“ (Enzyklo, 2024). Österreichweit gibt es dadurch etwa 130 km² an ungenutzten, brachliegenden Industrie- und Gewerbeflächen, welche zum Teil durch eine Revitalisierung neu genutzt werden könnten. Diese Industriebrachen verfügen meist über Wasser-, Strom-

und Kanalnetze, welche für die Produktion ausschlaggebend sind. Vorhandene Infrastrukturen wie gute Verkehrsanbindungen durch Straßen, Brücken und Bahnverbindungen sind für viele Unternehmen weitere wichtige Kriterien bei der Standortwahl, welche alte Produktionsstandorte attraktiv zur Wiedernutzung machen. Diese Ressourcen bleiben jedoch derzeit oft noch unbenutzt, da Unternehmen Schwierigkeiten haben, diese in ihre Planungen zur Erweiterung oder bei Neuansiedlung von Produktions- und Lagerstätten zu integrieren. Laut dem Umweltbundesamt (2008) fallen österreichweit jährlich rund 11 km² brach, wovon ca. 85% nur wenig oder minimal kontaminiert sind und somit zum Recycling zur Verfügung stehen würden. Bei einem jährlichen Flächenbedarf von rund 23 km², könnte somit rein rechnerisch fast die Hälfte des österreichischen Flächenverbrauchs durch Brachflächen abgedeckt werden (Wepner et al., 2004). Dies ist auch im Interesse der Republik Österreich, welche in ihrem Regierungsprogramm 2020 bis 2024 eine Förderung und Erweiterung des Brachflächenrecycling ermöglichen will, um dem Ziel einer Reduktion des Gesamtflächenverbrauch auf 2,5 Hektar pro Tag bis 2030, näher zu kommen (Republik Österreich, 2020). Damit die geforderten Umweltziele erreicht und insbesondere neue Flächenversiegelungen vermieden werden können, sind kosteneffiziente und zeitsparende Konzepte zur Nutzung und Erweiterung vorhandener Industrie- und Gewerbeflächen zu entwickeln.

Eine äußerst effiziente Methode, um zusätzlichen Raum für die Produktion zu gewinnen, wäre die vertikale Gebäudeerweiterung. Denn im Gegensatz zur horizontalen Erweiterung, welche in der Regel eine größere Grundfläche benötigen und somit zu einer weiteren Versiegelung der Bodenressourcen führt, ermöglicht die vertikale Erweiterung durch Aufstockung der vorhandenen Gebäude eine umweltfreundliche Methode neuen Raum zu schaffen, was langfristig die Nachhaltigkeit fördern kann (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1). Ein Problem, das sich mit einer solchen vertikalen Erweiterung ergibt, ist, dass für die Umsetzung der Materialflüsse über mehrere Etagen spezielle Technologien benötigt werden. Diese sind jedoch oftmals mit höherem Aufwand und Kosten verbunden als der Transport in der Ebene. Um eine möglichst kosteneffiziente Einbettung vertikaler Produktionsprozesse in bestehende Bestandsgebäude zu ermöglichen, ist es daher wichtig, die vertikalen Transportmittel hinsichtlich ihrer Merkmale wie Investitions- und Betriebsaufwand, Platzbedarf oder Eignung für bestimmte Ladegüter zu bewerten. In der Literatur kommt es oft zu einer Unterscheidung der primären Förderrichtung, wobei die meisten Transportmittel dabei eine horizontale oder schräge Bewegung vorweisen und Technologien mit einer rein vertikalen Transportrichtung (z.B.: Aufzug, Hebezeuge usw.) nur wenig berücksichtigt werden (Wehking, 2020). Das derzeitige Problem besteht daher darin, dass überwiegend der horizontale Materialtransport betrachtet wird und es keine klare Selektionsmethode gibt, um diese vertikalen innerbetrieblichen Transportmöglichkeiten zu bewerten. Die Hauptmotivation dieser Arbeit liegt darin, eine innovative Auswahlmethodik zu entwickeln, welche die Unternehmen bei der

Planung von vertikalen Materialflusskonzepten unterstützt. Mit Hilfe eines systematischen Verfahrens kann somit die am besten geeignete Lösung für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt und infolgedessen bei der Optimierung des Materialflusses und der Bewertung des Gesamtkonzeptes berücksichtigt werden. Durch die Entwicklung und Umsetzung einer solchen Methodik können Unternehmen nicht nur ihre Produktions- und Lagerprozesse effektiver gestalten und leichter implementieren, sondern leisten gleichzeitig durch eine optimale Nutzung bestehender Ressourcen einen bedeutenden Beitrag zum nachhaltigen Umgang mit der Flächeninanspruchnahme.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, eine systematische Auswahlmethodik für vertikale innerbetriebliche Transporttechnologien zu entwickeln, welche die Unternehmen bei der Planung ihrer Materialflusskonzepte über mehrere Etagen unterstützt. Hierbei werden vorliegende Umgebungsbedingungen und transporttechnologische Systemspezifikationen unterschiedlicher Transportalternativen durch die Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Anforderungen miteinander verglichen und bewertet. Betrachtet werden dabei Merkmale und Eigenschaften, die dabei helfen sollen, spezifisch für den jeweiligen Anwendungsfall die geeignetste Technologie auszuwählen. Dadurch soll Unternehmen geholfen werden, eine fundierte Entscheidung zu treffen. Angesichts der zunehmenden Herausforderungen im Zusammenhang mit der Flächennutzung und -entwicklung zielt die Ausarbeitung dieser Entscheidungshilfe darauf ab, dass vermehrt Produktions- und Lagerprozesse in Bestandsgebäude integriert oder vertikal erweitert werden können, um der Flächenversiegelung entgegenzuwirken. Zudem soll die Methode bei Neubauprojekten schon früh im Planungsprozess berücksichtigt werden, um somit die Entscheidungsfindung zu erleichtern. Des Weiteren gilt es, die in dieser Arbeit entwickelte Auswahlmethodik, anhand realer Fallbeispiele zu validieren und ihre praktische Anwendbarkeit zu demonstrieren. Basierend auf diesen unterschiedlichen Anwendungsfällen, wird die Wirksamkeit der Methodik unter realen Bedingungen überprüft und gegebenenfalls optimiert. Mit Hilfe des entwickelten Vorgehensmodells sollen Unternehmen schlussendlich in der Lage sein, die Eignungs- und Umsetzbarkeit bestimmter Transportmittel zu bewerten. Insgesamt soll diese Arbeit einen wertvollen Beitrag zur Optimierung innerbetrieblicher Transportprozesse leisten, indem Unternehmen bei der Planung vertikaler Materialflusskonzepte unterstützt werden.

Aus der Zielsetzung und dem erwarteten Ergebnis leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

1. Welche Herausforderungen und Hindernisse bestehen bei der Planung und Integration vertikaler Transporttechnologien in vorhandene Produktions- und Lagerprozesse?
2. Wie können verschiedene vertikale Transporttechnologien bewertet und ausgewählt werden, um die geeignetste Lösung für das definierte Zielsystem zu identifizieren?
3. Welcher Nutzen entsteht durch den Einsatz dieser Auswahlmethode und welche Einschränkungen ergeben sich in der praktischen Anwendung?

1.3 Definition der Forschungsmethodik

Die Arbeit zielt darauf ab, eine systematische Auswahlmethode für vertikale innerbetriebliche Transporttechnologien zu entwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, werden verschiedene Methoden für die Umsetzung der Forschung angewendet. Als Grundlage dafür dient die Design Science Research Methodologie (DSRM), um basierend auf Informationen aus der Fachliteratur eine geeignete Auswahlmethodik zu entwickeln.

Bei der DSRM handelt es sich um ein Rahmenwerk, welches zur Erarbeitung und Strukturierung der Forschungsergebnisse dient, um die Arbeit nachvollziehbarer für Dritte zu gestalten. Im Vergleich zu den traditionellen wissenschaftlichen Methoden, steht bei der DSRM die Implementierung neuer Lösungen im Mittelpunkt (vom Brocke et al., 2020). Diese Methodik findet in vielen Bereichen wie bei Informationssystemen, im Ingenieurwesen, der Architektur oder der Wirtschaft als fundamentales Problemlösungsparadigma Verwendung, um deren realwissenschaftliche Herausforderungen zu bewältigen (Hevner et al., 2004; vom Brocke et al., 2020). In diesem Ansatz werden Artefakte definiert, welche zur Identifikation von Ineffizienzen und Problemstellungen dienen (Hevner et al., 2004). Laut Peffers et al., (2007) können unter solchen Artefakte sowohl Konstrukte, Rahmenwerke, Algorithmen, Methoden als auch Modelle verstanden werden, welche zur Lösungsfindung des Problems beitragen. Da es sich bei dieser Arbeit um die Entwicklung einer konzeptionellen Methodik zur Auswahl innerbetrieblicher vertikaler Transportmittel handelt, wird dies als Artefakt verstanden. Dabei soll eine Handlungsweise konzipiert werden, welche zur Identifikation der geeignetsten Alternative dient.

Zur Vorgehensweise bei der DSRM gibt es in der Literatur zahlreiche Prozesse wie die von Hevner (2007) und Kuechler & Vaishnavi (2008), oder das am meisten

referenzierte Modell nach Peffers et al. (2007). Auch in dieser Arbeit wird das Prozessmodell nach Peffers et al. (2007) als Basis herangezogen. Dessen Ablauf besteht wie in Abbildung 1 gezeigt, aus den sechs aufeinander folgenden Prozessschritten:

1. Problemerkennung und -motivation
2. Zieldefinition
3. Design und Entwicklung
4. Anwendung
5. Evaluierung
6. Kommunikation

Diese Prozesse müssen nicht immer strukturiert von eins bis sechs durchlaufen werden (Peffers et al., 2007). Laut vom Brocke et al. (2020) kann auch der Eintritt zur Problemlösung, je nach Betrachtungsweise und Fortschritt des vorliegenden Problems, in vier unterschiedlichen Einstiegsstufen erfolgen: Problemorientierter-, zielorientierter-, Design- und entwicklungsorientierter-, kunden- und kontextorientierter Lösungsansatz.

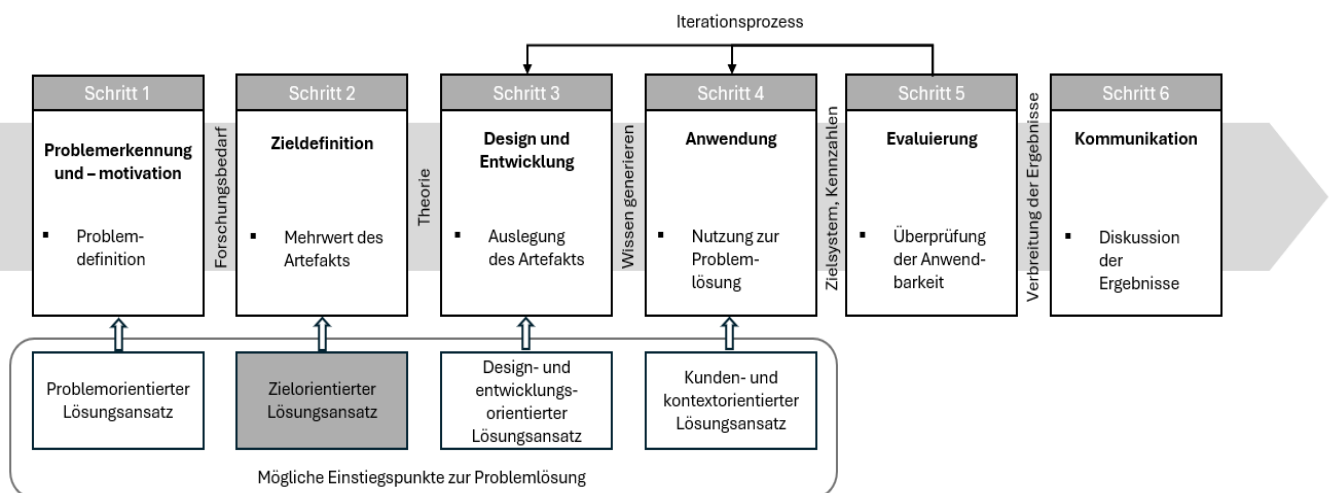


Abbildung 1: Prozessmodell in der DSRM (eigene Darstellung in Anlehnung an Peffers et al., 2007)

Da es sich in dieser Arbeit um die Entwicklung einer Methode zur Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel handelt, startet der Prozess in Stufe 2: Zieldefinition und wird anschließend in beide Richtungen schrittweise nach Außen durchlaufen. Grund dafür ist, dass laut Peffers et al. (2007) ein zielorientierter Lösungsansatz durch ein Forschungs- und Industrieinteresse zur Entwicklung eines Artefaktes in Bezug auf eine spezifische Problemstellung, angestoßen wird. Für diese Arbeit liegt eine praktische Problemstellung mit wissenschaftlicher Relevanz zu Grunde. In Prozessschritt 2 werden daher die Forschungsziele definiert und die notwendigen theoretischen Grundlagen beschrieben. Zudem wird eine systematische Literaturrecherche (vgl. Kapitel 3) hinsichtlich bekannter Methoden zur

Technologieauswahl durchgeführt, um vorhandene Forschungsergebnisse aufzuzeigen und wichtige Merkmale und Anforderungen für vertikalen Transporttechnologien zu identifizieren. Der Prozessschritt 3 (Design und Entwicklung) bezieht sich auf die Entwicklung des Artefakts. Ziel dieses Abschnittes ist es eine Methode zur Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel zu entwickeln, welche für diverse Anwendungsfälle anwendbar ist. Die in der Auswahlmethode verwendeten Bewertungsgrößen werden dabei aus den in Kapitel 2 beschriebenen Theoretische Grundlagen und der in Kapitel 3 durchgeführten systematischen Literaturanalyse abgeleitet. Dieses entworfene Artefakt wird im Prozessschritt 4 (Anwendung) anhand von vier realen Fallstudien, durch verschiedene Anwender evaluiert (vgl. Kapitel 5: Experimentelle Anwendung und Validierung der Methode). Dies ergänzt die methodische Vorgehensweise und ermöglicht es, die erarbeitete Methodik in reale Anwendungsfälle zu implementieren und dadurch dessen Anwendbarkeit in Prozessschritt 5 (Evaluierung) zu validieren. Entsprechen dabei die Ergebnisse nicht den zuvor definierten Anforderungen, so ist es in diesem Schritt möglich, zu Schritt 3 oder 4 zurückzukehren und Anpassungen am Artefakt vorzunehmen. Basierend auf den ausgewerteten Ergebnissen des empirischen und theoretischen Teiles werden anschließend die Forschungsfragen dieser Arbeit beantwortet. Im letzten Schritt 6 (Kommunikation) werden schließlich das zu lösende Problem, das entworfene Artefakt und alle Erkenntnisse wissenschaftlich aufbereitet und mit den relevanten Interessengruppen kommuniziert.

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in 6 Kapitel unterteilt, wobei sich der inhaltliche Aufbau an die gewählte Forschungsmethode (DSRM) nach Peffers et al. (2007) richtet. In der nachfolgenden Abbildung 2 sind der strukturelle Aufbau der Arbeit sowie die zugehörigen Schritte des DSRM-Prozesses ersichtlich.

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 1 die vorliegende Ausgangssituation und Motivation erläutert. Aufbauend auf die Problemstellung werden danach Ziele abgeleitet, wodurch sich spezifische Forschungsfragen ergeben, welche im Zuge dieser Arbeit beantwortet werden sollen.

Das zweite Kapitel widmet sich den theoretischen Grundlagen indem zunächst zentrale Begrifflichkeiten der Transportlogistik erläutert werden. Anschließend wird auf die Besonderheiten der mehrstöckigen Produktion eingegangen, aus welchen sich die Herausforderungen bei der Planung und Integration vertikaler Transportmittel ableiten lassen. Abschließend werden verschiedene Ansätze zur Entscheidungsfindung erläutert, um in weiterer Folge eine gezielte Analyse der Literatur durchführen zu können.

Kapitel 3 widmet sich somit der systematischen Literaturrecherche, in der relevante wissenschaftliche Arbeiten identifiziert und daraus der weitere Forschungsbedarf anhand einer Forschungslücke definiert wird.

In Kapitel 4 liegt der Fokus auf der Entwicklung der Auswahlmethodik und der dafür benötigten Werkzeuge. Es werden dafür konkrete Anforderungen an die Methode gestellt, welche zur Bewertung der Praxistauglichkeit und Anwenderfreundlichkeit der Methode erfüllt werden müssen.

Das Kapitel 5 dient zur experimentellen Anwendung und Validierung der Methode anhand realer Fallbeispiele, um eine praxisnahe Evaluierung der an die Methode gestellten Anforderungen zu ermöglichen.

Im letzten Kapitel wird eine Diskussion der erzielten Ergebnisse durchgeführt und versucht, die zu Beginn definierten Forschungsfragen zu beantworten. Des Weiteren wird abschließend ein Ausblick auf potenzielle Weiterentwicklungen der Methode sowie weiterführenden Forschungsbedarf eingegangen.

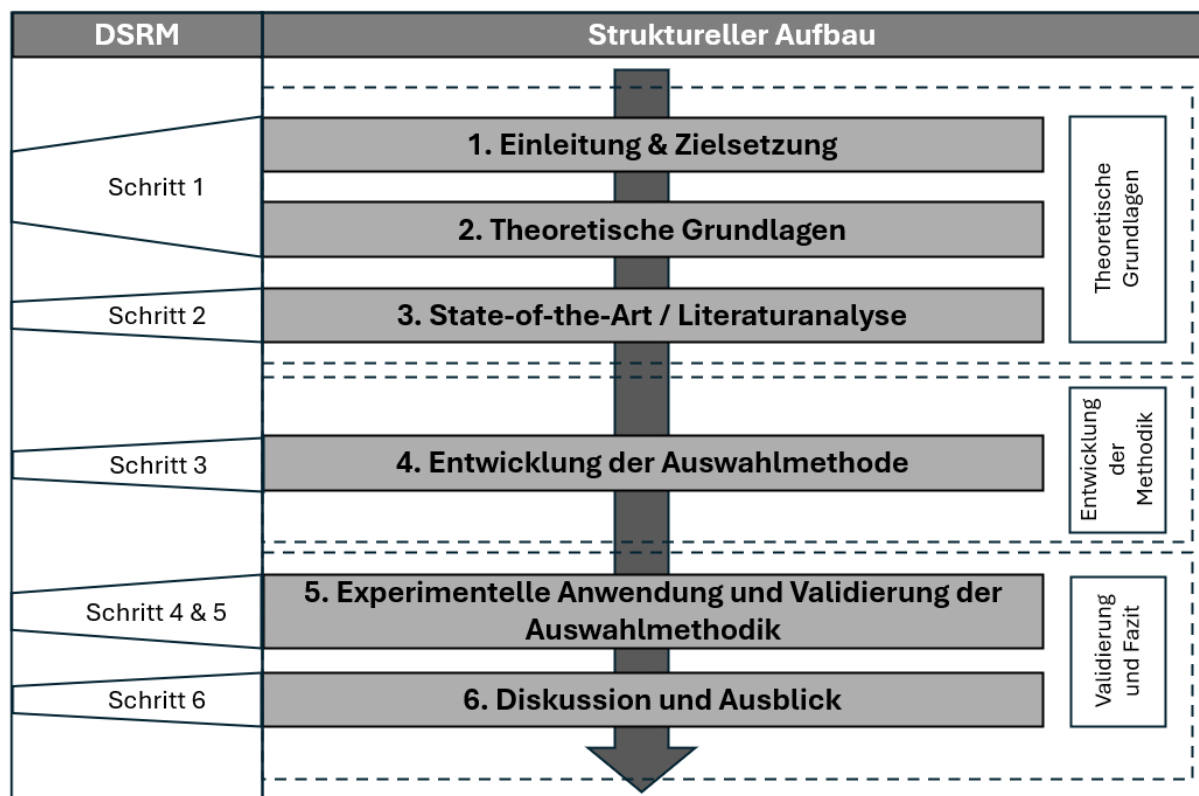


Abbildung 2: Struktureller Aufbau der Arbeit (Eigene Darstellung)

2 Theoretische Grundlagen

Das folgende Kapitel 2 dient dem Verständnisaufbau der theoretischen Grundlagen, welche für die Entwicklung der Methode relevant sind. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die notwendigen Begriffsdefinitionen der Transportlogistik definiert, welche als Grundlagen für die weitere Arbeit gelten soll. Des Weiteren wird in Kapitel 2.2 auf die mehrstöckige Produktion eingegangen, welche je nach Ausgangssituation entscheidenden Einfluss auf die Planung der vertikalen Materialflüsse mit sich bringt. Das dritte Unterkapitel widmet sich den theoretischen Ansätzen, welche zur Entscheidungsfindung herangezogen werden können. Zum Abschluss dieses Kapitels folgt eine Zusammenfassung der beschriebenen Aspekte.

Durch eine umfassende Ausarbeitung dieser theoretischen Grundlagen soll in weiterer Folge eine fundierte Beantwortung der in Kapitel 3.3 identifizierten Forschungslücke ermöglicht werden.

2.1 Transportlogistik Grundlagen und Begriffsdefinition

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Aspekte der Transportlogistik erläutert, wodurch eine umfassende Basis für das Verständnis innerbetrieblicher Materialflüsse geschaffen wird. Dabei wird zuerst in Abschnitt 2.1.1 der zentrale Begriff der Intralogistik definiert und erörtert. In den weiteren Abschnitten 2.1.2 bis 2.1.5 werden die für den Transport wichtigen Begriffe des Transportgutes, Transportmittels und des Transportprozess betrachtet. Abschnitt 2.1.4 fokussiert sich dabei speziell auf die bereits beschriebenen Transportmittel und grenzt diese durch eine spezifische Betrachtung der vertikalen Transportmittel, welche einen stockwerksübergreifenden Materialfluss ermöglichen, weiter ein.

2.1.1 Intralogistik

Die Intralogistik oder auch innerbetriebliche Logistik genannt, ist ein Teilbereich der Unternehmenslogistik und umfasst die Aufgabenbereiche der Beschaffungs-, Distributions- sowie der Produktionslogistik, welche innerhalb des Betriebsgeländes stattfinden (Martin, 2021). Dazu zählen alle innerbetrieblichen Material- und Informationsflüsse, welche für den Wertschöpfungsprozess entscheidend sind (Hompel et al., 2018). Der Materialfluss kann aus Sicht eines Unternehmens in zwei Teilbereiche unterteilt werden, externer und innerbetrieblicher Materialfluss (Martin, 2021). Unter externen Materialflüssen versteht man alle Aspekte, die den Güterfluss von und zu dem Betriebsgelände betrachten. Dabei sind die Standortwahl, die Verknüpfung der Werksanlage mit dem Verkehrsnetz und vor allem Warenanlieferung sowie der Versand entscheidende Faktoren. Der Begriff Intralogistik wurde definiert, um eine Abgrenzung zu den Logistikprozessen außerhalb des Unternehmens zu

schaffen. Sie verfolgt dabei das Ziel, das benötigte Transportgut in der korrekten Menge und Qualität, zur richtigen Zeit, am gewünschten Ort zu minimalen Kosten verfügbar zu machen (Martin, 2021). Die wichtigsten operativen Funktionen des innerbetrieblichen Materialflusses sind das Umschlagen, Lagern, Transportieren, Kommissionieren und Verpacken. Anstelle des Begriffes „innerbetrieblicher Materialfluss“ wird in der Logistik oft auch der Begriff „Fördern“ verwendet (Jünemann & Schmidt, 1999). Insbesondere beim Integrieren der Produktion in bestehende Betriebsgebäude mit vielen Restriktionen, bildet der Materialfluss ein ausschlaggebendes Kriterium bei der Planung (Martin, 2013). Entscheidend dabei ist die effizienteste Routenführung zwischen Aufnahme- und Abgabepunkt, da es ansonsten zu hohen Kosten wegen überlasteter Fahrwege und ineffizienter Routen kommen kann (Martin, 2016). Der Materialfluss innerhalb der Betriebs- und Grundstücksgrenzen kann laut Martin (2021) wiederum, wie in Abbildung 3 gezeigt in drei weitere Ebenen (Betriebsintern, Gebäudeintern und Arbeitsplatzbereich) aufgespalten werden.

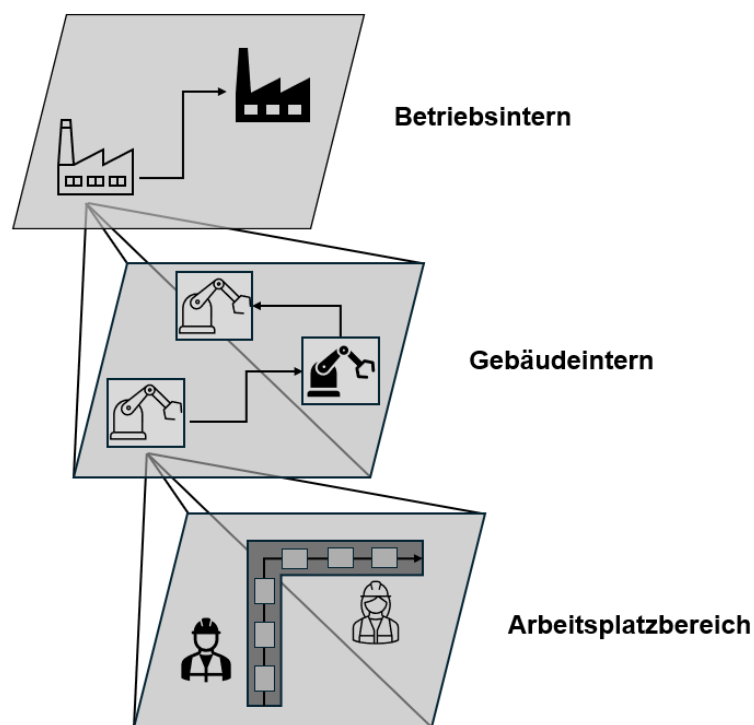


Abbildung 3: Einteilung des Materialtransportes innerhalb des Betriebsgeländes (Eigene Darstellung in Anlehnung an Martin (2021))

In der betriebsinternen Ebene wird die Gestaltung und zweckmäßige Zuordnung der Gebäude, sowie der Materialfluss zwischen den einzelnen Gebäuden auf einem Betriebsgelände betrachtet. Der gebäudeinterne Bereich umfasst die materialflussgerechte Layoutfestlegungen und Abteilungszuordnung innerhalb eines Gebäudes. Dabei sind vor allem die Materialflüsse zwischen den einzelnen Abteilungen zu betrachten und die erforderlichen Transportsysteme zu definieren. Im

Arbeitsplatzbereich wird die Feinplanung der Materialflüsse an den Arbeitsplätzen und deren ergonomische Gestaltung betrachtet (Martin, 2021). In dieser Arbeit steht insbesondere die Planung des gebäudeinternen Bereiches im Vordergrund, wodurch vor allem die Layoutplanung, Routenführung und Materialflussplanung von zentraler Bedeutung sind. Dabei sind vor allem die Materialflüsse zwischen den einzelnen Geschossen zu betrachten, welche durch sogenannte vertikale Transportmittel realisiert werden. Zur Planung eines solchen Materialflusses sind eine Vielzahl an Parametern notwendig, welche die Transportmittelauswahl maßgeblich beeinflussen (Hompel et al., 2018).

Um eine fundierte Entscheidung treffen zu können, ist es daher unerlässlich, konkrete unternehmensspezifische Informationen der zu tätigenen Transportaufgaben zu erhalten. Jede innerbetriebliche Transportaufgabe besteht, wie in Abbildung 4 zu sehen ist, aus der zu transportierenden Einheit, dem dabei verwendeten Transportmittel und dem Transportprozess (Günthner et al., 2006). Diese drei Begriffe werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

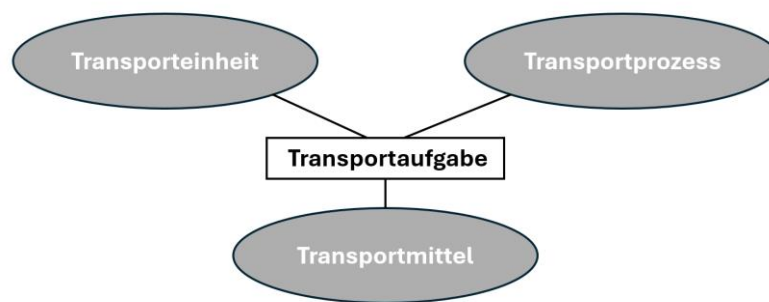


Abbildung 4: Bestandteile eines Transportes (Eigene Darstellung)

2.1.2 Transporteinheit

Bei der Auswahl des Transportmittels spielt das Transportgut eine entscheidende Rolle, da sich je nach Stoffzusammensetzung (fest, flüssig oder gasförmig) der innerbetriebliche Materialfluss unterscheidet (Martin, 2021). In dieser Arbeit werden jedoch nur feste Transportgüter betrachtet. Diese werden durch ihre physikalische Beschaffenheit in Schüttgut (z.B.: Sand, Mehl, Kohle) und Stückgut (z.B.: Fertigungs- und Montageteile, Behälter, Dosen) unterteilt (Arnold et al., 2008). Von einem Schüttgut ist laut Martin (2021) die Rede, wenn es sich um ein stückiges, körniges oder staubiges Massengut handelt, das eine Fließfähigkeit aufweist und während des Transportvorgangs seine Gestalt ändern kann. Schüttgüter können jedoch nicht ohne Hilfsmittel zu einer Transporteinheit zusammengefasst werden. Ein Stückgut hingegen behält während des gesamten Transportprozesses seine Gestalt und kann nur als eine Einheit (dem sogenannten Stückgut) transportiert werden. Da sich die einzelnen Transportgüter durch ihre Form, Masse, Abmessungen und sonstige Eigenschaften

sehr voneinander unterscheiden können, wird das Schüttgut oder oftmals auch mehrere Stückgüter in sogenannte Transporthilfsmittel (z.B.: Paletten, Boxen) zu einer größeren Transporteinheit zusammengefasst (Arnold et al., 2008; Fottner et al., 2022; Hompel et al., 2018). Solche Transporthilfsmittel (THM) dienen zur Bildung einer logistischen Einheit, um die Vielfalt der zu transportierenden Güter zu reduzieren, die Handhabung zu standardisieren und in weiterer Folge auch zu automatisieren (Martin, 2021). Damit die Lagerung und Funktionalität der logistischen Prozesse verbessert wird haben diese THM oft charakteristische Eigenschaften wie stapelbar, zusammenklappbar und ineinander schachtelbar. Martin (2021) unterteilt diese Transporthilfsmittel nach ihrer Bodenunterfahrbarkeit in:

- *Nicht unterfahrbare Transporthilfsmittel:* Dabei handelt es sich um Kleinladungsträger (KLT) mit einer Grundfläche von bis zu 400 x 600 mm. Beispiele dafür sind Kisten, Kleinbehälter, Schachteln usw.
- *Unterfahrbare Transporthilfsmittel:* Ab einer Grundfläche größer als 400 x 600mm spricht man von Großladungsträger (GLT) wie z.B.: Paletten, Großbehälter. Stückgüter und Kleinladungsträger können mit Hilfe solcher, zu größeren Transporteinheiten zusammengeführt und auch unterfahrbar gemacht werden, falls dies zuvor nicht möglich war.

Bei der Auswahl des geeigneten Transportmittels spielt daher nicht das Fördergut selbst die zentrale Rolle, sondern vielmehr die umfassende Betrachtung der gesamten Transporteinheit als Gesamtes. Aus wichtigen technischen Eigenschaften wie den maximalen Abmessungen, dem maximalen Gewicht, Lastverteilung sowie spezifische Handhabungseigenschaften können Grenzen abgeleitet werden (Fottner et al., 2022). Diese technischen Beschränkungen können den Einsatz bestimmter Transportmittel verhindern und gleichzeitig eine ineffiziente Überdimensionierung vermeiden. Auf Grund dessen ist eine sorgfältige Analyse und Bewertung dieser Kriterien von entscheidender Bedeutung, damit ein technisch und wirtschaftlich effizienter Transport erfolgen kann.

2.1.3 Transportmittel

Physische Güter durchlaufen entlang der Wertschöpfungskette eine Vielzahl unterschiedlicher räumlich getrennter Stationen, welche in der Regel mittels verschiedener Transportmittel miteinander verbunden werden (Hompel et al., 2018). Es ist dabei zu berücksichtigen, dass es sich bei dem Einsatz von Transportmitteln um sensible Schnittstellen in den Betriebsabläufen handelt. Kommt es zu einem Ausfall von einer dieser Fördereinrichtung, sind die Produktionsprozesse gefährdet und im schlimmsten Fall droht der Stillstand des laufenden Betriebes. Beim Auftreten von Warenbewegungen jeglicher Art muss daher geklärt werden, welches Transportmittel die logistische Aufgabe am zuverlässigsten, effektivsten und kostengünstigsten

bewältigen kann (Pfohl, 2018). Ein in der Literatur häufig verwendeter Ansatz zur Klassifizierung von Transportmitteln ist der technische Aufbau (Scheffler, 2013). Es gibt aber noch eine Vielzahl anderer Einteilungsmöglichkeiten wie: Antrieb, Tragfähigkeit, Förderleistung usw. In dieser Arbeit wird zuerst nach Beförderungsart unterschieden. Hierbei gliedert sich die Art des Transportmittels darin, ob es sich um einen kontinuierlichen (Stetigförderer) oder einen unterbrochenen (Unstetigförderer) Förderstrom handelt (Hompel et al., 2018). Bei der Entscheidung zwischen Stetigförderer und Unstetigförderer spielen besonders die Kosten und diverse technische Beurteilungskriterien (vgl. Kapitel 4.3) eine entscheidende Rolle (Pfohl, 2018). Unstetigförderer wie z.B.: Hebezeuge, Hängebahnen, Krane und Flurfördermittel sind durch ihre intermittierende Förderung gekennzeichnet, da ihr Förderprozess in einzelnen Arbeitsspielen erfolgen und somit ein unterbrochenen Förderstrom aufweisen (Grosseschallau, 2013). Aus diesem Grund kann es bei dieser Art von Transportmittel zu längeren Stillstandszeiten sowie Leerfahrten, wie zum Beispiel bei Be- und Entladevorgängen kommen. Sie werden vermehrt zum Fördern von kleinen und mittleren Mengen bei sich verändernden Wegen eingesetzt (Klaus & Krieger, 2013). Durch die hohe Anpassungsfähigkeit der Unstetigförderer finden sie vermehrt bei Neuplanungen Anwendung, da sie im Gegensatz zu Stetigförderer meist frei verfahrbar und somit bei Veränderungen in der Produktionsstruktur flexibler sind (Hompel et al., 2018). Für bekannte festgelegte Produktionslayouts mit hoher Leistung und Durchsatz, werden hingegen Stetigförderer wie z.B.: Bandförderer, Rollenbahnen etc. bevorzugt (Klaus & Krieger, 2013). Es handelt sich dabei um eine kontinuierliche Förderbewegung wobei stets dieselbe Förderrichtung beibehalten wird (Arnold et al., 2008). Durch die ortsfeste Installation sind sie daher gering flexibel gegenüber Layoutänderungen. Stetigförderer werden oftmals in zusätzliche technologische Prozesse wie Lackieren, Kühlen, Trocknen etc. miteingebunden, wodurch ein extra Zusatzprozess vermieden und somit weitere Kosten gespart werden können (Hompel et al., 2018). Eine weitere zusätzliche Differenzierung der Transportmittel kann wie in Abbildung 5 dargestellt, in flurgebundene und flurfreie Transportmittel vorgenommen werden. Wie es dem Namen entnehmen lässt, sind flurgebundene Transportmittel (Gabelstapler, Bandförderer usw.) an den Fußboden gebunden oder können über Gleise fahren die fest mit dem Boden verankert sind. Flurfreie Transportmittel (Brückenkran, Portalkran usw.) sind ausnahmslos durch ortsfeste Einrichtungen gekennzeichnet und verfahren dabei meist auf an der Hallendecke oder -wand befestigt Schienen oder auf wenigen Stützen, die im Boden verankert sind (Hompel et al., 2018). Sie zeichnen sich darin aus, dass der Transport üblicherweise oberhalb der eigentlichen Arbeitsebene oder Materialflusssysteme verläuft (Hompel et al., 2018). In Abbildung 5 wird eine mögliche Einteilung der Transportmittel und einige Beispiele zu der jeweiligen Transportmittelart aufgezeigt. Für eine detaillierte Beschreibung der vielfältigen Fördermittel und weitere Beispiele wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (Hompel et al., 2018; Koether, 2018; Martin, 2013; Schulte, 2013).

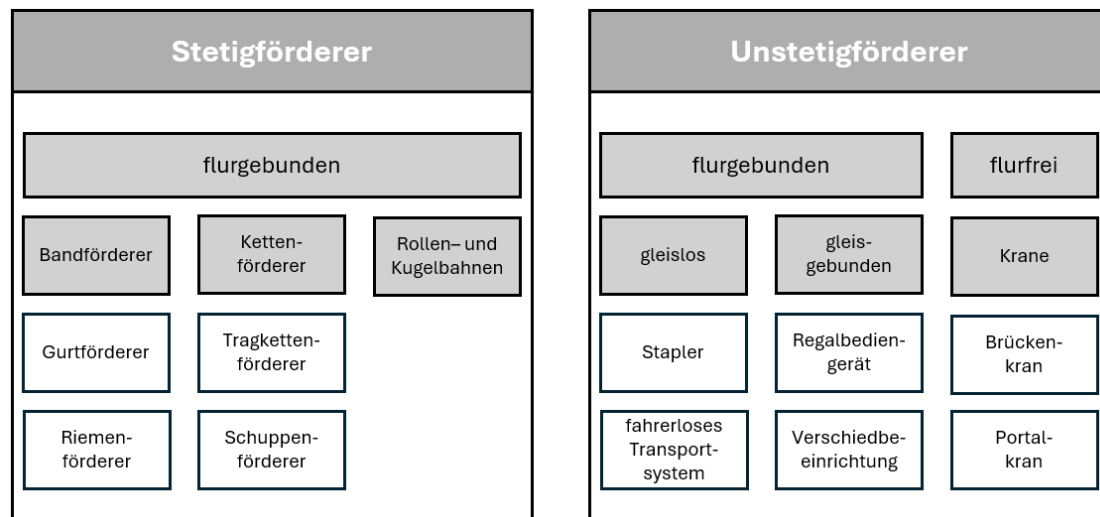


Abbildung 5: Einteilung der Transportmittel (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Günthner et al., 2006))

Im anschließenden Abschnitt 2.1.4 wird zusätzlich die für diese wissenschaftliche Arbeit bedeutende Differenzierung zwischen der Bewegung des Materialflusses in horizontaler und vertikaler Richtung unterschieden. Dabei wird spezifisch auf die vertikalen Transportmittel eingegangen und diese grundlegend erörtert.

2.1.4 Innerbetriebliche vertikale Transportmittel

Vertikale Transportmittel spielen in produzierenden Unternehmen eine zentrale Rolle, da sie den Materialfluss über verschiedene Höhenintervalle und zwischen den Etagen ermöglichen und somit die Produktivität und Effizienz der Produktionsprozesse erheblich beeinflussen. In diesem Abschnitt werden die zuvor erwähnten innerbetrieblichen Transportmittel noch weiter klassifiziert und es wird insbesondere auf die vertikalen Transportmittel eingegangen, welchen einen Materialfluss über mehrere Stockwerke ermöglichen. Im Gegensatz zu horizontalen Transportmitteln, die nur auf ebener Fläche operieren, müssen die vertikalen Fördermittel die Schwerkraft überwinden und oft schwere Lasten über mehrere Stockwerke hinwegbewegen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Auswahl vertikaler Transporttechnologien für den stockwerksübergreifenden Materialtransport. Im Zuge dessen sind nicht alle Transportmittel, die Transportgüter vertikal fördern können geeignet, sondern nur diejenigen, welche einen Materialfluss über mehrere Stockwerke ermöglichen. So können beispielsweise Krane, welche Materialien nur in einer Etage oder in kleine Höhenunterschiede heben, nicht für den Transport über mehrere Etagen verwendet werden. Um einen Überblick zu schaffen, wird in Abbildung 6 eine Einteilung der für den mehrgeschossigen Materialtransport am häufigsten eingesetzten innerbetrieblichen vertikalen Transportmittel angeführt. Abermals werden die Fördermittel in Stetig- und Unstetigförderer unterteilt und zusätzlich in

unterschiedliche Unterkategorien klassifiziert, die jeweils spezifische Anwendungsfälle und technische Eigenschaften aufweisen.

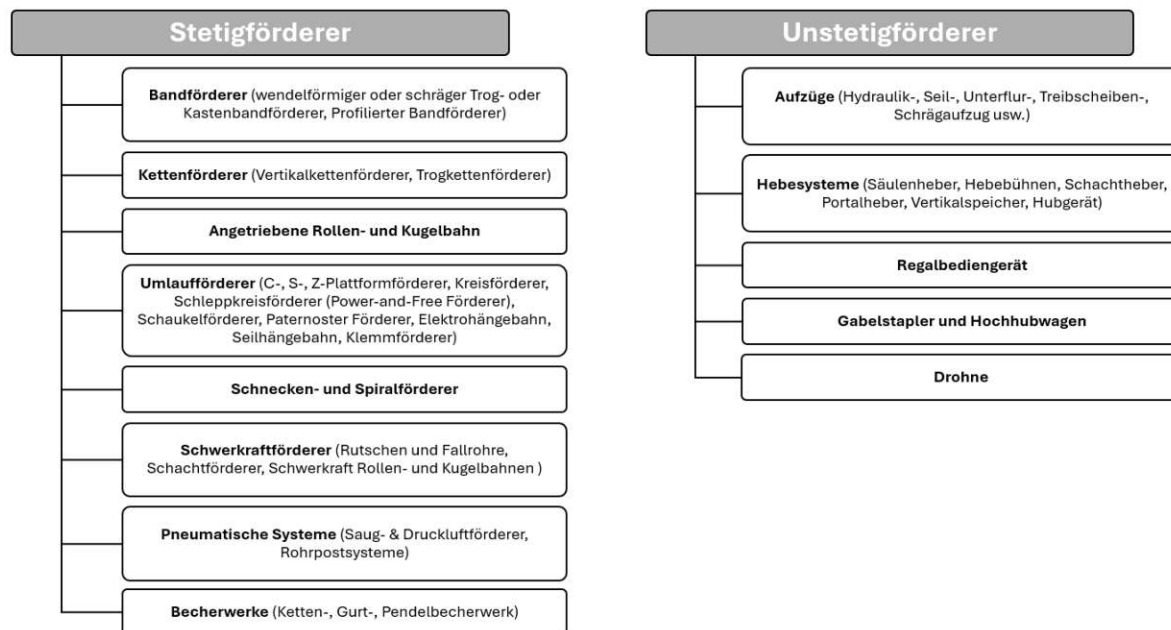


Abbildung 6: Einteilung vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel für den mehrgeschossigen Materialtransport (Eigene Darstellung)

Zu den gängigsten vertikalen Transportsystemen für den Stück- und Schüttguttransport über mehrere Etagen gehören Aufzüge, Hebesysteme, unterschiedliche Arten von Stetigförderern sowie Pneumatik- bzw. Schwerkraftsysteme. Folgend werden die einzelnen Kategorien aus Abbildung 6 noch ein wenig genauer erläutert und exemplarische Beispiele mit typischen Kennwerten angeführt.

Aufzüge: Aufzüge oder Etagenförderer sind besonders nützlich für den Transport von schweren und sperrigen Gütern zwischen verschiedenen Etagen einer Fabrik. Im Unterschied zu Kränen wird die Transporteinheit kontinuierlich auf einem Fahrkorb, einer Plattform oder einem Behälter transportiert, der fest mit dem Tragmittel verbunden ist und sich die gesamte Strecke in festen Führungen bewegt (Hompele et al., 2018). Diese ortsfesten Hebezeuge sind in der Lage, große Lasten sicher und zuverlässig sowohl vertikal als auch schräg zu heben und senken, wodurch sie ideal für die Bewegung von Rohstoffen, Halbfertig- oder Fertigprodukten in mehrstöckigen Produktionsanlagen sind (Wehking, 2020). Lastenaufzüge gibt es in vielen verschiedenen Bauformen, die sich anhand ihres Antriebes unterscheiden (Hompele et al., 2018). Als Beispiele dafür können Seil-, Ketten-, Treibschrauben- oder Hydraulikaufzüge sowie Spezialaufzüge genannt werden. Wie aus den Kennwerten in Tabelle 1 zu erkennen ist, verfügen Aufzüge über eine hohe Traglast und sind in der Lage, sehr große Distanzen zu überbrücken.

Kennwerte von Aufzügen			
Transportgut	Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte usw.	Hubgeschwindigkeit	0,3 bis 0,4 m/s
Nutzlast	bis ca. 20.000 kg	Hubhöhe	> 100 m

Tabelle 1: Ausgewählte Kennwerte von Aufzügen (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))

Hebesysteme: Von den Aufzügen abzugrenzen sind die sogenannten Hebesysteme, welche wie bei einem Aufzug eine Hebebewegung ausführen, jedoch nicht der Aufzugsverordnung unterliegen. Diese Technologien dienen überwiegend dem Materialtransport und dürfen daher bis auf ein paar Sonderfälle keine Personen befördern (Leonhardt & Anders, 2019).

Für den innerbetrieblichen Materialtransport über mehrere Stockwerke werden oftmals sogenannte Säulenheber eingesetzt. Die Hebeplattform wird dabei entlang der Säulen stabil geführt und in der Regel mittels einer Kette als Zugmittel angehoben, wobei Hubgeschwindigkeiten bis zu 6 m/s erreicht werden können (vgl. Tabelle 2). Die Führungssäule wird entweder im Boden verankert oder kann an andere Hallenelemente angebracht und befestigt werden. Ein simultanes Heben und Senken der Transporteinheiten ist mit diesem Transportmittel nicht möglich, da der Transport immer nur in eine Richtung stattfinden kann. Ausgehend von der kompakten Bauweise, werden Säulenheber oft in Fällen verwendet, bei denen schwere Güter zwischen verschiedenen Ebenen transportiert werden müssen, aber nicht genügend Platz für bodenebene Lösungen vorhanden ist. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zu Aufzügen ist die automatisierte Be- und Entladung. Als Lastaufnahmemittel können Rollenbahnen, Ketten- oder Gurtbandförderer eingesetzt werden, welche die Fördereinheit bei der Übergabestelle direkt an anschließende Fördermittel übergeben (Hompel et al., 2018). Solche Hebesysteme können auch als Portalheber ausgeführt werden, bei denen die horizontale Hubkonsole zwischen zwei vertikalen Führungsschienen auf- und abwärts bewegt wird (Martin, 2021). Damit Transporteinheiten von bis zu 3000 kg transportiert werden können, ist zudem ein Aufbau mit mehreren Säulen möglich.

Kennwerte eines Säulenhebers			
Transportgut	Schachteln, Behälter, Gepäck, Paletten	Hubgeschwindigkeit	0,5 bis 2 m/s (max. 6 m/s)
Nutzlast	bis ca. 3000 kg	Hubhöhe	max. 30 m
Lastaufnahmemittel	Rollenbahnen, Ketten- oder Gurtbandförderer	Antriebsleistung	bis zu 30 kW

Tabelle 2: Ausgewählte Kennwerte eines Säulenhebers (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))

Schachtheber sind vertikale Transportmittel, die ähnlich wie Aufzüge aufgebaut sind. Mittels einer vertikal verfahrbaren Hubplattform wird ein Transport unterschiedlicher Ladungen innerhalb eines geschlossenen Schachtes ermöglicht. Diese Systeme können modular zusammengestellt werden und ermöglichen eine flexible Bauweise.

Vertikalspeicher dienen sowohl als Puffersysteme, in denen die Güter zwischengelagert werden können, als auch zum vertikalen Materialtransport. Mittels eines Hebemechanismus können die Güter auf- oder abwärts in die entsprechende Entnahmeposition transportiert werden. Die Pufferfunktion dient dabei zum Ausgleich von Produktionsschwankungen und der Überproduktion.

Ein Hubgeräte besteht ähnlich wie ein Säulenheber aus einem vertikalen Mast und einer daran geführten Hubeinheit. Sie werden meist für den Transport von Behältern, Kartons oder Werkzeugträgern zwischen unterschiedlichen Produktionslinien eingesetzt. Ein weiteres klassisches Hebesystem ist die Hebebühne, welche mittels eines hydraulischen oder mechanischen Scherenhebeseystems eine Plattform auf unterschiedlichen Höhen verfahren kann (Martin, 2021). Diese Systeme werden meist als Verladerampen oder zu Wartungstätigkeiten bei unterschiedlichen Arbeitshöhen eingesetzt.

Regalbediengerät: Regalbediengeräte (RBGs) sind Transportmittel, die meist manuell oder automatisch in Hochregallagern eingesetzt werden. Die Transportgüter werden dabei vertikal und horizontal verfahren und in die entsprechenden Regale ein- bzw. auslagert (Wehking, 2020). Dabei verläuft der Mast, an dem das Lastaufnahmemittel befestigt wird, in der Regel an der unteren Seite auf einer Schiene und wird zusätzlich am oberen Teil an der Decke geführt (Wehking, 2020). Transportiert werden dabei die Güter üblicherweise auf genormten Ladehilfsmittel mit bis zu 1500 kg Nutzlast (vgl. Tabelle 3).

Kennwerte eines RBGs			
Transportgut	Europalette, Gitterbox, Schachteln oder Behältern	Hubgeschwindigkeit	bis zu 3 m/s
Nutzlast	1500 kg	Hubhöhe	max. 50 m
Lastaufnahmemittel	Gabel, Rollenförderer	Antriebsleistung	bis zu 30 kW

Tabelle 3: Ausgewählte Kennwerte eines RBGs (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))

Gabelstapler und Hochhubwagen: Bei diesen Transportmitteln handelt es sich um Flurfahrzeuge, die üblicherweise dem Materialtransport in einer Ebene und nur für kurze Distanzen dienen (Hompel et al., 2018). Die Handhabung findet dabei in der Regel manuell durch ein Bedienpersonal statt, jedoch gibt es auch Fahrzeuge, welche automatisiert arbeiten können. Gabelstapler und Hochhubwagen sind in einer Vielzahl von Typen und Ausführungen erhältlich, die je nach Einsatzbereich unterschiedlich

ausgeführt sind. Je nach Bauart verfügen Stapler über eine hohe Hubhöhe (bis ca. 9 m) und können Lasten von bis zu 16.000 kg befördern (Hompel et al., 2018). Bevorzugt wird dabei immer der Transport von palettierten Gütern (Wehking, 2020).

Drohne: Die Integration von Drohnen für den innerbetrieblichen Materialtransport befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten, wie beispielsweise Fritzsche et al. (2020) und Taschner (2023) analysieren den wirtschaftlichen Nutzen und die Anwendung der Drohnentechnologie für Materialtransport in der Produktion. Dieses Transportmittel bietet jedoch vielfältige Einsatzbereiche, insbesondere im industriellen Umfeld und in der Logistik, wo zukünftig eine vermehrte Nutzung zu erwarten ist (Taschner, 2023). Auf Grund ihrer Flexibilität und Größe können sie nämlich in Bereichen eingesetzt werden, die schwer zugänglich sind. Die Nutzung des Luftraumes kann dabei zu einer Effizienzsteigerung bei der Beförderung von kleinen leichten Gütern (ca. 5 kg) und geringen Höhen dienen (Wrycza et al., 2017). Das Gewicht und die Größe haben dabei einen erheblichen Einfluss auf den Transportprozess.

Neben den zuvor genannten Unstetigförderern gibt es, wie in Abbildung 6 dargestellt wird, auch einige Stetigförderer, die für den Materialtransport zur Anwendung kommen.

Band- und Kettenförderer: Ideal für den kontinuierlichen Materialfluss über längere Distanzen sind Band- und Kettenförderer (Martin, 2021). Sie kommen oft in der Lebensmittel-, Automobil- und Verpackungsindustrie zum Einsatz und werden besonders für die Beförderung von Stückgütern entlang einer Produktionslinie angewendet. Zur Überwindung größerer Höhen werden sie mit mehreren Antrieben ausgerüstet, wodurch eine variable Streckenführung mit steilen Steigungen realisiert werden können (Hompel et al., 2018). Für steile Steigungen beim Schüttguttransport können beispielsweise Vertikalkettenfördersysteme verwendet, welche mit Hilfe einer angetriebenen Kette als Zugorgan das Transportgut befördern (vgl. Vecoplan, o. D.). In Tabelle 4 werden gängige Kennwerte für Kettenförderer angeführt, wobei es zu beachten gilt, dass sich die jeweiligen Parameter je nach Ausführung und Anwendungsfall unterscheiden können. Der Materialtransport über mehrere Stockwerke mittels Bandförderer erfolgt meist anhand eines wendelförmigen oder schrägen Aufbaus. Einschränkungen gibt es dabei jedoch beim Steigungswinkel, da ab einer gewissen Neigung das Transportgut zu rollen oder rutschen anfängt. In der Regel werden Bandförderer häufig für den Schüttguttransport verwendet, indem sie zusätzlich mit Profilelementen ausgestattet werden. Dabei können sie als Trogband-, Nockenband- und Kettenförderer, oder mit einem profilierten Gurt ausgeführt werden. Dieser Aufbau ermöglicht je nach Profilelement Steigungen von bis zu 60° zu realisieren (Hompel et al., 2018). Diese Bauweisen benötigen jedoch einen sehr hohen Platzbedarf.

Kennwerte eines Kettenförderers			
Transportgut	KLT	Transportgeschwindigkeit	bis 1 m/s
Nutzlast	15 kg/Einheit	Antriebsleistung	bis zu 0,75 kW pro Antrieb

Tabelle 4: Ausgewählte Kennwerte eines Kettenförderers (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))

Umlaufförderer: Zur Überbrückung der Höhendifferenzen zwischen zwei Ebenen werden in der Industrie sehr oft Umlaufförderer der C-, S-, Z-Bauform eingesetzt (Hompel et al., 2018). Die Bezeichnungen beziehen sich dabei immer auf unterschiedliche Gestaltung der Zu- und Abführseite des Förderers. Umlaufförderer ähneln in ihrem Aufbau einem Schachtheber, unterscheiden sich aber wesentlich durch die Art der Rückführung ihrer Plattformen. Während die Hubplattform eines Schachthebers nur eine vertikale Bewegung ausführt, erfolgt bei Umlaufförderern die Rückführung der Plattformen durch einen kontinuierlichen Umlaufmechanismus innerhalb der Bauform. Dadurch ist ein einfacherer und platzsparender Einsatz gegenüber anderen Steigförderer, welche z.B.: schräg nach oben verlaufen, möglich (Wehking, 2020). Da es sich um einen Stetigförderer handelt sind diese Systeme erst ab einer Transportfrequenz von etwa 150 Einheiten/h wirtschaftlich. Es können je nach Bauart aber Förderleistungen von bis zu 2800 Einheiten/h und eine Hubhöhe von bis zu 40 m erreicht werden (vgl. Tabelle 5). Als weiterer Umlaufförderer, welcher zur Verbindung zweier Stockwerke dient, wird in der Praxis oftmals der Paternoster Förderer verwendet. Hierbei wird eine freihängende Plattform mit Hilfe von zwei parallel geführten Kettensträngen, welche über versetzte Umlenkrollen endlos zirkulieren, transportiert. Infolge der pendelfreien Lagerung kann das Transportgut während des gesamten Transportprozess immer in einer waagrechten Position gehalten werden (Wehking, 2020). Dabei können auch mehrere Ein- und Ausgabestellen eingerichtet werden. Ähnlich dazu, werden beim Schaukelförderer abermals umlaufende Ketten verwendet, zwischen denen an Verbindungsachsen pendelnde Tragorgane vertikal gefördert werden (Martin, 2021).

Kennwerte für C- & S-Förderer			
Transportgut	Paletten, Behälter, Schachteln, Trays...	Förderleistung	Bis zu 2800 Stück/h
Nutzlast	Bis zu 2000 kg	Transportgeschwindigkeit	bis 1 m/s
Hubhöhe	bis zu 20 m	Antriebsleistung	Von 1,5 kW bis 15 kW

Tabelle 5: Ausgewählte Kennwert eines C- & S-Förderer (Eigene Darstellung vgl. Martin, (2021); Hompel et al., (2018))

Bei den sogenannten Kreisförderern wird das Transportgut von Gehängen (z.B.: Haken, Tragarm, Gabeln usw.) getragen und entlang einer festen Umlaufbahn

transportiert (Hompel et al., 2018). Es kann dabei sowohl ein horizontaler als auch vertikaler Materialtransport stattfinden, wobei zur Überwindung großer Höhen mehrere Motoren benötigt werden. Eine Ausführungsform des Kreisförderers ist der Power-and-Free Förderer (Schleppkreisförderer), bei dem das Gehänge an einer getrennten Schiene befestigt ist (Wehking, 2020). Dabei enthält die obere Laufbahn die Kreisförderbahn in der sich die Antriebskette befindet („Power“) und in der unteren Bahn können die Transporteinheiten ein und ausgekoppelt werden („Free“) (Hompel et al., 2018). Eine weitere Art des Hängeförderers ist die Elektrohängebahn, bei der jede Transporteinheit über einen separaten Antrieb verfügt. Im Vergleich zu der Kettenförderung können dabei alle Fahrwagen individuell voneinander bewegt werden (Wehking, 2020). Tabelle 6 zeigt ausgewählte Kennwerte eines Kreisförderers.

Kennwerte für Kreisförderer			
Gehänge Art	Gabeln, Haken, Plattformen, Schalen, Behälter...	Steigung	Bis zu 45° (Power & Free bis 60°)
Nutzlast	Bis zu 2000 kg	Antriebsleistung	Von 0,5 kW bis 7,5 kW

Tabelle 6: Ausgewählte Kennwert für Kreisförderer (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))

Schnecken- und Spiralförderer: Für den Transport von Schüttgut kommen oftmals drehende Schnecken zu Einsatz, welche das Fördergut durch ihre Rotation nach oben transportieren (Martin, 2016). Ein vergleichbares Prinzip weisen Spiralförderer auf, welche größere Transportgüter entlang eines spiralförmigen Troges um eine Säule befördern. Dabei nutzen Spiralförderer die Schwerkraft, um die Güter mittels Rollen oder in einem reibungsarmen Trog o.ä. nach unten zu transportieren. Aufgrund ihrer großen Speicherkapazität werden Spiralförderer insbesondere in der Lebensmittelindustrie sowie beim Schüttguttransport eingesetzt. Dabei wird ihre Fähigkeit, zeitgleich eine große Menge an Fördergüter im Transportmittel zu bewegen, ausgenutzt. Dabei stellt das Transportmittel eine temporäre Puffermöglichkeit im Materialfluss dar.

Schwerkraftförderer: Ähnlich wie bei den Spiralförderern erfolgt der Materialtransport in einigen Fällen über Rutschen und Fallrohren von den oberen Stockwerken nach unten, in dem die Schwerkraft ausgenutzt wird (Martin, 2021). Obwohl diese ein sehr einfaches und kostengünstiges Transportmittel darstellen, werden sie für den Stückguttransport nur selten verwendet, da der Transport auf Grund der Reibung nur über eine begrenzte Länge erfolgen kann (Hompel et al., 2018). Anders ist dies bei Schwerkraftrollen-, Röllchen- und Kugelbahnen, welche einen geringeren Widerstand aufweisen und somit auch vermehrt für den Stückguttransport zum Einsatz kommen. Diese Ausführungen sind jedoch nur für geringe Neigungen geeignet, da ansonsten ein kontrollierter Transportprozess erschwert wird und es möglicherweise zu Beschädigung der Güter kommen kann (Hompel et al., 2018).

Pneumatische Fördersysteme: Auch pneumatische Fördersysteme, welche mittels Luftströmungen leichte und pulverförmige Stoffe transportieren, werden in der Industrie oftmals als vertikales Transportmittel eingesetzt. Grundsätzlich kann zwischen einem Druck- und Saugluftsystem oder einer Kombination beider unterschieden werden, je nachdem ob sich der Luftverdichter am Anfang oder Ende der gesamten Anlage befindet (Wehking, 2020). Diese Systeme finden besonders in der chemischen, pharmazeutischen und Lebensmittelindustrie Anwendung, da sie eine schonende und kontaminationsfreie Beförderung von empfindlichen Materialien ermöglichen und zusätzlich über hohe Hygienestandards verfügen. Auch Rohrpostsysteme sind nach diesem Prinzip aufgebaut. Nachfolgend werden in Tabelle 7 typische Kennwerte einer Druckluftförderanlage angeführt.

Kennwerte einer Druckluftförderanlage			
Transportgut	Sand, Kalk, Granulat, Zement ...	Max. Fördermenge	500 t/h
Hubhöhe	bis zu 100 m	Max. Förderdruck	4 bar

Tabelle 7: Ausgewählte Kennwert einer Druckluftförderanlage (Eigene Darstellung vgl. (Wehking, 2020))

Becherwerke: Weitere entscheidende vertikale Transportmittel, welche hauptsächlich für den Schüttguttransport eingesetzt werden, sind Becherwerke (Martin, 2016). In diesen Systemen werden mit Hilfe einer Reihe von Bechern, welche an einem Band oder Kette sind, Materialien wie Getreide, Zement, Sand oder Chemikalien vertikal befördert (Martin, 2021). Das Transportgut wird dabei von den Bechern aufgenommen und an der Umlenkstelle abgeworfen. Diese ermöglichen ähnlich wie die S-Förderer einen Etagenwechsel, besitzen aber im Gegensatz dazu eine große Speicherkapazität. Auf Grund der hohen Durchsatzrate bei gleichzeitig geringem Platzbedarf finden diese Systeme vor allem in Branchen Anwendung, bei denen große Mengen an Schüttgütern verarbeitet werden. Je nach Ausführung kann zwischen Ketten-, Gurt- und Pendelbecherwerk unterschieden werden. Nachfolgend in Tabelle 8 werden typische Kennwerte eines Kettenbecherwerks angeführt.

Kennwerte eines Kettenbecherwerks			
Transportgut	Schüttgut	Fördergeschwindigkeit	0,30m/s bis max. 3,5 m/s
Hubhöhe	40 m		

Tabelle 8: Ausgewählte Kennwert eines Becherwerks (Eigene Darstellung vgl. (Martin, 2021))

2.1.5 Transportprozess

Der Transportprozess umfasst den technischen Vorgang der Ortsveränderung eines Gutes und zielt darauf ab, die innerbetriebliche Transportaufgabe zu erfüllen und somit den Wertschöpfungsprozess zu unterstützen (Schulte, 2013). Der Prozess beschreibt dabei immer die Leistungsanforderungen der durchzuführenden Materialflussaufgabe und kann sowohl aus gleichen oder unterschiedlichen Transportmitteln bestehen (Martin, 2021). Damit die Transportaufgabe erfüllt werden kann, werden unterschiedliche Anforderungen an den Förderprozess gestellt. Es handelt sich meist um Angaben zu den Quellen und Senken (Auf- und Abgabepunkt), der Transportzeit und des Mengenstroms, welche während des Prozesses eingehalten werden müssen (Pfohl, 2018). Letzterer umfasst die für den Prozess wichtigen Daten der Fördermenge, -masse oder des Fördervolumens (Scheffler, 2013). Weitere wesentliche Kriterien, welche die Planung des Transportprozesses beeinflussen, sind die örtliche Umgebung sowie die Beschaffenheit des Förderweges, die Häufigkeit des Auftrages und die spezifischen Eigenschaften der zu transportierenden Einheiten. Beispielsweise können sich die Positionierung großer Maschinen, tragender Stützen oder andere infrastrukturelle Einschränkungen auf die Routenführung des Materialflusses auswirken. Besonders muss bei der Gestaltung des Transportprozesses auch auf die Anforderungen des Transportgutes geachtet werden. Der Förderweg muss so konzipiert werden, dass keine Beschädigung des Transportgutes auf Grund von Temperaturschwankungen, Vibrationen, Schmutz oder anderen räumlichen Gegebenheiten entstehen. Auch bei der Handhabung von gefährlichen Transportgütern oder hinsichtlich hygienischer Anforderungen sind spezielle Sicherheitszonen und räumliche Gegebenheiten zu errichten. Für die Auswahl der Transportmittel ist daher der Transportprozess von entscheidender Bedeutung (Martin, 2016). Eine Unterscheidung kann dabei anhand seiner Handhabungsstufen erfolgen, da je nach Randbedingungen der Transport nicht immer nur kontinuierlicher mit einem Transportmittel erfolgen kann (Fottner et al., 2022). Wird zum Beispiel im nachfolgenden Produktionsschritt eine Beschichtung des Transportgutes vorgenommen, so kann es sein, dass das zuvor verwendete Fördermittel nicht durch das Beschichtungsbad geführt werden kann. Um in diesem Fall eine Beschädigung durch aggressive Chemikalien zu vermeiden, muss das Transportmittel vor dem Eintauchen in das Bad gewechselt werden. Da mehrstufige Transportprozesse einen erhöhten Ressourcenbedarf mit sich bringen sollte jedoch der Prozess grundsätzlich aus wenigen Handhabungsstufen bestehen und somit solche Situationen vermieden werden. Bedingt durch die Vielzahl an Informationen, ist die ganzheitliche Betrachtung des Transportprozesses und seiner Schnittstellen besonders wichtig, um eine optimale Gesamtlösung identifizieren zu können.

2.2 Mehrstöckige Produktion

Dieses Kapitel widmet sich der zunehmenden Relevanz von mehrstöckigen Produktionsprozessen in Unternehmen, welche als Antwort auf die steigende Flächenversiegelung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Es wird aufgezeigt, wie Unternehmen durch eine strategische Planung und Nutzung der vertikalen Dimension ihren Flächenverbrauch minimieren können. Zu Beginn dieses Kapitels wird in Abschnitt 2.2.1 kurz auf Grundlagen der Fabrikplanung eingegangen. In Abschnitt 2.2.2 wird die Begrifflichkeit der mehrstöckigen Produktion erläutert und ein Überblick gegeben, wie sich diese in den letzten Jahrhunderten entwickelt hat. In den darauffolgenden Unterkapiteln werden drei zentrale Ansätze zur Realisierung mehrstöckiger Produktionsprozesse genauer betrachtet. Abschnitt 2.2.3 bezieht sich dabei auf den Neubau von Fabriken, in dem besonderer Wert auf die flächensparende Fabrikplanung gelegt wird. Das Unterkapitel 2.2.4 beschreibt die vertikale Gebäudeerweiterung und die damit verbundenen Herausforderungen. In Abschnitt 2.2.5 wird darauf eingegangen, welche Aspekte zu beachten sind, wenn vertikale Produktionsprozesse in Bestandsgebäude integriert werden sollen. Anschließend werden in Abschnitt 2.2.6 einige Best-Practice Beispiele angeführt, welche sich mit diesen Thematiken erfolgreich auseinandergesetzt haben. Im letzten Abschnitt (Abschnitt 2.2.7) werden alle identifizierten Herausforderungen bei der Planung vertikaler Transportmittel angeführt, welche besonders bei der Technologieauswahl betrachtet werden müssen.

2.2.1 Fabrikplanung

Bei der Fabrikplanung handelt es sich um den vorausbestimmenden systematischen Prozess bei der Gestaltung und Auslegung von Fabriken (VDI, 2009). Dazu zählen verschiedene Phasen beginnend von der Standortplanung bis hin zur Betriebsmittelplanung in der Produktionsstätte (Schenk et al., 2013; Wiendahl et al., 2023). Eine erfolgreiche Fabrikplanung soll zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit des Unternehmens dienen. Neben der Produktionsflussplanung stehen auch menschengerechte Arbeitsbedingungen, Wandlungsfähigkeit und somit auch eine gute Raumausnutzung im Fokus der Fabrikplanung, um zukunftsorientierte Veränderungen möglich zu machen. Die benötigte Fläche beziehungsweise der benötigte Raum spielt zudem in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle (Kubaschewski, 2016). Je nachdem, um was für eine Gebäudestruktur es sich handelt, entscheidet dies darüber, wie viel Bodenfläche für das Errichten der Fabrik versiegelt wird und ob ein Gebäude zukünftig erweitert werden kann. Aus diesem Grund ist die Fabrikplanung sowohl bei Neubauten als auch bei Umbauten oder Erweiterungen ein entscheidender Aspekt bei der effizienten Nutzung der Betriebsfläche. Je nach Branche gibt es unterschiedliche Werkslayouts, die bevorzugt werden. Bei Produktionsstätten mit Fließbandfertigung wie sie zum Beispiel im Maschinenbau oder

Fahrzeugbau üblich sind, handelt es sich bei der Gebäudestruktur üblicherweise um Flachbauten. Diese einstöckigen Gebäude sind die einfachste und kostengünstigste Varianten zur räumlichen Strukturierung von Produktionsprozessen (Helbing, 2010). Weitere gängige einstöckige Gebäudeform sind die Hallenbauten, welche meist bei großen und schweren Maschinen Anwendung finden. Je nach Branche können Produktionen jedoch auch über mehrere Etagen angeordnet werden, so spricht man dabei von Geschossbauten (Neufert, 2016). Vor allem in Stadtgebieten, in denen auf Grund der Gewerbeflächenknappheit eine effektive Flächennutzung entscheidend ist, sind solche Gebäudeformen oft zu finden (Kettner et al., 1984). Entscheidend für die Gestaltung eines Fabrikgebäudes ist die Kombination aus Gebäudeanforderungen und -eigenschaften. Bei den Gebäudeanforderungen handelt es sich dabei um Parameter, die sich aus den Produktions- und Infrastrukturebene ableiten lassen (Schenk et al., 2013). Wie bereits zuvor erwähnt, sind der Materialfluss und Produktionsprozess für Unternehmen wichtige Faktoren, denn je länger dabei die Wege sind, desto mehr Fläche wird für die Produktion in Anspruch genommen (Kettner et al., 1984). Die Belieferung der Montage, deren Entsorgung und der Abtransport der montierten Güter müssen zusätzlich bei der Gebäudestrukturplanung genauestens berücksichtigt werden. Transportmittel spielen daher bei der Layoutplanung ein entscheidender Faktor, da diese zum Teil feste Einrichtungen wie Schienen oder auch Freiflächen zur Fortbewegung benötigen, welche bereits bei der Planung berücksichtigt werden müssen (Kubaschewski, 2016). Laut Schenk et al. (2013) umfassen die Gebäudeanforderungen weitere Aspekte des Produktionsprozesses welche folgendermaßen eingegliedert werden können:

- Geometrie: Gesamtfläche, Abmessungen der Maschinen, zusammenhängende Aufstellflächen
- Belastung: Masse der Anlagen, Fundamente, Lastaufnahme (z.B.: von Boden und Decke)
- Ver- und Entsorgung: Kabel und Leitungsführung für Maschinen (z.B.: Energie, Wasser, Druckluft, Gas)
- Störwirkungen: Emissionen (z.B.: Abwärme, Strahlung, Staub, Geruch), Klima (z.B.: Temperatur, Luftdruck), Schwingungen (z.B.: vertikal, horizontal)

Im Gegensatz dazu stehen die Gebäudeeigenschaften, welche die Gebäudeelemente der Produktionsstätte darstellen (Schenk et al., 2013). Diese sind teilweise schon vorhanden und teilweise beim Bau zu beachten. Es wird unterschieden zwischen der primären Gebäudestruktur, wie Fundament, Geometrie oder Anzahl der Geschosse und der sekundären Gebäudestruktur, wie Dach, Gebäudetechnik und Innenausbau. Diese Aspekte sind jedoch nicht nur bei der Neuplanung von Fabriken zu beachten, sondern spielen auch einen entscheidenden Faktor bei der vertikalen Gebäudeerweiterung und der Integration von Produktionsprozessen in Bestandsgebäude.

2.2.2 Entwicklung mehrstöckiger Produktion

Der Produktionsprozess stellt das Herzstück jedes wertschöpfenden Unternehmens dar und ist somit entscheidend für den Erfolg eines Unternehmens. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 und 2.2.1 erwähnt, stellt dabei die Materialflussplanung ein wichtiger Teil der Fabrikplanung dar (Helbing, 2010). Insbesondere bei Geschossbauten kann es dabei je nach Gebäudeform zu unterschiedlicher räumlicher Anordnung des Produktionsprozesses kommen, wodurch es in der Literatur auch mehrere unterschiedliche Bezeichnungen für die Produktion über mehrere Etagen gibt. In dieser Arbeit wird der Begriff „mehrstöckige Produktion“ oder auch „vertikale Produktion“ für eine Wertschöpfung, welche mindestens über zwei Stockwerke stattfindet, verwendet. Dieser Begriff bezieht sich auf die architektonische Gegebenheit und ist daher abzugrenzen von „vertical manufacturing“, welches sich auf die vertikale Integration, sprich der Integration von vor- und nachgelagerter Wertschöpfungsstufen, bezieht (Wrona, 2013). Zu Beginn des 19. Jahrhunderts waren mehrgeschossige Fabrikgebäude weit verbreitet. Viele historische Produktionsstätten der Industrialisierung, wie beispielsweise Spinnmühlen, Strumpffabriken oder Schreibmaschinenbauer, nutzten mehrere Etagen für ihre Produktion (Erbstößer, 2016). Im Laufe der Zeit nahm jedoch dieser Trend immer mehr ab und änderte sich in Gebäudestrukturen mit eingeschossigen Hallenbauten. Zur Folge der zweiten Industriellen Revolution am Anfang des 20. Jahrhunderts, kam es auf Grund der stetig zunehmenden Industrialisierung und Massenproduktion zu einer immer höheren Nachfrage an Bodenressourcen für die industrielle Produktion (Brandt, 2008). Vor allem während und nach dem zweiten Weltkrieg entstanden viele brachliegenden Industriegebäuden, welche ungenutzt blieben, da sich zahlreiche Unternehmen lieber horizontal auf neue Grünflächen ansiedelten, als alte Gebäude zu erweitern. Aufgrund der immer weiter anwachsenden Produktivität und mangelnden Restriktionen bezüglich der Flächenversiegelung, war die horizontale Expansion die einfachste und effizienteste Möglichkeit, ihre Fabriken zu erweitern. Insbesondere bei der Herstellung von schweren Gütern, für die häufig fahrbare Maschinen und Kräne zum Einsatz kommen, ist eine vertikale Anordnung der Produktion nur schwer realisierbar. Ebenerdige Fabrikgebäude erwiesen sich daher über mehrere Jahrzehnte als die pragmatischste Lösung. Doch diese Bodenressourcen sind endlich und somit stehen mittlerweile viele Gemeinden und Städte vor der Herausforderung, gegen die starke Bodenversiegelung vorzugehen. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, den Flächenverbrauch zu reduzieren, sowie den steigenden Grundstücks- und Energiekosten entgegenzuwirken, wird das Modell der vertikalen Produktion jedoch zunehmend als praktikable Alternative betrachtet. Insbesondere in Branchen, welche intensiv mit Flüssigkeiten oder Schüttgütern arbeiten, wie beispielsweise in der Lebensmittelindustrie, ist die mehrstöckige Produktion besonders geeignet (vgl. Beispiele „Rudolf Ölz Meisterbäcker GmbH & Co KG“ oder „Josef Manner & Comp. AG“ in Abschnitt 2.2.6). Durch diese vertikale Anordnung der Produktion, kann der

Materialtransport mit Hilfe der Schwerkraft erfolgen, wobei das Eigengewicht der Güter genutzt wird, um auf natürliche Weise Höhenunterschiede überwinden zu können (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1). Auch bei Produkten, welche aufgrund ihrer Form, ihres Gewichts und ihrer Handhabung leicht mobil sind, findet die mehrstöckige Produktion vermehrt Anwendung, solange die Tragfähigkeit der Decken für die Maschinen ausreichend ist. Insgesamt kann von einer zyklischen Entwicklung der Produktion gesprochen werden.

Traditionell war eine vertikale Produktion üblich, welche jedoch aufgrund von Expansionen und Prozessoptimierung der Unternehmen verdrängt wurde und sich immer weiter in die Horizontale verlagerte. Doch die Bauweise und Entwicklung von Industriebauten wird maßgeblich durch das vermehrte Aufkommen der Flächenknappheit beeinflusst, was ein zentrales Problem bei der optimalen Nutzung der Unternehmensgrundstücke darstellt. Dadurch verdeutlicht sich nun erneut die Tendenz einer flächeneffizienteren und vorausschauenden Zukunftsplanung, die über die früheren Ansätze hinausgeht und zu einer verstärkten Planung flächensparender vertikalen Produktionen führt. Mit diesem Hintergrund gewinnen verschiedene Ansätze zur verminderten Bodenversiegelung in der Fabrikplanung an Bedeutung, welche in den nächsten Abschnitten genauer erläutert werden.

2.2.3 Neubau von Geschossbauten

Angesichts der zunehmenden Bebauung und Flächenversiegelung wird die Möglichkeit für Betriebe, angrenzende Grundstücke als Erweiterungsflächen zu erwerben, immer geringer. Aus diesem Grund stellen die stetig zunehmenden Grundstückskosten und das Potential zur Senkung der Betriebskosten wesentliche wirtschaftliche Treiber für das Vertikalisieren von Industriebauten dar (Erbstößer, 2016). Geschossbauten bieten daher eine vielversprechende Möglichkeit, um beim Neubau von Produktionsstätten die Flächeneffizienz zu maximieren, die betriebliche Raumnutzung effektiv zu verdichten und dadurch gleichzeitig die Bodenversiegelung zu minimieren. Die Planung solcher mehrgeschossigen Produktionsstätten auf „freier Grünfläche“ bringt, je nach Nutzung und Branche des Unternehmens, unterschiedliche Anforderungen mit sich. Insbesondere die Planung, Auslegung und Genehmigung mehrgeschossiger Produktionsstätten erweist sich dabei als komplexer, als bei anderen üblichen Bauten (Wimmer, 2024). Üblicherweise vertreten unterschiedliche Stakeholder verschiedene Gesichtspunkte und Ziele, welche schon vorab im Verlauf der Planung über das Vorhaben informiert werden sollten, um frühzeitig auf die unterschiedlichen Anforderungen reagieren zu können (Fottner et al., 2022). Besonders bei der Neuplanung von Materialflüssen über mehrere Stockwerke sollte darauf geachtet werden, dass die unterschiedlichen Produktionsschritte systematisch auf die verschiedenen Etagen verteilt werden. Beim Neubau vertikaler Fabriken ist daher besonders auf die Planung der Materialflüsse zwischen den einzelnen

Bereichen und Etagen zu achten sowie deren wechselseitige Abhängigkeiten zu analysieren. Die vertikalen Transportmittel stellen dabei das zentrale Element zwischen den verschiedenen Produktionsschritten in den über- bzw. unterliegenden Stockwerken dar. Bei der Anordnung der Produktionsflächen ist zudem zu berücksichtigen, dass die Anschlusselemente an das stockwerksübergreifende Transportmittel nahe an den Maschinen positioniert werden, um eine unnötige Flächennutzung durch horizontale Transportweg zu vermeiden. Zu beachten gilt, je mehr Etagen miteinander verknüpft werden, desto unübersichtlicher kann der Materialfluss werden (Wimmer, 2024). Es erfordert daher eine präzise Abstimmung der Fertigungs- und Transporttechnologien über mehrere Etagen hinweg, um lange Transportwege und unkoordinierte Abläufe zu vermeiden. Durch die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung der Maschinen können Produktionssystemen jedoch einheitlicher betrachtet werden (Haselsteiner et al., 2023). Besonders die Tragfähigkeit des Untergrundes muss aus bautechnischer Sicht speziell bei einem Neubau im Vorfeld abgeschätzt werden, da diese die Grundlage für die strukturelle Stabilität des Gebäudes und mitunter eine Entscheidungsbasis darstellt. Aus diesem Grund sollten große und schwere Maschinen mit einem hohen Materialfluss in der untersten Etage angesiedelt werden (Hompel et al., 2018). Die Entwicklung neuartiger Maschinen ermöglicht es jedoch, immer schlankere und leichtere Maschinen in die Produktionsprozesse einzugliedern und somit die Vertikalisierung voranzutreiben (Erbstößer, 2016). Die zunehmende Automatisierung und neue Logistiksysteme ermöglichen zudem eine immer effizientere vertikal organisierte Produktionsstruktur.

Bei Neubauten ist es erstrebenswert bereits in der Planung der Produktionsflächen eine gewisse Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu berücksichtigen, damit auch zukünftige Produktionsanpassungen und Erweiterungen realisiert werden können (Haselsteiner et al., 2023). Idealerweise wird bereits die Möglichkeit zukünftiger Betriebserweiterungen der Produktionsstätten, sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung berücksichtigt. Durch eine Optimierung der Raumverteilung mittels modularer Systeme, kann schnell durch etwaige Änderungen innerhalb der Produktionsstätte neuer Platz geschaffen werden, welcher effektiver für die Produktion genutzt werden kann.

2.2.4 Vertikale Gebäudeerweiterung

Als Alternative zum Neubau bietet die vertikale Gebäudeerweiterung bestehender Fabriken eine effiziente Möglichkeit zur Erweiterung der Produktionsfläche, ohne dabei neue Flächen versiegeln zu müssen. Laut Soénus & Wimmers (2021) erfolgt jedoch eine solche flächensparende Erweiterung vor allem bei größeren Produktionsunternehmen mehr oder weniger „gezwungenermaßen“, da durch die Flächenknappheit, entweder keine weiteren Nutzflächen zur Verfügung stehen oder nicht zur Bebauung freigegeben werden. Auch eine unzureichende Bodenqualität

kann dazu führen, dass Unternehmen ihre Expansion durch eine vertikale Gebäudeerweiterung anstelle von Neubauprojekten realisieren müssen. Durch vermehrte Umweltauflagen wie der umweltfreundlichen und schadstofffreien Gebäudegestaltung gewinnt die Aufstockung bestehender Fabrikgebäude zusätzlich an Bedeutung. Viele Unternehmen im urbanen Gebiet sind zudem von ihrem Produktionsstandort abhängig, da sie von der Personalverfügbarkeit, der Nähe zu Bildungseinrichtungen und fachlicher Expertise profitieren (Friedrich et al., 2020). Insbesondere für bestehende Fabriken oder Betriebe in dicht besiedelten urbanen Gebieten bietet sich daher die vertikale Erweiterung als eine pragmatische Möglichkeit an, ihre Produktionskapazität zu steigern, ohne den Standort wechseln zu müssen (Julistiono et al., 2023). Ebenso weisen große Unternehmen in ländlichen Gebieten oftmals eine hohe Verbundenheit zu ihrem Standort auf, da viele traditionelle Aspekte eine große Rolle spielen und die Unternehmen auch langfristig den Stellenwert in der Umgebung durch ihr soziales Engagement als attraktiver Arbeitgeber behalten wollen. Darüber hinaus können Faktoren wie bereits vorhandene Infrastrukturen, kürzere Transportwege und die Nähe zu wichtigen Versorgungseinrichtungen, weitere ausschlaggebende Punkte für eine vertikale Gebäudeerweiterung im Vergleich zu Neubauten sein (Julistiono et al., 2023).

Aus den genannten Gründen stellt daher die vertikale Gebäudeerweiterung eine vielversprechende Strategie dar, um die wertvolle Bodenressource schonend zu nutzen und gleichzeitig die Produktionskapazität zu erhöhen (Julistiono et al., 2023). Dies erfordert von den Unternehmen eine Umstrukturierung der Abläufe, sodass ihre unterschiedlichen Produktionsschritte über mehrere Etagen hinweg organisiert werden. Grundsätzlich können sowohl mehrgeschossige Gebäude, Flachbauten und auch Hallenbauten aufgestockt werden. In den vergangenen Jahrzehnten wurde jedoch die vertikale Erweiterung von Produktionsflächen in Branchen, bei denen schwere Maschinen und komplexe Fertigungsprozesse benötigt werden wie zum Beispiel im Maschinenbau, nur selten angewendet (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1). Die Zunahme kleinteiliger Produktionsprozesse in den letzten Jahren ermöglicht es dennoch immer mehr, kleinere und leichter Maschinen zu verwenden, welche durch ihre geringere Boden- / Deckenbelastung eine vertikale Produktion begünstigen (Erbstößer, 2016). Dies trägt zur weiteren Förderung des Trends der vertikalen Gebäudeerweiterung und mehrstöckigen Produktion bei. Durch fortschrittliche bauliche Anpassungen und neue logistische Konzepte können verschiedene Prozessschritte somit systematisch über mehrere Etagen angeordnet werden (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1). Trotz der vielen Vorteile gibt es einige Herausforderungen, welche bei der Umsetzung von vertikalen Gebäudeerweiterungen berücksichtigt werden müssen. Dazu gehören erhöhte Baukosten, komplexe Genehmigungsverfahren und spezielle Lösungen für den Materialtransport innerhalb des Gebäudes, was im Vergleich zum Neubau von Geschossbauten (vgl. Abschnitt 2.2.3) in einer aufwändigeren architektonischen Planung resultiert (Haselsteiner et al.,

2019, Teil 1). Eine der größten Herausforderungen bildet die erhöhten Anforderungen an die Gebäudestatik und -sicherheit bestehender Gebäude. Da bei vielen dieser älteren Produktionshallen nicht flächensparsam konzipiert wurden und somit eine Aufstockung in der Statik alter Produktionsstätten nicht eingeplant war, stellt die Erweiterung zu einem mehrstöckigen Produktionsprozess auf Grund ihrer Bauweise, oftmals eine große Schwierigkeit dar (Erbstößer, 2016). Um den Anforderungen an die Überwachung und Versorgung des Produktionsprozesses gerecht zu werden, spielt auch die Gestaltung des Grundrisses der Etagen eine entscheidende Rolle (Haselsteiner et al., 2019, Teil 2). Auch andere spezifische Probleme, wie ein ausreichender Wasserdruck der Hydranten, können aus brandschutztechnischer Sicht weitere Herausforderungen darstellen. Auf Grund dieser vielfältigen Herausforderungen, werden oftmals in den oberen Geschossen keine Produktionsflächen, sondern vermehrt Büro-, Service-, Verwaltungs- und Sozialräume untergebracht, da diese vergleichsweise einfacher zu realisieren sind (Haselsteiner et al., 2019, Teil 2). Diese Bereiche erfordern in der Regel keine schweren Maschinen und Anlagen, was die baulichen Anforderungen reduziert und die strukturelle Belastung des Gebäudes minimiert.

2.2.5 Integration von Produktionsprozesse in Bestandsgebäude

Eine weitere Strategie zur Reduktion der Bodenversiegelung ist die Integration von Produktions- und Logistikprozessen in Bestandsgebäude. Oftmals stehen Industriebrachen leer, weil die Gebäude zu klein oder die Maschinen zu alt geworden sind und der Standort somit zukünftig nicht für die Produktion ausreichend ist. Durch die Wiedernutzung solcher bestehenden Fabriken kann nicht nur wertvolle Fläche eingespart, sondern, wie in Kapitel 1 erklärt, auch der ökologische Fußabdruck minimiert werden. Diese Industriebrachen verfügen meist über Wasser-, Strom- und Kanalnetze, welche für die Produktion ausschlaggebend sind. Vorhandene Infrastrukturen wie gute Verkehrsanbindungen durch Straßen, Brücken und Bahnverbindungen sind für viele Unternehmen weitere wichtige Kriterien bei der Standortwahl, welche alte Produktionsstandorte attraktiv zur Wiedernutzung machen. Die Implementierung solcher Produktionssysteme innerhalb mehrstöckiger Industriebrachen kann durch eine komplexe Layoutplanung und spezielle Transportsysteme realisiert werden. Dabei gilt es vor allem die Verortung der einzelnen Maschinen und Transportmittel zu berücksichtigen, damit der Materialfluss in den bestehenden Strukturen und über die verschiedenen Ebenen angepasst werden kann (Friedrich et al., 2020). Um sicherzustellen, dass nicht nur der Materialfluss maximiert wird, sondern auch spezifische Sicherheitsstandards und gesetzliche Anforderungen eingehalten werden, ist die Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte und Hindernisse, welche im Rahmen einer Gebäudeanpassung und Umgestaltung auftreten können, erforderlich. Insbesondere bei historischen Gebäuden ist der

Denkmalschutz ein wichtiger Punkt, der zu beachten gilt, wodurch etwaige bauliche Veränderungen und Anpassungen stark einschränken werden können (Wepner et al., 2004). Dies ist oftmals mit umfangreichen Verfahren zur Genehmigung und der Einhaltung von Bau- und Umweltschutzvorschriften verbunden. Bauliche Altlasten können zusätzlich bei der Wiederverwendung von brachliegenden Industriegebäuden erhebliche Probleme bewirken, vor allem wenn es zuvor zu einer chemischen Kontamination gekommen ist (Umweltbundesamt, 2008). Dies kann, trotz Sanierung, im Zuge einer Revitalisierung in weiterer Folge auch zu einem negativen Ansehen der Brachfläche und somit zu Problemen bei der weiteren Nutzung führen (Wepner et al., 2004). Aus diesem Grund sind oftmals umfangreiche Untersuchungen der Geschichte, Anordnung, Form und Vornutzungen von Boden und Gebäude notwendig, um eine effiziente Integration der Produktion in Bestandsgebäude zu gewährleisten. Weiters ist zu prüfen, ob die Bodenstabilität und Fundamentstärke ausreichen, damit die Lastaufnahmefähigkeit von Boden und Decke gegeben ist (Helbing, 2010). Insbesondere bei der Installation neuer schwererer Maschinen muss die Strukturintegrität der beanspruchten Gebäude gegeben sein. Dafür ist eine präzise statische Berechnung erforderlich, um die Lastenverteilung im Betrieb zu bewerten und strukturelle Schäden verhindern zu können (Schenk et al., 2013). Im Zuge dessen kann es möglicherweise sein, dass zusätzliche Zwischendecken und Stahlkonstruktionen eingebaut werden müssen, um die Tragfähigkeit und Funktionalität des Gebäudes zu verbessern. Auch die vorhandene Gebäudestruktur kann bei der Eingliederung neuer Anlagen zu erheblichen Problemen führen, wodurch möglicherweise der Einsatz von Spezialgeräten oder baulichen Anpassungen, wie Fassadenöffnungen oder das Entfernen nichttragender Wände, erforderlich sein kann, um die Transportmittel zu verorten (Schenk et al., 2013). Des Weiteren benötigen moderne Produktionsanlagen spezielle Energie- und Medienversorgungen, weshalb eine Anpassung der bestehenden Kabel- und Leitungsführung notwendig ist. Dabei kann es sein, dass die Leistung der alten Infrastruktur nicht mehr ausreichend ist und somit kostspielig erneuert oder erweitert werden muss. Auch die erforderlichen Zugangs- und Wartungseinrichtungen der Maschinen können Hindernisse darstellen, da diese möglicherweise in Bestandsgebäuden nicht ausreichend vorhanden sind und eventuell erst erschwert nachträglich hinzugefügt werden können (Helbing, 2010).

Um die Integration der Produktion in vorhandene Strukturen zukünftig zu vereinfachen, sollten vorausschauende Maßnahmen wie eine optimierte Raumaufteilung, adaptive Wiederverwendung und modulare Bauweise angestrebt werden. Dadurch soll die Anpassungsfähigkeit, Effizienz und Nachhaltigkeit erhöht, während gleichzeitig sowohl die Kosten als auch der Aufwand für notwendige Standorterweiterungen oder Neubauten minimiert werden kann (Haselsteiner et al., 2023).

2.2.6 Best Practices

Wie bereits einleitend in Abschnitt 2.2.2 erwähnt, bringt die mehrstöckige städtische Produktion eine lange Tradition mit sich. In Tabelle 9 werden daher sowohl historische als auch moderne Beispiele von vertikalen Gebäudeerweiterungen und mehrstöckigen Produktionsstandorten vorgestellt und kurz beschrieben. Diese Fallstudien illustrieren, wie Unternehmen die vertikale Bauweise nutzen, um Platzmangel zu bewältigen und ihre Produktionskapazitäten in städtischen Gebieten zu maximieren. Des Weiteren soll aufgezeigt werden, was für Transporttechnologien genutzt werden, um den Materialtransport über mehrere Etagen zu ermöglichen. Die Beispiele reichen von traditionellen Unternehmen, die in ihren Produktionsstätten schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts mehrstöckig produziert haben, bis hin zu innovativen Geschossbauten oder modernisierten Bestandsgebäuden. Im Folgenden werden Beispiele in unterschiedlichen Branchen wie die historische Produktionsstätte des Ford „Modell T“ im Highland Park Plant in Detroit bis hin zur Süßwarenproduktion der Manner AG in Wien betrachtet. Weitere Best Practice Beispiele umfassen sowohl globale Konzerne wie die DAIMLER AG, als auch spezifische lokale Produktionsstätten wie die Rudolf Ölz Meisterbäcker GmbH & Co KG. Diese Fallstudien bieten wertvolle Einblicke in die Planung und Umsetzung vertikaler Produktionsstrukturen und zeigen unterschiedliche Ansätze bei der Herangehensweise. Durch die Betrachtung dieser vielfältigen Beispiele wird deutlich, dass die mehrstöckige Produktion nicht nur eine Reaktion auf den Platzmangel in urbanen Gebieten ist, sondern auch erhebliche Potenziale für Effizienzsteigerungen und nachhaltige Produktionsprozesse bietet.

	Name/Ort	Jahr	Produktion	Beschreibung
historisch	Ford Highland Park Plant / Detroit	1917	Automobilindustrie, Ford „Modell T“	„Vertikale Fließbandproduktion“ mittels hydraulischer Frachtlifte (Rappaport, 2016)
	Siemensstadt / Berlin	1929	Hochspannungsschaltgeräte	Vertikalisierung des Schaltwerkhochhaus; erste Hochhaus-Fabrik Europas, Konzept einer besonders flächensparenden Produktionsanlage mittels Lastenaufzüge und Paternosterlifte (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1)
	Van Nelle Fabrik / Rotterdam	1931	Tabak, Tee, Kaffee	8-geschossige Tabakproduktion, 6-geschossige Kaffee- und 3-geschossige Teeproduktion. Transport erfolgt vom obersten Stock nach unten mittels Aufzügen, Förderbändern und nach außen führenden Rutschen (Rappaport, 2016)
	Starrett-Lehigh Building / New York	1931	Vermietet an diverse Firmen	Güter konnten im Gebäude von Zügen auf Lastwagen um- oder entladen werden. Dieser Transport erfolgt geeigneten Lastenaufzügen. Je nach Fundierungsmöglichkeit erreichten sie bei den einzelnen Bauteilen 9 bis 19 Stockwerke (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1)
	Hoffmann-La Roche Verwaltungs- und Produktionsgebäude (heute Hotel Daniel) / Wien	1961	Pharmaunternehmen	Erdgeschoss: Eingangshalle 1.-3. Obergeschoss: Produktionsräume; 4. Obergeschoss: Lager; 5.-6. Obergeschoss: Direktion, Büro, Sitzungsräume, Bibliothek, Küche, Kantine (Haselsteiner et al., 2019, Teil 2)

modern	Maschinenfabrik Friedrich Deckel / München	1961	Maschinenteile, Kleinteilproduktion	Erdgeschoss bis 3. Obergeschoss: Produktion und im 4. Obergeschoss: Büroräume (Haselsteiner et al., 2019, Teil 2).
	Fabrik Leitz / Stuttgart-Feuerbach	1989	Papierwaren und Büroartikeln	Erdgeschoss: Anlieferung, Lagerräume, Versand; 1.-5.Obergeschoss: Produktionsbereiche; 6.Obergeschoss: Büros, Direktion (Ackermann, 1993)
	Henkel Central Eastern Europe GmbH / Wien	2000	Konsumgüter (Wasch- und Reinigungsmittel)	Vertikale Produktionsstrukturen wurden ab den 2000er Jahren verstärkt eingeführt. Der vertikale Materialtransport erfolgt mittels Fördersystemen und Aufzügen (Haselsteiner et al., 2019, Teil 2)
	Manner AG / Wien	2011	Süßwaren	Modernisierung der Produktionsstruktur auf eine vertikale Produktion von oben nach unten. Transport zwischen den Stockwerken erfolgt nicht in Paletten, sondern nur in Produkten (Bathen et al., 2019)
	Wandres GmbH / Stegen	2016	Teilereinigung	Mehrstöckige Produktionsstruktur mit kurzen vertikalen Wegen zwischen den Montageschritten
	Bohnenkamp AG / Osnabrück	2015	Handelsunternehmen	Standorterweiterung Zweigeschossiges Reifenlager. Transport zwischen den Ebenen erfolgt mittels Säulenhebern (Soénus & Wimmers, 2021)
	EUropan 14: 3L's for Liesing, Vertikale Fabrik	2017	Konzept	Entwurfsprojekt für eine vertikale Fabrik im Industriegebiet Liesing (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1).
	BMW / München-Milbertshofen	2018	Automobilindustrie	Vertikalen betrieblichen Expansion (Neubau der Lackiererei) ; Lackierprozesse sind dabei auf bis zu vier Geschossen organisiert (Soénus & Wimmers, 2021) .
	H. & J. Brüggem KG / Lübeck	2018	Müsli, Cornflakes etc.	Im Erdgeschoss sind Sozialbereiche und Logistikflächen untergebracht, in den Etagen zwei bis vier die Produktionsräume. Silozellen und die vertikale Produktion sind in der fünften und sechsten Ebene angeordnet (Haselsteiner et al., 2019, Teil 1).
	Firma Komax AG / Dierikon	2020	Lösungen für die automatisierte Kabelverarbeitung	Nutzungsflexibilität der 5 Etagen für diverse Anforderungen wie Produktion, Forschung und Entwicklung sowie Administration (Komax, 2020)
	„Sprinter-Werk“ der DAIMLER AG / Düsseldorf / Bremen / Sindelfingen	2018	Automobilindustrie	Produktionserweiterung über mehrere Ebenen durch die Verwendung von Lastenaufzügen und Vertikalförderer sowie C-Gehänge. Diese heben, schwenken und transportieren die Karosserien an einer Vorrichtung hängend durch die Produktion (Soénus & Wimmers, 2021).
	Rudolf Ölz Meisterbäcker GmbH & Co KG / Dornbirn	2019	Backwaren	Gebäudeerweiterung auf eine zweigeschossige Produktion für neue Fertigungslinien (Rudolf Ölz Meisterbäcker GmbH, 2019)
	Böhringer Ingelheim / Wien	2021	Medikamente	Vertikale Standorterweiterung (Haselsteiner et al., 2019, Teil 2)

Tabelle 9: Best Practice Beispiele für vertikale Gebäudeerweiterungen und mehrstöckige Produktion (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Haselsteiner et al., 2019))

Nachfolgend werden die Herausforderungen untersucht, welche sich bei der Planung solcher mehrstöckigen Produktionen ergeben und insbesondere in Hinblick auf die Technologieauswahl geeigneter vertikaler Transportmittel betrachtet werden müssen.

2.2.7 Herausforderungen bei der Planung vertikaler Transportmittel

Basierend auf der zuvor analysierten Literatur lassen sich verschiedene zentrale Herausforderungen identifizieren, die für eine effiziente Planung und Integration innerbetrieblicher vertikaler Transportmittel von entscheidender Bedeutung sind. Im folgenden Abschnitt werden diese Aspekte genauer betrachtet. Wird der Produktionsprozess auf mehrere Ebenen verteilt, so kann dies schnell zu einer Unübersichtlichkeit der Betriebsabläufe führen (Wimmer, 2024). Aus diesem Grund muss bereits in der Planung berücksichtigt werden, wie detailliert die Nachverfolgung einzelner Produkte möglich sein soll (Hompel et al., 2018). Es ist besonders wichtig, nicht nur die Schnittstelle zwischen den Etagen zu betrachten, sondern im weiteren Planungsverlauf den gesamten Materialfluss miteinzubeziehen. Die Auswahl eines geeigneten Transportmittels für den jeweiligen Anwendungsfall erfordert dabei viele Informationen, welche meist im Vorfeld noch nicht so detailliert bekannt sind (Hompel et al., 2018). Zusätzlich erschwert die große Bandbreite an unterschiedlichen Varianten und Herstellern eines Transportmitteltyps die Entscheidungsfindung, da es zu starken Abweichungen der Kennwerte und technischen Spezifikationen kommen kann (N. Hoppe et al., 2022). Insbesondere vertikale Transportmittel, welche Güter über mehrere Stockwerke hinweg befördern, bringen zusätzlich spezielle Hindernisse mit sich, welche explizit bei der Auswahl berücksichtigt werden sollten. Dementsprechend können nicht alle Transportmittel universell für die jeweilige Transportaufgabe verwendet werden, sondern die Auswahl wird maßgeblich durch die Abmessungen, das Gewicht, sowie durch den zu überwindenden Höhenunterschied beeinflusst. Im Gegensatz zu horizontalen Transportsystemen, bei denen hauptsächlich die Länge der Strecke und die Transportkapazität relevant sind, müssen bei vertikalen Transportmitteln weitere Herausforderungen in der Planung beachtet werden, um den gegebenen Anforderungen an die Mechanik, Statik, Sicherheitsstandards, sowie die Platzierung und Integration zu erfüllen.

Technische Herausforderungen:

Im Unterschied zu horizontalen Transportsystemen, bei denen primär die Förderlänge und die Transportkapazität relevant sind, muss beim vertikalen Materialtransport zusätzlich der Hubwiderstand berücksichtigt werden, welcher sich bedingt durch die zu bewältigende Schwerkraft ergibt. Durch die Überwindung größerer Höhenunterschiede, als beim Transport in der Ebene, kann es daher zu einem deutlich höheren Energieaufwand kommen (Wehking, 2020). Zur sicheren Handhabung von schnellen und auch langsamen Bewegungen sowie zur Überwindung der Schwerkraft sind daher in der Regel leistungsfähigere und präzisere Motoren als bei der horizontalen Beförderung notwendig (Groover, 2001). Dies erfordert eine sorgfältige Planung und Auslegung des Antriebssystems, um einen zuverlässigen Förderprozess gewährleisten zu können. Zusätzlich wird eine exakte Ansteuerung benötigt, die sowohl die Bewegung als auch die präzise Positionierung der Last in der Höhe

ermöglicht. Die Problematik besteht dabei, das für den spezifischen Anwendungsfall passende Regelgerät auszuwählen, welches sowohl hohe Arbeitsgeschwindigkeiten erlaubt und zusätzlich sanfte Positioniervorgänge sowie eine angemessene Positioniergenauigkeiten ermöglicht (Leonhardt & Anders, 2019). Aufgrund der Höhe und Länge der vertikalen Bewegung ist es zusätzlich möglich, dass es in solchen Systemen vermehrt zu Schwingungen und Resonanzen kommen kann, welche in weiterer Folge mit geeigneten Dämpfungsmaßnahmen eingeschränkt werden müssen. Dies führt auch dazu, dass die Schwingverhältnisse der einzelnen Geschosse genauer beachtet werden müssen, damit keine Schäden in der Gebäudestruktur verursacht werden (Helbing, 2010). Dabei stellen auch die Kalkulation der notwendigen Tragfähigkeit und strukturellen Integrität über lange Betriebszeiten eine besondere Herausforderung dar (Schenk et al., 2013). Eine unzureichende Dimensionierung kann zu kritischen Ausfällen oder gar Unfällen führen. Im Vergleich zu Transportprozessen in der Ebene, bei denen höhere Geschwindigkeiten relativ leicht realisierbar sind, erweist sich dies bei vertikalen Transportmitteln zudem als größere technische Herausforderung, da das Transportsystem nicht nur das Gewicht der zu befördernden Gütern über verschiedene Stockwerke hinweg bewegen, sondern gleichzeitig auch stabil halten muss (Hompel et al., 2018). Je nach Lage des Schwerpunktes können bei einer ungleichmäßigen Lastverteilung innerhalb der Transporteinheit, zudem erhöhte mechanische Belastungen auftreten, welche Auswirkungen auf den Energieaufwand sowie die Lebensdauer der einzelnen Komponenten mit sich bringen. Asymmetrische Transporteinheiten können größere mechanische Momente erzeugen, welche sich auf das Transportmittel auswirken und die Stabilität beeinträchtigen.

Sicherheit und Wartung:

Wie zuvor erwähnt, sind die Lastverteilung und die Tragfähigkeit der vertikalen Transportmittel bei der Beförderung von Materialien über höhere Distanzen von großer Bedeutung. Dies sorgt auch dafür, dass erhöhte Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden müssen (Gudehus, 2010). Ein Ausfall oder Defekt einer Fördereinrichtung, welche Güter über mehrere Etagen transportiert, kann den Produktionsprozess gefährden und im schlimmsten Fall zu einem Stillstand des Betriebs führen. Solche längeren Unterbrechung des Materialflusses können zudem zu unvorhergesehenen Folgewirkungen und erheblichen Mehrkosten führen, weshalb Stillstände so gut es geht vermieden werden sollten (Gudehus, 2010). Eine unsachgemäße Beladung oder Fehlfunktion des vertikalen Transportmittels kann dazu führen, dass Lasten aus großer Höhe herabfallen und erhebliche Schäden an Personen, Maschinen oder der Umgebung verursachen. Um solche Gefahr bestmöglich zu vermeiden, ist es bereits bei der Planung unerlässlich, spezielle Notfallsysteme wie Sicherheitsbremsen, Überlastschutz und redundante Steuerungssysteme usw. zu berücksichtigen. Da die mechanischen Komponenten vertikaler Fördermittel wie bereits erwähnt aufgrund der

konstanten Hebe- und Senkbewegungen an stärkeren Verschleißerscheinungen unterliegen, kommt es zu höheren Wartungsintervallen. Zur Gewährleistung der betrieblichen Kontinuität und Betriebssicherheit, gilt es daher, die Wartungsmaßnahmen vertikaler Transportmittel direkt bei der Planung zu integrieren (Schenk et al., 2013). Insbesondere die richtige Planung der Wartungszugänge stellt eine zusätzliche Herausforderung dar, da diese Transportmittel oftmals in schwer zugänglichen Bereichen installiert sind. Im Gegensatz zu horizontalen Fördersystemen, welche in der Regel näher an der Arbeitsfläche operieren, bedarf es bei vertikalen Transportmitteln einer komplexeren Planung. Aufgrund der schlechteren Zugänglichkeit sind Unternehmen gefordert, sichere und effiziente Wartungszugänge bei der Planung zu berücksichtigen und möglicherweise zusätzliche Infrastruktur für die Instandhaltung einzuplanen, um längere Ausfallzeiten und dadurch höhere Gesamtbetriebskosten zu vermeiden. Durch die höheren Sicherheitsanforderungen und technischen Beschränkungen zur Überwindung der Schwerkraft, müssen daher die Systeme so ausgelegt werden, dass ein Gleichgewicht zwischen Kosten, Leistung und Qualität gefunden wird, ohne die Gesamtproduktivität zu beeinträchtigen (Gudehus, 2010).

Platzierung und Integration:

Eine weitere entscheidende Herausforderung bei der Planung vertikaler Transportmittel ist die Platzierung und Integration der Systeme in den geplanten Produktionsprozess. Insbesondere bei der Überwindung mehrerer Stockwerke stellt, wie bereits erwähnt, die Planung des gesamten Materialflusses eine Herausforderung dar. Durch die mehrgeschossige Betrachtung ergeben sich bestimmte räumliche Einschränkungen, wie Lager, Maschinen, Verkehrswege und Anschlussstellen, welche sich nur in fixen räumlichen Lagen der jeweiligen Ebene befinden können und somit große Auswirkungen auf die Materialflussplanung haben (Gudehus, 2010). Dabei sind besonders die Positionierung des Transportmittels sowie dessen Quellen und Senken im unteren als auch in den oberen Stockwerken zu betrachten (Drira et al., 2007). Im Vergleich zum horizontalen Transport müssen daher bei der Installation von vertikalen Transportmitteln in der Regel spezielle architektonische Berücksichtigungen vorgenommen werden. Es muss darauf geachtet werden, dass insbesondere bei der Konstruktion und Auslegung, spezielle räumliche Strukturen wie Schächte, Treppenhäuser, Leitungen oder Tragkonstruktionen ausreichend berücksichtigt werden (Schenk et al., 2013). Auch die stützenfreie Nutzfläche, frei Grundfläche je Ebene und insgesamt die Aufstellmöglichkeiten von schweren Maschinen spielen eine entscheidende Rolle, um eine ungehinderte Integration zu ermöglichen (Haselsteiner et al., 2019, Teil 2; Helbing, 2010). Besonders in älteren Gebäuden ist daher die Integration eine Herausforderung, da die Gebäude möglicherweise nicht für die Einbettung solcher Systeme ausgelegt sind und es zu zusätzlichen baulichen Anpassungen bestehender Strukturen kommen kann. Im Zuge

dessen muss bei der Planung die Stabilität und Fundamentstärke ausreichend berücksichtigt werden, damit die Lastaufnahmefähigkeit von Boden und Decke gegeben ist, um vertikale Transportmittel zu integrieren (Helbing, 2010). Dabei gilt es zu beachten, dass die Tragfähigkeit der Etagen in Geschossbauten geringer als bei einstöckigen Gebäudeformen ist (Wimmer, 2024). Auch die Raumhöhe und der vorhandene Einbauraum spielen eine entscheidende Rolle, da es ansonsten beispielsweise bei Steigungs- oder Gefällstrecken vorkommen kann, dass kein ausreichender Raum zur Verfügung steht, was wiederum bereits große Einschränkungen in der Transportmittelauswahl mit sich zieht (Leonhardt & Anders, 2019). Eine Integration horizontaler Transportmittel ist daher meist unkomplizierter, da diese entlang einer Ebene verlaufen und somit weniger Anpassungen an der Gebäudestruktur erfordern und flexibler an die bestehende Umgebung angepasst werden können. Die vertikalen Transportmittel sind zudem in Bezug auf den Betriebsablauf eine sehr sensible Schnittstelle, weshalb es bei der Planung besonders erforderlich ist, strukturelle Restriktionen zu betrachten (Gudehus, 2010). Handelt es sich um eine Verbindung unterschiedlicher Produktionsprozesse über die einzelnen Stockwerke hinweg, so ist vor allem auf die Einhaltung des kontinuierlichen Materialflusses zu achten. Durch Veränderungen der Transportkapazität oder des Produktsortiments kann es beispielsweise zu starken Schwankungen zwischen den Abteilungen in den unterschiedlichen Stockwerken kommen. Um Engpässe zu vermeiden und die Gesamtleistung aufrecht zu erhalten, ist es daher wichtig nicht nur die physikalische Infrastruktur zu beachten, sondern auch potentielle Änderungen des Materialflusses bereits bei der Layoutplanung zu berücksichtigen (Azhar et al., 2021). Es gilt vorab zu klären, ob sowohl eine aufsteigende als auch absenkende Beförderung erfolgen soll, da nicht alle vertikalen Transportmittel in beide Richtungen betrieben werden können. Erfolgt der Produktionsfluss zudem simultan in beide Richtungen, so ist auch dies notwendig bei der Planung zu berücksichtigen, da nicht jedes Transportmittel die Güter zeitgleich nach oben und unten nach befördern kann (z.B.: Säulenheber). Zudem spielt es auch eine Rolle, ob der Materialfluss nach dem vertikalen Transport nahtlos, manuell oder auch automatisiert, weitergeführt wird. In den einfachsten Fällen erfolgt der Materialfluss danach in dieselbe Richtung, als es zuvor im anderen Stockwerk der Fall war. Allerdings kann es zum Beispiel in bestimmten Situationen erforderlich sein, die Ausgaberichtung während der Überwindung des Höhenunterschiedes zu ändern, um auf unmittelbare Kurven im nachgestellten horizontalen Transportmittel verzichten zu können. Zusätzlich gibt es bei manchen vertikalen Fördermitteln die Möglichkeit, das Transportgut aus unterschiedlichen Höhen ein- oder auszugeben, was wiederum eine noch detaillierte Planung erfordert.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Herausforderungen führen in weiterer Folge zur Ableitung spezifischer Rahmenbedingungen, welche schon früh in der Planung bei der Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel zu berücksichtigen sind.

2.3 Ansätze zur Entscheidungsfindung

Um der systematischen Vorgehensweise bei der Entscheidungsfindung gerecht zu werden, bietet dieses Kapitel einen Überblick über in der Theorie häufig verwendete Ansätze. Dafür gliedert sich dieses Kapitel in zwei Hauptabschnitte. Zuerst werden in Abschnitt 2.3.1 die analytischen Ansätze, genauer betrachtet. Dabei handelt es sich um formale Entscheidungsmethoden, welche durch ihre Struktur und Reproduzierbarkeit überzeugen. Den in Abschnitt 2.3.2 angeführten induktiven Ansätze werden hingegen eher subjektiven und flexibleren Methoden zugeordnet. Anzumerken ist, dass es sich hierbei nur um eine ausgewählte Zahl an Methoden handelt und in der Literatur noch weitere zu finden sind. Abbildung 7 klassifiziert die unterschiedlichen Ansätze, nach den Prinzipien, welche den Methoden zugrunde gelegt werden können. Die Einteilung der analytischen Ansätze, wird dabei noch einmal in rein numerische und skalenbasierte Ansätze aufgeschlüsselt.

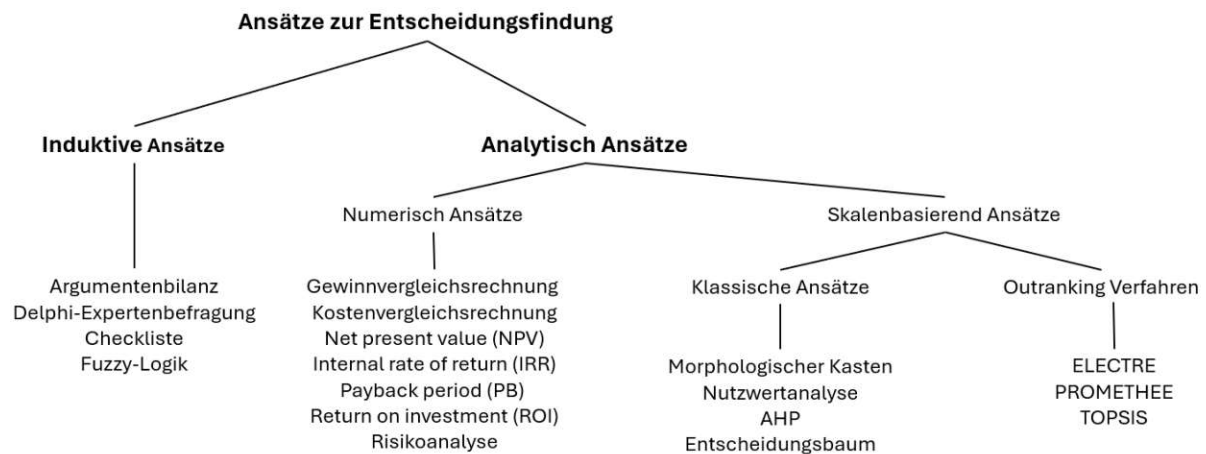


Abbildung 7: Ansätze zur Entscheidungsfindung (Eigene Darstellung in Anlehnung an MKRKDTTH & SURKSH (1986) und NAIK & Chakravarty (1992))

2.3.1 Analytische Ansätze

Bei den analytischen Ansätzen handelt es sich um Methoden die eine objektive, nachvollziehbare und oft numerische Bewertungen liefern. Dabei geht es meistens um mathematische Modelle und statistische Analysemethoden. Die hierbei verwendeten Kriterien werden oftmals in quantitativ (= messbar z.B.: Tragfähigkeit, Energieverbrauch, Kosten usw.) und qualitativ (= nicht messbar z.B.: Flexibilität, Lastform, Lastart usw.) unterschieden. Analytische Ansätze können wiederum in zwei Hauptkategorien unterschieden werden: numerische Ansätze und skalenbasierende Ansätze. Die in Abbildung 7 angeführten skalenbasierten Methoden werden zusätzlich in die Kategorien klassische Ansätze und Outranking Verfahren aufgeteilt.

Skalenbasierte Ansätze:

Skalenbasierte Ansätze werden oftmals verwendet, wenn sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien für die Beurteilung von Alternativen vorliegen. Sie wandeln zugrunde liegenden Faktoren in messbare Skalen um. Die in Abbildung 7 angeführten skalenbasierten Methoden werden folgend kurz beschrieben:

Klassische Ansätze:

- **Morphologischer Kasten**

Ein morphologischer Kasten ist eine Matrix, welche aus mehreren unabhängigen Parametern besteht, von denen jeder ein oder mehrere Ausprägungen hat (Ritchey, 1998). Diese Parameter weisen spezifische Merkmale oder Eigenschaften des zu analysierenden Problems auf, während die Ausprägungen mögliche Werte und Zustände dieser Merkmale angeben. Durch die Kombination unterschiedlicher Parameter und deren Ausprägungen, können eine Vielzahl an Lösungen entstehen, die in weiterer Folge bewertet werden. In den meisten Fällen wird diese Methode verwendet, um komplexe Zusammenhänge und vielfältige Lösungsansätze zu visualisieren. Die Anwendung eines Morphologischen Kastens geschieht meist in der Systemfindungsphase, um aus zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten die sinnvollsten Lösungsalternativen herauszufiltern (Martin, 2016). Sie bietet jedoch keine quantitative Werte, mit denen die Ergebnisse untereinander verglichen und priorisiert werden können.

- **Nutzwertanalyse (NWA):**

Basierend auf zuvor definierten Auswahlkriterien kann durch das Durchführen einer Nutzwertanalyse eine geeignete Alternative ausgewählt werden. Durch eine Gewichtung, je nach Wichtigkeit der Kriterien im Vergleich zu den anderen, kann dabei die Methodik an jeden Anwendungsfall individuell angepasst werden (Hompele et al., 2018). Aufgrund der großen Menge an Kriterien bei der Transportmittelauswahl, die nicht direkt einer Rangfolge zugeordnet werden können, erweist sich dabei die NWA als nützliches Werkzeug. Die Auswahl der Entscheidungskriterien und deren Gewichtung, sind dabei immer von den Präferenzen des Entscheiders abhängig was sowohl Vor- als auch Nachteile mit sich bringt (Clausen & Geiger, 2013). Es kann dadurch zwar zu einer auf das Problem maßgeschneiderte Lösung kommen, jedoch birgt diese subjektive Bewertung und Gewichtung auch das Risiko der Verzerrung und persönlicher Vorurteile. Zusätzlich kann es zu Problemen bei der Einigung geben, wenn mehrere Entscheidungsträger unterschiedliche Kriterien anders präferenzieren. Anschließend an die Gewichtung erfolgt die Bewertung der Zielerfüllung der einzelnen Kriterien. Jede Alternative erhält dabei einen Zielwert, welcher beschreibt wie gut dieses Kriterium erfüllt wird. Der Gesamtnutzen jeder Alternative errechnet sich anschließend durch eine Multiplikation dieser Bewertungen mit der Gewichtung und

einer anschließenden Aufsummierung dieser Werte. Die am besten geeigneten Alternativen werden schlussendlich anhand des höchsten Gesamtnutzwertes miteinander verglichen und ausgewählt (Hoffmeister, 2008).

- Analytic Hierarchy Process (AHP):

Die AHP ist ein systematisches Verfahren, bei dem die Technologiealternativen anhand von mehreren zuvor definierten qualitativen und quantitativen Kriterien bewertet werden (Aruldoss et al., 2013). Er ist eine weitere Methode, die sich besonders für komplexe unstrukturierte Probleme, bei denen mehrere Kriterien berücksichtigt werden müssen, eignet. Dabei wird das Entscheidungsproblem in eine hierarchische Struktur welche, aus einer Ziel-, Kriterien- und Alternativebene besteht zerlegt (Saaty, 1990). Diese Entscheidungskriterien können sich wiederum in Subkriterien aufspalten, wodurch mehrere Ebenen entstehen und somit der Arbeitsaufwand erhöht wird. Die anschließende Beurteilung der Kriterien durch Experten erfolgt immer paarweise. Auch hier kann es wie bereits bei der NWA erwähnt zu einer subjektiven Bewertung der Indikatoren kommen (Liu et al., 2023). Die Durchführung kann dabei sowohl individuell oder als Gruppe erfolgen (Hummel & IJzerman, 2011). Es werden dabei jeweils die Kriterien auf einer Ebene der Hierarchie, welche dem selben übergeordneten Element (Kriterium oder Ziel) unterstellt sind, miteinander verglichen (Fabianek et al., 2020). Auf Basis dieser Paarvergleiche wird eine Evaluationsmatrix erstellt, welche dann ausgewertet wird und somit schlussendlich die optimale Lösung definiert. Da sich dieser Vergleich immer nur auf zwei Auswahlkriterien begrenzt, erhöht sich der Aufwand rasant, wenn alle Kriterien untereinander verglichen werden müssen. Besonders bei sich ändernden Kriterien und Alternativen, bedeutet dies ein zusätzlicher Zeitaufwand, da der gesamte Vergleich erneut durchgeführt werden muss. Im Zuge dieser Bewertung ist es jedoch auch möglich die Qualität und Widerspruchsfreiheit durch Identifikation unnötiger Übereinstimmungen zu ermittelt (Mühlbacher & Kaczynski, 2013). Aus einigen Experimenten geht jedoch hervor, dass für manche Anwender des AHPs, Schwierigkeiten bei der Durchführung bestehen und die Ergebnisfindung nicht ganz transparent und nachvollziehbar erfolgt (Belton, 1986).

- Entscheidungsbaum:

Bei einem Entscheidungsbaum handelt es sich um ein visuelles und analytisches Werkzeug zur Entscheidungsfindung. Der Name erhält diese Methode aufgrund ihrer Baumstruktur, welcher aus verschiedenen Knoten und Zweigen auf mehreren unterschiedlichen Entscheidungsebenen besteht. Die Knoten repräsentieren dabei eine Entscheidung oder Bedingung, auf deren Zweige weitere Ketten von Folgeentscheidungen divergieren (Kröll, 2007). Die Blätter des Baumes repräsentieren schließlich die endgültigen Ergebnisse. Die Methode eignet sich für Entscheidungen, bei denen sowohl die Zusammenhänge und Strukturierung bekannt als auch

empirische Werte verfügbar sind. Zur Quantifizierung werden den Entscheidungen (Knoten) Zahlenwerte zugeordnet, welche den jeweiligen Nutzen oder Aufwand repräsentieren. Den Verbindungen zwischen den Knoten werden repräsentative Wahrscheinlichkeitswerte zugeordnet, um deren Zusammenhang darzustellen.

Outranking Verfahren:

Eine Alternative zu den klassischen Verfahren sind die Outranking Verfahren oder auch Prävalenzverfahren genannt, die auf dem paarweisen Vergleich der Alternativen hinsichtlich eines Kriteriums basieren. Dies ist vor allem bei einer hohen Anzahl von Kriterien oder in Situationen mit unsicheren Informationen nützlich (Kangas et al., 2001). Die am meisten verwendeten Verfahren werden nachfolgend kurz beschrieben:

- *Elimination and Choice Expressing Reality (ELECTRE):*

Die von Roy (1991) entwickelte Methode wird dazu verwendet, die Alternative mit dem höchsten Vorteil und den niedrigsten Konflikten basierend auf verschiedenen Kriterien zu treffen. Es werden dabei Alternativen ermittelt, welche in möglichst vielen Kriterien dominant sind und somit bevorzugt werden (Roy, 1991). Dabei gibt es verschiedene Ausführungen wie ELECTRE I, das für Auswahlprobleme, ELECTRE TRI für Zuordnungsprobleme sowie ELECTRE II, III und IV welches für Rangordnungsprobleme gedacht ist (Figueira et al., 2016). Mit Hilfe des Modelles wird eine sogenannte partielle Präordnung (Quasiordnung) ermittelt und anschließend die verschiedenen Alternativen in einem Graph dargestellt (Azhar et al., 2021).

- *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE):*

Wie auch bei den anderen Outranking Methoden wird bei der PROMETHEE für jedes einzelne Kriterium ein paarweiser Vergleich der Alternativen aufgestellt. Dabei wird für die sogenannten „verallgemeinerten Kriterien“ eine Präferenzfunktion bestimmt, um die Stärke der Ausprägung einer Alternative gegenüber der anderen, bezüglich eines Kriteriums darzustellen (Brans et al., 1986). Wiederum kann hier zwischen zwei alternativen Herangehensweisen unterschieden werden. PROMETHEE I bietet ein partielles Ranking der Alternativen, wohingegen PROMETHEE II alle Alternativen von der besten bis hin zu der schlechtesten bewertet.

- *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS):*

Bei der TOPSIS Methode geht es um die Reihung und Auswahl der Alternativen. Die beste Alternative ist dabei diejenige, die den kürzesten Abstand zur idealen Lösung und den weitesten Abstand zur schlechtesten Lösung aufweist (Chen et al., 2006). Durch diese Form der Bewertung werden die Ergebnisse durch ihre relative Nähe klar und differenziert dargestellt. Dies begünstigt eine objektive Bewertung, welche nicht

durch subjektive Gewichtungen beeinflusst wird (Liu et al., 2023). Jedoch spielt die Sensibilität der Gewichtungen eine große Rolle, da kleine Änderungen große Abweichungen in den Ergebnissen mit sich bringen können. Zudem wird für die Bewertung ein tiefes Verständnis der idealen und schlechten Lösungen benötigt, um ein effektives Bewertungsergebnis zu erzielen (Liu et al., 2023). Dies erfordert ausführliche Vorkenntnisse über den zugrunde liegenden Entscheidungsprozess, was wiederum die Vorgehensweise deutlich komplexer machen kann.

Numerische Ansätze

Liegt eine Vielzahl an quantifizierbaren Daten wie z. B. anfallende Lohn-, Energie-, Instandhaltungs-, Abschreibungskosten usw. vor, so sind numerische Ansätze geeignete Auswahlmethoden (Martin, 2016). Zu diesen Methoden zählen überwiegend Ansätze der Investitionsrechnung sowie die Methode der Risikobewertung. Da es sich bei dieser Arbeit um die Bewertung und Auswahl einer Transporttechnologie handelt, gibt es nicht nur quantitative Merkmale, sondern auch viele qualitative Faktoren, die zusätzlich betrachtet werden müssen, damit eine fundierte Entscheidung getroffen werden kann. Deshalb ist für diese Auswahlmethodik entscheidend, dass sowohl quantitative als auch qualitative Größen betrachtet werden. Finanzielle Berechnungen müssen zwar trotzdem aufgestellt werden, jedoch genügen diese allein nicht aus, um die Eignung eines Transportmittels für den bestimmten Anwendungsfall zu bestimmen. Im Folgenden werden diese numerischen Ansätze kurz erwähnt:

- **Kostenvergleichsrechnung:**

Bei der Kostenvergleichsrechnung werden die Kosten verschiedener Alternativen gegenübergestellt (Noosten, 2018). Es werden alle anfallenden Kosten über einen Betrachtungszeitraum betrachtet. Die Erlöse werden dabei nicht berücksichtigt.

- **Gewinnvergleichsrechnung:**

Die Gewinnvergleichsrechnung ist eine Erweiterung der Kostenvergleichsrechnung und vergleicht die unterschiedlichen Alternativen, indem der jeweilige Gewinn aus der Differenz von Erträgen und Aufwendungen berechnet wird (Noosten, 2018).

- **Net present value (NPV):**

NPV oder auch Kapitalwertmethode genannt verwendet die klassische Zeitwertformel, welche den Gegenwartswert aller zukünftigen Cashflows, abzüglich der Anfangsinvestition berechnet, um somit die Rentabilität eines System zu ermitteln (Kharitonov & Kosterin, 2017). Bei einem positiven Ergebnis wird das System vorrausichtlich Gewinn machen.

- Internal rate of return (IRR):

Die IRR oder auf Deutsch der „Methode des internen Zinsfluss“ ist ein Spezialfall, bei dem der NPV eines Projektes Null ist, was bedeutet, dass die erwarteten Cashflows sich genau mit den Kapitaleinsatz decken. Diese Methode gibt somit die geschätzte mittlere Rendite pro Jahr an unter Berücksichtigung der zukünftigen Cashflows an (Svatoňová et al., 2015). Das System rentiert sich, sobald die Rendite die Finanzierungskosten übersteigt.

- Payback period (PBP):

Bei der payback period, oder auch Amortisationszeit genannt, handelt es sich um eine einfache finanzielle Bewertung, bei der die Zeitdauer bestimmt wird, um die anfängliche Kapitalinvestition durch eingehende Cashflows zurückzuerhalten (Svatoňová et al., 2015).

- Rreturn on investment (ROI):

Die Kapitalrendite oder auch ROI gibt Auskunft über die Gesamtentwicklung der Investition, indem das Verhältnis des Gewinnes zur Investitionssumme berechnet wird (Jeffery, 2004). Dieser Wert wird prozentual angegeben. Je höher er ist, desto erfolgreicher war die Investition.

- Risikoanalyse:

Bei der Risikoanalyse werden alle potenziellen Risiken identifiziert und bewertet, die den Erfolg eines Projekts beeinträchtigen könnten (Cottin & Döhler, 2013). Sie liefert weitere Schritte zur Maßnahmenplanung und informiert Entscheidungen zu treffen, um die Wahrscheinlichkeit negativer Auswirkungen auf das Projekt zu reduzieren.

2.3.2 Induktive Ansätze

Die induktiven Ansätze basieren meist auf Beobachtungen und subjektiven Einschätzungen von Experten und sind daher oft flexibler und weniger formal als analytische Ansätze.

- Argumentenbilanz:

Bei der Argumentenbilanz handelt es sich um eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile aller Alternativen in einer Listenform (Haag et al., 2011). Diese Methode wird dazu verwendet, um sich einen groben Überblick zu verschaffen indem diverse Argumente miteinander verglichen werden. Sie eignet sich daher nicht für monetäre Bewertungen und Investitionsentscheidungen, da keine Wichtigkeit und Bezug zwischen den Argumenten erkennbar ist (Breiing & Knosala, 2013).

- Delphi-Expertenbefragung:

Unter der Delphi Methode versteht man eine Expertenumfrage, bei der ausgewählte Fachleute systematische Daten zu der Thematik erheben und auswerten (Kharat et al., 2016). Durchgeführt wird dies durch mehrmaliges anonymes Beantworten von Fragebögen, um aus Expertenmeinungen Prognosen zu gewinnen (Köhler, 1992). Nach jeder Runde werden die Ergebnisse durch einen Moderator präsentiert und den Experten erneut zum Überdenken ihrer Antworten und zur Urteilsbildung vorgelegt. Durch diese Rückkopplung können alte Antworten revidiert und gegebenenfalls korrigiert werden. Diese Methode verfolgt das Ziel, dass die Experten ihre Antworten anpassen und sich somit einer Mehrheitsmeinung der Gruppen an die „richtige“ Antwort annähert. Die Qualität des Ergebnisses hängt jedoch stark von der Auswahl der befragten Fachleute ab, da alle unterschiedliches Vorwissen verfügen und schlussendlich nur die Mehrheitsmeinung verwendet wird. Des Weiteren können im Vergleich zu den zuvor beschriebenen skalenbasierten Ansätzen keine Präferenzen und Abhängigkeiten der unterschiedlichen Kriterien miteinbezogen werden, wodurch es zu Ungenauigkeiten bei der Evaluierung des Fragebogens kommen kann (Döring & Bortz, 2016). Die Delphi-Expertenbefragung eignet sich daher besonders für Bereiche, in denen genaue Daten fehlen und Prognosen für zukünftige Entwicklungen erforderlich sind.

- Checkliste:

Mit Hilfe der Checkliste können verschiedene Aspekte und individuelle Kriterien systematisch erfasst werden (Haag et al., 2011). Es handelt sich dabei um eine Liste mit qualitativen Fragen, welche mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden müssen. Je nach Erfüllungsgrad dieser Kriterien können die Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien aufgezeigt werden. Auf Basis dessen kann eine Priorisierung der einzelnen Technologien erfolgen, um eine fundierte Entscheidung zu treffen.

- Fuzzy-Logik-Methode:

Bei der Fuzzy-Logik, auch bekannt unter dem Begriff „vage“ Logik, handelt es sich um ein komplexes Werkzeug zur Verarbeitung von unsicheren und unscharfen Daten, das in den letzten Jahren zunehmend an Aufmerksamkeit erlangt hat (Kruse et al., 2015). Diese systematische Methode kann im Vergleich zur traditionellen Logik, welche davon ausgeht, dass Dinge nur wahr oder falsch sein können, auch teilweise nicht zweiwertige Wahrheiten ausdrücken (Broß et al., 2017; Kruse et al., 2015). Durch eine solche differenzierte Entscheidungsfindung können Aussagen die zu einem bestimmten Grad beide Wahrheitswerte erfüllen auch prozentuell als Teilwahrheiten bewertet werden, je nachdem, ob die Aussage eher eindeutig „wahr“ oder „falsch“ ist (Kutzner et al., 2020). Durch den Einsatz solcher unscharfen Daten gewinnt die Methode Flexibilität und Anpassungsfähigkeit gegenüber der traditionellen Logik. Bei

der Fuzzy-Methode ist es zum Beispiel auch möglich, linguistische Begriffe, welche nicht direkt durch Zahlenwerte ausgedrückt werden können, zur Bewertung verschiedener Kriterien zu verwenden (Chan et al., 2000). Die Auswahl erfolgt dabei durch ein Abfragen von Wenn-Dann Beziehungen zwischen den Eingangsgröße (Kutzner et al., 2019).

2.4 Zusammenfassung des Kapitels

Die Bewertung und Auswahl geeigneter Technologien stellen einen zentralen Aspekt der Fabrikplanung dar, da diese als entscheidende Schnittstelle zwischen den verschiedenen Produktions- und Lagerbereichen fungieren und somit den Materialfluss entscheidend beeinflussen. Im ersten Abschnitt der vorangegangenen Kapitel werden die grundlegenden Begriffe der Intralogistik und des Transportierens erläutert, wobei der innerbetriebliche Materialfluss als essenzieller Bestandteil hervorgehoben wird. In diesem Abschnitt wird verdeutlicht, dass es eine Vielzahl an verfügbaren Transportmitteln gibt, weshalb eine spezifische Differenzierung auf vertikale Transportmittel für den stockwerksübergreifenden Materialtransport erforderlich ist. Diese Klassifizierung unterstreicht zudem, dass sich vertikale Transportmittel wie Lastenaufzüge, Säulenheber, Umlaufförderer usw. in ihrer Funktionalität und technischen Ausprägungen deutlich variieren. Beim vertikalen Materialtransport über verschiedene Stockwerke werden zusätzlich besondere technische Anforderungen (wie z.B.: Tragfähigkeit, Stabilität, Lastverteilung usw.) an das Transportmittel gestellt, welche im Vergleich zum Transport in einer Ebene explizit berücksichtigt werden müssen.

Angesichts der ansteigenden Flächenpreise und zunehmender Bodenversiegelung wird in weiterer Folge auf den Trend der mehrstöckigen Produktion eingegangen. Je nach Ausgangssituation gilt es im Rahmen von Neubauten, vertikaler Gebäudeerweiterungen oder durch Integration von Produktionsprozessen in bestehende Gebäude, den vorhandenen Raum, mit Hilfe vertikaler Produktionsprozesse so effizient wie möglich auszunutzen. Dabei ergeben sich neben technischen auch spezifische bauliche Aspekte (wie z.B.: der Statik, Zugänglichkeit, Hindernisbildung, Platzierung der Transportmittel usw.) sowie zusätzliche sicherheitstechnische Herausforderungen, welche bei der Planung vertikaler Materialflüsse berücksichtigt werden müssen.

Zur Entscheidungsfindung existieren viele verschiedene Ansätze, welche für eine strukturierte Bewertung verwendet werden können. Analytische Verfahren wie die Nutzwertanalyse, der AHP oder Outrankingverfahren ermöglichen beispielsweise eine strukturierte Bewertung bestimmter Technologien, indem sie die zugrundeliegenden Faktoren in Skalen umwandeln. Oftmals kommen auch numerische Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines vorhandenen Systems zum Einsatz. Induktive

Verfahren wie beispielsweise die Expertenbefragung oder Argumentenbilanz bieten hingegen eine flexiblere und informellere Möglichkeit der Bewertungen.

Damit es sich bei der Entscheidungsfindung jedoch um eine möglichst objektive Bewertung handelt, muss diese methodisch erfolgen werden. Hierbei spricht man über den Prozess, des Analysierens und Bewerten unterschiedlicher Alternativen und anschließender Identifizierung der am geeignetsten Technologie (Shen et al., 2010). Dabei werden Informationen über verschiedene Quellen gesammelt und die Alternativen basierend auf bestimmten Auswahlkriterien gegeneinander bewertet (Lamb & Gregory, 1997). Um nun die für den jeweiligen spezifischen Anwendungsfall optimale Transporttechnologie auswählen zu können, ist zu prüfen, ob bereits geeignete Methode existieren, welche eine solche Bewertung ermöglichen und auch die zuvor in Kapitel 2.2.7 identifizierten Herausforderungen bei der Planung von vertikalen Transportmitteln berücksichtigen. Daher soll im weiteren Verlauf anhand einer systematischen Literaturrecherche untersucht werden, inwieweit bestehende Auswahlmethoden den vertikalen Materialtransport über mehrere Stockwerke und die damit verbundenen spezifischen Anforderungen betrachten.

3 Systematische Literaturanalyse

Um den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Methoden zur Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel zu erfassen, widmet sich dieses Kapitel der systematischen Literaturrecherche. Ziel dieser Recherche ist es, anhand einer strukturierten Analyse relevante Publikationen zu ermitteln, um in weiterer Folge daraus eine Forschungslücke identifizieren zu können. Dafür wird zunächst in 3.1 die Vorgehensweise bei der Literaturrecherche detailliert beschrieben, welche anschließend in Abschnitt 3.2 durchgeführt wird. Basierend auf diesen Ergebnissen wird im Abschnitt 3.3 die identifizierte Forschungslücke herausgearbeitet, welche im weiteren Verlauf der Arbeit adressiert wird.

3.1 Vorgehensweise der Literaturanalyse

Bei einer systematischen Literaturrecherche handelt es sich um einen strukturierten und methodischen Prozess zur Sammlung, Bewertung und Synthese von Forschungsergebnissen aus bestehenden wissenschaftlichen Quellen. Mit Hilfe dieser reproduzierbaren und transparenten Methode soll der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik identifiziert und bewertet werden. Ziel ist es, einen Überblick der Anwendungsbereiche solcher Technologieauswahl Methoden zu verschaffen und zu evaluieren, welche dabei für die vorliegende Problemstellung am geeignetsten erscheint. Zur Gewährleistung einer strukturierten Recherche und dem anschließenden Reviewprozess erfolgt die Literaturanalyse gemäß der Methode von Webster & Watson (2002). Hierbei werden wissenschaftliche Suchmaschinen und Datenbanken wie JSTOR, Science Direct, Springer Link, Resaerch Gate, Scopus und Google Scholar systematisch nach definierten themenrelevanten Suchbegriffen durchsucht. Der Fokus während der Recherche wird dabei sowohl auf deutsche als auch englischsprachige Literatur in einem Publikationszeitraum von 1980 bis 2024 gelegt. Diese Suchbegriffe werden mit den Boolschen Operatoren: „AND“ oder „OR“ miteinander kombiniert. Wenn zwei Ergebnisse in der Suche vorkommen müssen, sind diese durch den Operator „AND“ miteinander verbunden. Werden sie mit „OR“ verknüpft, so beinhaltet das Ergebnis der Suche nur einen der beiden Begriffe. Der Operator „*“ wurde verwendet, um Wörter desselben Wortstammes zu integrieren. Um die Relevanz der recherchierten Publikationen festzustellen, werden diese anhand der Titelbezeichnungen, der Schlagwörter und Kurzbeschreibungen überprüft. Anschließend erfolgt eine Vorselektion der identifizierten wissenschaftlichen Arbeiten, welche dann in weiterer Folge inhaltlich genauer überprüft werden. Diese relevanten Methoden werden dann in weiterer Folge miteinander verglichen und hinsichtlich der Kompatibilität in Bezug auf die Zielsetzung der Forschungsarbeit bewertet. Basierend auf diesen Ergebnissen wird der notwendige Forschungsbedarf festgelegt, welcher in Bezug auf die Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittel besteht.

3.2 Auswertung

Die Auswahl von Geräten und Maschinen unterliegt meist einem Entscheidungsproblem, bei dem eine begrenzte Anzahl an Alternativen anhand mehrerer, teilweise widersprüchlicher Kriterien bewertet werden muss. Solche Probleme gehören zu der multikriteriellen Entscheidungsfindung (MCDM) (Dağdeviren, 2008). Innerhalb dieses Bereiches wird zwischen der „Multiple Objective Decisions Making“ (MODM), das sich mit der Optimierung mehrerer Zielen befasst und dem für diese Arbeit wichtigen „Multiple Attribute Decision Making“ (MADM) unterschieden (Aruldoss et al., 2013; Basilio et al., 2022; Tuzkaya et al., 2010; Zadeh, 1965). MADM umfasst methodische Ansätze zur Entscheidungsfindung, bei der aus einer diskreten Anzahl an Alternativen die beste Option anhand explizit definierter Bewertungskriterien ausgewählt wird (Hwang & Yoon, 1981).

In diesem Abschnitt werden im Rahmen der zuvor beschriebenen systematischen Literaturrecherche bestehende Auswahlmethoden für multikriterielle Entscheidungsprobleme im Kontext der Technologieauswahl identifiziert. Diese Methoden werden in Hinblick auf die zugrundeliegende Problemstellung kritisch analysiert und reflektiert. Dabei werden relevante Publikationsergebnisse aufgezeigt und miteinander verglichen, um in weiterer Folge den notwendigen Forschungsbedarf zu identifizieren. Die Suche in der Datenbank „Scopus“ ergab für den zuvor angegebenen Zeitraum 21.549 wissenschaftliche Artikel, welche mit folgender thematischen Suchanfrage gefunden wurden: ((“technolog* selection” or “multi-attribute decision making” OR “madm” OR “mcdm” OR “multi-criteria” OR “multi criteria” OR “multiplecriteria”) AND (“ahp” OR “topsis” OR “promethee” OR “electre” OR “maut” OR “simple multi-attribute rating technique” OR “smart” Or “financial” Or “Utility analysis” OR “Utility value analysis”)) (Erhoben am 07.07.2024). Diese Analyse zeigt auf, wie oft die Stichwörter der Transportmittelauswahl oder der Multikriterienanalyse bzw. multikriterielle Entscheidungsfindung in Kombination mit einem der skalenbasierten Ansätze aus 2.3.1 in einer wissenschaftlichen Arbeit veröffentlicht wurden. Bei der Suche wurden sowohl die ausgeschriebene Version als auch das Akronym verwendet. In Abbildung 8 werden die Publikationen nach den fünf meistgenannten Forschungsbereichen aufgelistet. Zu beachten ist dabei, dass eine Publikation gleichzeitig auch mehreren Bereichen zugeteilt werden kann. Es zeigt sich, dass die Ingenieurwissenschaften mit 8.977 Publikationen und die Informatik mit 8.163 Artikeln die klaren Spitzenreiter bei der Anwendung solcher Methoden sind. Gefolgt werden diese von den Gebieten der Umweltwissenschaft, Mathematik sowie der Betriebswirtschaft und Rechnungswesen.

Verteilung der Publikationen nach Forschungsbereichen

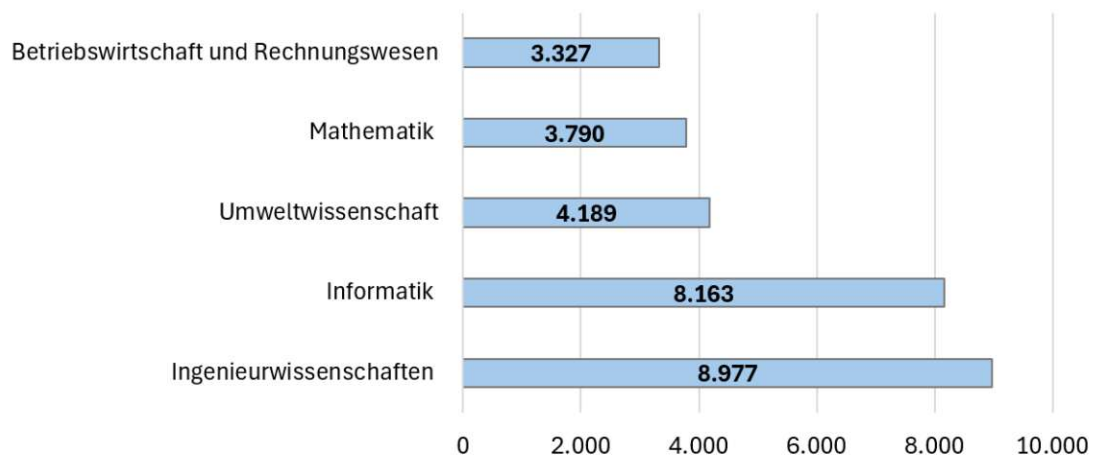


Abbildung 8: Verteilung der Publikationen nach Forschungsbereichen (Eigene Darstellung)

Die Auswertung der vorangegangenen Literaturrecherche zeigt, dass sich viele verschiedene Methoden zur Entscheidungsfindung in den Ingenieurwissenschaften etabliert haben. Diese können je nach Problemstellung und Umgebungsbedingung erheblich variieren, weshalb keine universelle Methode existiert, die für alle Anwendungsfälle gleichermaßen geeignet ist. Um einen umfassenden Überblick über die in der Literatur am häufigsten vertretenen Entscheidungsmethoden zu erhalten, veranschaulicht das Tortendiagramm in Abbildung 9 die Verteilung dieser Methoden in den Ingenieurwissenschaften anhand ihrer absoluten Häufigkeit. Es ist zu erkennen, dass sich vor allem MCDM-Methoden als beliebte und nützliche Auswahl- bzw. Entscheidungsmethoden etabliert haben.

Verteilung der Entscheidungsmethoden in den Ingenieurwissenschaften

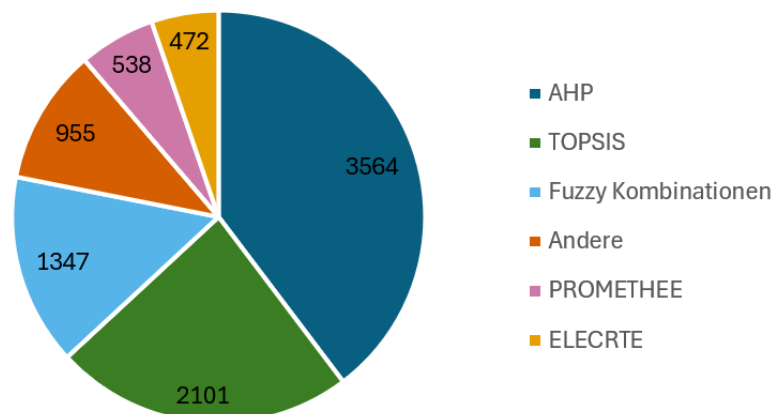


Abbildung 9: Verteilung der Entscheidungsmethoden in den Ingenieurwissenschaften (Eigene Darstellung)

Wie aus Abbildung 9 zu erkennen ist, ist der AHP mit 3564 Publikationen eine der am meisten verwendeten Entscheidungsmethoden in den Ingenieurwissenschaften (40%) und wird zum Beispiel vermehrt im Bereich der Fertigung zur Auswahl von Fertigungstechnologien eingesetzt (Jiang et al., 2011; Kengpol & O'Brien, 2001; Ordoobadi, 2013; Tabucanon et al., 1994). Auch bei der Produktdiversifikation und -entscheidung (Muerza et al., 2014), der Auswahl von öffentliche Verkehrsmittel (Nalmpantis et al., 2019) sowie zur Technologieauswahl in anderen Bereichen findet diese Methode Anwendung (Khatri & Srivastava, 2016; S. Mitra & Goswami, 2019; Samah & Manaf, 2010). Mit 2101 Veröffentlichungen, wird auch die TOPSIS Methode in unterschiedlichen Bereichen genutzt um geeignete Technologien zu selektieren (Alao et al., 2020; Georgiadis et al., 2013; İç, 2012). Auch zur Differenzierung und Auswahl von Transportalternativen findet diese Methode vermehrt Anwendung (Awasthi et al., 2011; Büyüközkan et al., 2018; Mavris & Kirby, 1999; Štreimikienė, 2013). Die von Zadeh (1965) vorgeschlagene Fuzzy-Logik wird mit 1347 Veröffentlichungen auch sehr oft zur Entscheidungsfindung in Kombination mit anderen Methoden verwendet, um den Unsicherheitsfaktor der anderen Methode zu kompensieren. So gibt es bei der Anwendungen zur Technologieauswahl eine Vielzahl an kombinierter Fuzzy-Methoden wie zum Beispiel Fuzzy-TOPSIS (Awasthi et al., 2011; Chu & Lin, 2003; Sánchez-Lozano et al., 2015) oder Fuzzy-AHP. Auch Hybride Kombinationen anderer Entscheidungsmethoden wie der Verknüpfungen von AHP, TOPSIS, PROMETHEE usw. finden in der Literatur Anwendung (Dağdeviren, 2008; Ishfaq et al., 2018; Karim & Karmaker, 2016; Kharat et al., 2016; D. S. Mitra & Goswami, 2019; Shen et al., 2010). Die Analyse zeigt zudem, dass nicht nur die üblichen MCDM-Methoden verwendet werden, sondern dass es auch eine Vielzahl anderer Methoden gibt. So befinden sich zum Beispiel unter den 955 „Anderen“ Methoden zur Entscheidungsunterstützung von Technologien auch Methoden wie die Nutzwertanalyse, die Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) oder andere Scoring-Modelle und Expertensysteme (Balezentis et al., 2021; Georgakellos, 2005; Sola & Mota, 2012). Die PROMETHEE-Methode und die ELECTRE-Verfahren zählen zu den am häufigsten verwendeten Outranking-Verfahren, wobei die PROMETHEE-Methode mit 538 Publikationen und die ELECTRE-Verfahren mit 427 Publikationen jeweils einen Anteil von etwa 6% an der Gesamtliteratur ausmachen. Letztere Methode wird häufig im Supply Chain Management und der Logistik eingesetzt, um die geeigneten Lieferanten und Transportmethoden zu identifizieren (Fei et al., 2019; Giuliano, 1985; Salvador et al., 2024). Darüber hinaus wird diese Methode auch verwendet, um verschiedene technologische Alternativen zu bewerten und einzustufen (Cristea et al., 2018; Haurant et al., 2011; Ulubeyli & Kazaz, 2009). Ebenso findet sich auch die PROMETHEE Methode in einem breiten Anwendungsgebiet bei der Technologieauswahl wieder. Sie wird sowohl in der Industrie (Ghazinoory et al., 2013; Kolli & Parsaei, 1992) als auch bei der Ermittlung von Transportmittel (Mergias et al., 2007; Oubahman & Duleba, 2021) intensiv genutzt. Die Literatur zeigt zudem, dass

insbesondere der Fertigungsbereich eines der bedeutendsten Anwendungsgebiete dieser Methode darstellt (Behzadian et al., 2010). In den letzten Jahren kommt in der Literatur jedoch nicht nur eine dieser erwähnten Methoden zum Einsatz, sondern es wird eine Kombination unterschiedlichster Methoden angewendet, um ein gutes Ergebnis zu erzielen (Mardani et al., 2015). Dabei können die Methoden wie in ihrer ursprünglichen Form sehr erfolgreich sein, jedoch ist die richtige Kombination ausschlaggebend für ihre Anwendbarkeit.

Nach dieser Voreinschränkung des Definitionsbereiches und Übersicht der Anwendungsbereiche erfolgt eine inhaltliche Detailanalyse der Arbeiten in Bezug auf die vorhandene Problemstellung. Durch eine weitere Spezifikation mittels Suchbegriffe wie: vertikaler Transport, Materialtransport, innerbetrieblicher Transport, Material Handling Equipment (MHE), Material handling equipment selection problem (MHESP) und Auswahl von Materialflusssystemen können Studien evaluiert werden, welche sich spezifisch mit der innerbetrieblichen Transportmittelauswahl beschäftigen. Wie in Tabelle 10 ersichtlich ist, werden in diesen Publikationen abermals unterschiedliche Methoden bei Transportmittelauswahl verwendet.

Quelle, (Jahr)	AHP	PROMETHEE	NWA	TOPSIS	Fuzzy Methode	Experten System	Software Anwendungen	Fragmentiert	Berücksichtigung räumlicher Restriktionen	Berücksichtigung des vertikalen Materialtransportes
Agarwal, (2022)				X	X			X		
Chakraborty & Banik, (2006)	X								X	
Chan et al., (2001)	X					X				
Dağdeviren, (2008)	X	X								
Fischer & Ditttrich, (2013)			X							
Franzius, (1972)			X							
Fritzsche et al., (2020)			X							X (nicht über mehrere Stockwerke)
Gaur, (2020)	X									
Hompel et al., (2018)			X							
Hadi-Vencheh & Mohamadghasemi, (2015)				X	X	X		X		
Jiamruangjarus, (2016)	X							X		
Kutzner et al., (2020)					X		X	X		X (nicht über mehrere Stockwerke)
Maniya & Bhatt, (2011)	X							X		
Mirhosseyni & Webb, (2009)					X	X			X	
Onut et al., (2009)	X			X	X				X	
Sawant & Mohite, (2009)				X	X			X	X	X (nicht über mehrere Stockwerke)
Shariati & Yazdani Chamzini, (2013)	X			X	X					
Soufi et al., (2021)	X						X		X	
Tuzkaya et al., (2010)		X			X					
VDI, (2011)			X							
Zubair et al., (2019)	X									

Tabelle 10: Methoden aus der Literatur zur innerbetrieblichen Transportmittelauswahl (Eigene Darstellung)

Es ist zu erkennen, dass verschiedene Autoren unterschiedliche Methoden und Kombinationen dieser zur Optimierung des Materialflusses und der Transportmittelauswahl anwenden. Wie aus den Ergebnissen der vorhergegangenen Literaturrecherche hervorgeht, bestätigt sich auch bei dieser Spezifikation, dass der

AHP einer der am häufigsten angewandten Methoden zur Transportmittelauswahl ist. So verwenden beispielsweise (Chakraborty & Banik (2006) den analytisch hierarchischen Prozess zur Materialtransportauswahl in einer bestimmten Umschlagsumgebung. Auch Dağdeviren (2008) nimmt den AHP als Grundlage zur Bestimmung der Struktur und Gewichtung der Kriterien des Entscheidungsproblems und kombiniert diesen in der Anwendung zusätzlich mit der PROMETHEE Methode, welche zur Ermittlung der endgültigen Rangfolge dient. Die Publikation von Zubair et al. (2019) ist eine weitere aktuelle Methode bei der das geeignetste Materialtransportsystem zur Optimierung des Materialflusses mittels AHP ausgewählt wird. Der Ausgangspunkt dieser Untersuchung war ein pharmazeutisches Unternehmen, das Transportwagen für den Materialtransport einsetzt, welche jedoch mit mehreren Problemen behaftet sind. Ziel dieser Studie war es eine geeignete Methode zu entwickeln, welche zur Auswahl der geeignetsten Transportmittelart dient. Auch die Nutzwertanalyse wird in der Literatur oftmals als Bewertungsansatz zur individuellen Selektion der Transportmittel verwendet indem diverse gewichtete Kriterien zur Entscheidungsfindung herangezogen werden (Fischer & Dittrich, 2013; Franzius, 1972; Fritzsche et al., 2020; Hompel et al., 2018; VDI, 2011). In viele Auswahlmethoden wird zudem die Fuzzy-Logik in die Entscheidungsfindung integrieren, um einer Unschärfe der Angaben entgegenzuwirken. So gibt es wie in Tabelle 10 ersichtlich unterschiedlichsten Kombinationen wie zum Beispiel die Verwendung einer Fuzzy-TOPSIS Methode (Onut et al., 2009; Sawant & Mohite, 2009) oder auch Fuzzy-AHP oder Fuzzy-PROMETHEE. Auch Hybride Fuzzy Methoden mit anderen Ansätzen wie eines morphologischen Kastens (Kutzner et al., 2020), einer gewichteten Nutzen Analyse (Karande & Chakraborty, 2013) oder Expertensystemen (Mirhosseyni & Webb, 2009) werden in der Literatur des Öfteren verwendet. Im Vergleich dazu zeigen Sawant & Mohite (2009) in Ihrer Forschung auf, wie eine solch spezifische Selektion mit Hilfe von stark individualisierten Anforderungen zur Auswahl eines Fahrerloses Transportfahrzeuges (FTS) mittels der TOPSIS Methode durchgeführt werden kann. Aktuelle Publikationen wie die von Kutzner et al. (2020) oder Soufi et al. (2021) bieten zudem für die erleichterte Planung des innerbetrieblichen Materialflusses geeignete Softwareanwendungen zur Transportmittelauswahl. In diesen Methoden werden die verschiedenen Alternativen auf Basis unterschiedlicher Kriterien mittels einer webbasierten Softwareanwendung bewertet und anschließend automatisch ausgewählt. In der Spalte „Fragmentiert“ aus Tabelle 10 werden alle Methoden angeführt, die sich bei ihrer Auswahl auf einen speziellen Typ von Transportmittel beschränken. Einige Methoden der Literatur wie die Methoden von Agarwal & Bharti (2022), Jiamruangjarus & Naenna (2016), Maniya & Bhatt (2011) oder Verma et al. (2021) wählen zum Beispiel die geeignetste Variante eines Transportmitteltypen wie zum Beispiel von Förderbändern, Flurförderfahrzeuge, Hubwagen usw. aus, welche für den jeweiligen Anwendungsfall am geeignetsten ist. Dabei wird beispielsweise aus den vielen verschiedenen Arten von Hubwagen

evaluiert, dass das geeignetste Fördermittel ein pneumatischer Hubwagen ist. Bei den Ergebnissen handelt es sich dabei immer um ein spezifisches Produkt, jedoch ist nicht klar, ob ein anderes Transportmittel die Aufgabe besser erfüllen hätte können (N. H. Hoppe & Freitag, 2023). Als Grund für diese spezifische Selektion kann die Große Variantenvielfalt herangezogen werden, welche viel Vorwissen zu den unterschiedlichen Transportmittelvarianten und den daraus abgeleiteten Kriterien voraussetzt (N. Hoppe et al., 2022). Wie schon zuvor beschrieben sind bei der Auswahl vertikaler Transportmittel die Berücksichtigung räumliche Restriktionen von entscheidender Bedeutung. Allerdings werden diese nicht in allen Publikationen als Entscheidungskriterien in die vorgestellte Auswahlmethode einbezogen. Aus den in Tabelle 10 angeführten Publikationen werden spezifische Umgebungsrestriktionen lediglich in fünf Arbeiten explizit hervorgehoben. Diese Studien integrieren räumliche Aspekte wie beispielsweise Verkehrsführung, Gangbreite, freie Höhe usw., als Auswahlkriterien in die Transportmittelwahl. Zudem wird die Berücksichtigung des vertikale Materialtransportes in der Entscheidungsfindung ausschließlich in den Arbeiten von Fritzsche et al., (2020); Kutzner et al., (2020) und Sawant & Mohite, (2009) betrachtet. Darin werden zwar Parameter für den vertikalen Transport in die Entscheidungsfindung miteinbezogen, jedoch handelt es sich nur um allgemeine vertikale Hubbewegungen auf unterschiedliche Höhenniveaus innerhalb einer Halle oder die Fähigkeit zur Überwindung von Steigungen. Beispielsweise kann in der Softwareanwendung von Kutzner der vertikale und horizontale Förderweg in Meter als zwei der vorhandenen Auswahlkriterien angegeben werden, jedoch werden danach Ergebnisse wie etwa ein Kran ausgegeben, welcher nicht für einen Materialtransport über mehrere Stockwerke geeignet ist. Der für diese Arbeit zentrale Aspekt des vertikalen Materialtransports über mehrere Stockwerke wird in keiner der Publikationen spezifisch adressiert.

Diese umfassende Untersuchung der bestehenden Ansätze und Methoden im aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik verdeutlicht ein signifikantes Defizit in Bezug auf die Auswahlmethoden von vertikalen Transportmitteln für den stockwerksübergreifenden Materialtransport. Diese Forschungslücke, die im Folgenden näher erläutert wird, verdeutlicht den dringenden Bedarf an der Entwicklung einer spezifischen Methodik für diesen Bereich.

3.3 Forschungslücke

Die durchgeführte Literaturanalyse zeigt auf, dass trotz der umfangreichen Forschung zur Bewertung innerbetrieblicher Transportmittel, eine Methodik fehlt, welche sich speziell auf die Auswahl vertikaler Transportmittel fokussiert. In der bestehenden Fachliteratur liegt, wie schon eingehend erklärt, der Fokus überwiegend auf der Auswahl horizontaler Transportmittel, da diese auf Grund der zentralen Rolle im Materialfluss in vielen Einsatzszenarien verwendet werden. Diese Fokussierung ist

nachvollziehbar, da derzeit der Materialfluss in den Produktionsstätten überwiegend in einer Ebene stattfindet, wodurch es größtenteils nur den Einsatz von horizontalen Transportmitteln erfordert. Auf Grund dessen sind derzeit auch nur wenige Transportmittel im Einsatz, welche eine rein vertikale Hauptförderrichtung haben (Wehking, 2020). Diese Praxis ist jedoch in Anbetracht der steigenden Flächenversiegelung und Umweltanforderungen zunehmend problematisch und fordert Unternehmen dazu auf ihre Raumkapazitäten bei der Fabrikplanung vermehrt in die vertikale Ebene zu erweitern. Dieser Widerspruch zu traditionellen Ansätzen erfordert jedoch spezifische Methoden zur Technologieauswahl, die sich gezielt mit dem Materialtransport über mehrere Stockwerke hinweg auseinandersetzen. Wie aus der aktuellen Literaturrecherche hervorgeht, wird die Notwendigkeit für bestehende Auswahlmethoden vertikaler Transportsysteme jedoch nicht ausreichend adressiert (vgl. Tabelle 10). Es gibt zwar existierende Methoden, die den vertikalen Materialtransport zusätzlich zum Transport in der Ebene betrachtet, jedoch wird dabei speziell der mehrgeschossige Transport nur unzureichend berücksichtigt. Insbesondere der vertikale Materialtransport zur Überwindung von Stockwerken unterscheidet sich jedoch signifikant von horizontalen Transportprozessen. Vertikale Transportmittel bringen dabei spezifische Anforderungen und Kriterien mit sich, die in den bestehenden Auswahlmethoden nicht ausreichend berücksichtigt werden, was wiederum die Notwendigkeit einer neuen Methodik verdeutlicht. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen der vertikalen Materialflüsse besonders durch komplexe räumliche und technische Restriktionen, welche in der Methodik besonders beachtet werden müssen. Eine neue Methode sollte daher nicht nur auf die klassischen Kriterien wie Kosten oder Effizienz aus der Literatur abzielen, sondern auch die besonderen Herausforderungen eines vertikalen Transportes über mehrere Stockwerke adressieren (vgl. Abschnitt 2.2.7) um den Anforderungen, die sich stellen, gerecht zu werden. Angesichts der Vielzahl an Marken und Modellen der Transportmitteltypen sind die in der Literatur verwendeten Methoden oft fragmentiert und beziehen sich daher nur auf spezifische Technologien (vgl. Tabelle 10). Da in dieser Arbeit der Lösungsraum an möglicher Alternativen bereits gezielt auf vertikale Transportmittel zur Sicherstellung des Materialflusses über mehrere Stockwerke eingegrenzt wurde, ist eine detaillierte und spezifische Auswahl des optimalen Transportmittels aus den unterschiedlichen Transportmitteltypen möglich (vgl. Abschnitt 2.1.4 Innerbetriebliche vertikale Transportmittel).

Diese Erkenntnisse unterstreichen die Notwendigkeit, eine praxisnahe Methode zu entwickeln, welche die besonderen Anforderungen und Herausforderungen des vertikalen Materialtransportes über mehrere Stockwerke in die Auswahl geeigneter Transportmittel miteinbezieht.

4 Entwicklung der Auswahlmethode

Kapitel 4 behandelt die Entwicklung der Auswahlmethodik und stellt somit den zentralen Bestandteil der Arbeit dar. Hierbei handelt es sich um die dritte Phase des DSRM-Prozesses: „Design und Entwicklung“ (vgl. Abbildung 1). Aufbauend auf den in Kapitel 2.3 beschriebenen Methoden zur Technologieauswahl sowie der in Kapitel 1 dargelegten Problemstellung, wird in diesem Kapitel eine geeignete Auswahlmethodik zur Deckung des identifizierten Forschungsbedarfs entwickelt (vgl. Kapitel 3.3). Dafür werden zunächst in Abschnitt 4.1 die spezifischen Anforderungen an die Methodik definiert, die anschließend im Vergleich der unterschiedlichen Auswahlmethoden in Abschnitt 4.2 zu berücksichtigen sind. In Abschnitt 0 werden Standardkennwerte ausgewählter vertikaler Transporttechnologien identifiziert, welche in weiterer Folge zum Vergleich unterschiedlichen Alternativen bei der Anwendung der Methode herangezogen werden können. Die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Kriterien zur Technologieauswahl bieten einen Überblick der verbindlichen Anforderungen sowie ergänzende Entscheidungskriterien. In Abschnitt 4.5 Gesamtbild der Methode wird die Gesamtheit der entwickelten Methode vorgestellt, woraufhin in Abschnitt 4.6 eine detaillierte Anleitung der Vorgehensweise bei der praktischen Anwendung folgt.

4.1 Anforderungen an die Methode

Auf Grund der Ausarbeitung des aktuellen Standes der Wissenschaft und Technik in Kapitel 3 sowie des daraus abgeleiteten Forschungsbedarfs werden nun unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen aus Kapitel 2 und der zu Beginn dargelegten Motivation, spezifische Anforderungen an die Auswahlmethode definiert. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zielt darauf ab, die Auswahl eines vertikalen Transportmittels für den innerbetrieblichen Einsatz durchzuführen und somit die Materialflussplanung über mehrere Stockwerke zu vereinfachen. Sie soll dabei bereits im frühen Planungsprozess als Leitfaden zur Entscheidungsfindung dienen. Das Ziel besteht darin, eine Rangfolge der geeigneten Alternativen zu bilden und somit eine Auswahl des besten vertikalen Transportmittels für den vorliegenden Anwendungsfall zu ermöglichen. Damit dies erreicht werden kann muss die Methode in der Lage sein, die unterschiedlichen Alternativen nach ihrem technischen Nutzen und ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten und die daraus resultierenden Ergebnisse übersichtlich darzustellen. Die Methodik sollte dabei so gestaltet sein, dass eine universelle Anwendbarkeit für diverse Szenarien gewährleistet wird, um unabhängig von den unterschiedlichen unternehmensspezifischen Einflussfaktoren (z.B.: Gewicht, Materialbeschaffenheit, Größe usw.) eine adäquate Transportmittelauswahl zu ermöglichen. Durch Inklusion praxistauglicher Werkzeuge der Fabrikplanung soll zudem sichergestellt werden, dass eine einfache und strukturierte Herangehensweise zur Berücksichtigung diverser Gegebenheiten bei der Technologieauswahl ermöglicht

wird. Darüber hinaus gilt es, in der Literatur übliche Kriterien der Transportmittelauswahl zusammenzufassen und bereitzustellen, um somit den Entscheidungsträgern Hilfestellung bei der Kriterienauswahl zu leisten. Insbesondere die in der Literatur diskutierten Herausforderungen aus den Bereichen Fabrikplanung zeigen, dass eine solche Methode in der Lage sein sollte, sowohl qualitative und quantitative Informationen zu bewerten. Dabei ist entscheidend, dass alle für die Fabrikplanung wichtigen betrieblichen Anforderungen und Restriktionen sowie gesetzliche Vorgaben miteinbezogen werden. Insbesondere die in Kapitel 2.2.7 identifizierten Herausforderungen bei der Planung und Integration vertikaler Transporttechnologien sind basierend auf dem jeweiligen Anwendungsfall individuell zu erfassen und umfassend zu beurteilen. Da in der Realität gerade zu Beginn der Planung die vorhandenen Daten oftmals vage und unvollständig sind, sollte die Methode einen gewissen Handlungsspielraum bei der Verarbeitung der Informationen vorweisen. Um eine solche Anpassungsfähigkeit gewährleisten zu können, muss die Methode flexibel gegenüber unterschiedlicher Unternehmenssituationen und Eingangsdaten sein. Die Durchführung und Entscheidungsfindung der Methode muss möglichst nachvollziehbar und transparent gestaltet werden, wobei es eine langwierige Einarbeitung in ein Programm zu vermeiden gilt. Um eine leichte Handhabung sicherzustellen soll, im Vergleich zu anderen komplexeren Methoden, die Anwendung mittels einfacher Hilfsmittel wie z.B.: einem Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen. Um eine systematische Abwicklung der Methode zu ermöglichen und den Auswahlprozess zu erleichtern, wird eine strukturierte und sukzessive Vorgehensweise gefordert. Anhand einer klaren Eingabe soll eine nachvollziehbare Informationsgewinnung gewährleistet werden. Durch die strukturierte Vorgehensweise und Dokumentation der einzelnen Ergebnisse soll es zudem ermöglicht werden, dass die Entscheidungsfindung auch im Nachhinein reproduzierbar ist. Damit eine möglichst effiziente Auswahl in einem akzeptablen Zeitaufwand durchgeführt werden kann, sollte eine Filterung der Alternativen vorab durchgeführt werden, welche alle für diesen Anwendungsfall nicht realisierbaren Technologien eliminiert. Schließlich sollen die Ergebnisse durch eine graphische Veranschaulichung übersichtlich für alle Interessensgruppen aufbereitet und kommuniziert werden. Die Anforderungen an die Methode werden nachfolgend noch einmal zusammengefasst:

1. Universelle Anwendbarkeit in diversen Szenarien
2. Hohe Anpassungsfähigkeit bei betrieblichen Anforderungen und Vorgaben
3. Berücksichtigung qualitative und quantitative Informationen
4. Möglichkeit der Anwendung auch bei unsicheren Daten
5. Möglichst geringer Aufwand
6. Kein großer Implementierungs- und Schulungsbedarf
7. Hohe Transparenz und Nachvollziehbarkeit
8. Leitfaden zur Vereinfachung des Planungsprozesses
9. Klare Struktur der Eingabe und übersichtliche Ergebnisdarstellung

4.2 Vergleich der Methoden

Trotz der Vielzahl an Auswahlmethoden und deren Kombinationen, gibt es keine Methodik, die am besten für alle Entscheidungssituationen geeignet ist (Guitouni & Martel, 1998). Zum Vergleich der unterschiedlichen Technologiebewertungsverfahren, wird eine Beurteilung anhand mehrerer für die Problemstellung relevanter Kriterien durchgeführt. Dabei werden die Stärken und Schwächen der aus der Literatur entnommenen Methoden (Kapitel 2.3) in Bezug auf die ausgewählten Kriterien analysiert. Die in diesem Schritt angewendeten Beurteilungskriterien basieren auf den in 4.1 angeführten Anforderungen an die Methode. Diese und weitere Kriterien finden sich auch in der Literatur wieder. So verwenden zum Beispiel Gershon & Duckstein (1983) in Ihrer Arbeit qualitative Merkmale, wie die Benutzerfreundlichkeit, Bearbeitungszeit usw., zur Bewertung unterschiedlicher Entscheidungsmethoden. Zusätzlich werden weitere Merkmale von vielen Autoren zum Vergleich herangezogen darunter: die Handhabung von Unsicherheiten, die Verwendung von quantitativen und qualitativen Daten, der Aufwand usw. (Belton & Stewart, 2012; Benoit & Rousseaux, 2003; Chakraborty, 2011; Cinelli et al., 2013, 2014; Steck, 1997; Velasquez & Hester, 2013). Die für diese Arbeit verwendeten zehn Auswahlkriterien werden in Tabelle 11 angeführt und dienen der schematischen Bewertung der einzelnen Methoden. Wenn die aufgeführte Methode in Bezug auf das betrachtete Kriterium geeignet ist, wird sie mit einem „+“ bewertet. Ist dies nicht der Fall, so erhält die Methode ein „-“ und ist dadurch ungeeignet. Bei einer Bewertung mit „o“, weist die Methode keine signifikanten Vor- oder Nachteile bezüglich dieses Kriteriums auf und ist somit als neutral zu betrachten.

Das erste Kriterium links in Tabelle 11 bezieht sich dabei auf die Ressourcen, die benötigt werden, um die jeweilige Methode anzuwenden. Vor allem wird darauf geachtet, ob die Methode von einer großen Menge an Informationen abhängt und viele Hilfestellungen zur Durchführung benötigt werden. Das Kriterium Vorkenntnisse bezieht sich auf das Vorwissen und die Erfahrung, die benötigt wird, um die Technologieauswahl mit der jeweiligen Methode durchzuführen. Einige Methoden erfordern mehr Vorwissen zur Durchführung, weshalb es für diese Arbeit besonders wichtig ist, dass die Methode leicht zu handhaben und zu verstehen ist, damit alle interessierten Parteien sie problemlos übernehmen können. Wie zuvor erwähnt soll zur Anwendung kein spezialisiertes Personal benötigt oder eine Schulung durchgeführt werden müssen. Die Nachvollziehbarkeit und Transparenz beziehen sich darauf, wie verständlich die Methode durchgeführt wird und ob die Ergebnisse klar ersichtlich sowie reproduzierbar sind. Bei der Gruppenentscheidung geht es darum, ob die Methode mit mehreren Beteiligten und durch das Einbeziehen von Experten angewendet werden kann. Das darauffolgende Kriterium gibt an, wie gut die Methode mit unvollständigen, vagen oder unsicheren Informationen umgehen kann. Im Zuge dessen bezieht sich die Flexibilität auf die Anpassungsfähigkeit an verschiedene

Anforderungen und Bedürfnisse, was die Robustheit der Bewertung erhöht. Zu beachten gilt, dass bei der Transportmittelauswahl sowohl monetäre als auch nicht monetäre Gesichtspunkte bei der Entscheidungsfindung betrachtet werden. Auf Grund dessen wird mit den folgenden beiden Kriterien die Eignung der Methode für quantitative Kriterien, sprich die Verarbeitung von numerischen und messbaren Daten, bzw. von qualitativen Kriterien überprüft. Letztere beziehen sich auf die Fähigkeit der Methode zur Bewertung von subjektiven und schwer messbaren Daten. Bei der Skalierbarkeit wird bewertet, wie effektiv die Methode bei unterschiedlich großen Datensätzen funktioniert, ohne dass darunter die Leistung oder Genauigkeit leidet. Das letzte Kriterium bewertet die Einfachheit und Verständlichkeit bei der Anwendung aus Sicht der Entscheidungsträger. Diese zehn Kriterien werden nun in der nachfolgenden Tabelle bewertet, um die unterschiedenen Technologiebewertungsmethoden miteinander zu vergleichen und anschließend die geeignetste für die vorhandene Problemstellung auszuwählen.

Methoden zur Technologiebewertung und - auswahl		Aufwand	Vorkenntnisse	Nachvollziehbarkeit / Transparenz	Gruppenentscheidungen	Handhabung unsichere Eingangsdaten	Flexibles Vorgehen	Eignung für quantitative Kriterien	Eignung für qualitative Kriterien	Skalierbarkeit	Anwenderfreundlichkeit
Legende											
Bewertung	Symbol										
geeignet	+										
einigermaßen geeignet	o										
ungeeignet	-										
Morphologischer Kasten		o	+	+	+	-	o	o	+	-	o
Nutzwertanalyse		o	+	+	+	o	+	+	+	o	+
Analytic Hierarchy Process (AHP)		-	o	o	+	o	o	+	+	+	o
PROMETHEE		-	-	o	+	o	o	+	+	o	o
TOPSIS		o	-	o	o	o	o	+	o	+	o
ELECTREE		-	-	-	+	+	o	+	+	+	-
Entscheidungsbaum		-	o	+	o	o	-	+	o	o	+
Finanzielle Ansätze (NPV, IRR, usw.)		o	-	o	-	o	o	+	-	+	o
Risikoanalyse		-	-	o	+	o	-	+	o	+	o
Argumentenbilanz		+	o	-	+	-	+	o	+	o	+
Delphi-Expertenbefragung		-	+	-	+	+	+	o	+	-	o
Checkliste		+	+	o	o	-	o	+	o	-	+
Fuzzy-Logik		-	o	-	o	+	+	+	o	+	-

Tabelle 11: Vergleich der in der Literatur verwendeten Methoden zur Technologiebewertung und -auswahl (Eigene Darstellung)

Wie aus Tabelle 11 ersichtlich ist, sind schnelle und einfache Methoden wie die Argumentenbilanz oder die Checkliste mit einem geringeren Aufwand verbunden, da sie nur wenige Ressourcen erfordern und eine geringe Vorbereitungszeit benötigen. Dies macht sie somit zu den günstigsten Methoden in der Durchführung, jedoch eignen sie sich nicht für Entscheidungen, die auf einer Vielzahl unterschiedlicher und komplexer Kriterien basieren, wie es bei der Auswahl vertikaler Transportmittel der Fall ist. Auch andere anwenderfreundliche Methoden wie der morphologische Kasten oder der Entscheidungsbaum sind als alleinstehende Methode für solch komplexe Auswahlverfahren nicht geeignet, da sie bei zu großer Anzahl an Kriterien und Alternativen zu aufwändig und unübersichtlich werden. Finanzielle Methoden können zwar bei der monetären Bewertung einzelner Alternativen hilfreich sein, allerdings dienen diese nur als Hilfestellung bei der endgültigen Technologieauswahl, da sie keine qualitativen Daten in die Bewertung miteinfließen lassen können. Diverse Outrankingverfahren finden in der Literatur zwar sehr häufig bei der Technologieauswahl Anwendung (vgl. Kapitel 3), dennoch sind sie auf Grund der hohen Komplexität nur von Personen mit Vorwissen, durch Schulungen oder von Experten anwendbar und somit für die Problemstellung dieser Arbeit nicht optimal. Zusätzlich bedarf es bei der Durchführung dieser Methode einen hohen Aufwand, wodurch es schließlich auch an Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse mangelt. Um den Entscheidungsprozess bei unscharfen qualitativen Kriterien und linguistischen Themen in ein quantitatives Maß umzuwandeln wird bei der Entscheidungsfindung oftmals die Fuzzy-Logik als Hilfsmittel verwendet (LIANG & WANG, 1991). Sie wird jedoch, wie zuvor beschrieben, meist in Kombination mit anderen Methoden verwendet, um Unsicherheiten bei der Datenerfassung zu berücksichtigen und die Konsistenz beim Vergleich von verschiedenen Transportmitteln zu bewahren. Aus dem Vergleich in Tabelle 11 geht weiter hervor, dass vor allem die Nutzwertanalyse und der AHP besonders gut als Methode für die Technologieauswahl geeignet sind, da sie sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien umfassend bewerten. Trotz dieser großer Anzahl unterschiedlicher Kriterien ermöglicht die NWA anhand strukturierter Vorgehensweise eine direkte Vergleichbarkeit der Alternativen (Kühnapfel, 2019). Auf Grund der geringeren Komplexität der Nutzwertanalyse gegenüber des AHPs ist auch der Aufwand geringer, was sie zu einer anwenderfreundlichen und relativ einfachen durchzuführenden Methode macht. Durch die hohe Transparenz bei der Vorgehensweise der Nutzwertanalyse wird zudem das Verständnis der Entscheidungsergebnisse erleichtert. Insbesondere bei komplexen Entscheidungen und unsicheren Eingangsdaten ist jedoch der AHP durch seine Robustheit und hohe Präzision der Ergebnisse besser geeignet. Dies macht diese Methode hingegen deutlich aufwändiger als die Nutzwertanalyse und kann unter Umständen auch spezielles Fachwissen bei der Durchführung voraussetzen. Ein weiterer Vorteil der Nutzwertanalyse ist die Flexibilität gegenüber unterschiedlichen Situationen und

Kriterien. Insbesondere bei komplexen Entscheidungen und unsicheren Eingangsdaten ist jedoch der AHP durch seine Robustheit und hohe Präzision der Ergebnisse besser geeignet.

Basierend auf dieser Auswertung erweist sich die Nutzwertanalyse als eine der am besten geeigneten Methoden zur Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel. Angesichts der Vielzahl an Anforderungen und Restriktionen bei der Planung von Materialflüssen über mehrere Stockwerke kann die Auswahl durch individuelle Kriterien gezielt an die jeweiligen Einsatzszenarien angepasst werden. Diese Beurteilungskriterien werden durch eine Gewichtung ergänzt, welche stets bei jedem konkreten Anwendungsfall neu bestimmt werden muss. Dadurch können wichtigere Kriterien priorisiert und weniger wichtige Merkmale geringer berücksichtigt werden, um alle relevanten Präferenzen ausreichend abzudecken. Durch eine iterative Vorgehensweise bei der Bestimmung der Kriterien und ihrer Gewichtung, kann die Auswahl in mehreren Schleifen überprüft und angepasst werden. Zusätzlich kann die Nutzwertanalyse durch eine Einbindung von Expertenmeinungen weiter verfeinert werden. Ein weiterer ausschlaggebender Aspekt ist die Flexibilität der Nutzwertanalyse. Dies ermöglicht eine stetige Anpassung des Entscheidungsprozesses an neue Technologien und sich verändernde Rahmenbedingungen. Ein wesentliches Merkmal dieser Auswahlmethode ist die hohe Anwendungsfreundlichkeit und Transparenz, welche durch die systematische Vorgehensweise des Auswahlprozesses und der nachvollziehbaren Entscheidungsfindung gewährleistet wird. Durch ihre klare Struktur und Einfachheit bei der Anwendung kann sie daher als anfängliche Entscheidungshilfe von diversen Stakeholdern in der Materialflussplanung angewendet werden. Um den für die Entscheidungsfindung wichtigen monetären Aspekt angemessen zu berücksichtigen, wird zusätzlich eine Kostenvergleichsrechnung in die Vorgehensweise mit einbezogen (vgl. Abschnitt 4.5). Auf diese Weise ermöglicht die Methode eine umfassende Bewertung, welche sowohl den technischen Nutzen als auch ökonomische Faktoren berücksichtigt und somit eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Materialflussplanung bietet.

4.3 Kriterien zur Transportmittelauswahl

Zu Beginn der Transportmittelauswahl ist die Auswahl und Definition der spezifischen Vergleichskriterien erforderlich (Pfeifer, 2013). Ziel ist es, mit Hilfe dieser Anforderungskriterien die Alternative mit dem höchsten Erfüllungsgrad für den jeweiligen Anwendungsfall auszuwählen (Martin, 2016). In diesem Abschnitt wird daher zuerst ein Überblick über die in der Literatur häufig vorkommenden Kriterien zur Transportmittelauswahl angeführt. Anschließend wird basierend auf diesen Ergebnissen ein eigener Kriterienkatalog erstellt, welcher dann in der entwickelten Methode zur Identifikation möglicher Alternativen (vgl. Kapitel 4.6.3) und als

Hilfestellung bei der Auswahl von Entscheidungskriterien in Schritt 4: Bewertungsvorbereitung dienen soll.

Es gibt eine Vielzahl von Kriterien, die die systematische Auswahl von Transportmitteln beeinflussen. Für die Auswahl der geeigneten Transportmittel verwenden die Autoren in der Literatur meist Kriterien, die auf Beurteilungen, früheren Erfahrungen oder Grundsätzen des Materialflusssystems beruhen (Gaur & Ronge, 2020). Diese sollten laut Hompel et al. (2018) möglichst unabhängig voneinander sein und alle Anforderungen an die Planungsvarianten abdecken. In zahlreichen Ansätzen der Literatur werden die Entscheidungskriterien in übergeordnete Gruppen unterteilt, die wiederum aus mehreren Subkriterien bestehen können. Nachfolgend wird in Tabelle 12 der Blick auf einige in der Literatur vorhandene Methoden zur Transportmittelauswahl und die darin verwendeten Kriterien geworfen.

Autor, (Datum)	Verwendete Kriterien
Braglia et al., (2001)	Investitions- und Betriebskosten, Kosten für logistische Unterstützung, Einkaufsvorteile, Betriebsvorteile, strategische Flexibilität, Leistungen
Chakraborty und Banik, (2006)	Material, Bewegung, Bereich und deren Subkriterien
Chan et al., (2001)	Material, Bewegung, Vorgang, Bereich, Umgebungsrestriktionen und deren Subkriterien
Ghazinoory et al., (2013)	Investitionskosten, Betriebskosten
Hadi-Vencheh und Mohamadghasemi, (2015)	Technisch, finanziell, operativ, strategisch
Karande & Chakraborty, (2013)	Variable- und Fixkosten pro Stunde, Förderbandgeschwindigkeit, Abmessungen des Transportguts, Flexibilität
Kulak, (2005)	Material, Bewegung, Vorgang, Umgebungsrestriktionen
Maniya und Bhatt, (2011)	Kontrollierbarkeit, Genauigkeit, Kosten, Distanz, Zuverlässigkeit, Flexibilität
Mirhosseini & Webb, (2009)	Material, Bewegung, Vorgang, Bereich, Umgebungsrestriktionen und deren Subkriterien
Momani und Ahmed, (2011)	Material, Bewegung, Vorgang und Bereich und deren Subkriterien
Onut et al., (2009)	Material, Bewegung, Vorgang, Kosten, Umgebungsrestriktionen
Park, (1996)	Material, Bewegung, Vorgang und Bereich
Sawant & Mohite, (2009)	Länge, Breite, Höhe, maximale Tragfähigkeit, maximale Fahrgeschwindigkeit, Batteriekapazität, maximale Hubhöhe, Hubgeschwindigkeit, Positionsgenauigkeit
Tuzkaya et al., (2010)	operationelle Aspekte, ökonomische Faktoren, Umwelteinflüsse, strategische Faktoren

Tabelle 12: Verwendete Auswahlkriterien in der Literatur (Eigene Darstellung)

In der Arbeit von Chakraborty & Banik (2006) und Park (1996) werden die Auswahlkriterien in die Gruppen: Material, Bewegung, Vorgang und Bereich eingeteilt. Diese Hauptgruppen spalten sich wiederum in weitere Kriterien auf, wobei jedem Kriterium zwei bis fünf Werte zugeordnet werden können. Auch Chan et al. (2001), Kulak (2005) und Mirhosseyni & Webb (2009) verwenden ebenfalls dieselben übergeordneten Gruppen und erweitern diese um die Kategorie „Umgebungsrestriktionen“, welche Kriterien wie: lichte Höhe, freie Bodenfläche, Querverkehr, Hindernisse usw. mitberücksichtigt. In der Arbeit von Onut et al., (2009) kommt zudem der Aspekt der Kosten dazu, welcher die finanzielle Bewertung miteinbezieht. Dieses klassische Kriterium der Transportmittelauswahl findet auch in den Publikationen von (Braglia et al. (2001), Hadi-Vencheh & Mohamadghasemi (2015) und Maniya & Bhatt (2011) Anwendung. In der Methode von Ghazinoory et al. (2013) erfolgt die Auswahl zur Gänze auf den Kriterien Investitions- und Betriebskosten und lässt somit andere Faktoren außen vor. Eine andere mögliche Herangehensweise bei der Gruppierung der Kriterien ist die von Tuzkaya et al. (2010). Hierbei werden die unterschiedlichen Kriterien in vier Hauptgruppen zusammengefasst und die Entscheidung anschließend anhand der Bewertung dieser Gruppen getroffen. Die erste Hauptgruppe dieser Arbeit sind die operationellen Aspekte wie z.B.: Einfachheit, Zuverlässigkeit, Adaptierbarkeit. Die zweite Gruppe stellen die ökonomischen Faktoren wie Investitions-, Betriebs-, Installationskosten usw. dar. Als nächstes werden hierbei die Umweltfaktoren, wie Stromverbrauch, Wiederverwendbarkeit als Rohstoff usw. berücksichtigt. In der letzten Gruppe werden die strategischen Überlegungen der Transportmittelwahl miteinbezogen als zusätzliches Kriterium berücksichtigt. Als Indikatoren dieser Kategorie kann die Flexibilität in Bezug auf zukünftige Pläne, Produktivität, Qualität usw. genannt werden. In der Arbeit von Sawant & Mohite (2009) kommen eine Vielzahl an unterschiedlichen Kriterien vor, die sich nach den Herstellerangaben von FTS richten und eine Einschränkung der vielen verschiedenen FTS ermöglichen soll. Während sich in den älteren Ansätzen die Kriterien besonders auf die Beschreibung des Transportprozesses und die Spezifikation des Transportmittels fokussieren, werden in neueren Ansätzen auch Merkmale der Transporteinheit mitberücksichtigt (Kutzner et al., 2019). Dabei werden für den Transport wichtige Indikatoren wie geometrische-, physikalische-, chemische- sowie spezifische Eigenschaften beachtet (Martin, 2016).

Der in dieser Arbeit zugrundeliegende Kriterienkatalog orientiert sich an der Kriterienliste von Pahl & Beitz (2018) sowie an der Studie von Soufi et al. (2021), welche 278 Kriterien aus 17 analysierten Publikationen (einschließlich einiger der zuvor beschriebenen Publikationen) und fünf durchgeführten industriellen Feldstudien identifiziert. Anhand der im Vorfeld aus der Literatur recherchierten Kriterien, soll der Kriterienkatalog dem Anwender als Hilfestellung bei der Auswahl möglicher Entscheidungskriterien dienen. Zudem soll er als Leitfaden anregen, um selbst individuell auf den jeweiligen Anforderungen abgestimmte Zielerfassungskriterien

identifizieren zu können. Zur Förderung der Übersichtlichkeit wird der Kriterienkatalog in zwei Abschnitte aufgeteilt: „KO-Kriterien“ und „Zusätzliche Kriterien“. Wie in Abschnitt 4.3.1 dargestellt, werden zunächst Rahmenbedingungen angeführt, die basierend auf den Erkenntnissen der Theoretische Grundlagen zwingend abgefragt werden müssen, um überhaupt eine Auswahl von Transportmittel durchführen zu können. Zusätzlich werden zu diesen Rahmenbedingungen weitere Kriterien ergänzt, die sich wie in Abschnitt 2.2.7 beschrieben aus den spezifischen Herausforderungen des vertikalen Transportes ergeben. Im zweiten Abschnitt des Kriterienkataloges (Abschnitt 4.3.2) wird den Entscheidungsträgern ein Überblick mit zusätzlichen relevanten Kriterien aus der Fachliteratur der Transportmittelauswahl gegeben, welche je nach Ausgangssituation, zur Entscheidungsfindung herangezogen werden können. Zur erleichterten Handhabung und Nachvollziehbarkeit werden beiden Abschnitte des Kriterienkatalogs in folgende Teilbereiche eingeteilt: Allgemeinen Anforderungen, Transportgut, Transportprozess und Transportmittel.

4.3.1 KO-Kriterien

Der in Tabelle 13 angeführte Kriterienkatalog bietet eine strukturierte Übersicht aller verbindlichen Anforderungen, die es schon früh im Planungsprozess zu klären gilt. Diese Ausschlusskriterien oder auch als sogenannte „KO-Kriterien“ bezeichnet, sind essenziell für die Auswahl geeigneter vertikaler Transportmittel und müssen somit zwingend erfüllt werden. Einerseits umfassen sie fundamentale Aspekte der Transportaufgabe (wie z.B.: Art der Güter, Abmaße, Gewicht usw.), die als Basis für eine funktionale Transportmittelauswahl dienen und daher stets abgefragt werden müssen. Andererseits werden ergänzend dazu aus den in Abschnitt 2.2.7 identifizierten Herausforderungen weitere spezifische KO-Kriterien abgeleitet, die bei der Auswahl vertikaler Transportmittel zwingend zu berücksichtigen sind. Um diese Ausschlusskriterien systematisch in die Entscheidungsfindung einzubeziehen, müssen sie bereits zu Beginn der Auswahlverfahrens geprüft werden.

	KO-Kriterien	Kommentar
Transportgut	Art der Güter	Fest (Stückgut oder Schüttgut), Fluid, Gas
	Abmaße	Länge x Breite x Höhe
	Gewicht	Einfluss auf die erforderliche Tragfähigkeit des Transportmittels
	Art des Transporthilfsmittels	z.B.: Palette, Box, Karton...
	Besondere Eigenschaften	heiß, kalt, trocken, schmutzig, klebrig, adhäsiv, magnetisch, korrosionsfähig, elektrisch leitend, Lebensmittel usw.

	Gefahrgut	Erfordert spezielle Sicherheitsvorkehrungen, Kennzeichnung und Genehmigungen (z.B.: explosiv, entflammbar, giftig, ätzend usw.)
Allgemeine Anforderungen	Gesetzliche Bestimmungen Einschränkungen der Platzverhältnisse & Berücksichtigung bestehender Infrastrukturen Strukturelle Anforderungen Zugänglichkeit Stabilität und Fundamentstärke Boden und Decke	Einhaltung von Arbeitsschutzgesetzen, Brandschutzverordnungen, Umweltauflagen, Vorschriften für max. Geschwindigkeiten, Lärm, Staubentwicklung, CO-Gehalt, Unfall-Verhütungs-Vorschriften usw. z.B.: Treppen, Schächte, Maschinen, Regale, Türen, Tore, Wege usw. Bauliche Anpassungen zur Integration des Transportmittels (z.B.: strukturelle Verstärkungen, Durchbrüche usw.) Zugänglichkeit zur Bedienung, für Wartungs- und Reparaturarbeiten, Kennzeichnungen Prüfung der Tragfähigkeit insbesondere bei schweren Lasten und Bestandsgebäuden
Transportprozess	Anzahl der zu überwindende Stockwerke Stockwerkshöhe Transportfrequenz Regelmäßigkeit des Transportes Unregelmäßigkeit bei der Lastverteilung Besondere Umgebungsbedingungen Bereitstellung & Entnahme der Transporteinheit Schnittstelle zwischen Produktionsprozessen Umkehrbare Förderrichtung Gleichzeitiger Transport in beide Richtungen	Besonders beim Materialtransport über viele Stockwerke ein Ausschlusskriterium Bestimmt zusammen mit der Anzahl an Stockwerken die maximale benötigte Hubhöhe des Transportmittels Anzahl an Transporte pro Tag bzw. Stunde; beeinflusst den Automatisierungsgrad (manuell oder vollautomatisch) z.B.: kontinuierlich, gelegentlich, stoßweise, saisonbedingt Wird eine Handhabung von Lastschwankungen, unterschiedlicher Schwerpunktslagen oder variierendem Gewicht benötigt Temperatur, Staub, Feuchtigkeit, Vibration, Chemikalien, Lebensmittelproduktion etc. Übergabestellen zu Transportmitteln, Anbaugeräten, Kommissionieren, Lagersysteme etc. Notwendigkeit zur Einhaltung der Synchronisation von Taktzeiten und Materialfluss; Betrachtung des Gesamtkonzeptes Notwendigkeit einer Hub- und Senkbewegung Notwendigkeit einer parallelen Beförderung von Produkten nach oben und unten
Transportmittel	Nutzlast (Tragfähigkeit) Anbindung an bestehende Fördermittel Betriebssicherheit	Max. Tragfähigkeit des Transportmittels Kompatibilität mit bestehenden Fördersystemen Einsatz von Sicherheitsmaßnahmen wie z.B.: Lastsicherung, Not-Aus-Schalter, Lichtschranken zum Schutz für Menschen, Maschine, Produkte, usw.

Notbetrieb	Ausstattung mit Notfallsysteme wie Sicherheitsbremsen, Überlastschutz, redundante Steuerungssysteme usw.
Einfachheit der Wartung	Einfache Durchführung von Instandhaltungstätigkeiten, leichte Austauschbarkeit von Ersatzteilen

Tabelle 13: KO-Kriterien zur Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel (Eigene Darstellung)

4.3.2 Zusätzliche Kriterien

Um einen Überblick über zusätzliche Entscheidungskriterien bei der Transportmittelauswahl zu verschaffen, werden sämtliche in der Literatur identifizierten Kriterien in den Tabelle 14 Tabelle 16 zusammengefasst. Die Tabellen werden abermals in die zuvor definierten Kategorien aufgeteilt, um eine strukturierte Zuordnung der Kriterien zu ermöglichen. Angesichts der großen Anzahl an zusätzlichen Kriterien werden zudem übergeordnete Beschreibungen definiert, um die Handhabung des Kriterienkataloges zu erleichtern.

Beginnend mit Tabelle 14 wird eine kurze Übersicht über die allgemeinen Anforderungen in Bezug auf das Gebäude und allgemeine Auflagen, welche es bei der Transportmittelauswahl zu beachten gibt. Sie dient als Grundlage für Kriterien der baulichen Gestaltung und enthält gesetzliche sowie strategische Anforderungen, welche Auswirkungen auf den Entscheidungsprozess haben können.

Übergeordnete Beschreibung	Allgemeine Anforderungen	Kommentar
Gebäude	Bauliche Anpassung	Notwendigkeit von baulichen Anpassungen Verstärkungen, Fundamentanpassungen, Deckenöffnungen usw.
	Medientechnik	Versorgung mit Strom, Gas, Wasser, Druckluft, Hydrauliköl usw.
	allg. Gebäudeanforderungen	Zustand, Nutzen usw.
	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen	Berücksichtigung zukünftiger Fabrikserweiterung
	Tragfähigkeit Gebäude	Belastungsgrenze von: Boden, Decke, Dach oder Stützen
	Integration in bestehende Produktionsstruktur	Einfluss auf die bestehenden Produktionsabläufe und Materialflüsse
Allgemeine Auflagen	Auswirkungen auf Fabrikdesign und Layout	Ästhetik, Farbgebung, Integration in das Fabrikskonzept usw.
	Tarifverträge	Berücksichtigung tariflicher Vorgaben wie z.B.: Personalbedarf
	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit	Umweltverträglichkeit, Recyclingfähigkeit usw.

Tabelle 14: Kriterienliste bezüglich allgemeiner Anforderungen (Eigene Darstellung)

Tabelle 15 dient als Nachschlagewerk zur Berücksichtigung von Kriterien bezüglich des Transportprozesses. Dazu zählen Faktoren, die bei der Abwicklung des Transportes eine Rolle spielen und auch technische Anforderungen, die den Transportprozess maßgeblich beeinflussen können.

Übergeordnete Beschreibung	Transportprozess	Kommentar
Abwicklung des Transportes	Stabilität	Fähigkeit zur Sicherung gegen umkippen oder verrutschen
	Vertikal und horizontaler Transport	Muss eine Kombination aus vertikaler und horizontaler Bewegung ausgeführt werden
	Stapelfähigkeit	Eignung zur Stapelung der Transport ohne Beschädigung des Transportgutes
	Transportweg	feste Richtung, variable Richtung oder Kurvenbahn
	Fähigkeit mehrere Produktströme abzuwickeln	Gleichzeitige Beförderung mehrerer Transportaufgaben
	Anforderungen an den Transportweg	Kurvenanzahl und -radien, Neigungswinkel...
	Handhabungsstufen	Anzahl an Zwischenstationen oder Umsetzungsvorgängen
	Anfahren mehrere Quellen und Senken	Notwendigkeit einer flexiblen Steuerung zur Verteilung der Güter an mehrere Zielorte
	Losgröße	Manufaktur, Kleinserie, Serienfertigung, Massenproduktion
	Zeit	Durchlaufzeit, Taktzeit usw.
Technische Anforderungen	Transportverhalten	Stabilität, Stöße, Vibrationen...
	Zugänglichkeit	Zugänglich für Wartungs- oder Reparaturarbeiten
	Integration in bestehende Systeme	Fähigkeit zur Integration in bestehende Systeme; Hängt eng mit dem Automatisierungsgrad zusammen; z.B.: Schnittstellen zu ERP-Systemen
	Synchronisation	Abstimmung mit dem Materialfluss in anderen Stockwerken
	Positionierung	Erforderliche Ausrichtung für weiteren Produktionsschritt

Tabelle 15: Kriterien bezüglich des Transportprozess (Eigene Darstellung)

In Tabelle 16 werden ausschließlich Kriterien, welche das Transportmittel betreffen, angeführt. Besonders technische Spezifikationen wie der Platzbedarf, Art des Antriebs usw. sind dabei Grundgrößen, welche zusätzlich zur Ermittlung eines vertikalen Transportmittels herangezogen werden können. Des Weiteren können Betriebs-,

Umweltbedingungen, sowie die Fähigkeit zur Automatisierung und Integration der Transportmittel aussagekräftige Kriterien sein, welche bei der Eingrenzung und Auswahl hilfreich sein können. Auch Aspekte bezüglich des Lieferanten können unter Umständen als Entscheidungskriterium verwendet werden.

Übergeordnete Beschreibung	Transportmittel	Kommentar
Technische Spezifikationen	Platzbedarf/Flächenbedarf	Bauliche Beschränkungen, benötigte Stellfläche
	Art des Antriebes	Schwerkraft, Handantrieb, Elektro, Verbrennungsmotor, Hybrid, Pneumatik, Hydraulik usw.
	Art der Energiezufuhr	Netzanschluss, Batterie, Schleppkabel, Druckluft usw.
	Spur- Schienenbindung	Notwendigkeit einer Fahrspur, Führungsschiene o.ä.
	Fähigkeit zur Höhenüberwindung	Max. Steigung die Transportiert werden kann
	Maximalgeschwindigkeit	Maximalgeschwindigkeit des Transportmittels
	Flexibilität bei unterschiedlicher Förderreihenfolge	Anpassung an variierenden Transportbedarf
	Flexibilität Förderleistung/-frequenz	Transportfähigkeit unterschiedlicher Förderkapazität (Einheiten/h oder Einheiten/d)
	Flexibilität Ladungsträger	Kompatibilität unterschiedlicher Ladungsträger
	Flexibilität Layoutänderung	Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen an Standorten (Quelle, Senke, Lage)
	Flexibilität des Standortes	Fähigkeit die Position des Transportmittels zu verändern
	Erweiterbarkeit	Erweiterbar zu neuen Produktionsprozessen oder Stockwerken
	Fassungsvermögen / Kapazität	Wieviel maximal transportiert werden kann
Betriebsbedingungen	Manövrierfähigkeit	Für manche Transporthilfsmittel darf es nicht zu sperrig sein (enge Transporträume)
	Inbetriebnahme	Aufwand für Montage und Installation
	Instandhaltung	Wartungsaufwand, Ersatzteilversorgung, Haltbarkeit, Reparaturfreundlichkeit
	Transportkapazität	Menge an Gütern die gleichzeitig transportiert werden können
	Ergonomie	Lärm, Vibrationen, Beleuchtung, Kraftaufwand usw.
	Mensch-Maschine Beziehung	Wie gut lässt sich das Transportmittel von Menschen Bedienen (Intuitive Bedienbarkeit, Schulungsaufwand etc.)
	Genauigkeit	Präzision beim Be- und Entladen der Güter; wichtig bei hoher Automatisierung

	Anwendungsfreundlichkeit	Bedienkomfort, Übersichtlichkeit, Kennzeichnungen, Haptik usw.
	Personalbedarf	Aufwand der Mitarbeiter für Betrieb, Wartung, Störungsbehebung usw.
Umwelt und Energie	Energieverbrauch	Stromverbrauch in kWh
	Energierückgewinnung	Rückumwandlung mechanischer Energie in elektrische Energie (Rekuperation) zur Energieeinsparung
	Sauberkeit	Transportmittel soll keine Verschmutzungen verursachen z.B.: Fett- oder Ölaustritt, Staubentwicklung; Besonders wichtig, wenn hohe Hygieneanforderungen gefordert sind
	Umweltverträglichkeit	Emissionswerte
Automatisierung und Integration	Automatisierungsgrad	Grad der eigenständigen Abwicklung von Transportaufgaben (manuell bis vollautomatisch)
	Stau und Pufferfähigkeit	Möglichkeit zur Zwischenspeicher zur Überbrückung von Wartezeiten im Materialfluss
	Aufwand bei Verzweigungen	Zusätzlicher Aufwand zur Steuerung und Anpassung bei Verzweigungen
	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	Fähigkeit zur Integration bestehender Transporttechnologien wie z.B.: Förderbänder, Roboter, FTS usw.
	Hindernisbildung	Beeinträchtigung durch Platzbedarf für andere Transportmittel oder Personen; Bildung von Engstellen
Lieferanten	Ersatzteil Verfügbarkeit	Verfügbarkeit von Ersatzteilen, Lieferzeit und Lagerbedarf für kritischen Komponenten
	Standort des Lieferanten	Serviceverfügbarkeit, Lieferzeit, Logistikaufwand
	Ruf des Lieferanten	Erfahrungen zu: Qualität, Service, Zuverlässigkeit, Kundenzufriedenheit, Support

Tabelle 16: Kriterien bezüglich des Transportmittels (Eigene Darstellung)

In Hinblick auf die Bewertung der einzelnen vertikalen Transportmittel, kann dieser vorliegende Kriterienkatalog als grundlegendes Werkzeug herangezogen werden, um individuelle Entscheidungsmerkmale für den jeweiligen Anwendungsfall identifizieren zu können. Dieser Katalog dient lediglich als Orientierungshilfe, um eine fundierte Entscheidungsfindung zu unterstützen. Im Rahmen der Methode erfolgt basierend auf diesen Informationen eine Einteilung in erforderliche Anforderungen und weniger bedeutende Kriterien, die für die jeweilige Ausgangssituation von Relevanz sind. Zusätzlich können qualitative und quantitative Auswahlkriterien individuell nach Präferenz der Entscheidungsträger angepasst und ergänzt werden, um die variablen Gegebenheiten und Zielsetzungen der Unternehmen angemessen berücksichtigen zu können.

4.4 Standardkennwerte vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel

Die Transportmittelauswahl gestaltet sich angesichts der Vielzahl an Marken und Modellen als besonders komplex, da viel Vorwissen zu den unterschiedlichen Alternativen vorausgesetzt wird (N. Hoppe et al., 2022). Zudem variieren die technischen Kennwerte innerhalb eines Transportmitteltyps auf Grund ihrer Variantenvielfalt und den unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten, was die Vergleichbarkeit der einzelnen Alternativen zusätzlich erschwert, wodurch in vielen Methoden der Literatur oftmals eine fragmentierte Transportmittelauswahl durchgeführt wird (vgl. Kapitel 3.2). Wie in den Anforderungen an die Auswahlmethode in Abschnitt 4.1 festgelegt wurde, muss zur Durchführung der Methode eine Einschränkung der möglichen Alternativen durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt Standardkennwerte ermittelt, die als Grundlage für eine gezielte Vorselektion dienen. Bei diesen Kennwerten handelt es sich um essenzielle KO-Kriterien, welche zu Beginn der Methode ermittelt werden müssen, da sie grundlegende Anforderungen der vorherrschenden Situation darstellen. Um die entwickelten Auswahlmethodik anhand realer Kennwerte durchführen zu können, werden ergänzend zu den Werten aus der Fachliteratur (vgl. Abschnitt 2.1.4) weitere Informationen anhand von Herstellerangaben, Webseiten und Datenblättern erhoben. Da jedoch nicht alle relevanten Angaben von Herstellern transparent und frei zugänglich bereitgestellt werden, erfolgte eine gezielte Kontaktaufnahme zu diversen Anbietern, um weitere spezifische Informationen zu den technischen Kennwerten zu erhalten. Besonders herausfordernd gestaltete sich dabei die Beschaffung von belastbaren Daten zur Investitionssumme und des Instandhaltungsfaktors, da Unternehmen diese Informationen ohne konkreten Projektauftrag nur ungerne offenlegen. Falls für ein bestimmtes Transportmittel keine belastbaren Daten verfügbar waren, wurden zusätzliche Schätzungen von Herstellern und fachlichen Experten herangezogen.

Zur Vereinfachung der Identifikation potenzieller Alternativen wird folgend eine Kategorisierung der Standardkennwerte vorgenommen. Diese Klassifizierung erfolgt anhand des Gewichtes der Transporteinheit und unterteilt die gesammelten Angaben in zwei identische Kategorien mit unterschiedlichen Ausprägungen der Kennwerte. Wie im Anhang (vgl. Tabelle 42) ersichtlich ist, erfolgt die Aufteilung der Kennwerte in schwere ($> 200\text{kg}$) und leichte Transporteinheiten ($\leq 200\text{kg}$). Es gilt zu beachten, dass es sich bei den für diese Tabellen herangezogen Kennwerten um Daten von spezifischem Transportmittel von bestimmten Herstellern handelt. Diese angegebenen Richtwerte dienen als Orientierung, in welchem Bereich die angeführten Transportmittel üblicherweise befinden und können je nach Hersteller, Transportmitteltyp, Variante, Baujahr usw. variieren.

4.5 Gesamtbild der Methode

Anhand der spezifischen Problemstellung und der identifizierten Forschungslücke werden in diesem Abschnitt die Grundzüge der Methode zur Auswahl innerbetrieblicher vertikaler Transportmittel vorgestellt. Auf Basis der in Abschnitt 4.2 gewählten Auswahlmethodik gliedert sich die Vorgehensweise in mehrere unterschiedliche Schritte (vgl. Abschnitt 4.6). Dies ermöglicht eine transparente und kontrollierte Entscheidungsfindung, in der markante Ergebnisse zu bestimmten Zeitpunkten des Ablaufs in den nachfolgenden Schritt übernommen werden.

Die systematische Anwendung der Nutzwertanalyse in dieser Methode dient hierbei als fundierte Entscheidungsgrundlage, indem sie eine Vielzahl von Bewertungskriterien der Transportmittelauswahl berücksichtigt. Insbesondere in Fällen, in denen deren Bedeutung bzw. Gewichtung nicht immer klar hierarchisch eingeordnet werden können, bietet sich dadurch diese Methode als hilfreiches Werkzeug zur Auswahl vertikaler Transportmittel an (Kühnapfel, 2021). In der Literatur gibt es häufig unterschiedliche Bezeichnungen für die einzelnen Prozessschritte der Nutzwertanalyse, jedoch sind die Hintergründe der Berechnung des Gesamtnutzwertes meist gleich. In Abbildung 10 wird der für diese Arbeit adaptierte Ablauf der NWA schematische dargestellt, welcher nachfolgend genauer beschrieben wird.

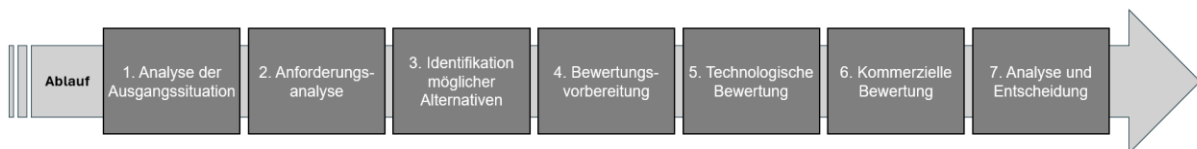


Abbildung 10: Ablauf der Methode (Eigene Darstellung)

Unabhängig davon, ob es sich um eine vollständige Neuplanung des gesamten Materialflusses, einer vertikalen Produktionserweiterung oder um eine Eingliederung in Bestandsgebäude handelt, ist zu Beginn in Schritt 1 eine gründliche Analyse der Ausgangssituation unerlässlich. Das Ziel dieser Vorplanung ist es, die Gegebenheiten zu erfassen und im Zuge dessen, verlässliche Planungs- und Dimensionierungsdaten zu generieren, welche ausschlaggebend für die weitere Ermittlung der vertikalen Transportmittel sind (Martin, 2016). Die Identifikation, Verarbeitung und Festlegung relevanter Anforderungen spielen dabei eine Schlüsselrolle, da die spezifischen Prioritäten je nach Anwendungsfall in der Regel sehr stark variieren können. Insbesondere unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.2.7 definierten Herausforderungen bei der Planung vertikaler Transportmittel ist vorab eine genaue Einschätzung der verbindlichen Anforderungen vorzunehmen. Als wesentlicher Teil des ersten Schrittes wird zur strukturierten Erhebung dieser Anforderungen ein Fragenkatalog entwickelt, welcher die in Abschnitt 4.3.1 definierten KO-Kriterien

erfassen soll. Angesichts der Komplexität, die mit der Planung eines vertikalen Materialflusssystems einhergeht, ist die Identifikation bestimmter Restriktionen und Definition von Anforderungen ein entscheidender Punkt.

In Schritt 2 wird eine hierarchisch strukturierte Anforderungsliste erstellt, in der unbedingte Unternehmensforderungen und ergänzende Wünsche angeführt werden, woraus sich im weiteren Verlauf die Bewertungskriterien für die Nutzwertanalyse ableiten lassen. Umfassende interdisziplinäre Kenntnisse helfen dabei, die richtigen Parameter zu identifizieren, um eine wirtschaftliche und technisch optimierte Lösung für die vorliegende Transportaufgabe zu entwickeln. Erleichtert wird dabei die Ausarbeitung der Anforderungen durch die in Abschnitt 4.3.2 zusätzlich angeführten Kriterien.

In Schritt 3 der entwickelten Auswahlmethode, wird basierend auf der zuvor identifizierten Liste an Anforderungen eine Vorauswahl der in Frage kommenden Transportmittel getroffen. Diese Vorselektion dient dazu, bestimmte Alternativen aus dem weiteren Auswahlprozess auszuschließen, um die Komplexität und den Arbeitsaufwand für den weiteren Verlauf der detaillierten Bewertung zu reduzieren.

Anschließend erfolgt in Schritt 4 die Bewertungsvorbereitung mit der präzisen Definition der Entscheidungskriterien, welche für die anschließende NWA verwendet werden. Diese werden basierend auf der vorliegenden Ausgangssituation und den Anforderungen sorgfältig reflektiert und konkretisiert. Als weiterer Teil der Bewertungsvorbereitung erfolgt eine Zuweisung von Gewichtungsfaktoren zu den einzelnen Kriterien, um die Relevanz der unterschiedlichen Entscheidungskriterien zu verdeutlichen. Dieser Schritt dient dazu, die relative Bedeutung der einzelnen Kriterien zu quantifizieren, um eine differenzierte Bewertung der Alternativen zu ermöglichen.

Zu Beginn von Schritt 5 werden die einzelnen Entscheidungskriterien in sogenannte Zielwerte transformiert. Hierzu wird durch die auszuführende Person eine Bewertung der Zielerreichung aller Auswahlkriterien durchgeführt. Diese Zielwerte werden zusammen mit den Gewichtungen der jeweiligen Kriterien in eine Nutzwertmatrix eingetragen, in der die anschließende Berechnung der Teilnutzwerte stattfindet. Die technologische Bewertung der einzelnen Alternativen erfolgt durch das Aufsummieren dieser Teilnutzwerte, wodurch sich der Gesamtnutzwert des jeweiligen Transportmittels errechnet.

Einige in der Literatur vorhandenen Methoden, wie beispielsweise jene von Franzius, (1972) und Hompel et al., (2018), empfehlen, dass wirtschaftliche Faktoren als qualitative Kriterien definiert und direkt in die Entscheidungsfindung der NWA integriert werden. Zur Erzielung präziserer Ergebnisse, wird jedoch in der VDI- Richtlinie 2710 die Kombination der Nutzwertanalyse mit einem zusätzlichen Investitionsrechnungsverfahren vorgeschlagen (VDI, 2011). Um daher bereits schon

früh im Planungsprozess eine fundierte Einschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Transportmittels treffen zu können, wird in Schritt 6 dieser Arbeit das Verfahren der Kostenvergleichsrechnung zur kommerziellen Bewertung verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.1). Im Rahmen dieser Bewertung werden, ohne den Erlös berücksichtigen zu müssen, die jährlichen Fix- und variablen Kosten berechnet, um eine Reihung der Alternativen zu ermöglichen.

In Schritt 7 werden die Transportmittelalternativen basierend auf der Rangordnung der Nutzwertanalyse und der kommerziellen Bewertung miteinander verglichen. Dabei sind niedrige Kosten und ein hoher Gesamtnutzwert ausschlaggebend für die Entscheidungsfindung. Eine zusätzliche grafische Darstellung der Bewertungsergebnisse ermöglicht es, die jeweiligen Stärken und Schwächen der Alternativen anschaulich darzustellen, um eine differenzierte Analyse der Ergebnisse vornehmen zu können. Durch die visuelle Aufbereitung wird die Nachvollziehbarkeit Entscheidungsfindung weiter erleichtert.

Eine detaillierte Schilderung der Vorgehensweise zur Anwendung der Methodik wird im folgenden Kapitel 4.6 dargestellt.

4.6 Vorgehensweise

Zur Durchführung der einzelnen Handlungsschritte der Methode wird in diesem Abschnitt noch einmal genauer auf die in Abbildung 10 definierten Arbeitspakete eingegangen. Diese strukturierte Abarbeitung soll den Entscheidungsträgern eine standardisierte Vorgehensweise ermöglichen, welche Schritt für Schritt systematisch abgearbeitet werden kann. Das Verfahren der Nutzwertanalyse hat im Zuge dessen keine allgemeine Gültigkeit und muss folglich für jeden Anwendungsfall, nach diesem Muster, neu durchgeführt und nachvollzogen werden. In der folgenden Abbildung 11 wird die Methode detailliert aufgeschlüsselt, um einen Überblick zu geben, welche Input- und Outputparameter für den jeweiligen Schritt erforderlich sind.

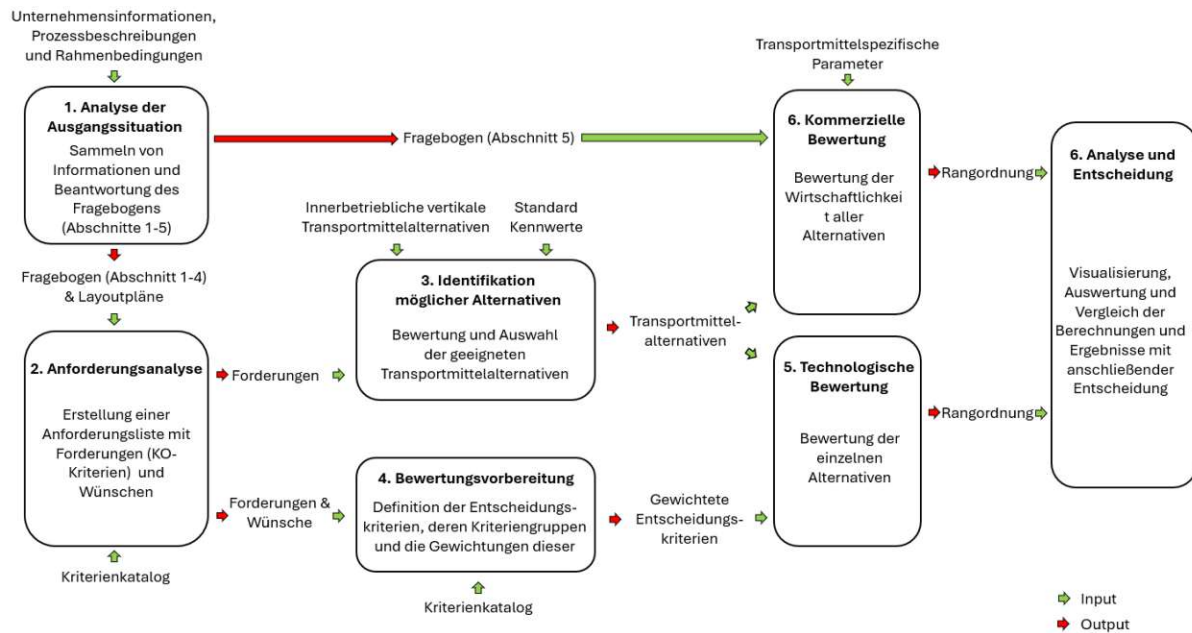


Abbildung 11: Vorgehensweise mit Input- und Outputparametern (Eigene Darstellung)

Damit eine spätere Reproduzierbarkeit der Bewertungen und Analyse ermöglicht wird, ist eine deutlich erkennbare Struktur von großer Bedeutung (Kühnapfel, 2021). Aus diesem Grund wird für die Durchführung der Methode ein Excel-Tool entwickelt, welches aus mehreren Tabellenblättern besteht und die Vorgehensweise vereinfachen und transparenter machen soll. Die strukturierte Anordnung der Tabellenblätter dient der schrittweisen Durchführung der in Abbildung 11 aufgezeigten Vorgehensweise. Bei Anwendung der Methode müssen die unternehmensspezifischen Eingabedaten in ihre vorgesehenen orange markierten Zellen der zugehörigen Arbeitsmappen eingegeben werden. Diese Einträge werden automatisch mit allen relevanten Tabellenblätter verknüpft, sodass eine konsistente Datenverarbeitung der Input- und Outputparameter gewährleistet wird. Der Auswahlprozess eines geeigneten vertikalen Transportmittels wird dabei immer in den nachfolgend beschriebenen Schritten durchlaufen.

4.6.1 Schritt 1: Analyse der Ausgangssituation

Wie schon zu Beginn in Kapitel 2.2 erwähnt, führen unterschiedliche Gründe zur Initiierung einer vertikalen Materialflussplanung. Im ersten Schritt dieser Methode gilt es daher die Planungsgrundlagen adäquat festzulegen. Durch die unterschiedlichen Alleinstellungsmerkmale und Ausgangssituationen jedes Unternehmens, ist eine klare und konkrete Formulierung von Zielen zu Beginn notwendig. Zunächst ist es daher essenziell, alle situationsgerechten Ziele, Restriktionen und Rahmenbedingungen anhand von Unternehmensinformationen abzuklären. Diese Betrachtung ermöglicht es den vorhandenen Zustand im Zuge einer sogenannten IST-Analyse genauer zu betrachten, um sicherzustellen, dass alle infrastrukturellen und organisatorischen

Gegebenheiten für eine konkrete Materialflussplanung vorhanden sind. Dabei soll spezifische auf den zu planenden physischen Materialfluss eingegangen werden. Parallel dazu, gilt es jedoch auch alle unmittelbar betroffenen Schnittstellen und Interaktionsstellen des Materialflussbereiches zu analysieren. Je nach vorgegebenen Anfangszustand kann es zu Einschränkung der Planung kommen, da beispielsweise räumliche, technische, strukturelle oder gesetzliche Randbedingungen beachtet werden müssen (Gudehus, 2010). Um diese Bedingungen vorab berücksichtigen zu können, gilt es die in Kapitel 4.3.1 definierten KO-Kriterien abzufragen. Damit eine effiziente Sammlung dieser unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen in Bezug auf die Ausgangssituation gewährleistet werden kann, dient der in Tabelle 17 ausgearbeitete standardisierte Fragebogen als Leitfaden zur Informationsgewinn. Anhand der Beantwortung definierter Schlüsselfragen werden sowohl quantitative als auch qualitative verbindliche Anforderungen durch die verantwortliche Person des Unternehmens erhoben. Die Fragen sind so gestaltet, dass sie entweder manuell als Kommentar, mit „Ja“ / „Nein“ oder durch eine direkte Auswahl unterschiedlicher vorgegebener Ausprägung beantwortet werden müssen. Die Beantwortung erfolgt dabei immer durch das Setzen eines „X“ in den entsprechenden Feldern. Zusätzlich zu den vorgeschlagenen Ausprägungen gibt es die Möglichkeit, weitere Spezifikationen mittels eines Kommentares zu nennen. Der Fragebogen orientiert sich in seinem Aufbau an der Struktur des in Kapitel 4.3.2 ausgearbeiteten Kriterienkatalogs und wird mit Fragen zur Informationsgewinnung in Bezug auf die kommerzielle Bewertung erweitert. Die Abschnitte sind daher entsprechend der Kategorien des Kriterienkataloges folgendermaßen gegliedert: Transportgut, die allgemeinen Anforderungen, den Transportprozess und des Transportmittels sowie Kriterien zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit (vgl. Abschnitt 4.6.6) abgefragt.

Zu Beginn des Fragebogens (vgl. Tabelle 17) werden in den Frage 1.1 bis 1.7 alle Informationen bezüglich der zu transportierenden Güter ermittelt. Dabei werden Fragen beantwortet, welche sich mit den Spezifikationen des Transportgutes auseinandersetzen. Je nach Produktart können sich die unterschiedlichen Eigenschaften bezüglich: Abmaße, Gewichtsangaben usw. auf die Transportmittelauswahl auswirken. Zudem sind in diesem Abschnitt weitere repräsentative Merkmale, die den Transport beeinflussen könnten zu präzisieren. Beispielsweise werden bestimmte Merkmale und Eigenschaften des Transportgutes (z.B.: magnetisch, schmutzig, nass etc.) abgefragt, sowie eine Gefahrgutklassifizierung vorgenommen.

Damit eine standardisierte Vorgehensweise vorliegt, müssen diese Fragen für alle durchzuführender Transportaufgaben berücksichtigt werden. Dies setzt eine vollständige Identifikation aller Informationen voraus, wobei für alle Transportaufgaben die relevanten Daten wie z.B.: Abmaße, das Gewicht, die Transportfrequenz usw. erfasst werden müssen. Beim Ausfüllen des Fragebogens sind jedoch ausschließlich

die maximalen Werte des jeweiligen Kriteriums anzugeben, da diese die ausschlaggebenden Parameter sind, welche das Transportmittel zu erfüllen hat. Werden beispielsweise Transporteinheiten mit 50 kg, 100 kg und 300 kg transportiert, so muss das Transportmittel mindestens einer Nutzlast von 300 kg standhalten, wodurch nur der Wert von 300 kg als Transportgewicht im Fragebogen aufzunehmen ist. Die Genauigkeit dieser Eingangsdaten hat eine große Auswirkung auf den weiteren Entscheidungsprozess, weshalb dieser Schritt besonders sorgfältig erfolgen muss.

Abschnitt 2 des Fragebogens befasst sich mit allgemeinen Anforderungen zur Überprüfung des Werkslayouts sowie weiteren gesetzlichen Bestimmungen. Dabei werden infrastrukturelle Gegebenheiten in Hinblick auf den bestehenden oder geplanten Materialflusses erfasst. Insbesondere müssen Einschränkungen durch bestehende Infrastruktur wie z.B.: Treppen, Aufzüge, Regale usw. genauestens überprüft werden, um die Integration eines vertikalen Transportmittels einplanen zu können. Es empfiehlt sich eine Layoutzeichnung oder einen Anordnungsplan in Bezug auf die relevanten Tätigkeitsbereiche anzufordern, um eine detaillierte Erfassung aller infrastrukturellen Restriktionen und der Materialwege sowie deren logistische Schnittstellen zu ermöglichen. Da vertikale Transportmittel hohe Anforderungen an die Fundamente stellen, muss ermittelt werden, ob statische Hindernisse wie die Tragfähigkeit der Böden und Belastbarkeit der Wände oder Decken zu beachten oder in weiterer Folge bauliche Anpassungen erforderlich sind. Darüber hinaus gilt es zu klären, ob weitere spezifische Restriktionen der Betriebsumgebung wie etwa Schächte, Versorgungsleitungen, Schienen vorhanden sind und somit potenzielle Hindernisse für die Materialflussplanung darstellen könnten. Um den positiven Nutzen der vorhandenen Infrastruktur nicht zu vernachlässigen, sollte auch geprüft werden, ob es eventuell bestehende Strukturen gibt, die sich für die Installation des Transportmittels eignen und mitverwendet werden können. Beispielsweise können Säulen, Träger oder andere Bauelemente verwendet werden, um die Montage und Integration eines neuen Transportmittels zu erleichtern. In Frage 2.3 wird zudem auf besondere Umgebungsbedingungen darunter: Temperatur, Staub, Feuchtigkeit, Vibration, Chemikalien, Lebensmittelproduktion usw. eingegangen, welche entscheidende Auswirkungen auf die Transportmittelauswahl haben können und somit schon zu Beginn der Entscheidungsfindung erhoben werden müssen.

Eine weitere entscheidende Rolle, welche sich auf die Belastung des Transportmittels auswirkt, ist die Häufigkeit der auftretenden Transportaufgaben. Daher wird in den Fragen 3.1 und 3.2 erfasst, ob es sich um einen kontinuierlichen (fortlaufenden) oder einen gelegentlichen Transportbedarf handelt, bei dem Transporte nur in längeren zeitlichen Abständen erforderlich sind. Zudem wird die Möglichkeit eines unregelmäßigen Materialflusses berücksichtigt, bei dem es zu einem stoßweisen Transport handelt. Auch saisonale Schwankungen im Materialfluss können in diesem Zusammenhang angeführt werden. Abermals muss dies für alle Transportaufgaben

durchgeführt und nur die maximalen Ausprägungen in den Fragebogen eingetragen werden. Ebenso sollen mittels der Fragen 3.3 bis 3.7 die Höhenprofile und generelle Anforderungen an den vertikalen Transportprozess geklärt werden. Die Fragen 3.8 bis 3.12 beziehen sich auf die Integration in bestehende Produktionsprozesse sowie die Anbindung an bestehende Transportsysteme, wobei die Bereitstellung und Entnahme der Transporteinheit explizit abgefragt werden. Handelt es sich bei dem Förderprozess um eine Schnittstelle zwischen zwei Produktionsprozessen, so muss das Gesamtkonzept genauestens betrachtet werden. Wie schon in Abschnitt 2.2.7 vermerkt, gelten die Übergabepunkte zwischen Abteilungen oder Prozessschritten als besonders kritische Stellen, da diese bei potenziellen Störungen oder ineffizienten Abläufen den gesamten Materialfluss beeinflussen können. Insbesondere in Bezug auf den Materialfluss sind daher definierte Quellen- und Senken Beziehungen zu untersuchen.

Die Fragen aus Abschnitt 4 des Fragebogens beziehen sich auf Anforderungen an das Transportmittel, wobei konkret nur die Anforderung an eine hohe Zuverlässigkeit angefragt wird. Dabei sind Kennwerte wie die Ausfallrate und durchschnittliche Lebensdauer, Verfügbarkeit, Störanfälligkeit usw. ausschlaggebend.

In Abschnitt 5 des Fragebogens werden vorab schon alle unternehmensspezifischen Parameter erfragt, welche für den Schritt 6: Kommerzielle Bewertung der Transportmittelalternativen, benötigt werden (vgl. Abschnitt 4.6.6). Hierbei handelt es sich um Kennwerte des Logistikpersonals wie z.B.: Arbeitstage pro Jahr, Arbeitsstunden pro Tag, Jahresgehalt. Zudem werden Aspekte bei Fremdfinanzierung der Transportmittel angefragt, welche in der kommerziellen Bewertung mitberücksichtigt werden müssen.

Fragebogen zur Analyse der Ausgangssituation					
Nr.	Fragen	Antwort		Ausprägung und Kommentar	
		Ja	Nein		
1. Transportgut				<i>zutreffende Ausprägung mit einem "X" markieren</i>	
1.1	Um welche Art von Transportgut handelt es sich?			☐ Stückgut	☐ Gas
				☐ Schüttgut	☐ _____
				☐ Flüssigkeit	☐ _____
1.2	Welche Transporthilfsmittel werden für den Transport verwendet?			☐ Europaletten	☐ Kleinladungsträger (KLT)
				☐ Gitterbox	☐ Gefäße
				☐ Werkzeugträger	☐ Tablare
				☐ Rohstoffe	☐ Säcke
				☐ Trays	☐ Gepäck
				☐ Behälter	☐ stapelbares Palettengestell
				☐ Kartonage	☐ _____

1.3	Welche maximale Abmaße hat das Transportgut mit dem Transporthilfsmittel (Angabe von: Länge x Breite x Höhe in [mm])?				
1.4	Welches Transportgewicht muss pro Einheit befördert werden? (Gewicht in [kg])				
1.5	Gibt es Unregelmäßigkeiten in der Lastverteilung? (z.B.: bei Fluiden die sich bewegen, dezentraler Schwerpunkt usw.)				
1.6	Gibt es besondere Eigenschaften der zu transportierenden Güter? Wenn ja, welche?			☐ heiß ☐ kalt ☐ sperrig ☐ zerbrechlich ☐ nass ☐ trocken ☐ klebrig	☐ neigt zum Kippen / Rutschen ☐ schmutzig ☐ stoßempfindlich ☐ Lebensmittel ☐ magnetisch ☐ korrosionsanfällig
1.7	Ist das Transportgut als gefährlich einzustufen? Wenn Ja, warum?			☐ entflammbar ☐ explosiv ☐ giftig	☐ ätzend
2. Allgemeine Anforderungen					
2.1	Müssen spezielle gesetzliche Bestimmungen oder Vorschriften berücksichtigt werden?				
2.2	Gibt es Einschränkungen in den Platzverhältnissen oder durch spezielle bauliche Vorgaben, die Installation eines vertikalen Transportmittels beeinflussen könnten?			☐ Maschinen ☐ Regale ☐ Tore ☐ Versorgungsleitungen ☐ Traglast Boden ☐ lichte Höhe	☐ Schienen ☐ Schächte ☐ Säule ☐ tragende Wände
2.3	Herrschen besondere betriebliche Umgebungsbedingungen, welche Einfluss auf das Transportmittel haben? Wenn ja, welche?			☐ Vibration ☐ Chemikalien ☐ normale Luftfeuchtigkeit ☐ erhöhte Luftfeuchtigkeit ☐ klimatisierte Räume ☐ erhöhte Temperatur (> 30° Celsius) ☐ niedrige Temperatur (< 5° Celsius) ☐ Hygieneanforderung	☐ Dampf ☐ Verunreinigungen ☐ Staub ☐ Späne oder andere feine Partikel ☐ magnetische oder elektrische Felder ☐ Öle, Fette
3. Transportprozess					

3.1	Wie hoch ist die tägliche Transportfrequenz [Einheiten pro Tag]?				
3.2	Tritt die Transportaufgabe regelmäßig auf?			gelegentlich stoßweise	saisonal _____
3.3	Über wie viele Stockwerke muss die Einheit transportiert werden können?				
3.4	Wie hoch sind die Stockwerke, die durch das Transportmittel bedient werden sollen (in [m])?				
3.5	Ist das Transportmittel die einzige Möglichkeit, das Transportgut zwischen den Geschossen zu befördern?				
3.6	Muss ein Transport in beide Richtungen gleichzeitig möglich sein?				
3.7	Muss die Förderrichtung umgekehrt werden können?				
3.8	Dient der vertikale Transportprozess als Schnittstelle zwischen zwei unterschiedlichen Produktionsprozessen?				
3.9	Werden während des Transportes mehrere Quellen (Beladestellen) und Senken (Abgabestellen) bedient?				
3.10	Wie erfolgt die Bereitstellung des Transportgutes am Ausgangspunkt?			von Hand Stapler Kran Hubwagen	Roboter Rollenbahn Bandförderer _____
3.11	Wie erfolgt die Entnahme bzw. Weiterbeförderung nach dem stockwerksübergreifenden Transport?			von Hand Stapler Kran Hubwagen	Roboter Rollenbahn Bandförderer _____
3.12	Muss das neue Transportmittel an bestehende Förder- oder Transportsysteme angebunden werden?				
4. Transportmittel					
4.1	Muss eine hohe Zuverlässigkeit gewährleistet werden?				
5. Wirtschaftlichkeit					
5.1	An wie vielen Tagen im Jahr wird in der Produktion gearbeitet? [d/a]				
5.2	Wie viele Arbeitsstunden pro Tag werden gearbeitet? [h/d]				

5.3	Was für ein Zinssatz wird für die Fremdfinanzierung verlangt? [%]			
5.4	Wie hoch ist der Fremdfinanzierungsanteil bei der Investition? [%]			
5.5	Wie hoch ist das durchschnittlichen brutto Jahresgehalt des Logistikmitarbeiters? [€]			
5.6	Wie hoch ist der aktuelle Strompreis in [€/kWh]?			

Tabelle 17: Fragebogen zur Analyse der Ausgangssituation (Eigene Darstellung)

Das Gesamtergebnis des Schritt 1 beinhaltet eine detaillierte Darstellung des aktuellen Zustands, in dem die erforderlichen Anforderungen und KO-Kriterien mittels des Fragebogens erfasst und dokumentiert werden. Diese strukturierte Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass die Ausgangssituation klar aufgenommen werden kann und in weiterer Folge als spezifische Anforderungen definiert (vgl. 4.6.2) und damit Transportmittelalternativen vorab eingegrenzt (vgl. 4.6.3) werden können. Die Informationen des Fragebogens werden dabei direkt als Forderungen in die Anforderungsanalyse in Schritt 2 übernommen. Es ist besonders wichtig, dass dieser Schritt detailliert und strukturiert durchgeführt wird, da er die Basis für die weitere Methode bildet. Gegebenenfalls muss der Fragebogen auch mehrmals durchlaufen und von mehreren Personen beantwortet werden, um ein klares Bild der Ausgangssituation zu schaffen. Zusätzlich zu den vorgefertigten Vorlagen sollten Beschreibungen und andere Darstellungen des Transportprozesses dem Fragebogen beigefügt werden, um die Ausgangslage für Dritte nachvollziehbarer zu machen.

4.6.2 Schritt 2: Anforderungsanalyse

Nach der in Schritt 1 vorgenommene Analyse und Eingrenzung der allgemeinen Ausgangssituation sind weitere Informationserhebungen notwendig, welche die Anforderungen an das Transportmittel noch genauer konkretisieren. Als Basis dafür dient eine Anforderungsliste, in der alle Forderungen (F) und auch Wünsche (W) vermerkt werden. Diese Forderungen stellen sogenannte verbindliche „KO-Kriterien“ dar, welche als unverzichtbare Mindest- bzw. Höchstbedingungen definiert werden und unter allen Umständen erfüllt werden müssen. Im Gegensatz dazu werden Wünsche als zusätzliche unverbindliche Anforderungen betrachtet (Pahl & Beitz, 2018). Diese „Soll-Kriterien“ können je nach Möglichkeit ergänzend berücksichtigt werden. Die zusammenfassende Darstellung aller Forderungen und Wünsche in einer Anforderungsliste dient zur besseren Nachverfolgbarkeit und Transparenz der entwickelten Methode. Um eine standardisierte Vorgehensweise zu gewährleisten,

wird nachfolgend der allgemeingültige Aufbau der Anforderungsliste schematisch anhand eines Beispiels in Tabelle 19 dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, teilt sich die Anforderungsliste in zwei Abschnitte. Der erste Abschnitt (Nr. 1 bis 23) beinhaltet alle Informationen aus dem Fragenkatalog. Für die Einträge in Abschnitt 2 können zusätzliche Anforderungen aus dem Kriterienkatalog (vgl. 4.3.2) ausgewählt werden. Es können zudem spezifische Ausprägungen der einzelnen Punkte definiert werden, welche in weiterer Folge entscheidend für die Identifikation möglicher Transportmittelalternativen sind. Um einen vollumfänglichen Überblick der Anforderungen zu bekommen und eine universelle Anwendbarkeit zu gewährleisten, müssen sowohl quantitative (z.B.: Mengen) als auch qualitative (z.B.: Materialeigenschaften) Informationen vermerkt werden (Pahl & Beitz, 2018). Alle definierten Forderungen aus beiden Tabellenabschnitten, sind KO-Kriterien, welche das Transportmittel unbedingt erfüllen muss und werden somit direkt zur Einschränkung der Optionen in „Schritt 3: Identifikation möglicher Alternativen“ übertragen.

Zu Beginn der Anforderungsanalyse werden die Antworten aus dem Fragenkatalog mit deren jeweiligen Ausprägungen automatisch in die Anforderungsliste für die Transportmittelauswahl (Nr. 1 bis 23) übertragen. Dabei handelt es sich um die in Abschnitt 4.3.1 definierten KO-Kriterien, welche unbedingt erfüllt werden müssen. Wird im Fragenkatalog eine Frage so beantwortet, dass dieses Kriterium für den jeweiligen Anwendungsfall irrelevant ist (wie z.B.: kein Gefahrgut vorhanden), erhält es in der Anforderungsliste automatisch das Symbol „-“. Dieses Kriterium wird anschließend für den weiteren Verlauf der Methode nicht mehr betrachtet. Zusätzlich zu den Antworten des Fragenkatalogs wird der in Kapitel 4.3.2 vorgestellte Kriterienkatalog als unterstützendes Werkzeug für die Auswahl zusätzlicher Anforderungen herangezogen (In der Excel-Datei ist dieser unter Tabellenblatt A.Kriterienkatalog hinterlegt). Ergänzend zu den Informationen aus Schritt 1: Analyse der Ausgangssituation soll dieser die Auswahl weiterer Forderungen und Wünsche, basierend auf den unternehmensspezifischen Anforderungen, erleichtern. Die im Katalog angeführten Kriterien basieren auf einer umfassenden Analyse unterschiedlicher wissenschaftlicher Studien und spiegeln typische Gesichtspunkte bei der Auswahl innerbetrieblicher Transportmittel wider. Das Ziel ist es, zusätzliche Forderungen und Wünsche des Unternehmens als Kriterien zu sammeln und in der Anforderungsliste ab Nr. 24 zu vermerken. Dazu werden, wie in Tabelle 18 schematisch aufgezeigt, die jeweiligen Kriterien per Drop-Down-Funktion im Kriterienkatalog mit einem „X“ ausgewählt, wodurch sie samt Kommentar direkt in die Anforderungsliste übernommen werden (siehe: Tabelle 19). Zur besseren Übersichtlichkeit und Vermeidung von Fehlern wird die entsprechende Zeile des Kataloges, in der das „X“ gesetzt wurde, farbig hinterlegt. Dadurch wird direkt ersichtlich, um welches Kriterium bzw. welche Anforderung es sich handelt.

Kriterienkatalog mit zusätzlichen Entscheidungskriterien				
Übergeordnete Beschreibung		Hinzufügen zur Anforderungsliste		Kommentar
		zutreffendes Kriterium mit einem "X" markieren		
Allgemeine Anforderungen	Gebäude		Bauliche Anpassung	Notwendigkeit von baulichen Anpassungen Verstärkungen, Fundamentanpassungen, Deckenöffnungen usw.
			Medientechnik	Versorgung mit Strom, Gas, Wasser, Druckluft, Hydrauliköl usw.
			altig. Gebäudeanforderungen	Zustand, Nutzen usw.
		X	= Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen	Berücksichtigung zukünftiger Fabrikserweiterung
		X	Tragfähigkeit Gebäude	Belastungsgrenze vom Boden, Decke, Dach oder Stützen
	Allgemeine Auflagen		Integration in bestehende Produktionsstruktur	Einfluss auf die bestehenden Produktionsabläufe und Materialflüsse
			Auswirkungen auf Fabrikdesign und Layout	Ästhetik, Farbgebung, Integration in das Fabrikkonzept usw.
			Tarifverträge	Berücksichtigung tariflicher Vorgaben wie z.B.: Personalbedarf
		X	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit	Umweltverträglichkeit, Recyclingfähigkeit usw.

Tabelle 18: Schematische Auswahl zusätzliche Kriterien aus dem Kriterienkatalog (Eigene Darstellung)

Darüber hinaus bietet die in Tabelle 19 aufgezeigte Anforderungsliste die Möglichkeit, eigene Kriterien, welche sich nicht im Kriterienkatalog befinden, in die orange markierten Felder einzutragen. Je nach Ermessen der bewertenden Person, werden diesen zusätzlichen Anforderungen die Symbole „F“ und „W“ zugeordnet.

Legende			
Relevanz		Symbol	
Forderung		F	
Wunsch		W	
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Anforderungsliste für die Transportmittelauswahl
1	Art des Transportgutes	F	Stückgut
2	Transporthilfsmittel	F	Europaletten, stapelbares Palettengestell, Palette mit Stahlkäfig
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	F	1200x800x2200
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	F	1500
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	F	1200
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	F	4,5
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	F	4,5
8	Umkehrbare Förderichtung	-	Nein
9	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	-	Nein
10	Unregelmäßige Lastverteilung	-	Nein
11	Besondere Eigenschaften und Zustand Transportgut	-	Nein
12	Gefahrgut	-	Nein
13	Zusätzliche Gesetzesbestimmungen	-	Nein
14	Einschränkungen der Platzverhältnisse oder durch spezielle bauliche Vorgaben	-	Nein
15	Besondere Bedingungen in der Betriebsumgebung	-	Nein
16	Regelmäßiger Transport	-	Ja
17	Einzigste Transportmöglichkeit	-	Ja
18	Anfahren mehrerer Quellen und Senken	-	Nein
19	Schnittstelle zwischen zwei Produktionsprozessen	-	Nein
20	Bereitstellung des Transportgutes	F	Rollenbahn
21	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	F	Rollenbahn
22	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/Transportsysteme	F	Ja, Rollenbahn
23	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	F	Ja
Hilfestellung:			
A. Kriterienkatalog		Zusätzliche Anforderungen	
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Kommentar
24	Integration in bestehende Produktionsstruktur	F	Einfluss auf die bestehenden Produktionsabläufe und Materialflüsse
25	Vertikal und horizontaler Transport	W	Muss eine Kombination aus vertikaler und horizontaler Bewegung ausgeführt werden
26	Platzbedarf/Flächenbedarf	W	Bauliche Beschränkungen, benötigte Stellfläche
27	Flexibilität Förderfrequenz	W	Transportfähigkeit unterschiedlicher Förderleistung/-kapazität (Einheiten/h oder
28	Flexibilität Layoutänderung	W	Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen an Standorten (Quelle, Senke, Lage)
29	Instandhaltung	W	Wartungsaufwand, Ersatzteilversorgung, Haltbarkeit, Reparaturfreundlichkeit
30	Genauigkeit	W	Präzision beim Be- und Entladen der Güter; wichtig bei hoher Automatisierung
31	Automatisierungsgrad	W	Grad der eigenständigen Abwicklung von Transportaufgaben (manuell bis
32	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	W	Fähigkeit zur Integration bestehender Transporttechnologien wie z.B.: Förderbänder, Roboter, FTS usw.
33			
34			
37			

Tabelle 19: Anforderungsliste Transportmittelauswahl (Eigene Darstellung)

In diesem Schritt ist es wichtig, dass alle relevanten Einflussfaktoren frühzeitig erkannt und vermerkt werden, um ein aussagekräftiges Ergebnis gewährleisten zu können. Es wird der unverrückbare Rahmen aufgespannt, in dem die Transportmittelauswahl erfolgen muss. Um die Komplexität der NWA zu reduzieren, werden im nachfolgenden Schritt mögliche Alternativen identifiziert und eine erste Einschränkung vorgenommen.

4.6.3 Schritt 3: Identifikation möglicher Alternativen

In Schritt 3 der Auswahlmethode steht die Identifikation und Vorauswahl möglicher Alternativen im Vordergrund, um die Vielzahl möglicher vertikaler Transportmittel vorab einzuschränken. Als Grundlage dafür dienen die Forderungen (F) aus der Anforderungsliste, welche sich aus den Antworten des in Schritt 1 angeführten Fragebogens und den individuell erweiterten Forderungen basierend auf dem Kriterienkatalog ergeben. In diesem Schritt werden die wichtigsten Forderungen aus der Anforderungsliste automatisch in eine Matrix zur Vorselektion übernommen und die einzelnen Transportmittelalternativen hinsichtlich der Erfüllung dieser beurteilt. Die Bewertung findet anhand der in Kapitel 4.4 Standardkennwerte statt. Es werden dabei die Ausprägungen aus der Anforderungsliste mit den hinterlegten Angaben verglichen. Je nach Gewicht der Transporteinheit werden dafür die Vergleichswerte automatisch aus der Tabelle für leichte Güter (< 200kg) oder der Tabelle für schwere Güter (> 200kg) verwendet. Erfüllt die Transportalternative eine relevante Einflussgröße, so wird automatisch ein „✓“ in der dazugehörigen Zelle eingetragen. Wird die Forderung von einer Alternative nicht erfüllt, so wird dort ein „X“ in der Tabelle vermerkt. Das Transportmittel ist somit nicht für diese Ausgangssituation geeignet und wird dadurch frühzeitig aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen und nicht weiter berücksichtigt. In Tabelle 20 wird beispielhaft eine solche Vorselektion aufgezeigt. Es ist erkennbar, dass nur bei drei Alternativen (Säulenheber, Portalheber und Hubgerät) kein „X“ vermerkt wurde, wodurch nur diese für den vorliegenden Anwendungsfall zweckmäßig sind. Um den Aufwand für den weiteren Verlauf der Methode zu minimieren, empfiehlt es sich bei der Vorselektion darauf zu achten, dass die Anzahl an möglichen Alternativen auf 3-4 Transportmittel beschränkt wird.

Legende			Transportmittel								
Relevanz (Symbol)			Lastenaufzug	Säulenheber	Angetriebene Rollenbahn mit Schrägförderung	C-/S-Umlaufrörderer	Paternoster Förderer	Schachtheber	Hubgerät	Portalheber	Vertikalspeicher
Geeignet (✓)											
Nicht geeignet (X)											
Nr.	Forderungen	Ausprägung									
1	Art des Transportgutes	Stückgut	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Transporthilfsmittel	Europaletten, stapelbares Palettengestell, Palette mit Stahlkäfig	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	1200x800x2200	X	✓	X	X	X	X	✓	✓	X
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	1500	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	X
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	1200	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	4,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	4,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Umkehrbare Förderrichtung	Nein	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	Nein	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Bereitstellung des Transportgutes	Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/Transportsysteme	Ja, Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	Ja	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	Integration in bestehende Produktionsstruktur										
15											

Transportmittel die für den Anwendungsfall in Frage kommen:	
Säulenheber, Portalheber, Hubgerät	

Tabelle 20: Identifikation und Vorauswahl möglicher Alternativen (Eigene Darstellung)

Diese gezielte Einschränkung der in Frage kommenden Varianten trägt dazu bei, den weiteren Arbeitsaufwand zu minimieren und dadurch die Entscheidungsfindung zu beschleunigen, indem die Bewertung nicht für alle denkbaren Alternativen durchgeführt werden muss. Basierend auf den unternehmensspezifischen KO-Kriterien werden dadurch nur diejenigen Transportmittelalternativen ausgewählt, welche als vertikales Fördersystem in Frage kommen könnten und im Rahmen der Methode genauer miteinander verglichen werden müssen.

4.6.4 Schritt 4: Bewertungsvorbereitung

Bei der Bewertungsvorbereitung handelt es sich um einen entscheidenden Schritt, welcher einen großen Einfluss auf die nachfolgende Nutzwertanalyse der ausgewählten Transportmittelalternativen mit sich zieht. Der Kern dieses Schrittes stellt die Identifikation der Entscheidungskriterien dar, welche den Grundstein für die nachfolgende Transportmittelauswahl legen, indem spezifische Anforderungen als Ziele definiert werden. Dafür werden die in Schritt 2 identifizierten „zusätzlichen Anforderungen“ herangezogen, um Entscheidungskriterien auszuwählen. Um diese hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für die vorhandene Ausgangssituation priorisieren zu können, wird im Rahmen der Bewertungsvorbereitung zusätzlich eine Gewichtung aller Kriterien vorgenommen. Diese Gewichtung repräsentiert die Präferenzen des Entscheidungsträgers und beeinflusst somit das Auswahlverfahren in Bezug auf die Übereinstimmung mit vorhandenen Unternehmenszielen (Gudehus, 2010). Es ist daher wichtig sehr detailliert vorzugehen, da hier Grundweichen für die weitere Entscheidungsfindung gesetzt werden.

Nachdem in Schritt 2: Anforderungsanalyse alle wichtigen Parameter sowie deren Ausprägungsform in einer Anforderungsliste gesammelt wurden, erfolgt nun die Auswahl der Entscheidungskriterien aus dieser Liste und die Einordnung in übergeordnete Gruppen. Zusätzlich wird dabei die Auswahl jedes Entscheidungskriteriums mit einer kurzen Begründung dokumentiert. Dies ermöglicht eine transparente Vorgehensweise und soll zur Nachvollziehbarkeit der Methode beitragen. Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, ist es wichtig, nur jene Kriterien auszuwählen, welche die wesentlichen Erwartungen und Anforderungen an die Lösungen abbilden. In diesem Zusammenhang ist für die Durchführung der Nutzwertanalyse besonders der Umfang der ausgewählten Entscheidungskriterien wichtig. Einerseits müssen alle relevanten Aspekte der Ausgangssituation und Restriktionen abgedeckt werden, andererseits darf die Anzahl an vorhandenen Kriterien auch nicht zu groß sein, da das Auswahlverfahren ansonsten sehr unübersichtlich werden kann. Die Anzahl der Entscheidungskriterien wird dabei immer durch das Unternehmen bestimmt. Als Anhaltspunkt wird in der Literatur bei der Auswahl von Transportmitteln häufig ein Umfang von 10 bis 20 Entscheidungskriterien als angemessen betrachtet (Kühnapfel, 2021). Diese Kriterien müssen dabei relevant

für das vorgegebene Ziel sein und die vorherrschende Situation gut abdecken, um eine fehlerhafte Entscheidung bei der NWA zu vermeiden (Kühnapfel, 2021). Unzutreffende oder irrelevante Kriterien können zu einer Verzerrung der NWA führen und somit das Gesamtbild verfälschen. Ein weiterer Aspekt, der bei der Auswahl der Entscheidungskriterien beachtet werden muss, ist, dass sich die Kriterien inhaltlich nicht überschneiden oder gegenseitig beeinflussen dürfen (Fottner et al., 2022; Hompel et al., 2018). Eine Überschneidung mehrere Kriterien oder Verknüpfung zusammenhängende Aspekte kann dazu führen, dass diese ungewollt überproportional in das Ergebnis einfließen und dadurch fälschlicherweise im Entscheidungsprozess bedeutsamer eingestuft werden, als sie in Wirklichkeit sind (Fottner et al., 2022; Soufi et al., 2021). Um eine solche Überbewertung zu verhindern, empfiehlt es sich, wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, thematisch verwandte Kriterien in übergeordnete Gruppen zusammenzufassen. Durch diese Zusammenführung kann nicht nur eine größere Anzahl an Entscheidungskriterien berücksichtigt werden, sondern gleichzeitig werden auch die Gefahren der Unübersichtlichkeit und verzerrten Wahrnehmung, welche sich aus einer Vielzahl an Kriterien ergeben, minimiert. Die übergeordneten Kriteriengruppen und deren Einzelkriterien können je nach Anwendungsfall variieren und sind nach Bedarf anzupassen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine transparente und differenzierte Bewertung, welche den tatsächlichen Bedeutungen der Kriterien gerecht wird. Um Missverständnisse und Fehlinterpretationen zu vermeiden, müssen die Kriterien so formuliert werden, dass sie für alle Beteiligten verständlich und ausreichend konkretisiert sind (Schuh & Klappert, 2011). Beispielhaft wird in Tabelle 21 gezeigt, wie die ausgewählten Bewertungskriterien für die weitere Vorgehensweise eingetragen werden. Zu Beginn dieses Schrittes werden alle Forderungen und Wünsche automatisch aus der Tabelle „zusätzlichen Anforderungen“ (vgl. Tabelle 19 Abschnitt 4.6.2) in eine Liste im „Tabellenblatt 4.1 Entscheidungskriterien“ überführt. Anhand dieser Liste gilt es wie in Tabelle 21 aufgezeigt wird, thematisch übergeordnete Gruppen zu bilden und die zugehörigen Entscheidungskriterien manuell mittels der Drop-Down Auswahl hinzuzufügen. Um diese Zuordnung besser nachvollziehen zu können, müssen die jeweiligen Entscheidungskriterien beschrieben werden.

Individuelle Zuordnung der Kriterien in Gruppen

Forderung und Wünsche	F/W	Entscheidungskriterien		
Integration in bestehende Produktionsstruktur	F	Systemintegration	Integration in bestehende Produktionsstruktur	Einfluss auf die bestehenden Produktionsabläufe und Materialflüsse
Vertikal und horizontaler Transport	W		Automatisierungsgrad	vollautomatische Abwicklung
Platzbedarf/Flächenbedarf	W			
Flexibilität Förderfrequenz	W			
Flexibilität Layoutänderung	W	Flexibilität	Flexibilität Förderfrequenz	Transportfähigkeit unterschiedlicher Förderleistung/-kapazität (Einheiten/h oder Einheiten/d)
Instandhaltung	W		Flexibilität Layoutänderung	Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen im Layout
Genauigkeit	W	Infrastruktur	Platzbedarf/Flächenbedarf	Sollte eine möglichst kleine Stellfläche benötigen
Automatisierungsgrad	W		Vertikal und horizontaler Transport	Muss über einen Ladungsträger verfügen der eine horizontale Bewegung ausführen kann
Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	W			
			Instandhaltung	
			Genauigkeit	
			Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	

Tabelle 21: Auflistung und Beschreibung der ausgewählten Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung)

Damit die Relevanz der Entscheidungskriterien in Anbetracht der vorherrschenden betrieblichen Ausgangssituation berücksichtigt und in die Bewertung einfließen kann, wird in weiterer Folge eine Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien vorgenommen. In der Literatur werden verschiedene Gewichtungsverfahren wie zum Beispiel die direkte Gewichtung, die absolute Gewichtung, die singuläre Gewichtung, die sukzessive Gewichtung und das Matrixverfahren verwendet.

Aufgrund der insgesamt großen Anzahl unterschiedlicher Kriterien zur Auswahl vertikaler Transportmittel erweist sich dabei die absolute Gewichtung mit einer Punkteanzahl von 1 bis 100 als besonders zweckmäßig, um in einer angemessenen Zeit die Gewichtung durchführen zu können (Schuh & Klappert, 2011). Laut Kühnapfel (2019) besteht schon ab 25 Kriterien die Gefahr, dass es zu einer Überbewertung und Wahrnehmungsverzerrung kommen kann. Um dies zu verhindern, wird die Gewichtung abermals in den zuvor definierten Kriteriengruppen durchgeführt, sodass die Kriterien entsprechend ihrer Bedeutung zur Zielerfüllung gerecht werden (Kühnapfel, 2021). Die Gewichtung in dieser Methode erfolgt sowohl bei den Kriteriengruppen k_i als auch den einzelnen Kriterien k_j durch eine absolute Gewichtung mittels intuitiver Punktevergabe durch den Entscheidungsträger. Je höher die zugeordnete Punkteanzahl ist, desto wichtiger ist dieses Kriterium auch in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Im Vergleich zur direkten Verteilung des Gesamtgewichts auf die Kriterien einzeln, ermöglicht diese Herangehensweise eine genauere Gewichtung indem sichergestellt wird, dass die relativen Wichtigkeiten angemessen berücksichtigt werden können. Für die Durchführung der Gewichtung werden die zuvor definierten Kriteriengruppen und die dazugehörigen Entscheidungskriterien automatisch in das Tabellenblatt 4.2 übernommen. Die Gewichtung erfolgt nun anhand der Präferenz des Entscheidungsträgers. Wie aus

Tabelle 22 zu erkennen ist, werden dafür zuerst die absoluten Bewertungen der Kriteriengruppen A_l untereinander und anschließend mit demselben Schema auch die einzelnen Entscheidungskriterien A_k innerhalb der Kriteriengruppen relativ zueinander nach ihrer Wertigkeit gewichtet, indem der entsprechende Wert von 1 bis 100 in die orangen Felder eingetragen wird. Diese absoluten Bewertungen werden anschließend wieder relativiert. Der dafür hinterlegte mathematische Zusammenhang wird nachfolgend für die Umrechnung der Kriteriengruppen (Formel 1) und die Umrechnung der einzelnen Kriterien (Formel 2) dargestellt:

$$G_l = \frac{A_l}{\sum_{l=1}^n A_l}$$

mit
 G_l ... Relative Gewichtung der Kriteriengruppe
 A_l ... Kriteriengruppe

Formel 1: Berechnung der relativen Gruppengewichtung (Eigene Darstellung)

$$G_k = \frac{A_k}{\sum_{k=1}^n A_k}$$

mit
 G_k ... Relative Gewichtung der einzelnen Entscheidungskriterien
 A_k ... Entscheidungskriterien

Formel 2: Berechnung der relativen Gewichtung der einzelnen Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung)

Anschließend erfolgt die Berechnung der Gesamtgewichtung eines Entscheidungskriteriums G_i . Wie in Formel 3 ersichtlich ist, errechnet sich diese aus der Multiplikation der relativen Gruppengewichtung G_l und der relativen Gewichtung des Kriteriums innerhalb der jeweiligen Gruppe G_k (Kühnapfel, 2021).

$$G_i = G_l * G_k$$

Mit
 G_i ... Gesamtgewichtung des Entscheidungskriteriums
 G_l ... Relative Gewichtung der Kriteriengruppe
 G_k ... Relative Gewichtung der einzelnen Entscheidungskriterien

Formel 3: Gesamtgewichtung eines Entscheidungskriteriums (Eigene Darstellung)

Wie in Tabelle 22 ersichtlich ist, gilt es bei der Durchführung in Excel nur die absoluten Gewichtungsfaktoren von 0 bis 100 den orangen Feldern zuzuordnen. Die Berechnung der restlichen Werte erfolgt automatisch. In der folgenden Tabelle ist exemplarisch dargestellt, dass beispielsweise die Kriteriengruppe: Infrastruktur (k_{III}) mit 45% gewichtet wird und somit die einflussreichste Gruppe darstellt. Das Kriterium „Vertikaler und horizontaler Transport“ (= k_2) erhält innerhalb dieser Gruppe III eine relative Gewichtung G_k von 30%. Die Anwendung der Formel 3 ergibt nun eine Gesamtgewichtung dieses Kriteriums von $G_2=14\%$.

Gewichtung								
Kriteriengruppe		Absolute Gruppen Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Gruppen Gewichtung	Kriterien		Absolute Kriterien Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Kriterien Gewichtung	
I	k _i	A _i	G _i	i	k _i	A _k	G _k	G _i = G _i * G _k
I	Systemintegration	40	40%	1	Integration in bestehende	35	35%	14%
				2	Automatisierungsgrad	25	25%	10%
				3	Genauigkeit	20	20%	8%
				4	Instandhaltung	20	20%	8%
				5			0%	0%
					Summe	100	100%	
II	Flexibilität	15	15%	1	Flexibilität Förderfrequenz	60	60%	9%
				2	Flexibilität Layoutänderung	40	40%	6%
				3			0%	0%
				4			0%	0%
				5			0%	0%
					Summe	100	100%	
III	Infrastruktur	45	45%	1	Platzbedarf/Flächenbedarf	25	25%	11%
				2	Vertikal und horizontaler Transport	30	30%	14%
				3	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	45	45%	20%
				4			0%	0%
				5			0%	0%
					Summe	100	100%	
Summe der Gewichte		100	100%					100%

Tabelle 22: Schematische Gewichtung der Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung in Anlehnung an Kühnapfel (2021))

Zu beachten gilt aber, dass die Anzahl der Kriterien Gewichtungen in Summe immer einen Wert von 1 (100%) ergeben müssen (Haag et al., 2011; Schuh & Klappert, 2011). Um eine falsche Gewichtung zu vermeiden, gibt die zugehörige Excel-Datei automatisch eine Fehlermeldung aus, sobald die Summe der einzelnen Gewichtungen nicht genau 100 ergibt. Wie schematisch in Tabelle 23 gezeigt, erscheint dann in der entsprechenden Zelle die Meldung „Fehler“ in Rot, wodurch auch die Berechnung der anderen Werte verhindert wird.

Gewichtung								
Kriteriengruppe		Absolute Gruppen Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Gruppen Gewichtung	Kriterien		Absolute Kriterien Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Kriterien Gewichtung	
I	k _i	A _i	G _i	i	k _i	A _k	G _k	G _i = G _i * G _k
I	Systemintegration	60	#WERT!	1	Integration in bestehende	35	35%	#WERT!
				2	Automatisierungsgrad	25	25%	#WERT!
				3	Genauigkeit	20	20%	#WERT!
				4	Instandhaltung	20	20%	#WERT!
				5			0%	#WERT!
				Summe	100	100%		
II	Flexibilität	15	#WERT!	1	Flexibilität Förderfrequenz	10	#WERT!	#WERT!
				2	Flexibilität Layoutänderung	40	#WERT!	#WERT!
				3			#WERT!	#WERT!
				4			#WERT!	#WERT!
				5			#WERT!	#WERT!
				Summe	FEHLER	#WERT!		
III	Infrastruktur	45	#WERT!	1	Platzbedarf/Flächenbedarf	25	25%	#WERT!
				2	Vertikal und horizontaler Transport	30	30%	#WERT!
				3	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	45	45%	#WERT!
				4			0%	#WERT!
				5			0%	#WERT!
				Summe	100	100%		
Summe der Gewichte		FEHLER	#WERT!					#WERT!

Tabelle 23: Schematische Darstellung einer fehlerhaften Gewichtung (Eigene Darstellung)

Es ist zu berücksichtigen, dass bei der Festlegung der Kriterien und deren nachfolgende Gewichtung ein subjektiver Bewertungsspielraum unvermeidbar ist, da diese Entscheidungen stark von der persönlichen Erfahrung und den Ansichten des Entscheiders abhängen (Haag et al., 2011). Aus diesem Grund wird empfohlen, die Bewertungsvorbereitung von mehreren Personen unabhängig voneinander oder im Team durchzuführen. Falls dies nicht möglich ist, sollte nach der Gewichtung eine Überprüfung der Plausibilität durchgeführt und gegebenenfalls eine Anpassung vorgenommen werden. Zudem muss sowohl bei der Auswahl der Entscheidungskriterien als auch bei der Gewichtung darauf geachtet werden, dass eine inhaltliche Begründung vorliegt, um ein nachvollziehbares und sinnvolles Ergebnis zu erhalten (Kühnapfel, 2019). Um eine möglichst objektive NWA zu gewährleisten, muss die Gewichtung bereits in diesem Schritt abgeschlossen werden, bevor die eigentliche Bewertung der Kriterien erfolgt (Fottner et al., 2022). Die gesamte Gewichtung wird anschließend in die Nutzwertmatrix (Schritt 5) übernommen.

4.6.5 Schritt 5: Technologische Bewertung

Bei der technologischen Bewertung wird der Kern der Methodik: die Nutzwertanalyse durchgeführt. Zu Beginn dieses Schrittes wird dafür die Zielerfüllung der einzelnen Entscheidungskriterien bewertet und diese somit in dimensionslose Zielwerte umgewandelt. Dabei fließen die zuvor in Schritt 4 festgelegten Entscheidungskriterien und ermittelten Gewichtungen in die Berechnung des Gesamtnutzwertes der jeweiligen Transportmittelalternativen mit ein. Durch eine solche Auswertung ist es möglich, den jeweiligen Gesamtnutzen zu quantifizieren, um in weiterer Folge einen fundierten Vergleich zwischen den verschiedenen Möglichkeiten aufstellen zu können.

Der durch die individuelle Bewertung des Nutzens definierte Zielwert, gibt Aufschluss darüber, in welchem Ausmaß eine Transportmittelalternative das entsprechende Entscheidungskriterium erfüllt. Zur Ermittlung dieser Zielerfüllung, wird eine Skala benötigt, die eine solche Bewertung ermöglicht. Welche Skalierungsweise dabei verwendet wird, hängt immer vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Ein höheres Skalenniveau ermöglicht in der Regel auch eine präzisere Auswertung der Ergebnisse, setzt allerdings aber auch eine höheren Informationsgrad und Urteilsfähigkeit der bewertenden Person voraus (Zangemeister, 1976). Üblicherweise werden in der Literatur zur Bewertung von Technologien numerische Punktesysteme im Bereich von eins bis fünf oder eins bis zehn verwendet (Bechmann, 1978; Hompel et al., 2018; Saaty, 1990). Eine Zuordnung von Punkten ereignet sich als sinnvoll, da im Anschluss direkt mit diesen Zahlen weitergerechnet werden kann. Diese Skalierungsmethode ähnelt am ehesten der Ordinalskala, wobei vorausgesetzt wird, dass die bewertende Person in der Lage ist eine Aussage darüber zu treffen, ob ein Kriterium besser bewertet wird als ein anderes. Für quantitative Kriterien erfolgt diese Bewertung recht problemlos anhand dieser Punkteskala. Bei qualitativen oder schlecht messbaren

Kriterien hingegen ist es erforderlich, diese durch linguistische Ausprägungen nachvollziehbarer zu machen. Das für diese Methode verwendete Bewertungsschema wird nachfolgend in Abbildung 12 dargestellt. Dabei wird eine Punkteskala von eins bis fünf verwendet, welche zusätzlich durch ein linguistisches Bewertungssystem von „sehr schlecht (--)“ bis „sehr gut (++)“ zur Bewertung der nicht quantifizierbarer Kriterien erweitert wird.

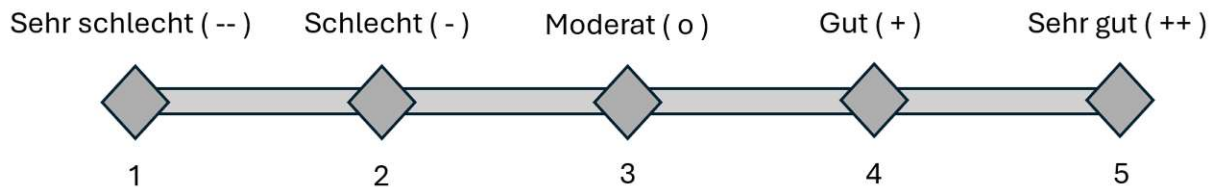


Abbildung 12: Bewertungsschema der Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung)

Soll nun beispielsweise die Anpassungsfähigkeit gegenüber unterschiedlicher Transportgüter bewertet werden, erfolgt die Bewertung anhand der linguistischen Ausprägungen aus Abbildung 12. Kann dabei eine Transportmittelalternative unabhängig von der Art des Transportgutes die Transportaufgabe erfüllen, so verfügt sie über eine „sehr gute“ Anpassungsfähigkeit. In diesem Fall wird dem Entscheidungskriterium die maximale Punktezahl zugeordnet, was einem Zielwert von 5 entspricht. Ist das Transportmittel für einige Güter, aber nicht für alle geeignet, so wird der Variante nur eine bestimmte Anzahl der maximal möglichen Punkte zugewiesen. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass die Bildung einer Reihenfolge wie z.B: „Alternative 1 ist leicht besser als Alternative 2, aber deutlich schlechter als Alternative 3“ verhindert werden soll. Denn trotz der marginalen Abweichungen kommt es zur Bildung einer Reihenfolge der Varianten, was zu deutlichen Punkteunterschieden in der Bewertung und somit einer Verzerrung der tatsächlichen Gegebenheiten führen kann (Fottner et al., 2022).

Als Bewertungsinstrument der einzelnen Transportmittel wird eine sogenannte Nutzwertmatrix aufgestellt. In den Zeilen der Matrix werden, wie in Tabelle 24 beispielhaft aufgezeigt, alle Kriteriengruppen und Entscheidungskriterien sowie deren Gesamtgewichtung aus Schritt 4: Bewertungsvorbereitung angeführt. Die Spalten hingegen repräsentieren die einzelnen Transportmittelalternativen j , welche sich auf Grund der Bewertung in Schritt 3, als geeignet für den jeweiligen Anwendungsfall erweisen. Zunächst werden die Zielwerte w_{ij} der jeweiligen Entscheidungskriterien gemäß dem Schema aus Abbildung 12 bewertet und eingetragen. Wie aus Tabelle 24 ersichtlich ist, wird dazu der entsprechende Zielwert per Drop-Down Auswahl oder durch eine direkte Eingabe in das orange Feld hinzugefügt. Die Bewertung der Alternativen sollte dabei immer unabhängig von den anderen erfolgen, um ein objektives Auswahlverfahren zu gewährleisten (Fottner et al., 2022).

Nutzwertanalyse zur Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittelalternativen											
Maßstab zur Bewertung des Zielerfüllungsgrades der Kriterien					Säulenheber		Portalheber		Hubgerät		
Grad der Erfüllung	--	-	0	+	++	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert
Punktebewertung	1	2	3	4	5						
Kriteriengruppe	Kriterien			Gewichtung gesamt							
k_i	k_i			G_i		w_{ij}	$TE_{ij} = w_{ij} \cdot G_i$	w_{ij}	$TE_{ij} = w_{ij} \cdot G_i$	w_{ij}	$TE_{ij} = w_{ij} \cdot G_i$
Systemintegration	Integration in bestehende Produktionsstruktur			14%		3	0,42	3	0,42	4	0,56
	Automatisierungsgrad			10%		2	0,20	3	0,30	4	0,40
	Genauigkeit			8%		3	0,24	3	0,24	3	0,24
	Instandhaltung			8%		3	0,24	4	0,32	3	0,24
						5	0,00		0,00		0,00
Flexibilität	Flexibilität Förderfrequenz			9%		3	0,27	2	0,18	3	0,27
	Flexibilität Layoutänderung			6%		3	0,18	2	0,12	5	0,30
							0,00		0,00		0,00
							0,00		0,00		0,00
Infrastruktur	Platzbedarf/Flächenbedarf			11%		3	0,34	2	0,23	4	0,45
	Vertikal und horizontaler Transport			14%		4	0,54	3	0,41	4	0,54
	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik			20%		4	0,81	3	0,61	4	0,81
Gesamtnutzwert GN_j				100%		3,24		2,82		3,81	
Rangordnung						2		3		1	

Tabelle 24: Nutzwertanalyse zur Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittelalternativen
(Eigene Darstellung in Anlehnung an (Schuh & Klappert, 2011))

Um das Zwischenergebnis, den sogenannten Teilnutzwert TE_{ij} einer Alternative bezogen auf das Entscheidungskriterium zu erhalten, wird der bewertete Zielwert w_{ij} mit dem zugehörigen Gewichtungsfaktors G_i multipliziert. Diese Berechnung der Teilergebnisse erfolgt nach Formel 4:

$$TE_{ij} = w_{ij} * G_i$$

mit

TE_{ij} ... Gewichteter Teilnutzwert einer Alternative bezogen auf das Entscheidungskriterium

w_{ij} ... Bewerteter Zielwert

G_i ... Gesamtgewichtung des Entscheidungskriterien

Formel 4: Berechnung Gewichteter Teilnutzwert einer Alternative bezogen auf das Entscheidungskriterium (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Schuh & Klappert, 2011))

Nach der Berechnung der Teilnutzwerte wird der Gesamtnutzwertes GN_j für jede Alternativen j ermittelt. Dieser für die Transportmittelauswahl entscheidende Wert ergibt sich anschließend durch das Aufsummieren der Teilnutzwerte TE_{ij} (Formel 5) und spiegelt den Nutzen der bewerteten Alternative bezogen auf den jeweiligen Anwendungsfall wider. Der Gesamtnutzwert stellt somit das zentrale Ergebnis der Nutzwertanalyse dar.

$$GN_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} * G_i = \sum_{i=1}^n TE_{ij}$$

mit

GN_j ... Gesamtnutzwertes einer Alternativen

w_{ij} ... Bewerteter Zielwert

G_i ... Gesamtgewichtung des Entscheidungskriterien

TE_{ij} ... Gewichteter Teilnutzwert einer Alternative bezogen auf das Entscheidungskriterium

Formel 5: Berechnung Gesamtnutzwert einer Alternative (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Schuh & Klappert, 2011))

Basierend auf den bewerteten Zielerfüllungskriterien und deren Gewichtungen ergibt sich somit die Rangordnung der Gesamtnutzwerte der einzelnen Transportmittelalternativen. Die Variante mit dem höchsten Gesamtnutzen wird als beste Alternative angesehen. Erzielt ein Transportmittel bei der Bewertung ein sehr niedriges Ergebnis, muss hinterfragt werden, ob dies für die Ausgangssituation überhaupt relevant ist oder möglicherweise von vornherein direkt in Schritt 3 ausgeschlossen werden sollte. In weiterer Folge werden die Ergebnisse in Schritt 7 (Abschnitt 4.6.7) graphisch veranschaulicht, um eine nachvollziehbare Entscheidung treffen zu können. Da es sich bei der Nutzwertanalyse um die Bewertung des „Nutzwertes“ handelt, muss zusätzlich die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Alternativen unter Berücksichtigung kommerzielle Faktoren getrennt von der Nutzwertanalyse bewertet werden (Hompel et al., 2018). Eine solche kommerzielle Bewertung wird nun in Schritt 6 der Methode durchgeführt, bevor die Ergebnisse miteinander verglichen werden können.

4.6.6 Schritt 6: Kommerzielle Bewertung

Neben der Nutzwertanalyse ist eine getrennte kommerzielle Bewertung der Technologien unerlässlich, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können. In der Literatur gibt es viele unterschiedliche Arten zur Integration des wirtschaftlichen Nutzens in die Gesamtbewertung. Beispielsweise können dabei die in Kapitel 2.3 angeführten statischen Investitionsrechenverfahren wie die Gewinn- und die Kostenvergleichsrechnung, oder auch dynamische Verfahren wie die Kapitalwertmethode und die interne Zinsfußmethode verwendet werden (Arnold & Furmans, 2005; Noosten, 2018). Wie bereits in Abschnitt 4.5 erläutert, wird in dieser Arbeit eine statische Kostenvergleichsrechnung zur kommerziellen Bewertung der Alternativen aufgestellt, welche sämtliche direkten und indirekten Kosten berücksichtigt. Diese vereinfachte Bewertungsmethode reicht laut Martin (2016) in den meisten Fällen aus, um eine grobe Entscheidung treffen zu können. Die Kosten eines vertikalen innerbetrieblichen Transportmittels werden dabei anhand der jährlichen Gesamtkosten K_{Ges} bemessen, welche sich, wie in Formel 6 dargestellt, in Fixkosten K_F und Variable Kosten K_V aufteilen lassen.

$$K_{Ges} = K_F + K_V$$

mit

K_{Ges} ... Gesamtkosten einer Alternative j [€/a]

K_F ... Fixkosten [€/a]

K_V ... Variable Kosten [€/a]

Formel 6: Gesamtkosten einer Alternative pro Jahr (Eigene Darstellung)

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Fixkosten und variablen Kosten wiederum in weitere Kostengruppen aufgeteilt (vgl. Tabelle 25). Die Fixkosten ergeben sich aus den Investitionskosten des Transportmittels unter Berücksichtigung der jährlichen

Abschreibung und der Zinskosten. Bei den variablen Kosten handelt es sich um Kosten, welche vom Transportprozess abhängig sind (Martin, 2016). Diese inkludieren die Instandhaltungskosten, Energiekosten und Personalkosten.

Gesamtkosten	Fixkosten	Jährliche Abschreibung
		Zinskosten
	Variable Kosten	Instandhaltungssumme
		Energiekosten
		Personalkosten

Tabelle 25: Zusammensetzung der Gesamtkosten (Eigene Darstellung)

Um eine kommerzielle Bewertung der Transportmittelalternativen durchführen zu können, müssen zuvor einige erforderliche Inputdaten zu Beginn in Schritt 1: Analyse der Ausgangssituation erfasst werden. Dazu sind in Abschnitt 5 des Fragebogens unternehmensspezifische Informationen wie z.B.: Arbeitstage, Arbeitsstunden, Personalkosten etc. anzugeben. Diese werden in der zugehörigen Excel-Datei dann direkt als sogenannte „allgemeine Inputdaten“ in eine Tabelle für die kommerzielle Bewertung übernommen (vgl. Tabelle 26)

Allgemeine Inputdaten	Wert
Transportfrequenz [Einheiten/d]	1200
Transportweg [m]	4,5
Arbeitstage pro Jahr [d/a]	230
Arbeitsstunden pro Tag [h/d]	24
Abschreibungszeitraum [a]	15
Fremdfinanzierungsanteil [%]	0
Bruttogehalt Mitarbeiter pro Jahr [€/a]	40.000,00 €
Zinssatz [%]	4
Strompreis [€/kWh]	0,18

Tabelle 26: Allgemeine Inputdaten zur kommerziellen Bewertung (Eigene Darstellung)

Für den Vergleich der jeweiligen Alternativen sind zudem transportmittelspezifische Kennwerte zur Berechnung erforderlich (vgl. Tabelle 27). Diese werden direkt aus den hinterlegten Standardkennwerten von Abschnitt 4.4 für die jeweilige zu bewertenden Alternativen übernommen. Lediglich die orange hinterlegte Handhabungszeit muss durch den Entscheidungsträger abgeschätzt werden, da sich diese je nach Anwendungsfall unterscheiden kann. Dabei handelt es sich um die Zeit bei der Logistikpersonal aktiv am Prozess beteiligt ist.

Transportmittelspezifische Inputdaten	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Investitionssumme [€]	40.000,00 €	30.000,00 €	25.000,00 €
Hubgeschwindigkeit [m/s]	1,5	1,3	0,8
Handhabungszeit [s/Einheit]	3	6	4
Leistung [kW]	5,5	7	5,5
Instandhaltungsfaktor [%/a]	7	8	7

Tabelle 27: Transportspezifische Inputdaten zur kommerziellen Bewertung (eigene Darstellung)

Die Berechnung der einzelnen Kostenpositionen aus Tabelle 25 werden nun nachfolgend genauer erläutert.

Fixkosten

Zur Berechnung der Fixkosten wird die Summe der jährlichen Abschreibungen A_a und den Zinskosten K_z gebildet (vgl. Formel 7). Diese Kosten stehen in direkter Abhängigkeit zur einmalig getätigten Investitionssumme bei der Anschaffung des Transportmittels.

$$K_F = A_a + K_z$$

mit

K_F ... Fixkosten [€/a]

A_a ... jährlichen Abschreibungen [€/a]

K_z ... Zinskosten [€/a]

Formel 7: Berechnung der jährlichen Fixkosten (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))

Wie in Formel 8 aufgezeigt wird, berechnet sich die jährliche Abschreibung A_a aus der Division der zu tätigen Investitionssumme I und dem Abschreibungszeitraum L . Es wird dabei eine lineare Abschreibungsmethode betrachtet und davon ausgegangen, dass das Transportmittel über die gesamte Nutzungsdauer komplett abgeschrieben wird und somit am Ende des Zeitraumes kein Erlös mehr vorhanden ist. Der Abschreibungszeitraum kann sich je nach Transportmittel unterscheiden. Zur Vereinfachung wird in dieser Arbeit für alle Technologien eine einheitliche Nutzungsdauer von $L=15$ Jahre berücksichtigt, welche laut der AfA-Tabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter als typischer Kennwert für den Abschreibungshorizont von Transportanlagen (wie z.B.: Aufzüge, Hebezeuge, Transportbänder usw.) gilt (Bundesministerium der Finanzen, 2000). Die Investitionssumme kann aus Tabelle 27 entnommen werden.

$$A_a = \frac{I}{L}$$

mit

A_a ... jährlichen Abschreibungen [€/a]

I ... Investitionssumme [€]

L ... Abschreibungszeitraum [a]

Formel 8: Berechnung der jährlichen Abschreibungen für die getätigte Investitionssumme (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))

Die Berechnung der für den Betrachtungszeitraum anfallenden Zinskosten liefert Formel 9. Dafür muss nach Martin (2016) die Investitionssumme mit dem prozentualen Fremdfinanzierungsanteil und Zinssatz multipliziert werden. Wird die Investitionssumme eigenfinanziert ($f=0\%$), so fällt diese Kostengruppe aus der Bewertung weg.

$$K_z = I * f * z$$

mit

K_z ... Zinskosten [€/a]

I ... Investitionssumme [€]

f ... Fremdfinanzierungsanteil [%]

z ... Zinssatz [%]

Formel 9: Berechnung der jährlichen Zinskosten für die getätigte Investitionssumme (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))

Variable Kosten

Wie aus Tabelle 25 zu entnehmen ist, setzen sich die variablen Kosten aus den Instandhaltungskosten, Energiekosten und Personalkosten zusammen. Diese einzelnen Kostenpositionen werden, wie in Formel 10 gezeigt, nacheinander aufsummiert.

$$K_v = K_I + K_E + K_P$$

mit

K_v ... Variable Kosten [€/a]

K_I ... Instandhaltungskosten [€/a]

K_E ... Energiekosten [€/a]

K_P ... Personalkosten [€/a]

Formel 10: Berechnung der variablen Kosten (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))

Zur Berechnung der einzelnen variablen Kostenpositionen bedarf es jedoch zuerst ein paar Nebenrechnungen.

Nebenrechnungen:

Da die angeführten variablen Kosten von der Einsatzdauer ED des Transportmittels abhängen, braucht es für deren Berechnung die Definition und Ermittlung der zurückzulegenden Transportstrecke und die dafür benötigte Zeit. Diese Berechnungen werden abermals aus den unternehmensspezifischen Inputdaten ermittelt.

Die Gesamtzeit pro Einheit t_E welche das Transportmittel für einen Zyklus benötigt, setzt sich aus der Summe von Transportzeit t_T und der Handhabungszeit t_L , (Zeiten für die Lastaufnahme und – abgabe) zusammen (vgl. Formel 11).

$$t_G = t_T + t_L$$

mit

t_G ... Gesamtzeit pro Einheit [s/Einheit]

t_T ... Transportzeit [s/Einheit]

t_L ... Handhabungszeit [s/Einheit]

Formel 11: Berechnung der Gesamtzeit je Transportaufgabe (Eigene Darstellung)

Die Zeiten für die Lastaufnahme und – abgabe sind abhängig von den einzelnen Transportmittel Spezifikationen, welche je nach Transportmittel variieren können. Da in dieser Arbeit nur eine überschlägige Gegenüberstellung der Transportzeiten betrachtet wird, werden für diese Daten übliche Werte aus der Literatur oder Expertenschätzungen als Basis verwendet. Für eine detaillierte Ermittlung muss eine Zeiterfassungsmethode wie zum Beispiel das „Methods Time Measurement“ (MTM) Verfahren verwendet werden (Bokranz & Landau, 2012). Dabei werden die einzelnen Schritte in Zeitbausteine zerlegt, welche anschließend aufaddiert werden. So können Standardvorgänge anhand von transportmittelspezifischen Zeitbausteinen für jede Alternative bewertet werden.

Die Transportzeit t_T ergibt sich, wie in Formel 12 ersichtlich, aus der Division der zurückgelegten Wegstrecke s durch die Hubgeschwindigkeit des Transportmittels v_j . Für die Berechnung der zurückgelegten Strecke s wird die doppelte Transporthöhe betrachtet, welche das Transportmittel in einem Zyklus insgesamt zurücklegen muss. Dabei fährt das Transportmittel einmal hoch und wieder runter, um wieder in seine Ausgangslage zurückzukommen. Zur Berechnung der Transportzeit werden die Beschleunigungs- und Bremsphase des Transportmittels nicht genauer berücksichtigt. Stattdessen wird von einer gleichförmigen Bewegung mit einer mittleren Geschwindigkeit v_j ausgegangen.

$$t_T = \frac{s}{v_j}$$

mit

t_T ... Transportzeit [s/Einheit]

s ... Transportstrecke [m]

v_j ... Hubgeschwindigkeit [m/s]

Formel 12: Berechnung der Transportzeit (Eigene Darstellung)

Um die benötigte Einsatzdauer ED darstellen zu können, wird davon ausgegangen, dass der Transport immer gleichmäßig über den Arbeitstag verteilt ablaufen wird. Die Berechnung erfolgt wie in Formel 13 gezeigt, indem die Anzahl der Transporte pro Jahr x_a mit der Gesamtzeit in Stunden pro Einheit t_E multipliziert und zusätzlich durch die Anzahl von Sekunden pro Stunde (3600 [s/h]) dividiert wird.

$$ED = \frac{x_a * t_G}{3600}$$

mit

ED ... Einsatzdauer in Stunden pro Jahr [h/a]

x_a ... Anzahl der Transporte pro Jahr [Einheiten/a]

t_G ... Gesamtzeit pro Einheit [s/Einheit]

Formel 13: Berechnung der Einsatzdauer pro Jahr (Eigene Darstellung)

Die dafür benötigte Zahl der Transporte pro Jahr x_a wird durch Multiplikation der Anzahl an Arbeitstage pro Jahr n_d mit der Anzahl an Transporte pro Tag x_d ermittelt (vgl. Formel 14).

$$x_a = x_d * n_d$$

mit

x_a ... Transportfrequenz pro Jahr [Einheiten/a]

x_d ... Transportfrequenz pro Tag [Einheiten/d]

n_d ... Anzahl an Arbeitstage pro Jahr [d/a]

Formel 14: Berechnung der Transportfrequenz pro Jahr (Eigene Darstellung)

Zur Berechnung der Personalkosten wird zusätzlich ein sogenannter Personalfaktor definiert, welcher beschreibt wie viel die Person anteilmäßig während des laufenden Betriebs mit dem Transportmittel arbeiten muss, damit ein reibungsloser Ablauf gewährleistet werden kann. Es wird die Zeit abgeschätzt, die für den operativen Transportmitteleinsatz wie z.B.: beim Be- und Entladen, Steuern usw. anfällt. Instandhaltungsmaßnahmen sind dabei nicht zu berücksichtigen, da diese schon für die Berechnung der Instandhaltungskosten hinzugezogen werden. Der Personalfaktor hängt davon ab, wieviel Zeitaufwand er pro Zyklus bei dem jeweilige Transportmittel benötigt und dementsprechend wieviel andere Wertschöpfungstätigkeit der Mitarbeiter währenddessen durchführen kann. Die Berechnung erfolgt anhand der Division des Zeitaufwandes während eines Zyklus (Handhabungszeit t_L) und der Anzahl an Arbeitsstunden pro Tag. Dieser Wert wird anschließend, wie in Formel 15 gezeigt, mit der Anzahl an Transporten pro Tag multipliziert.

$$c_P = \frac{t_L}{3600 * n_h} * x_d$$

mit

c_P ... Personalfaktor [%]

t_L ... Handhabungszeit [s/Einheit]

n_h ... Anzahl an Arbeitsstunden pro Tag [h/d]

x_d ... Transportfrequenz pro Tag [Einheiten/d]

Formel 15: Berechnung des Personalfaktors (Eigene Darstellung)

Zusammenfassend werden diese Parameter aus den Nebenrechnungen in Tabelle 28 für jede Alternative dargestellt, um die Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Berechnungen zu erhöhen.

Nebenrechnung notwendiger Parameter	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Transportzeit [s/Einheit]	6	7	11
Gesamtzeit pro Einheit [s/Einheit]	9	13	15
Einsatzdauer in Stunden pro Jahr [h/a]	690	991	1169
Transportfrequenz pro Jahr [Einheiten/a]	276000	276000	276000
Personalfaktor	4,17	8,33	5,56

Tabelle 28: Nebenrechnung notwendiger Parameter zur kommerziellen Bewertung (Eigene Darstellung)

Mit Hilfe dieser Parameter können nachfolgend die weiteren variablen Kosten berechnet werden.

Energiekosten:

Zur Berechnung der Energiekosten müssen zusätzlich zur Einsatzdauer pro Jahr ED weitere Inputdaten berücksichtigt werden (vgl. Formel 16). Die dafür benötigte Leistung P wird bei der Anwendung der Methode direkt aus den Standardkennwerten übernommen (vgl. Tabelle 27) und ist auf Informationen aus Herstellerkataloge und Datenblätter des jeweiligen Transportmittels zurückzuführen. Der Strompreis c_S ist eine sehr variable Kenngröße und wird bereits in Schritt 1 der Methode durch den Fragebogen ermittelt.

$$K_E = P * ED * c_S$$

mit

K_E ...Energiekosten [€/a]

ED ...Einsatzdauer in Stunden pro Jahr [h/a]

P ...Leistung [kW]

c_S ...Strompreis [€/kWh]

Formel 16: Berechnung der Energiekosten pro Jahr (Eigene Darstellung)

Instandhaltungskosten

Um die Kosten für Wartungs- und Reparaturarbeiten einschätzen zu können (vgl. Formel 17) wird ein bestimmter Prozentsatz definiert, welcher von der getätigten Investitionssumme veranschlagt wird (Fottner et al., 2022). Dieser Instandhaltungsfaktor c_B ist von den Betriebsbedingungen und Leistungsanforderungen des Transportmittels abhängig und muss je nach Situation beurteilt werden. Zum Beispiel liegt der Wert von Staplern bei einer niedrigen Beanspruchung erfahrungsgemäß bei 5 bis 15% der Investitionssumme (Martin, 2016). Damit eine automatisierte Berechnung ermöglicht wird, werden zur Anwendung dieser Methode sind die entsprechende Instandhaltungsfaktoren den jeweiligen Transportmitteln bereits in den Standardkennwerten zugeordnet (vgl. Abschnitt 4.4).

$$K_I = I * c_B$$

mit

K_I ... Instandhaltungskosten [€/a]

I ... Investitionssumme [€]

c_B ... Instandhaltungsfaktor [%/a]

Formel 17: Berechnung der Instandhaltungskosten pro Jahr (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fottner et al., 2022))

Personalkosten:

Die Personalkosten errechnen sich durch die Multiplikation des zuvor mittels Formel 15 ermittelten Personalfaktors und dem Bruttojahresgehalt des Mitarbeiters. Das durchschnittliche Bruttojahresgehalt, kann sich je nach Branche, Qualifikation des Mitarbeiters usw. stark unterscheiden und ist daher je nach Anwendungsfall individuell zu betrachten. Um die gesamten Personalkosten für das Unternehmen bewerten zu können, müssen die zusätzlich für den Arbeitgeber anfallenden Lohnnebenkosten wie z.B.: Sozialversicherung, Kommunalsteuer, Mitarbeiter Vorsorgekassa usw. berücksichtigt werden. Dies führt zu einer Erhöhung der Personalkosten für den Arbeitgeber um ca. 31% (vgl. TAXSERVICES, (o.D) aufgerufen am: 26.02.25). In Formel 18 wird daher der Bruttojahresgehalt mit dem Faktor 1,3 multipliziert.

$$K_P = B * 1,3 * c_P$$

mit

K_P ... Personalkosten [€/a]

B ... Bruttojahresgehalt des Mitarbeiters €/a]

c_P ... Personalfaktor [%]

Formel 18: Berechnung der Personalkosten pro Jahr (Eigene Darstellung)

Nach abgeschlossener Ermittlung der einzelnen Kostengruppen können die jährlichen Gesamtkosten der einzelnen Alternativen mithilfe der Formel 6 ermittelt werden. Alle Berechnungen erfolgen in der zugehörigen Excel-Datei automatisch auf Tabellenblatt 6, sobald der Fragenkatalog beantwortet und die transportmittelspezifischen Inputdaten vollständig eingetragen wurden. Die kommerzielle Bewertung der Alternativen wird anschließend in Tabelle 29 strukturiert dargestellt. Dabei werden die einzelnen Kostengruppen aufgeschlüsselt nach ihren Kosten pro Jahr differenziert angeführt und automatisch in eine Rangordnung gebracht. Die Alternative mit den geringsten Gesamtkosten wird dabei als das am wirtschaftlich vorteilhaftesten Transportmittel angesehen.

Kommerzielle Bewertung			
Auswertung	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Jährliche Abschreibung [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Zinskosten [€/a]	-	-	-
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Energiekosten [€/a]	683,10	1.248,37	1.157,48
Instandhaltungskosten [€/a]	2.800,00	2.400,00	1.750,00
Personalkosten pro Jahr [€/a]	1.666,67	3.333,33	2.222,22
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	5.149,77	6.981,70	5.129,70
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	5.149,77	6.981,70	5.129,70
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	7.816,43	8.981,70	6.796,36
Rangordnung	2	3	1

Tabelle 29: Kommerzielle Bewertung (Eigene Darstellung)

Im letzten Schritt der Methode lassen sich nun alle Transportmittel anhand ihres wirtschaftlichen Nutzens vergleichen. Dafür werden die einzelnen Kostengruppen in Abschnitt 4.6.7 miteinander verglichen und die kommerziellen Unterschiede der jeweiligen Alternativen aufgezeigt.

4.6.7 Schritt 7: Analyse und Entscheidung

Im Anschluss an die Bewertung müssen die Ergebnisse aus Schritt 5 & 6 (Abschnitt 4.6.5 & 4.6.6) gegenübergestellt und genauer untersucht werden. Zur Entscheidungsfindung ist es besonders wichtig sowohl die monetären als auch die nicht monetären Bewertungen und deren Rangfolgen zu betrachten. Für beide Bewertungsverfahren werden in der Excel-Datei unter Tabellenblatt 7 automatisch unterschiedliche Diagramme erstellt, die zur Veranschaulichung und dem Vergleich der Ergebnisse dienen sollen. Dabei können die Ergebnisse der NWA und der kommerziellen Bewertung durchaus voneinander abweichen (Fottner et al., 2022). Zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse ist es unverzichtbar, die Informationen der Zielerfüllungsmatrix in einer grafischen Darstellung zu visualisieren. Dies erleichtert allen Beteiligten, den Auswahlprozess nachzuvollziehen und ein besseres Verständnis zu entwickeln, wie die einzelnen Kriterien die Nutzwertanalyse beeinflussen. Es kann verdeutlicht werden, ob manche Kriterien stärker in die Entscheidung einfließen oder ob es sich um eine gleichmäßige Verteilung der Wichtigkeit handelt. Als Visualisierungstool können dafür vielerlei Arten von Diagrammen verwendet werden, welche jeweils unterschiedliche Vorteile mit sich bringen. In dieser Methode wird ein Spinnendiagramm verwendet, welches die gegenseitigen Abhängigkeiten der Kriteriengruppen und der jeweiligen Alternativen darstellt. Bei einem Spinnendiagramm handelt es sich um ein polygonales Diagramm, in dem alle Kriterien auf einer Koordinatenachse dargestellt werden. Zur Visualisierung

werden dabei für jede Alternative die Teilnutzwerte einer Kriteriengruppe aufsummiert. Diese Summe wird der entsprechenden Achse des Spinnendiagramms zugeordnet und miteinander verbunden, sodass ein Vergleich der bewerteten Kriteriengruppen aller Alternativen ersichtlich ist. Dadurch entsteht eine polygonale Fläche im Diagramm, welche die Stärken und Schwächen der jeweiligen Alternativen repräsentiert. Ergänzend dazu wird ein Balkendiagramm mit allen Entscheidungskriterien erstellt. Dafür werden die Entscheidungskriterien auf die Abszisse und die zugehörigen Teilnutzwert jeder Alternative auf der Ordinate eingetragen. Dies erleichtert die Diskussion und Auswertung der NWA, da die Bewertungen der einzelnen Kriterien direkt aus dem Diagramm ersichtlich sind. Zur Visualisierung der kommerziellen Bewertung werden die einzelnen Aspekte der variablen und fixen Kostengruppen in einem gestapeltem Balkendiagramm aufgezeigt. Diese grafische Aufbereitung erleichtert direkt den Vergleich der einzelnen Kostengruppen und ermöglicht somit eine detaillierte Analyse. Insbesondere wird sichtbar, wie die Kosten innerhalb der einzelnen Gruppe verteilt sind und welche Unterschiede zu anderen Transportmitteln bestehen. Des Weiteren werden die Ergebnisse der kommerziellen Bewertung zusätzlich in einem Balkendiagramm dargestellt, bei dem die einzelnen Kostengruppen unterschiedliche Längen darstellen und somit aufzeigen, wie groß der monetäre Unterschied der einzelnen Kostenfaktoren direkt sind. Die grafische Darstellung der Bewertungsunterschiede zwischen den einzelnen Alternativen trägt zur Transparenz der Ergebnisse und Entscheidungsfindung bei.

5 Experimentelle Anwendung und Validierung der Methode

In diesem Kapitel handelt es sich um „Schritte 4: Anwendung“ und „Schritt 5: Evaluierung“ des in Kapitel 1.3 beschriebenen DSRM-Prozesses. Dabei wird die entwickelte Auswahlmethode von Experten anhand realer Anwendungsszenarien auf ihre Praxistauglichkeit getestet und anschließend validiert. Um den Ablauf bei der Anwendung der Methode und deren Bewertung zu verstehen, wird in Kapitel 5.1 die Vorgehensweise bei der Evaluierung dargelegt. Dabei wird die Auswahl der Experten erläutert und ein Fragebogen erstellt, mit welchem sich anhand definierter Fragen die Anwendbarkeit der Methode beurteilen lässt. Zur Veranschaulichung der Methode wird die entwickelte Vorgehensweise in den Kapiteln 5.2 bis 5.5 anhand industrienaher Beispiele von einigen Experten aus der Industrie und Wissenschaft angewendet. Dies zeigt auf, wie die Methode unter Verwendung von Unternehmensdaten experimentell durchgeführt wird und welche Ergebnisse sich daraus ergeben. Es wird dabei überprüft, ob die in Kapitel 4.1 definierten Anforderungen an die Methode erfüllt sind. In Abschnitt 5.6 werden schließlich die Erkenntnisse gesammelt und die Ergebnisse ausgewertet. Ziel ist es, die Methodik auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen und dessen praktische Umsetzung sowie Wirksamkeit beurteilen zu können.

5.1 Vorgehensweise der Evaluierung

Bei der Evaluierung der Methode findet die zuvor in Kapitel 4.6 detailliert beschriebene Vorgehensweise schrittweise Anwendung, wodurch sichergestellt und geprüft wird, dass die zentralen Anforderungen und Bewertungsgrößen welche in Kapitel 4.1 definiert wurden, umfassend erfüllt werden. Damit sowohl die wissenschaftliche als auch praxisnahe Perspektive in die Bewertung einfließen, wird die Anwendung und Validierung von mehreren unterschiedlichen Personen durchgeführt. Um sicherzustellen, dass alle Probanden ein breites Spektrum an Wissen und Expertise zu dem behandelten Thema vorweisen, wird bei der Auswahl der Personen auf folgende Aspekte geachtet:

- Die Personen aus der Industrie sind bereits seit mehr als einem Jahr Vollzeit bei einem Logistiklieferanten oder in einem produzierenden Unternehmen im Bereich der Produktion, Logistik, Industrial Engineering oder ähnlichem tätig. Zudem weisen sie eine Position im Unternehmen vor in der sie Expertise zur Auswahl und Einführung von Transportmittel vorweisen können (z.B.: Leitungsfunktion, Key-User, Projektleiter usw.)
- Für den Bereich der Wissenschaft werden Personen angedacht, die mindestens seit einem Jahr in einem Forschungsbereich der Logistik, Fabrikplanung, Wirtschaftsingenieurwesen oder ähnlichem tätig sind.

Insgesamt erfolgt daher die Anwendung und Validierung der Methode in dieser Arbeit durch zwei Experten aus dem Fachbereich der Fabrik- und Logistikplanung sowie durch zwei Anwendern aus Industrieunternehmen.

Die Fallbeispiele basieren auf diversen Anwendungsfällen, die jeweils unterschiedliche Ausgangssituationen von Produktionsprozessen abbilden. Es werden dabei sowohl Neubauprojekte, vertikale Gebäudeerweiterungen und die Integration eines vertikalen Transportmittels in eine bestehende Produktionsstruktur betrachtet. Dadurch wird die Anwendbarkeit der Methode unter wechselnden Rahmenbedingungen überprüft und ihre Vielseitigkeit validiert. Die erforderlichen Eingangsdaten werden dabei immer anwendungsfall bezogen und individuell erfasst. Im Rahmen der Anwendung wird von den durchführenden Personen aufgezeigt, ob die in Abschnitt 4.1 geforderten Anforderungen 1 bis 4 realisierbar sind:

1. *Universelle Anwendbarkeit in diversen Szenarien*
2. *Hohe Anpassungsfähigkeit bei betrieblichen Anforderungen und Vorgaben*
3. *Berücksichtigung qualitative und quantitative Informationen*
4. *Möglichkeit der Anwendung auch bei unsicheren Daten*

Um zusätzlich die Effizienz und Benutzerfreundlichkeit der Entscheidungsfindung sicherzustellen, wird anschließend durch die Beantwortung eines Fragebogens analysiert, inwieweit die zuvor definierten Anforderungen 5 bis 9 erfüllt werden:

5. *Möglichst geringer Aufwand*
6. *Kein großer Implementierungs- und Schulungsbedarf*
7. *Hohe Transparenz und Nachvollziehbarkeit*
8. *Leitfaden zur Vereinfachung des Planungsprozesses*
9. *Klare Struktur der Eingabe und übersichtliche Ergebnisdarstellung*

Zur Gewährleistung aussagekräftigen Validierung, erfolgt diese unmittelbar nach der Anwendung der entwickelten Vorgehensweise. Dafür wird ein standardisierter Fragebogen auf Basis der „Post-study System Usability Questionnaire“ (PSSUQ) entwickelt, welcher durch die Testpersonen ausgefüllt werden muss. Der PSSUQ wurde Ende der 1980er Jahre von IBM zur Messung der wahrgenommenen Zufriedenheit eines Systems nachfolgend an dessen Anwendung entwickelt (Lewis, 2002). Dieser Fragebogen ist sowohl für große (>100) als auch kleine Stichproben (<15) anwendbar. Der PSSUQ umfasst standardmäßig 16 positiv formulierte Fragen, die anhand einer siebenstufigen Likert Skala beurteilt werden. Die Antwortmöglichkeiten zur Bewertung der Fragen erstrecken sich dabei von 1 („Stimme voll und ganz zu“) bis 7 („Stimme überhaupt nicht zu“). Diese Skalenbreite stellt eine „neutrale“ Antwortmöglichkeit zur Verfügung, wodurch ein fehlerhaftes

Antwortverhalten reduziert werden kann (Weijters et al., 2010). Ein niedrigerer Wert bei der Bewertung der jeweiligen Frage signalisiert dabei eine höhere Erfüllung der jeweiligen Anforderungen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Bewertung mit freien Kommentaren zu ergänzen. Den Probanden steht zudem frei, einzelne Fragen nicht zu beantworten, indem („N/A“) ausgewählt wird, wobei in diesem Fall allerdings eine Begründung in der Kommentarzeile erforderlich ist.

Der in dieser Arbeit verwendete Fragebogen zur Validierung wird dahingehend angepasst, dass direkt nach der Anwendung der Methode eine gezielte Bewertung der in Abschnitt 4.1 definierten Anforderungen (5 bis 9) anhand vordefinierter Fragen ermöglicht wird. Tabelle 30 präsentiert alle 16 Fragen des modifizierten Fragebogens sowie die dazugehörigen Anforderungen an die Methode, die durch die Beantwortung ausgewertet werden sollen.

Hauptaspekt	Anforderung an die Methode	Fragebogen zur Validierung
Systemnützlichkeit (SysUse)	5. Möglichst geringer Aufwand & 6. Kein großer Implementierungs- und Schulungsbedarf	1. Insgesamt bin ich zufrieden damit wie einfach, die Methode anzuwenden ist. 2. Es war einfach die Methode zu anzuwenden. 3. Ich konnte die notwendigen Schritte mit dieser Methode schnell durchführen. 4. Ich fühlte mich bei der Nutzung der Methode sicher. 5. Es war leicht, die Struktur und den Umgang mit der Methode zu erlernen. 6. Ich glaube, dass ich diese Methode schnell produktiv anwenden kann.
Informationsqualität (InfQual)	7. Hohe Transparenz und Nachvollziehbarkeit & 8. Leitfaden zur Vereinfachung des Planungsprozesses	7. Die Methode bietet eine klare Anleitung und Hilfestellung bei auftretenden Fehlern. 8. Falls ich einen Fehler gemacht habe, konnte ich diesen leicht erkennen und korrigieren. 9. Die bereitgestellten Informationen (z.B.: Hinweise, Fragebogen, Kriterienkatalog, usw.) waren verständlich und hilfreich. 10. Es war einfach die benötigten Informationen zu finden. 11. Die Informationen haben mir bei der Bewältigung der Entscheidungsfindung sehr geholfen. 12. Die Struktur der Eingabe- und Ergebnisdarstellung war klar aufgebaut.
Benutzeroberfläche (IntQual)	9. Klare Struktur der Eingabe und übersichtliche Ergebnisdarstellung	13. Die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse war übersichtlich und verständlich. 14. Mir hat die Nutzung der Methode in Excel gefallen. 15. Die Methode bietet alle Funktionen und Anpassungsmöglichkeiten, die ich erwartet habe.
		16. Insgesamt bin ich zufrieden mit der Auswahlmethodik.

Tabelle 30: PSSUQ-Fragebogen zur Validierung (Eigene Darstellung)

Zur Auswertung des Fragebogens wird anschließend der Mittelwert aller 16 Fragen berechnet. Im Vergleich zu anderen, tendenziell kürzeren Fragebögen wird mittels der PSSUQ jedoch eine differenzierte Erfassung und Bewertung einzelner Aspekte ermöglicht. Wie aus Tabelle 30 zu entnehmen ist, erlaubt dies eine detailliertere Analyse der unterschiedlichen Anforderungen an die Methode. Der Fragebogen kann dabei in die folgenden Hauptaspekte unterteilt werden, die jeweils auch einzeln ausgewertet werden können.

- Frage 1 bis 6: Systemnützlichkeit (SysUse) - Bewertung der Anwendungsfreundlichkeit und Effizienz
- Frage 7 bis 12: Informationsqualität (InfQual) - Bewertung der Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit
- Frage 13 bis 15: Benutzeroberfläche (IntQual) – Bewertung der visuellen Gestaltung / des Nutzererlebnis
- Frage 16: Dient nur der Gesamtbewertung

Zur Interpretation der ausgewerteten Befragung werden die Mittelwerte mit den von Sauro & Lewis (2016) ermittelten Durchschnittswerten des PSUUQ verglichen. Dabei wird von Ihnen darauf hingewiesen, dass der Mittelpunkt einer siebenstufigen Skala nicht bei einem Wert von 4 liegt, sondern über alle Fragen hinweg ein wenig niedriger ausfällt. Die Ergebnisse der Studie von Sauro & Lewis (2016) geben folgende Vergleichswerte mit dem entsprechenden (99%-Konfidenzintervall) vor:

- Gesamt (Overall): 2.82 (2,62 bis 3,02)
- Systemnützlichkeit (SysUse): 2.80 (2,57 bis 3,02)
- Informationsqualität (InfQual): 3.02 (2,79 bis 3,24)
- Benutzeroberfläche (IntQual): 2.49 (2,28 bis 2,71)

Wenn das Ergebnis des jeweiligen Hauptaspektes innerhalb dieses Konfidenzintervall liegt, weist dies eine gute Erfüllung auf. Liegt der Wert unterhalb des Intervalls so deutet dies auf eine besonders hohe Nutzerfreundlichkeit hin, während ein zu hoher Wert auf ein potenzielles Problem hinweisen könnte.

5.2 Fallbeispiel 1: Medizintechnik

Für den ersten Anwendungsfall der entwickelten Methode wird die Anwendung der Methodik im Kontext eines in der Medizintechnik tätigen Unternehmens betrachtet. Die hierfür verwendeten Eingangsdaten stammen aus einem Projekt der Fraunhofer Austria Research GmbH und dienen zur praktischen Anwendung der Methode. Konkret handelt es sich dabei um einen neu zu planenden Standort, bei dem eine optimale Flächennutzung angestrebt wird. An diesem Produktionsstandort sollen medizinische Tests produziert und gemeinsam in Kartons verpackt werden. Im Zuge dessen muss ein vertikales Transportmittel ausgewählt werden, das die auf

Hygienepaletten geschichteten Kartons, zwischen dem Lager im Untergeschoss und der im Erdgeschoss angesiedelten Produktion, Kommissionierung und dem Versand transportiert. Die Produktion der medizinischen Tests erfordert eine hohe Sauberkeit, um den Hygienestandards gerecht zu werden. Zudem sind für das Unternehmen vor allem die Gewährleistung einer hohen Lieferfähigkeit und die Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen von großer Bedeutung. Daher wird ein vertikales Transportmittel benötigt, das nicht nur einen sauberen, sondern auch effizienten und reibungslosen Förderprozess garantiert, um Verzögerungen im Produktions- bzw. Lieferprozess zu vermeiden. Die Anwendung der Methode anhand dieses Fallbeispiels sowie deren Validierung mittels des PSSUQ-Fragebogens erfolgt durch einen Projektleiter im Bereich der Fabrikplanung der Fraunhofer Austria Research GmbH und wird im folgenden Abschnitt detailliert dargestellt. Die Anwendung und anschließende Beantwortung des Fragebogens erfolgen in diesem Fallbeispiel durch einen Projektleiter im Bereich der Fabrikplanung und Produktionsdesign der Fraunhofer Austria Research GmbH.

Aus der Beantwortung des Fragenkatalogs ergab sich, dass das Transportmittel eine geforderte Mindesttragfähigkeit von 200kg und eine vertikale Förderhöhe von 10 m aufweisen muss. Zudem muss ein Transport in beide Richtungen möglich sein, da die Transporteinheiten sowohl hoch als auch runter befördert werden müssen. Täglich sind 20 Europaletten mit den hergestellten Tests in ein anderes Stockwerk zu befördern, von wo aus sie manuell weiter transportiert werden. Da es sich um Hygieneartikel handelt, muss während des gesamten Transportes ein hohes Maß an Sauberkeit gewährleistet werden. Auf Basis dieser Forderungen wurden der Lastenaufzug, der Säulen- und Schachtheber als geeignete Transportmittelalternativen für den vorliegenden Anwendungsfall identifiziert. Da es sich in diesem Fallbeispiel um den Neubau einer Fabrik handelt, spielt der Umweltfaktor eine nicht zu vernachlässigende Rolle in der Bewertung. Wie in Tabelle 31 dargestellt, spiegelt sich dies auch in der Auswahl der Entscheidungskriterien wider, da dieser Aspekt eine eigene Kriteriengruppe bildet. Darüber hinaus soll bereits in der Planungsphase die Möglichkeit zukünftiger Erweiterungen berücksichtigt werden, weshalb auch die Flexibilität eine zentrale Rolle in der Entscheidungsfindung spielt. Zusätzlich wurde die Effizienz als eine weitere Gruppe definiert, da sie sowohl für einen hohen Automatisierungsgrad und Bedienbarkeit von großer Bedeutung sind. Das Kriterium „Sauberkeit“ wurde zusätzlich noch einmal in die Bewertung mit aufgenommen, da eine zusätzliche Unterscheidung dieses Aspektes zwischen den einzelnen Alternativen als wichtig erachtet wurde.

Entscheidungskriterien		
Kriteriengruppe	Kriterien	Beschreibung
Effizienz	Synchronisation	Abstimmung mit dem Materialfluss in anderen Stockwerken
	Automatisierungsgrad	hoher grad an eigenständiger Abwicklung von Transportaufgaben gefordert
	Anwendungsfreundlichkeit	Bedienkomfort, Übersichtlichkeit, Kennzeichnungen, Haptic usw.
Flexibilität	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen	Berücksichtigung zukünftiger Fabrikerweiterung
	Flexibilität Layoutänderung	Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen an Standorten (Quelle, Senke, Lage)
Umwelt	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit	Umweltverträglichkeit, Recyclingfähigkeit usw.
	Platzbedarf/Flächenbedarf	geringe benötigte Stellfläche durch Bauliche Beschränkungen
	Energieverbrauch	Energieeffiziente Anwendung
	Sauberkeit	Transportmittel soll keine Verschmutzungen verursachen z.B.: Fett- oder Ölaustritt, Staubentwicklung ; Besonders wichtig wenn hohe Hygieneanforderungen gefordert sind

Tabelle 31: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Anhand dieser Entscheidungskriterien wird eine an den unternehmensspezifischen Anforderungen angemessene Gewichtung durchgeführt. Wie sich aus der Nutzwertanalyse (Tabelle 32) entnehmen lässt, haben die Flexibilität bei Layoutänderungen und die zukünftige Erweiterbarkeit mit jeweils einer Gewichtung von 20% einen besonders hohen Einfluss auf die Bewertung. Ebenso werden eine hohe Anwenderfreundlichkeit sowie eine gute Synchronisation und Automatisierung als wichtig empfunden. Da das Kriterium „Sauberkeit“ bereits zuvor in der Vorselektion berücksichtigt wurde, erhält es in diesem Abschnitt eine geringere Gewichtung.

Nutzwertanalyse zur Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittelalternativen											
Maßstab zur Bewertung des Zielerfüllungsgrades der Kriterien						Lastenaufzug		Säulenheber		Schachtheber	
Grad der Erfüllung	--	-	0	+	++	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert
Punktebewertung	1	2	3	4	5						
Kriteriengruppe	Kriterien			Gewichtung gesamt							
k _i	k _i			G _i		w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i	w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i	w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i
Effizienz	Synchronisation			12%		2	0,24	3	0,36	4	0,48
	Automatisierungsgrad			12%		2	0,24	4	0,48	4	0,48
	Anwendungsfreundlichkeit			16%		2	0,32	3	0,48	3	0,48
							0,00		0,00		0,00
							0,00		0,00		0,00
Flexibilität	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen			20%		2	0,40	4	0,80	3	0,60
	Flexibilität Layoutänderung			20%		2	0,40	3	0,60	4	0,80
							0,00		0,00		0,00
							0,00		0,00		0,00
							0,00		0,00		0,00
Umwelt	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit			2%		3	0,06	3	0,06	3	0,06
	Platzbedarf/Flächenbedarf			4%		2	0,08	4	0,16	3	0,12
	Energieverbrauch			4%		2	0,08	4	0,16	3	0,12
	Sauberkeit			10%		4	0,40	2	0,20	3	0,30
Gesamtnutzwert GN _j				100%		2,22		3,30		3,44	
Rangordnung						3		2		1	

Tabelle 32: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Nachdem in der Nutzwertmatrix aus Tabelle 32 alle Zielwerte entsprechend zugeordnet wurden, lässt sich erkennen, dass der Schachtheber einer Punktezah von $GN_3 = 3,44$ einen deutlich höheren Gesamtnutzwert als die anderen beiden Alternativen hat. Er ist somit im Vergleich zum Säulenheber ($GN_2 = 3,30$) auf Rang 2 und dem zum Lastenaufzug ($GN_1 = 2,22$) auf Rang 3 am geeignetsten für die vorliegende Ausgangssituation zu betrachten. Da sich die Gesamtnutzwerte zwischen

Rang 1 und Rang 2 nur wenig unterscheiden, wird in Abbildung 13 die Bewertung der einzelnen Entscheidungskriterien genauer betrachtet, um zu analysieren, worin sich die Unterschiede ergeben. Es ist zu erkennen, dass sich die Bewertungen in den Kriterien „Flexibilität Layoutänderung“ und „Berücksichtigung zukünftiger Erweiterung“ deutlich unterscheiden. Da jedoch beide Kriterien gleich gewichtet wurden und die Alternativen gegengleich bewertet sind, hat dieser Unterschied keinen Einfluss auf die Differenz der beiden Gesamtnutzwert. Es lässt sich jedoch erkennen, dass der Schachtheber in den Kriterien Sauberkeit und Synchronisation eine höhere Bewertung erzielt, wodurch sich letztlich der höhere Nutzwert dieser Technologie ergibt. Die komplett geschlossene Form des Lastenaufzuges bietet zwar einen Vorteil in Bezug auf die Sauberkeit, jedoch stellt dies das einzige Kriterium dar, bei dem sich dieses Transportmittel gegenüber den anderen abheben kann. Die kompaktere Bauweise ist auch der Grund für die bessere Bewertung der Sauberkeit bei einem Schachtheber, da weniger Verunreinigungen auf die medizinischen Tests gelangen können.

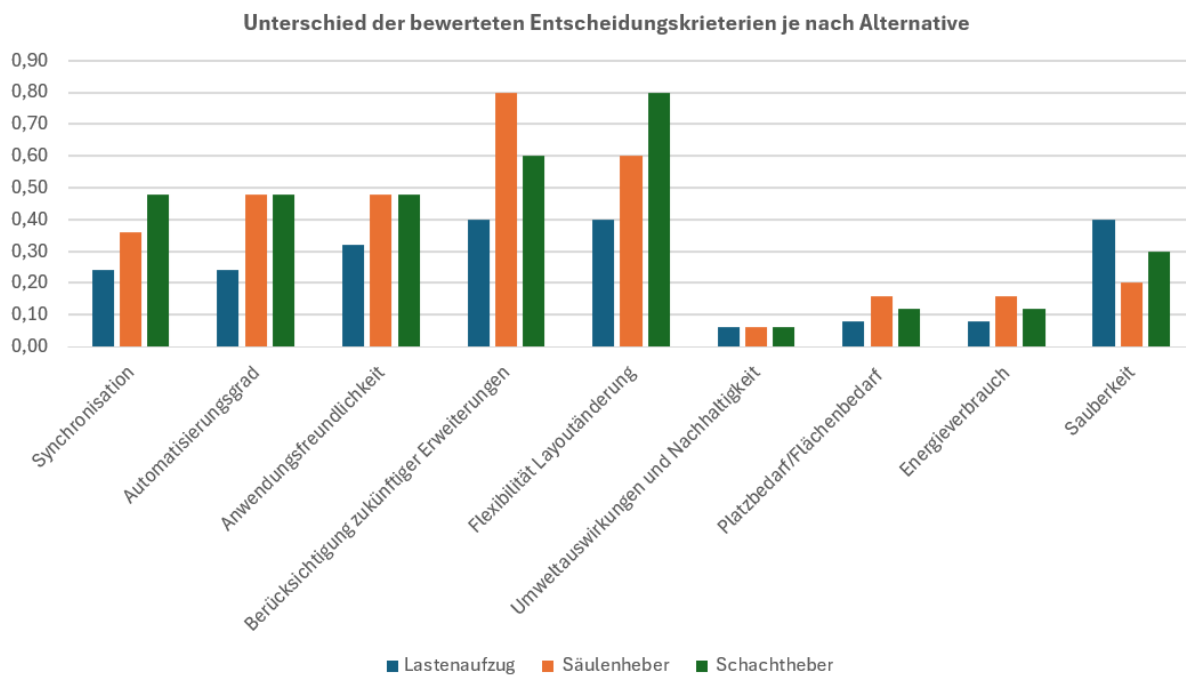


Abbildung 13: Analyse der bewerteten Entscheidungskriterien Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Da nur ein kleiner Unterschied zwischen den Nutzwerten beider Technologien vorherrscht, ist es für eine fundierte Entscheidungsfindung unerlässlich, die wirtschaftliche Analyse der Gesamtkosten aller Alternativen zu betrachten. Wie aus Tabelle 33 ersichtlich ist, ergibt sich bei der kommerziellen Bewertung eine veränderte Rangordnung der Alternativen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist nämlich der Säulenheber mit 2900€ pro Jahr deutlich günstiger als der zuvor in der Nutzwertanalyse besser bewertete Schachtheber, welcher 3800€ pro Jahr kostet. Ein wesentlicher Kostenfaktor in diesem Vergleich sind die jährlichen Instandhaltungskosten, die beim Schachtheber deutlich höher als beim Säulenheber sind. Dies ist primär auf die höhere

Investitionssumme zurückzuführen, welche neben höheren Wartungskosten auch höhere jährliche Abschreibungen nach sich zieht.

Kommerzielle Bewertung			
Auswertung	Lastenaufzug	Säulenheber	Schachtheber
Jährliche Abschreibung [€/a]	2.000,00	1.333,33	1.666,67
Zinskosten [€/a]	-	-	-
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.000,00	1.333,33	1.666,67
Energiekosten [€/a]	6,11	21,27	10,39
Instandhaltungskosten [€/a]	2.400,00	1.400,00	2.000,00
Personalkosten pro Jahr [€/a]	104,17	125,00	156,25
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.510,28	1.546,27	2.166,64
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.000,00	1.333,33	1.666,67
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.510,28	1.546,27	2.166,64
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	4.510,28	2.879,60	3.833,31
Rangordnung	3	1	2

Tabelle 33: Analyse der kommerziellen Bewertung Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Auf Grundlage dieser Auswertung liegt es nun in der Hand des Entscheidungsträgers eine endgültige Auswahl zu treffen. Während die Nutzwertanalyse eine positivere Anwendbarkeit des Schachthebers für den vorliegenden Anwendungsfall bestätigt, sprechen der marginale Unterschied des Gesamtnutzwertes und die signifikant höheren jährlichen Gesamtkosten gegen dieses Transportmittel. Wodurch sich unter Berücksichtigung der ökonomischen Aspekte der Säulenheber als das am geeignetste Transportsystem herauskristallisiert.

Nach anschließender Beantwortung des PSSUQ-Fragebogens durch den Probanden werden nachfolgend die Ergebnisse der Validierung aufgezeigt (vgl. Anhang D1 Abbildung 19). Alle Bewertungen der unten angeführten Hauptaspekte des Fragebogens liegen innerhalb oder unter dem in Abschnitt 5.1 vorgegebenen Konfidenzintervall des jeweiligen Vergleichswertes, wodurch sich basieren auf dieser Bewertung die Methodik sehr benutzerfreundlich erweist.

- Gesamt (Overall): 2,13
- Systemnützlichkeit (SysUse): 2,5
- Informationsqualität (InfQual): 2,2
- Benutzeroberfläche (IntQual): 1,33

Die Auswertung des Fragebogens ergab mit einem Mittelwert von 2,13 eine insgesamt positive Bewertung der gesamten Methodik. Gleichzeitig wurden in den Kommentaren auch einige Hinweise auf Verbesserungspotenzial hinterlegt. Eine Kritikpunkt betrifft den Kriterienkatalog, welcher als zu detailliert und umfangreich wahrgenommen wurde. Während dieser zwar eine präzise Auswahl von Entscheidungskriterien

ermöglicht, führt jedoch die Analyse des Kataloges und die anschließende Auswahl der Kriterien laut dem Anwender zu einem erhöhten Zeitaufwand. Positiv hervorgehoben wurde insbesondere der strukturierte Aufbau der Methode, welcher eine systematische Vorgehensweise ermöglicht und besonders hilfreich zur Entscheidungsfindung war. Dies wird auch durch die Bewertung der Systemnützlichkeit mit einem Mittelwert von $\text{SysUse} = 2,5$ bestätigt. Die bereitgestellten Informationen wurden grundsätzlich als verständlich und hilfreich bewertet. Allerdings wurde angemerkt, dass einige Fragen zur Informationsgewinnung nicht präzise genug gestellt sind, wodurch es zu Unsicherheiten bei der Beantwortung führen kann. Einige Formulierungen innerhalb der Fragen wurden daher als zu uneindeutig beschrieben, weshalb im Anschluss an diese Validierung eine Überarbeitung des Fragenkataloges erfolgen wird. Die Informationsqualität wurde durch verschiedene Werkzeuge wie dem Fragebogen, Kriterienkatalog usw. verbessert, dennoch wird eine größere Datenbasis als sinnvoll erachtet, um noch genauere Entscheidungen zu ermöglichen. Bei der Bewertung der Benutzeroberfläche wurde vor allem die einfache Bedienbarkeit und Anpassbarkeit vom Anwender positiv hervorgehoben. Mit einem Mittelwert von $\text{IntQual} = 1,33$ erzielt dieser Aspekt ein überragendes Ergebnis, was auf die klare Eingabestruktur und übersichtliche schrittweise Abarbeitung der einzelnen Schritte zurückzuführen ist. Der Anwender konnte die Ergebnisfindung klar nachvollziehen und fand sich sehr schnell mit der Durchführung der Methode zurecht. Es wurde jedoch angemerkt, dass eine bessere Führung in einem anderen Softwaretool als Excel möglicherweise die Anwendbarkeit noch weiter verbessern könnte.

5.3 Fallbeispiel 2: Reifenproduzent

Im zweiten Fallbeispiel wird eine vertikale Gebäudeerweiterung einer Produktionsstätte für PKW- und LKW-Reifen betrachtet. Die Anwendung der Methode findet dabei durch einen technischen Projektleiter eines Generalplanungsunternehmens für intralogistische Transportsysteme statt, welcher Inputdaten aus einem ihrer Projekte verwendet. Derzeit werden die fertigen Reifen je nach Größe gemeinsam auf eine Europalette mit Stahlkäfig zur Stapelsicherung geschichtet und über eine Rollenbahn in das bestehende Lager befördert. Da nun ein zusätzlicher Lagerbereich im Obergeschoss geschaffen wird, muss der bestehende Materialfluss erweitert werden. Die Paletten sollen dabei direkt anschließend an den Produktionsprozess im Erdgeschoss ins Lager im ersten Obergeschoss befördert werden können. Von dort aus werden die Paletten nahtlos übernommen und automatisiert eingelagert. Um eine manuelle Handhabung zu reduzieren, soll nun ein passendes vertikales Transportmittel direkt in die bestehende Struktur integriert und sowohl im Erdgeschoss als auch im oberen Stockwerk an die Rollenbahn angebunden werden.

Anschließend an die Beantwortung des Fragenkataloges durch den Probanden werden für die vorliegende Ausgangssituation der Säulenheber, der Portalheber und das Hubgerät als die geeignetsten Alternativen identifiziert. Da das Transportmittel in eine bestehende Produktionsstruktur integriert werden muss, wird wie in Tabelle 34 zu sehen ist, bei der Auswahl der Entscheidungskriterien vor allem ein Augenmerk auf die Systemintegration und die Infrastruktur gelegt. Zusätzlich wird die Flexibilität bei Änderung der Förderfrequenz und des Layouts als weitere Kriterien angeführt.

Entscheidungskriterien		
Kriteriengruppe	Kriterien	Beschreibung
Systemintegration	Integration in bestehende Produktionsstruktur	Einfluss auf die bestehenden Produktionsabläufe und Materialflüsse
	Automatisierungsgrad	vollautomatische Abwicklung
	Genauigkeit	Präzision beim Be- und Entladen der Güter
	Instandhaltung	Wartungsaufwand, Ersatzteilversorgung, Haltbarkeit,
Flexibilität	Flexibilität Förderfrequenz	Transportfähigkeit unterschiedlicher Förderleistung/ -kapazität (Einheiten/h oder Einheiten/d)
	Flexibilität Layoutänderung	Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen im Layout
Infrastruktur	Platzbedarf/Flächenbedarf	Sollte eine möglichst kleine Stellfläche benötigen
	Vertikal und horizontaler Transport	Muss über einen Ladungsträger verfügen der eine horizontale Bewegung ausführen kann
	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	Fähigkeit zur Integration & Anschluss an die bestehende Rollenbahn

Tabelle 34: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Die in Tabelle 35 angeführte Nutzwertmatrix zeigt, dass in diesem Fallbeispiel die Kompatibilität mit anderen Transportmitteln, die Integration in bestehende Produktionsstruktur und die Fähigkeit, einen vertikalen und horizontalen Transport durchzuführen, bei der Gewichtung der Kriterien im Vordergrund stehen und somit die Nutzwertanalyse am meisten beeinflussen.

Nutzwertanalyse zur Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittelalternativen											
Maßstab zur Bewertung des Zielerfüllungsgrades der Kriterien						Säulenheber		Portalheber		Hubgerät	
Grad der Erfüllung	--	-	o	+	++	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert
Punktebewertung	1	2	3	4	5						
Kriteriengruppe	Kriterien			Gewichtung gesamt							
k _i	k _i			G _i		w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i	w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i	w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i
Systemintegration	Integration in bestehende Produktionsstruktur			14%		3	0,42	3	0,42	4	0,56
	Automatisierungsgrad			10%		3	0,30	3	0,30	4	0,40
	Genauigkeit			8%		3	0,24	3	0,24	3	0,24
	Instandhaltung			8%		3	0,24	4	0,32	3	0,24
							0,00		0,00		0,00
Flexibilität	Flexibilität Förderfrequenz			9%		3	0,27	2	0,18	3	0,27
	Flexibilität Layoutänderung			6%		3	0,18	2	0,12	5	0,30
							0,00		0,00		0,00
							0,00		0,00		0,00
Infrastruktur	Platzbedarf/Flächenbedarf			11%		3	0,34	2	0,23	4	0,45
	Vertikal und horizontaler Transport			14%		4	0,54	3	0,41	4	0,54
	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik			20%		4	0,81	3	0,61	4	0,81
Gesamtnutzwert GNj				100%		3,34		2,82		3,81	
Rangordnung						2		3		1	

Tabelle 35: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Nach abgeschlossener Bewertung lässt sich erkennen, dass das Hubgerät mit einem Gesamtnutzen von $GN_3 = 3,69$ die höchste Punktezahl belegt und somit für diesen spezifischen Anwendungsfall als am geeignetsten gilt. Der Säulenheber folgt mit $GN_1 = 3,34$ auf Rang 2 und der Portalheber ($GN_3 = 2,82$) landet mit einem deutlichen Abstand auf Rang 3.

Betrachtet man in Tabelle 36 die Analyse die einzelnen Kriteriengruppen, so ist zu erkennen, dass sich in Bezug auf die Systemintegration die Bewertung des Hubgeräts deutlich von den anderen zwei Alternativen abhebt, da sich dieses Transportmittel besser an die vorherrschende Produktionsstruktur anpassen lässt. In Bezug auf die Flexibilität weisen alle drei Alternativen ähnliche Ergebnisse auf, wobei der Portalheber minimal schlechter beurteilt wurde. In der letzten Kategorie „Infrastruktur“ heben sich der Säulenheber und auch das Hubgerät deutlich vom Portalheber ab. Vergleicht man die Kriterien einzeln, so liegt der markanteste Unterschied zwischen Hubgerät und Säulenheber bei den Kriterien „Integration in bestehende Produktionsstruktur“ und der „Kompatibilität mit anderen Transportmitteln“. Dies lässt sich daraus begründen, dass sich der Säulenheber auf Grund seiner Bauweise weniger für die Integration in das bestehende Systeme eignet und somit nicht ganz so flexibel mit anderen Fördersystemen interagieren kann. Auch in Bezug auf eine veränderliche Produktionsstruktur ist ein Hubgerät kompakter und variabler anwendbar als der Säulenheber, welcher an feste Installationspunkte gebunden ist.

<i>Summe der Teilnutzwerte nach Kriteriengruppe</i>			
Ermittelter Rang nach Gesamtnutzwert:	2	3	1
	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Systemintegration	1,20	1,28	1,44
Flexibilität	0,45	0,30	0,45
Infrastruktur	1,69	1,24	1,80

Bwertung der Alternativen nach Kriteriengruppen

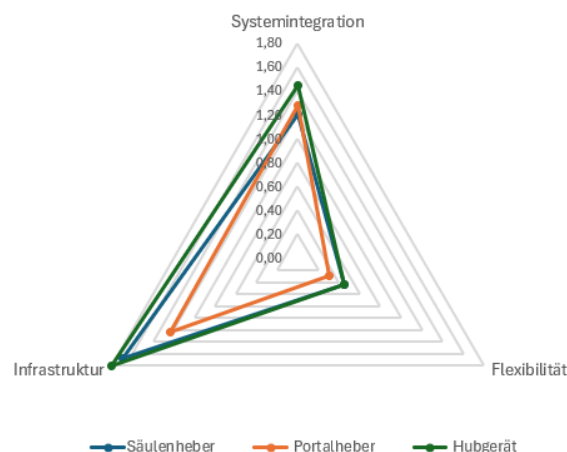


Tabelle 36: Analyse der Kriterienruppen Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Aus der Kommerziellen Bewertung lässt sich schließen, dass das Hubgerät mit ca. 6800 €/a auch die kostengünstigste Lösung im Vergleich zum Säulenheber (ca. 7850

€/a) und Portalheber (ca. 9000 €/a) ist, obwohl dem Säulenheber die geringsten Energie- und Personalkosten zuzuschreiben sind. Dies lässt sich auf die höhere Investitionssumme und die daraus resultierenden jährlichen Abschreibungs- und Instandhaltungskosten zurückführen. Die genaue Aufteilung der einzelnen Kostengruppen wird in Abbildung 14 aufgezeigt.

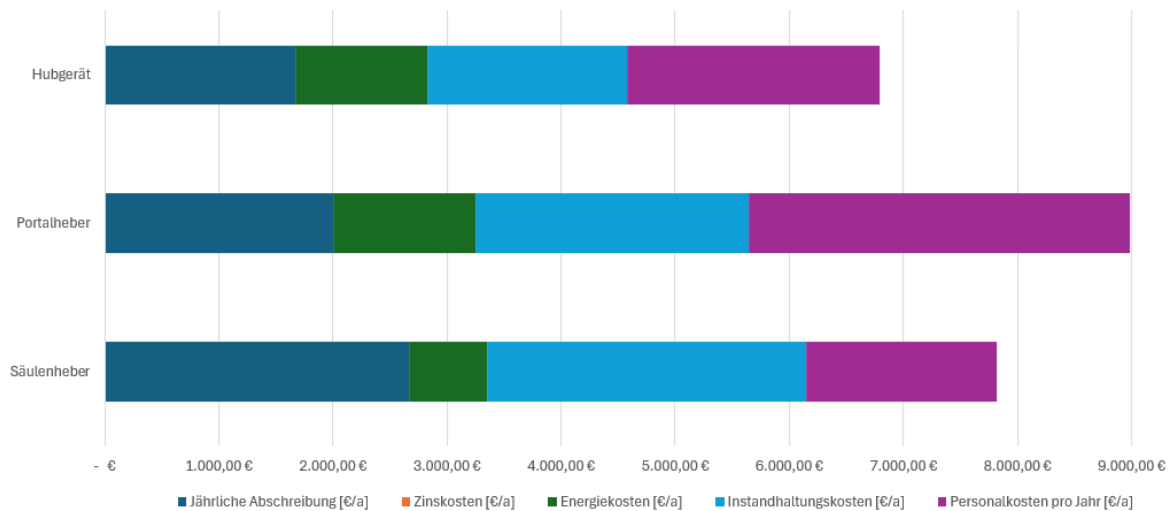


Abbildung 14: Analyse der Kostengruppen Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Insgesamt bringt der Säulenheber zwar gewisse Vorteile mit sich, jedoch überzeugt schlussendlich das Hubgerät vor allem in der Kategorie Systemintegration, da er entscheidende Aspekte für den vorliegenden Anwendungsfall und die Integration in die vorhandene Produktionsstruktur mit sich bringt. In Anbetracht der niedrigeren Gesamtkosten ergibt sich daher aus beiden Bewertungen, dass das Hubgerät sowohl aus technischer als auch wirtschaftlicher Sicht für den vorliegenden Anwendungsfalles die beste Lösung darstellt.

Die Auswertung des beantworteten PSSUQ-Fragebogens (vgl. Anhang D2 Abbildung 20) liefert im Rahmen der durchgeführten Fallstudie folgendes Ergebnis:

- Gesamt (Overall): 2,12
- Systemnützlichkeit (SysUse): 2,33
- Informationsqualität (InfQual): 2,16
- Benutzeroberfläche (IntQual): 1,66

Die Ergebnisse des Fragebogens zeigen, dass insgesamt die Methode mit einer Bewertung von 2,13 unterhalb des Konfidenzintervalls liegt und somit ein sehr gutes Ergebnis vorliegt. Besonders der letzte Abschnitt des Fragebogens wurde mit einem Mittelwert von 1,66 als eine überdurchschnittlich gute bewertet. Dies lässt sich laut der Bewertung des Probanden vor allem auf die automatische Datenübertragung zwischen den einzelnen Tabellenblättern zurückführen welche Handhabung erleichtert und eine intuitive Bedienung sowie visuelle Gestaltung der Ergebnisse ermöglicht. Auf Grund

der klaren Struktur wird auch die Bewertung der Informationsqualität als sehr gut eingestuft (InfQual = 2,16), was sich auf die bereitgestellten Informationen zurückführen lässt. Der Fragen- und Kriterienkatalog wurden dabei als wertvolle Hilfestellung zur spezifischen Anpassung bei unterschiedlichen Ausgangssituationen empfunden, wobei der Kriterienkatalog selbst, als ein wenig zu umfangreich wahrgenommen wurde. Zudem hebt der Anwender hervor, dass die Methode für diesen Anwendungsfall spezifisch angepasst und die Entscheidungskriterien individuell zusammengestellt werden konnten. Die thematische Zuordnung dieser einzelnen Kriterien stellten jedoch für ihn eine Herausforderung dar. Ein weiterer Kritikpunkt bei der Anwendung der Methode war, dass mehr Vorwissen und Informationen zu den angeführten Transportmitteln erforderlich sind, um eine aussagekräftige Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Trotz dieser Anmerkungen verdeutlicht die gute Bewertung der Systemnützlichkeit (SysUse = 2,33) eine hohe Benutzerfreundlichkeit und einfache Handhabung. Der schrittweise strukturierte Aufbau der Vorgehensweise sowie die übersichtliche Benutzeroberfläche zur Entscheidungsfindung wurden vom Anwender dabei als sehr positiv hervorgehoben.

Insgesamt zeigt diese Validierung anhand des vorliegenden Fallbeispiels ein sehr vielversprechendes Ergebnis auf. Durch die strukturierte Vorgehensweise und einfacher Bedienbarkeit der Methode wird laut dem Probanden eine intuitive Implementierung aller relevanten Informationen ermöglicht, was die Methode sehr vielseitig macht. Anhand kleiner Verbesserungen wie der Kürzung des Kriterienkataloges sowie der Bereitstellung zusätzlicher Informationen zu den vertikalen Transportmitteln, könnte die Anwendbarkeit weiter verbessert werden.

5.4 Fallbeispiel 3: Möbelbeschläge Hersteller

Für den dritten Anwendungsfall wird ein Beispiel aus einem Unternehmen betrachtet, das sich auf die Herstellung und den Vertrieb von Möbelbeschlägen spezialisiert hat. In diesem Beispiel wird ein Produktionsprozess betrachtet, bei dem eine Vielzahl an kleiner Metallstanzteile direkt aus der Maschine in stapelbaren Normbehältern gesammelt werden. Sobald das Transportgewicht von 20 kg erreicht ist, werden die Behälter auf einer Rollenbahn zu der 2 Meter entfernten Sammelstelle geführt. Anschließend wird der Stanzmaschine automatisch ein leerer Behälter zugeführt. Da sich die Stanzmaschinen aufgrund ihres hohen Eigengewichtes und der Schwingungen im Erdgeschoss befinden erfolgt die Montage aller Einzelteile in leichteren Maschinen im Obergeschoss. Die vollen Behälter werden derzeit von einem Mitarbeiter auf eine Europalette gestapelt, um sie dann manuell zum nächsten Produktionsschritt weiter zu befördern. Um diese Personalkapazitäten einzusparen, soll nun der Transport zwischen dem Stanzprozess im Erdgeschoss und der Montage im Obergeschoss automatisiert werden. Der Behälterwechsel an der Maschine findet künftig alle 40 Sekunden statt, wodurch sich bei einem Schichtbetrieb von 24h eine

Transportfrequenz von ca. 2200 Einheiten pro Tag ergibt. Um den hohen Durchsatz und einen effizienten Materialfluss zu gewährleisten, soll an die bereits vorhandene Rollenbahn ein vertikales Transportmittel angebunden werden, welches die Stanzteile automatisch in das Obergeschoss zur Weiterverarbeitung befördert. Die Anwendung und Beantwortung des PSSUQ-Fragebogens erfolgten dabei durch einen Mitarbeiter im Bereich der Arbeitstechnik dieses Unternehmens.

Anschließend an die Analyse der Ausgangssituation werden anhand der definierten KO-Kriterien folgende Transportmittel als geeignet identifiziert: Schachtheber, C-/S-Umlaufförderer und Paternoster Förderer. Die Gegenüberstellung der KO-Kriterien und den unterschiedlichen Transportmittelvarianten zeigt, dass sich vor allem bei der hohen geforderten Transportfrequenz besonders Stetigförderer wie ein C-/S-Umlaufförderer oder Paternoster Förderer für diesen Materialtransport eignen. Auch der Schachtheber ist mit einem geeigneten Ladungsträger in der Lage höhere Transportfrequenzen abzuwickeln. Für die Nutzwertanalyse müssen nun Entscheidungskriterien ausgewählt, gruppiert und spezifische Gewichtungen zugeordnet werden. Wie in Tabelle 37 aufgezeigt wird, werden alle Entscheidungskriterien in die zwei Kriteriengruppen „Infrastruktur“ und „Betriebsbedingungen“ zugeordnet. Da es sich in diesem Fallbeispiel um eine Integration in einen bestehenden Produktionsstruktur handelt sind Aspekte wie die Integration in bestehende Systeme und Anbindung an vorhandene Transportmittel besonders zu beachten. Zudem steht auf Grund der bereits vorhandenen Infrastruktur nur ein begrenzter Platz zur Verfügung wodurch auch Kriterien wie der Platzbedarf und die Hindernisbildung in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen sind. Die zweite Kriteriengruppe „Betriebsbedingungen“ berücksichtigt Aspekte wie die Flexibilität der Förderfrequenz und der Nutzungsgrad, welche besonders bei sich verändernden Produktionsmengen wichtig sind. Zudem sollte das Transportmittel in der Lage sein, geringfügige Schwingungen zu kompensieren die trotz guter Dämpfung der Maschinen nicht vollständig eliminiert werden können. Ein geringer Wartungsaufwand ist zusätzlich von Relevanz, weshalb auch diese Kriterien in die Entscheidungsfindung mitaufgenommen wurde.

Entscheidungskriterien		
Kriteriengruppe	Kriterien	Beschreibung
Infrastruktur	Integration in bestehende Systeme	Fähigkeit zur Integration in bestehende Systeme z.B.: Schnittstellen zu ERP-Systemen
	Synchronisation	Abstimmung mit dem Materialfluss im anderen Stockwerk
	Platzbedarf/Flächenbedarf	Bauliche Beschränkungen, benötigte Stellfläche
	Hindernisbildung	Beeinträchtigung durch Platzbedarf für andere Transportmittel oder Personen; Bildung von Engstellen
	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	Fähigkeit zur Integration an die bestehenden Rollenbahnen
Betriebsbedingungen	Flexibilität Förderfrequenz	Transportfähigkeit bei zukünftiger Erhöhung oder der Transportfrequenz
	Vibration	Vibration aufgrund der Stanzmaschinen
	Instandhaltung	Wartungsaufwand, Ersatzteilversorgung, Haltbarkeit, Reparaturfreundlichkeit
	Nutzungsgrad	Hohe Auslastung des Transportmittels gefordert

Tabelle 37: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Um die Präferenzen des Unternehmens bei der Bewertung zu berücksichtigen, wurden den Entscheidungskriterien und deren übergeordneten Gruppen jeweils Gewichtungsfaktoren zugeordnet. Wie aus der Nutzwertmatrix in Tabelle 38 zu entnehmen, wurden die „Kompatibilität mit anderen Transportmitteln (23%)“ und die „Synchronisation (19%)“ am höchsten gewichtet, da deren Einfluss auf den gesamten Materialfluss als besonders relevant eingestuft wurden. In Bezug auf den Produktionsprozess wird auch die Integration in bestehende Systeme als entscheidender Faktor bei der Bewertung eingestuft. Von betrieblicher Relevanz ist zudem infrastrukturelle Gegebenheiten des Flächen-/ Platzbedarfs, welcher mit 11% in die Bewertung miteinfließt. Wohingegen die Kriterien „Vibration, Instandhaltung und Nutzungsgrad“ als weniger wichtig erachtet wurden.

Nutzwertanalyse zur Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittelalternativen											
Maßstab zur Bewertung des Zielerfüllungsgrades der Kriterien						C-/S-Umlaufförderer		Paternoster Förderer		Schachtheber	
Grad der Erfüllung	--	-	o	+	++	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert
Punktebewertung	1	2	3	4	5						
Kriteriengruppe	Kriterien			Gewichtung gesamt							
k _i	k _i			G _i		w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i	w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i	w _{ij}	TE _{ij} = w _{ij} · G _i
Infrastruktur	Synchronisation			19%		4	0,75	4	0,75	3	0,56
	Integration in bestehende Systeme			15%		3	0,45	4	0,60	3	0,45
	Platzbedarf/Flächenbedarf			11%		3	0,34	2	0,23	4	0,45
	Hindernisbildung			8%		3	0,23	2	0,15	4	0,30
	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik			23%		4	0,90	2	0,45	3	0,68
Betriebsbedingungen	Flexibilität Förderfrequenz			11%		4	0,45	4	0,45	3	0,34
	Vibration			9%		3	0,26	2	0,18	3	0,26
	Instandhaltung			3%		3	0,08	3	0,08	3	0,08
	Nutzungsgrad			3%		4	0,10	2	0,05	4	0,10
Gesamtnutzwert GN _j				100%		3,55		2,93		3,21	
Rangordnung						1		3		2	

Tabelle 38: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Basierend auf den berechneten Gesamtnutzwerten zeigt sich der Umlaufförderer in einer C-/ S-Ausführung insgesamt mit einem Wert von $GN_1 = 3,55$ als die geeignetste

Lösung für die Anbindung an das bestehende System. Dies ergibt sich vor allem durch die Überlegenheit des Umlaufförderers bei der Bewertung des Entscheidungskriteriums „Kompatibilität mit bestehenden Transportmitteln“, da er sich laut Anwender optimal in die vorhandene Infrastruktur anpassen würde. Wie auch der Umlaufförderer punktet der Paternoster Förderer vor allem hinsichtlich der Kriterien „Synchronisation“ und „Integration in bestehende Systeme“ gegenüber dem Säulenheber. Auch in Bezug auf die „Flexibilität der Förderfrequenz“ ist der Paternoster Förderer positiv zu bewerten, da dieser wie auch der Umlaufförderer in der Lage ist, noch höhere Durchsätze effizient zu bewältigen. Dies ist besonders bei sich verändernden Materialflüssen wichtig, was ein Vorteil gegenüber dem Schachtheber bietet, da er höhere Durchflüsse nicht mehr so effizient handhaben kann. Allerdings wurde der Paternoster Förderer trotzdem mit einem Gesamtnutzwert von $GN_2 = 2,74$ am niedrigsten bewertet. Dies lässt sich besonders auf den großen Platzbedarf sowie einer für diesen Anwendungsfall schlechten Kompatibilität mit dem bestehenden Transportsystem erklären, wodurch eine aufwändige Implementierung erforderlich wäre. Der Schachtheber stellt mit einem $GN_2 = 3,21$ eine praktikable Alternative dar und weist in allen Kategorien eine einigermaßen solide Bewertung auf. Die zuvor definierten Nachteile werden durch eine kompaktere Bauweise und der geringeren Hindernisbildung im Vergleich zu den anderen beiden Technologien kompensiert.

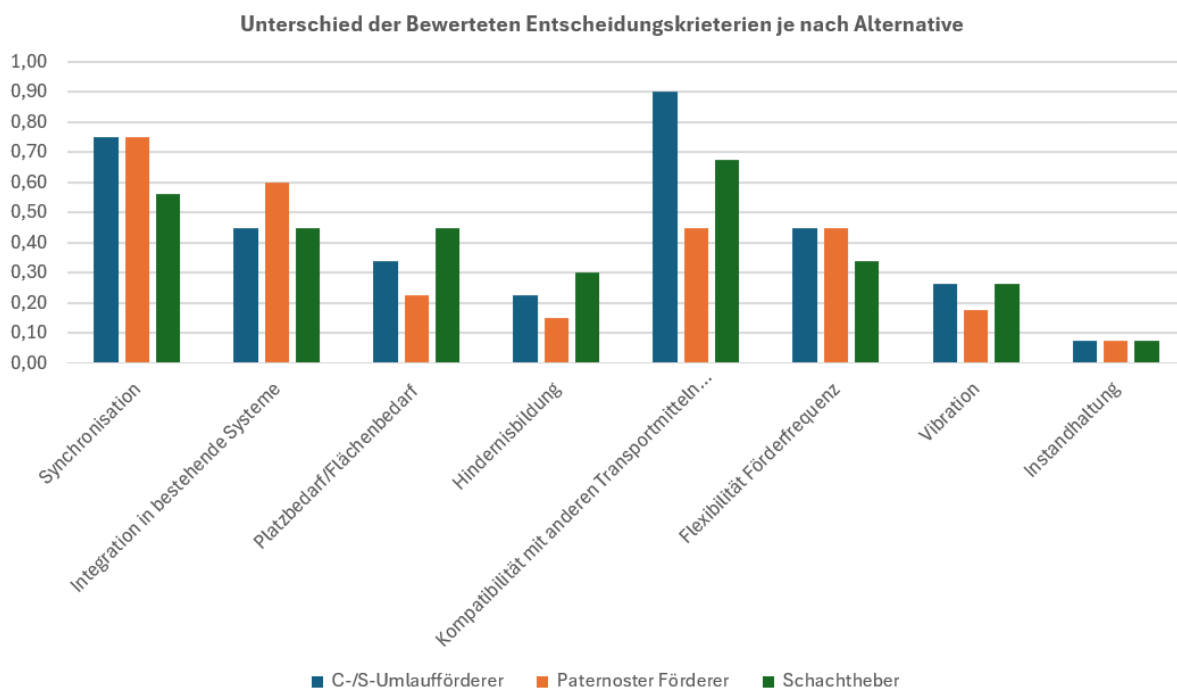


Abbildung 15: Analyse der bewerteten Entscheidungskriterien Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Wird jedoch die kommerzielle Bewertung betrachtet, so ist zu erkennen, dass der Schachtheber und Paternoster Förderer deutlich geringere jährliche Gesamtkosten vorweisen als der Umlaufförderer. Dies ist maßgeblich auf die hohe Investitionssumme des Umlaufförderers von 60.000€ zurückzuführen, die zu erhöhten jährlichen Abschreibungen und Instandhaltungskosten führt. Während der Paternosterförderer mit 40.000€ auch hohe Anfangskosten aufweist, zeichnet sich dieser jedoch durch eine höhere Energieeffizienz aus, wodurch sich seine jährlichen Kosten im Vergleich zum Umlaufförderer reduzieren. Der Schachtheber hingegen sichert sich mit jährlichen Gesamtkosten von ca. 9.800€ pro Jahr die beste Platzierung. Wie in Abbildung 16 aufgezeigt, lässt sich dies auf die niedrige Investitionssumme und somit geringere Abschreibungs- und Instandhaltungskosten zurückführen. Allerdings führt die höhere Handhabungszeit des Schachthebers dazu, dass bei diesem Transportmittel die Personalkosten im Vergleich zu den anderen beiden Fördersystemen deutlich höher sind. Auf Grund dessen weichen in der Gesamtbewertung der Paternoster Förderer und der Schachtheber aus ökonomischer Sicht nur leicht voneinander ab.

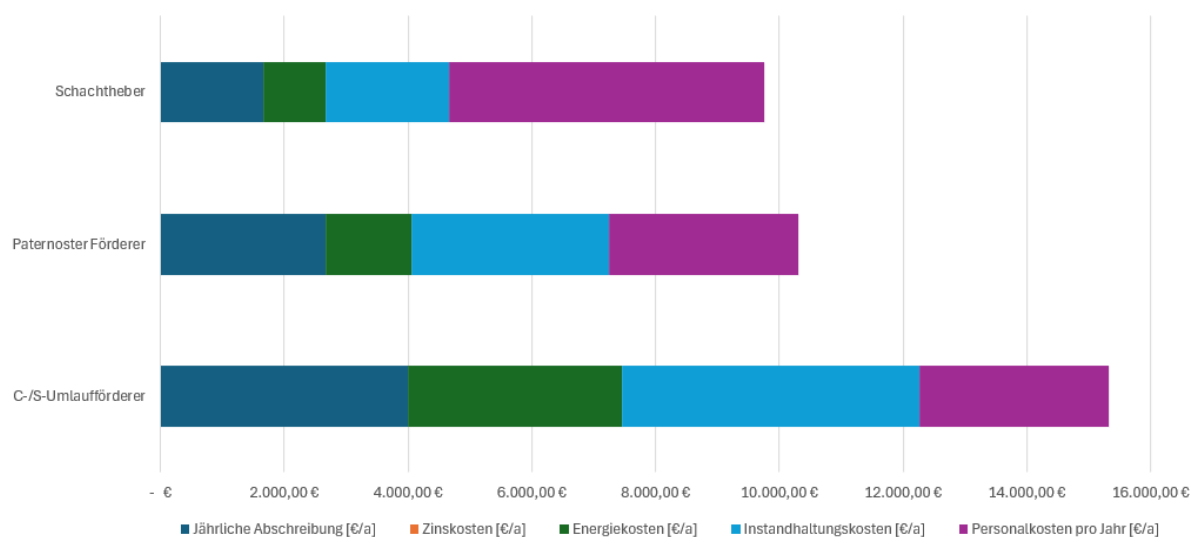


Abbildung 16: Analyse der Kostengruppen Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Eine Betrachtung der Gesamtnutzwerte zeigt deutlich, dass sich der C-/S-Umlaufförderer am besten für den vorliegenden Anwendungsfall eignet. Aufgrund seiner sehr guten Kompatibilität und Integrationsfähigkeit in die bestehende Infrastruktur, wird dieses Transportmittel gegenüber den anderen bevorzugt. Berücksichtigt man jedoch die kommerzielle Bewertung, so weist dieses Transportmittel deutlich höhere Gesamtkosten pro Jahr als die beiden anderen Alternativen auf. Eine eindeutige Entscheidung ist daher an dieser Stelle nicht möglich. Aus diesem Grund muss in weiterer Folge eine detaillierte Betrachtung und Analyse der beiden Alternativen erfolgen, um eine endgültige Auswahl treffen zu können.

Nach der Durchführung folgt die Beantwortung des PSSUQ-Fragebogens anhand mehrerer verschiedener Kategorien. Die Ergebnisse der einzeln ausgewerteten

Bewertungskategorien liegen alle innerhalb des Konfidenzintervalls und weisen somit eine gute Erfüllung auf:

- Gesamt (Overall): 2,4
- Systemnützlichkeit (SysUse): 2,33
- Informationsqualität (InfQual): 3
- Benutzeroberfläche (IntQual): 1,66

Bei genauerer Betrachtung des im Anhang ((vgl. Anhang D3 Abbildung 21) beigefügten Fragebogen, ist zu erkennen, dass die Methode insgesamt mit einem Score von 2,4 als sehr benutzerfreundlich und strukturiert bewertet wurde. Besonders die klare Struktur und visuelle Darstellung wurden von der ausführenden Person positiv hervorgehoben. Dies spiegelt sich auch in der Bewertung der Benutzeroberfläche IntQual = 1,66 wider, welche die klare Eingabe der Daten und transparente Ergebnisdarstellung bestätigt. Um die Bedienbarkeit weiter zu verbessern, wurde als Verbesserung die Implementierung in eine Webanwendung vorgeschlagen. Der Proband gab an, dass die Anwendung für ihn aufgrund der strukturierten Vorgehensweise einfach und in einem angemessenen Zeitaufwand zu bewerkstelligen war. Daraus lässt sich auch die sehr gute Bewertung der Systemnützlichkeit SysUse=2,33 erklären, was darauf hinweist, dass die notwendigen Schritte effektiv durchgeführt werden konnten. Dennoch wurde vom Anwender darauf hingewiesen, dass zur Bewertung der einzelnen Technologien ein gewisses Vorwissen benötigt wird. Dies ist auch ein Punkt, der sich bei der Bewertung der Informationsqualität noch einmal angeführt wurde. Zwar wurden die von der Methode bereitgestellten Werkzeuge zur Informationsfindung und die Schritt für Schritt Durchführung als hilfreich beschrieben, jedoch wären zusätzliche Hintergrundinformationen für die technologische Bewertung der einzelnen Technologien sinnvoll, um den Entscheidungsprozess zu erleichtern.

Insgesamt weist diese Validierung der Methode darauf hin, dass alle wesentlichen Anforderungen an die Methode zur Auswahl vertikaler Transportmittel erfüllt wurden. Während eine klare Struktur und hilfreiche Werkzeuge dazu beitragen, alle benötigten Informationen zu sammeln und an die Ausgangssituation anzupassen, dient die übersichtliche Strukturierung dazu bei, den Planungsprozess zu vereinfachen und den Aufwand durch eine einfache Bedienbarkeit zu minimieren. Dennoch wird im Bereich der Informationsqualität aufgezeigt, dass durch eine Bereitstellung theoretischer Grundlagen und technologischer Informationen bezüglich der einzelnen Transportmittel die Anwendbarkeit weiter verbessert werden kann. Außerdem könnte die vorgeschlagene Webimplementierung eine Weiterentwicklung darstellen, welche dabei hilft, die Durchführung noch effizienter zu gestalten.

5.5 Fallbeispiel 4: Holzverarbeitung

Im letzten Fallbeispiel werden abermals Informationen aus einem realen Planungsprojekt der Fraunhofer Austria Research GmbH zur praktischen Anwendung verwendet. Hierbei handelt es sich konkret um die Neuplanung einer Fabrik in der holzverarbeitenden Industrie, mit dem Ziel, sowohl das Produktionsvolumen zu steigern als auch ein effizientes Logistikkonzept zu entwickeln. Der innerbetriebliche Transport der Holzstücke erfolgt auf Paletten mit den Abmaßen von 1200 x 800 x 1500 mm. Die Neuplanung der Fabrik sieht vor, dass dieses Transportmittel die einzige Möglichkeit ist, die 1500 kg schwere Transporteinheiten zwischen den beiden Geschossen zu befördern. Zudem gilt es zu beachten, dass es sich um eine holzverarbeitende Produktionsumgebung handelt, in der sich viel Staub und auch Holzspäne in der Betriebsumgebung befinden können. Diese Betriebsbedingungen dürfen das Transportverhalten des Fördermittels nicht beeinflussen und müssen somit bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden. Zudem gilt es spezifische räumliche Gegebenheiten der Fabrik wie Tore und Versorgungsrohrleitungen bei der Planung zu berücksichtigen. Die Anwendung der entwickelten Methode anhand dieses Fallbeispiels und dessen anschließende Validierung erfolgt durch einen erfahrenen Fabrikplaner der Forschungsinstitution.

Anhand dieser und weiterer Informationen aus dem ausgefüllten Fragebogen wird zuerst eine Einschränkung der Transportmittelalternativen vorgenommen. Basierend auf diesen Forderungen wurden der Säulenheber, der Portalkran und das Hubgerät als geeignete Alternativen beurteilt. Bei der Auswahl der Entscheidungskriterien wird besonderer Wert auf eine nachhaltige Betriebsführung, die Einplanung einer gewissen Flexibilität und die Systemintegration gelegt. Wie aus Tabelle 39 zu entnehmen ist, werden bereits bei der Neuplanung zukünftige Erweiterungen und die Flexibilität bei möglichen Layoutänderungen als Faktoren zur Bewertung herangezogen. Auch die Umweltauswirkungen, der Energieverbrauch und die Sauberkeit des Transportmittels sind Entscheidungskriterien, welche einen Einfluss auf die Transportmittelauswahl haben. In der Kriteriengruppe „Systemintegration“ finden sich Kriterien wie die Systemintegration in den zu planenden Produktionsprozess, der Platzbedarf und der Automatisierungsgrad wieder.

Entscheidungskriterien	
Kriteriengruppe	Kriterien
Systemintegration	Anwendungsfreundlichkeit
	Automatisierungsgrad
	Platzbedarf/Flächenbedarf
	Synchronisation
Flexibilität	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen
	Flexibilität Layoutänderung
Nachhaltigkeit	Energieverbrauch
	Sauberkeit
	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit

Tabelle 39: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

Wie aus Tabelle 40 zu entnehmen ist, wurde bei der Gewichtung vor allem die Flexibilität als ausschlaggebender Aspekt in der Entscheidungsfindung bei der Transportmittelauswahl präferenziert. Die Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen fällt dabei mit einer Gesamtgewichtung von 42% maßgeblich in die Bewertung mit ein. Ergänzend dazu wurde auch das zweite Kriterium dieser Gruppe mit 28% sehr hoch bewertet, wodurch auch die Flexibilität bei Layoutänderungen großen Einfluss auf die Transportmittelauswahl hat. Insgesamt nimmt diese Kriteriengruppe 70% der Gesamtgewichtung ein, was auf eine sehr starke Priorisierung der Anpassungsfähigkeit bedeutet. Diese hohe Gewichtung ist besonders auf die Neuplanung der gesamten Fabrik zurückzuführen, da somit sichergestellt werden soll, dass auch zukünftig Kapazitätserweiterungen und damit verbundene Veränderungen des Produktionslayouts realisierbar sind.

Nutzwertanalyse zur Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittelalternativen											
Maßstab zur Bewertung des Zielerfüllungsgrades der Kriterien						Säulenheber		Portalheber		Hubgerät	
Grad der Erfüllung	—	-	o	+	++	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert	Bewerteter Zielwert	Gewichteter Teilnutzwert
Punktebewertung	1	2	3	4	5						
Kriteriengruppe	Kriterien			Gewichtung gesamt							
k_i	k_i			G_i		w_{ij}	$TE_{ij} = w_{ij} \cdot G_i$	w_{ij}	$TE_{ij} = w_{ij} \cdot G_i$	w_{ij}	$TE_{ij} = w_{ij} \cdot G_i$
Systemintegration	Anwendungsfreundlichkeit			8%		3	0,24	3	0,24	2	0,16
	Automatisierungsgrad			3%		3	0,09	3	0,09	2	0,06
	Platzbedarf/Flächenbedarf			8%		3	0,24	3	0,24	3	0,24
	Synchronisation			1%		3	0,03	3	0,03	3	0,03
Flexibilität							0,00		0,00		0,00
	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen			42%		3	1,26	4	1,68	3	1,26
	Flexibilität Layoutänderung			28%		2	0,56	3	0,84	3	0,84
							0,00		0,00		0,00
Nachhaltigkeit							0,00		0,00		0,00
	Energieverbrauch			5%		3	0,15	3	0,15	3	0,15
	Sauberkeit			2%		3	0,06	3	0,06	3	0,06
	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit			3%		3	0,09	3	0,09	3	0,09
Gesamtnutzwert GNj				100%		2,72		3,42		2,89	
Rangordnung						3		1		2	

Tabelle 40: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

In Hinblick auf die in Tabelle 40 durchgeführte Bewertung der einzelnen Technologien ist zu erkennen, dass der Portalheber mit einem Gesamtnutzwert von $GN_2 = 3,42$ die am besten geeignete Lösung für diesen Neubau darstellt. Insbesondere die modulare Erweiterbarkeit des Portalhebers stellt einen Vorteil dar, da auch zukünftige Erweiterungen der Fördertechnik möglich sind. Zudem weisen der Portalheber und das Hubgerät in Bezug auf die Flexibilität bei Layoutänderungen eine bessere Bewertung als der Säulenheber vor, wodurch dieser den niedrigsten Gesamtnutzwert ($GN_1 = 2,72$) und somit die geringste Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall besitzt.

Auch bei Betrachtung der kommerziellen Bewertung (vgl. Tabelle 41) ist der Säulenheber mit jährlichen Gesamtkosten von rund 5.700€ die teuerste Alternative. Mit jährlichen Fixkosten von 2.000€ und variablen Kosten von ca. 2.700€ folgt der Portalheber mit Gesamtkosten von ca. 4.700€ an zweiter Stelle. Die wirtschaftlichste Option stellt das Hubgerät dar, das mit jährlichen Kosten von ca. 3.600€ die kostengünstigste Alternative repräsentiert.

Kommerzielle Bewertung			
Auswertung	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Jährliche Abschreibung [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Zinskosten [€/a]	-	-	-
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Energiekosten [€/a]	21,51	32,38	29,91
Instandhaltungskosten [€/a]	2.800,00	2.400,00	1.750,00
Personalkosten pro Jahr [€/a]	156,25	187,50	171,88
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.977,76	2.619,88	1.951,79
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.977,76	2.619,88	1.951,79
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	5.644,43	4.619,88	3.618,46
Rangordnung	3	2	1

Tabelle 41: Analyse der kommerziellen Bewertung Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

Abermals erweisen sich die hohen Investitionskosten als entscheidender Kostenfaktor, da sie sowohl die laufenden Fixkosten durch die jährlichen Abschreibungen als auch die variablen Instandhaltungskosten maßgeblich beeinflussen. Das Hubgerät stellt mit einer Investitionssumme von 25.000€ die in der Anschaffung billigste Alternative dar. Die Fixkosten belaufen sich dabei ca. auf 1.700€, was ihn wiederum mit den niedrigen variablen Kosten zu der kostengünstigsten Alternative macht. Die hohe Investitionssumme von 40.000€ des Säulenhebers wirkt sich wie in Abbildung 17 gezeigt, mit Instandhaltungskosten von 2.800€ und jährlichen Abschreibungskosten von 2.600€ maßgeblich auf die Entscheidung aus.

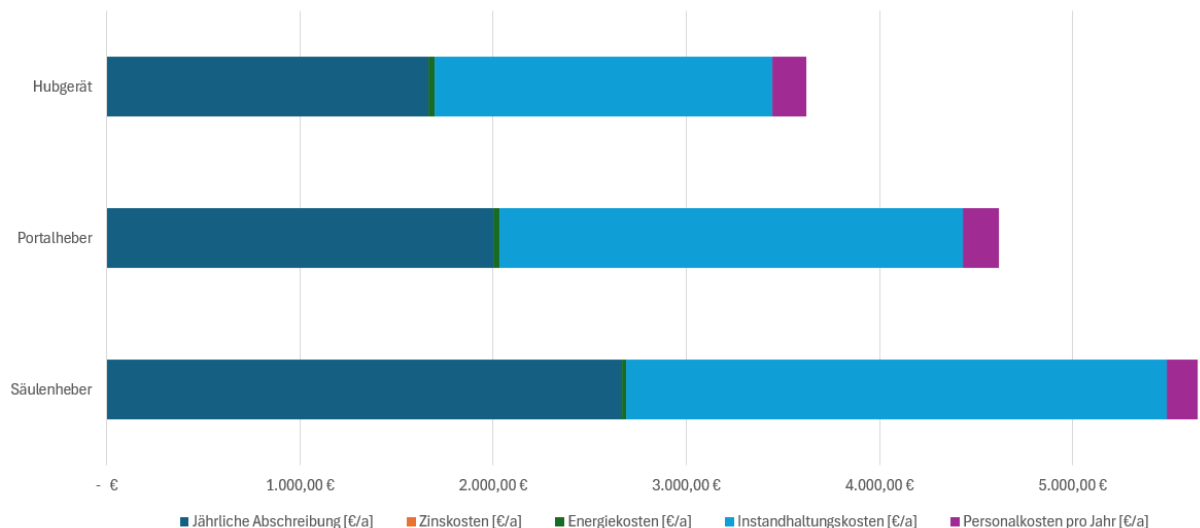


Abbildung 17: Analyse der Kostengruppen Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

Zusammenfassend zeigt die Bewertung, dass der Portalheber auf Grund der hohen Flexibilität und Anpassungsfähigkeit bei zukünftigen Veränderungen aus technischer Sicht die geeignetste Lösung darstellt, wohingegen das Hubgerät die wirtschaftlichste Option bietet.

Die Evaluation der Methode erfolgte anschließend durch den Probanden, wobei die Auswertung des PSSUQ-Fragebogens (vgl. Anhang D4 Abbildung 22) folgende es Ergebnis liefert:

- Gesamt (Overall): 1,38
- Systemnützlichkeit (SysUse): 1,33
- Informationsqualität (InfQual): 1,66
- Benutzeroberfläche (IntQual): 1

Es ist zu erkennen, dass alle Werte der einzelnen Teilbereiche des PSSUQ-Fragebogens unterhalb des Konfidenzintervalls liegen, was auf eine überdurchschnittliche Zufriedenheit und Akzeptanz der Methode hinweist. Dies belegt, dass die Methode als äußerst benutzerfreundlich wahrgenommen wurde und sehr intuitiv anwendbar war. Die ausgezeichneten Werte in Bezug auf die Informationsqualität lassen zudem auf eine hilfreiche Informationsfindung sowie klare und einfache Vorgehensweise zurückschließen. Obwohl das durchgeführte Fallbeispiel von ihm als nicht ganz passend erachtet wurde, wurde die Funktionalität der Methode insgesamt als sehr zufriedenstellend bewertet. Der Nutzer gab an, dass er über wenig tiefergehendes Vorwissen zu den vertikalen Transportmitteln verfügt, was jedoch keinen Einfluss auf die strukturierte Vorgehensweise und Handhabung der Methode hatte. Besonders die Vorselektion der Alternativen durch hinterlegte Kennwerte wurde von ihm als sehr hilfreich hervorgehoben, da diese auch ohne umfassende Informationen eine Identifikation geeigneter Transporttechnologien für

den vorherrschenden Anwendungsfall ermöglichte. Die endgültige Bewertung der Alternativen stellte für den Probanden jedoch eine Schwierigkeit dar, da ihm wiederum die fundierten Hintergrundinformationen zu den einzelnen Technologien fehlten. Trotz dieser Einschränkung wurde die Nützlichkeit der Methode bestätigt, da sie eine Hilfestellung bei der Informationsgewinnung und wertvolle Grundlage zur weiterführenden detaillierteren Bewertung der einzelnen Technologien bietet.

5.6 Erkenntnisse und Fazit

Im Zuge der Fallstudien wurde die Vorgehensweise zur Durchführung der Methode mit unterschiedlichen unternehmensspezifischen Anforderungen von Experten durchlaufen. Basierend auf den daraus folgenden Erkenntnissen wird die Methode iterativ weiterentwickelt, wie es in der DSRM üblich ist (Peffer et al., 2007).

Anhand der vier unterschiedlichen Fallstudien wird sowohl die universelle Anwendbarkeit der entwickelten Methode als auch die Übertragbarkeit auf diverse betriebliche Kontexte untermauert. Dabei wird versucht mittels unterschiedlicher Szenarien eine breite Anwendbarkeit und praxisnahe Übertragbarkeit zu veranschaulichen - von den Hygieneanforderungen und der Flexibilität in der Medizintechnik, über die hohe Transportfrequenz und die Integration des Transportmittels in bestehende intralogistische Prozesse bei der Herstellung von Möbelbeschläge, bis hin zum Transport schwerer Ladungsträger und der vertikalen Gebäudeerweiterung des Reifenherstellers. Der standardisierte Fragebogen und Kriterienkatalog ermöglichen dabei eine multikriterielle Bewertung, bei der individuelle betriebliche Präferenzen sowie unternehmensspezifische Rahmenbedingungen gezielt berücksichtigt werden können. Im Zuge der Anwendung der Methode wurde der Fragebogen dahingehend überarbeitet, dass alle essenziellen Anforderungen an das Transportmittel abgefragt werden. Dies wurde durch das Umformulieren und neu Hinzufügen einzelner Fragen ermöglicht, da zuvor nicht alle notwendigen Aspekte vollständig berücksichtigt wurden. Zudem wurden Fragestellungen, die für die durchführenden Personen unklar formuliert und nicht eindeutig zu beantworten waren, überarbeitet und präzisiert, um eine zielgerichtete Beantwortung zu ermöglichen. Des Weiteren wurden Fragen entfernt, welche in den nachfolgenden Schritten der Methode keine Verwendung fanden. Zur Verbesserung der Anwendbarkeit wurden nach der Analyse des ersten Fallbeispiels in der Excel-Datei zu jedem Schritt der Methodik eine Informationsbox hinzugefügt. Diese Boxen enthalten eine kurze Anwendungsanleitung und Hinweismeldungen zu dem entsprechenden Schritt, um die Nachvollziehbarkeit und Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen. Die standardisierten Vorlagen der Methode wie der Fragenkatalog zur Informationsgewinnung, die Anforderungsliste und der Kriterienkatalog wurden in den PSSUQ-Fragebögen als äußerst hilfreich bewertet, da sie eine systematische und effiziente Implementierung relevanter Informationen ermöglichen. Trotz der unterschiedlichen Ausgangssituationen und der Vielzahl an

Inputdaten wird die strukturierte Durchführung der Methode von den Teilnehmern als positiv hervorgehoben. Dies lässt sich besonders durch die automatisierte Übernahme relevanter Daten zwischen den einzelnen Schritten erklären, wodurch der manuelle Bedienaufwand minimiert und eine schnelle Herangehensweise ermöglicht wird. Zusätzlich können durch die Verknüpfung der einzelnen Schritte Änderungen in der Ausgangssituation schnell angepasst und simuliert werden. Die Anwendung in Excel wird von den Probanden als sehr benutzerfreundlich bewertet, da sie eine intuitive Handhabung ohne lange Einarbeitungszeit ermöglicht. Durch visuelle Darstellung anhand farblich markierter Felder wird besonders die Eingabe von Daten vereinfacht. Gleichzeitig weist jedoch einer der Probanden darauf hin, dass die Nutzung anderer Softwarelösungen möglicherweise noch anwenderfreundlicher wäre. Die transparente Darstellung aller benötigter Informationen und Berechnungen begünstigt eine nachvollziehbare und schlüssige Entscheidungsfindung, was insbesondere im Vergleich zu anderen komplizierten Softwarelösungen als Vorteil wahrgenommen wird. Die Identifikation geeigneter Transportmittel anhand definierter Forderungen aus der Anforderungsliste ermöglicht es zudem, die geeigneten Alternativen einzuschränken und somit den weiteren Arbeitsbedarf zur Durchführung der Methode zu reduzieren. Die Vorselektion anhand vordefinierter Kennwerte, wurde bei der Validierung als ein besonders hilfreiches Instrument zur Eingrenzung der Alternativen empfunden. Durch die systematische Erfassung aller relevanter unternehmensspezifischer Kennwerte im Fragebogen, können alle Informationen verglichen und somit alle ungeeigneten Alternativen automatisch ausgeschlossen werden, ohne dass der Anwender über viel Vorwissen zu den einzelnen Technologiekennwerten verfügen muss. Die hierfür ausgearbeitete Datenbasis stützt sich auf unterschiedlichen Herstellerangaben und dient als Orientierungshilfe, in welchem Bereich standardmäßig diese Kennwerte liegen. Zudem konnten in den, für die Anwendung hinterlegten Standardkennwerten, nicht alle benötigten Technologiekennwerte ermittelt werden, wodurch in einzelnen Fällen auf Abschätzungen zurückgegriffen wurde. Je nach Anforderungen und gewünschter Konfiguration kann es jedoch zu erhebliche Preisunterschiede der einzelnen Technologien kommen, weshalb es unerlässlich ist, für den weiteren Planungsverlauf explizite Herstellerinformationen einzuholen. Auf Grund der vielen unterschiedlichen technischen Ausführungen der Transportmittel können diese Werte jedoch stark variieren, weshalb es zur Weiterentwicklung der Methode wichtig ist, eine bessere und umfangreichere Datengrundlage zu schaffen. Der entwickelte Kriterienkatalog, welcher als Unterstützung bei der Identifikation relevanter Entscheidungskriterien dient, wurde von zwei Probanden als sehr umfangreich wahrgenommen. Dies lässt sich auf die große Anzahl erfasster quantitativer und qualitativer Kriterien zurückführen, welche dem Anwender die Auswahl und Anpassung geeigneter Entscheidungskriterien erleichtern soll. Allerdings führte das Durcharbeiten des umfangreichen Kataloges für einige Probanden zu einem erhöhten Zeitaufwand,

weshalb anschließend eine gezielte Überarbeitung und Kürzung des Kataloges durchgeführt wurde, um die Anwendbarkeit der Methode zu verbessern. Die Auswahl und Definition der „zusätzlichen Anforderungen“ erfolgt individuell durch den Anwender anhand des Kriterienkataloges und orientiert sich dabei an den betrieblichen Anforderungen und Gegebenheiten. Die daraus resultierenden Entscheidungskriterien werden anschließend in thematisch zusammenhängende Gruppen eingeteilt. Einem der Anwender fiel diese Einteilung in Kriteriengruppen laut eigener Aussagen ein wenig schwer, da er eine derartige Kategorisierung zuvor noch nie durchgeführt hatte. Diese Aussage spiegelt sich auch in Erkenntnissen aus der Fachliteratur wider, in der darauf hingewiesen wird, dass die Zuordnung von Objekten zu genau einer Kategorie für manche Personen mitunter schwierig sein kann (Klüver et al., 2012). Um solche potenziellen Unsicherheiten zu vermeiden, kann es daher sinnvoll sein, die Kategorisierung als Gruppe durchzuführen. Trotz der Einteilung der Entscheidungskriterien in Gruppen, stößt die Bewertungsmethode bei einer zu großen Anzahl an Entscheidungskriterien an ihre Grenzen. Mit einer steigenden Anzahl an Kriterien innerhalb einer Gruppe wird es zunehmend schwieriger, eine präzise prozentuale Gewichtung vorzunehmen, da die Gewichtungswerte der einzelnen Kriterien immer kleiner werden. Dies mindert die Vergleichbarkeit der Gewichtungen, da durch die zunehmende Komplexität das Verhältnis eines einzelnen Kriteriums zur Gesamtgewichtung immer schwieriger nachzuvollziehen ist. Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass durch das Hinzufügen oder Entfernen von Kriterien eine Neubewertung der gesamten Gewichtung innerhalb der Gruppe durchgeführt werden muss. Die Gewichtung auf zwei Ebenen muss sehr sorgfältig und präzise durchgeführt werden, da sowohl die Auswahl der Entscheidungskriterien als auch die Bewertung der Gewichtungen einen direkten Einfluss auf die Nutzwertanalyse haben. Dies wurde auch exemplarisch in Fallbeispiel 4: Holzverarbeitung deutlich, in dem sich 70% der Gesamtgewichtung auf lediglich zwei Entscheidungskriterien verteilte. Dies hatte zur Folge, dass diese beiden Kriterien einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung der Technologien im Rahmen der Nutzwertanalyse mit sich zog. Die Gewichtung der Kriterien unterliegt dabei immer einer subjektiven Beurteilung und besitzt bei der Bewertung durch eine Einzelperson immer eine legitime individuelle Relevanz, da die Zuordnung der Gewichtungsfaktoren nach dem Ermessen des Entscheidungsträgers erfolgt. Um eine fehlerhafte Bewertung zu vermeiden, wurde in der zugehörigen Excel-Datei eine Fehlererkennung implementiert, welche eine Meldung ausgibt, sobald sich die Gesamtgewichtung über oder unter 100% befindet. Dies soll dem Nutzer signalisieren, wenn ein Fehler gemacht wurde und somit zur Verbesserung der Entscheidungsfindung beitragen. Im Anschluss an die Gewichtung erfolgt die Bewertung der einzelnen Alternativen hinsichtlich ihrer Zielerfüllung. Wie auch aus den ausgewerteten PSSUQ-Fragebögen hervorgeht, setzt die Bewertung mittels Nutzwertanalyse jedoch ein fundiertes Grundverständnis und Fachwissen über die jeweiligen Technologien voraus. Daher sollte die Zuordnung der Zielerfüllungswerte

ausschließlich durch Fachpersonal durchgeführt werden, um ein realistisches Ergebnis zu gewährleisten. Einen ähnlichen Eindruck hatte auch einer der Probanden, der anmerken ließ, dass er sich aufgrund von fehlenden Hintergrundinformationen in Bezug auf vertikale Fördersysteme nicht in der Lage fühle, eine belastbare Bewertung der Technologien vorzunehmen. Idealerweise sollte daher, wie bereits erwähnt, die Gewichtung der Kriterien und deren anschließende Bewertung nicht von einer einzelnen Person erfolgen, um das Risiko subjektiver Einflüsse auf die Entscheidungsfindung zu reduzieren und somit die objektive Beurteilung zu fördern. Zur kommerziellen Bewertung werden sowohl Inputdaten aus dem Fragebogen als auch transportmittelspezifische Parameter aus den Standardkennwerten herangezogen. Die Anwendung der Methode verdeutlicht, dass insbesondere die Investitionssumme einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkostenstruktur hat und somit ein entscheidender Kostenfaktor in der Bewertung darstellt. Da es sich hierbei um eine frühe Kostenabschätzung im Planungsprozesses handelt, liefert die Berechnung lediglich eine erste Einschätzung der Wirtschaftlichkeit und erfordert in der weiterführenden Planung eine spezifischere monetäre Bewertung anhand von konkreten Herstellerangaben. Zusätzlich erwies sich bei der Anwendung der Methode die Abschätzung der Handhabungszeit für die Anwender als schwierig, da diese sehr stark von den vor und nachgelagerten Transportmitteln und dem damit verbundenen Automatisierungsgrad abhängt, was vorläufig eine exakte Bewertung erschwert. Dennoch erweist sich die kommerzielle Bewertung anhand der Kostenvergleichsrechnung als sinnvolles Werkzeug, da sie zusätzlich zur NWA eine Tendenz der zu erwartenden Kosten aufzeigt und somit eine weitere Entscheidungsgrundlage für die Transportmittelauswahl liefert.

Die klare Struktur und visuelle Gestaltung der Benutzeroberfläche erweist sich in der praktischen Anwendung als sehr hilfreich, da sie eine intuitive leicht erlernbare Anwendung, ohne eine umfangreiche Einarbeitungszeit ermöglicht. Die Durchführung der Methode erfolgt anhand einer schrittweisen strukturierten Vorgehensweise, die als systematischer Leitfaden zur Auswahl vertikaler Transportmittel für den stockwerksübergreifenden Materialfluss dient. Durch den Einsatz diverser standardisierter Werkzeuge ermöglicht sie eine individuelle Identifikation spezifischer Anforderungen, welche sich flexibel an den jeweiligen Anwendungsfall anpassen lassen. Die strukturierte Abarbeitung der einzelnen Schritte erleichtert eine präzise Erfassung aller relevanter Parameter, wodurch die besonderen Anforderungen und Herausforderungen des vertikalen Materialtransportes über mehrere Stockwerke explizit berücksichtigt werden können. Durch die Implementierung in Excel wird eine durchgängige Informationsübermittlung erreicht, welche in weiterer Folge eine nachvollziehbare und konsistente Bewertung sowie schlüssige Ergebnisdarstellung bewirkt. Zusammenfassend bestätigt die Analyse der Fallbeispiele sowie deren Validierung, die Praxistauglichkeit der entwickelten Methodik und demonstriert die

Anpassungsfähigkeit an diverse unternehmensspezifische Ausgangssituationen. Damit erfüllt die Methode nicht nur die in 4.1 formulierten Anforderungen an die Methode sondern liefert Unternehmen auch eine Unterstützung bei der Planung ihrer vertikalen Materialflusskonzepte über mehrere Etagen. Anhand einer technologischen und wirtschaftlichen Bewertung bietet sie schon früh im Planungsprozess eine Grundlage zur Bewertung und Auswahl innerbetrieblicher vertikaler Transportmittel.

6 Diskussion und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit reflektiert sowie die zu Beginn in Kapitel 1.2 definierten Forschungsfragen beantwortet. Anschließend wird an die Diskussion folgt ein Ausblick der Potenziale zur Weiterentwicklung der Methode auf Basis der durchgeführten Anwendungen aufgezeigt und fortführenden Forschungsbedarf ableitet.

6.1 Diskussion der Ergebnisse

Aus den dargestellten Theoretische Grundlagen (vgl. Kapitel 2) sowie den Erkenntnissen aus der Experimentelle Anwendung und Validierung der Methode (vgl. Kapitel 5) können die Forschungsfragen wie folgt beantwortet werden:

Forschungsfrage 1: *Welche Herausforderungen und Hindernisse bestehen bei der Integration vertikaler Transporttechnologien in bestehende Produktions- und Lagerprozesse?*

Die theoretischen Grundlagen und Ergebnisse der Literaturanalyse verdeutlichen, dass es wesentliche Herausforderungen gibt, welche bei der Planung und Integration vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel zu berücksichtigen sind. Dabei gilt es sowohl technische als auch sicherheitsrelevante und infrastrukturelle Aspekte zu berücksichtigen. Der entscheidende Unterschied bei der Planung des vertikalen Materialfluss im Vergleich zum Materialtransport in der Ebene liegt in der Notwendigkeit, die Schwerkraft überwindenden. Insbesondere beim vertikalen Materialtransport zur Überwindung mehrerer Stockwerke steigt der Energiebedarf, da die Last gegenüber der Schwerkraft transportiert werden muss. Dies führt zu höheren Anforderungen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit der einzelnen Transportmittel. Zusätzlich müssen die Systeme mechanisch stabil sein, da eine ungleichmäßige Lastverteilung oder unkontrollierte Bewegungen in weiterer Folge Schwingungen und Resonanzen hervorrufen können. Über die Jahre hinweg kann diese Hebe- und Senkbewegung zu einer höheren mechanischen Belastung des Systems und somit zu einem größeren Verschleiß sowie einem erhöhten Wartungsaufwand führen. Besonders die Planung der Zugänglichkeit für Reparatur- und Wartungsarbeiten sowie einer durchgängige Medienversorgung stellen dabei eine größere Hürde als beim Transport in einer Ebene dar und müssen zusätzlich berücksichtigt werden, um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. Gleichzeitig müssen bei der Integration in Bestandsgebäude vorherrschende gebäudetechnische Restriktionen berücksichtigt werden, welche es bei Neubauprojekten nicht gibt. Da viele Produktions- und Lagerhalle ursprünglich nicht zur Integration vertikaler Transportmittel konzipiert wurden, sind oftmals gebäudetechnische und infrastrukturelle Anpassungen notwendig, um Platz für neue Fördermittel zu schaffen. Darüber hinaus müssen

bestehende Gebäuderestriktionen wie z.B.: begrenzte Deckenhöhe, bestehende Strukturen, Maschinen, Treppenhäuser, Schächte, Lüftungssysteme usw. berücksichtigt werden, welche den geplanten Verlauf des Materialflusses einschränken können. Im Zuge dessen muss besonders bei älteren Fabriken die Tragfähigkeit und strukturelle Stabilität der Umgebung genauestens analysiert und berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die Tragfähigkeit sowie Stabilität der Böden, Decken, Stützen usw. ausreichend dimensioniert ist. Zusätzlich können möglicherweise strukturelle Anpassungen und Verstärkungen notwendig sein, um die Sicherheit des gesamten Systems zu gewährleisten. Möglicherweise kommt es zudem bei der Planung des Materialflusses über unterschiedliche Stockwerke zu Restriktionen im Layout, da die Platzierung von Transportmitteln durch die vorgegebene Infrastruktur maßgeblich eingeschränkt wird. Besonders sollte bei der Verortung der Quellen und Senken des stockwerksübergreifenden Transportmittels darauf geachtet werden, dass diese auf den Materialfluss abgestimmt sind und eine nahtlose Integration ermöglichen. Sind die vertikalen Transportmittel einmal verortet, so ist es auf Grund der festen Installationspunkte schwierig Änderungen im Produktionslayout durchzuführen wodurch dieser Aspekt besonders zu berücksichtigen ist, um zukünftige Anpassungen zu vermeiden. Zudem stellen sie durch die Verbindung mehrerer Etagen eine kritische Stelle im Produktionsprozess dar, wodurch eine Störung erhebliche Folgen mit sich ziehen kann. Ein technischer Defekt kann daher nicht nur Auswirkungen auf den Materialfluss haben, sondern auch zu Unfällen führen, indem das Transportgut instabil werden und aus einer Höhe herunterfallen könnte. Neben den zuvor genannten Herausforderungen unterliegen vertikale Fördersysteme daher auch strengeren Sicherheitsvorschriften, bei denen umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen und Notfallsysteme berücksichtigt werden müssen, um sowohl einen Systemausfall als auch ein Unfallrisiko zu vermeiden.

Zusammenfassend erfordert die Integration vertikaler Transportmittel eine sorgfältige Berücksichtigung aller relevanter Faktoren, um einen effizienten und sicheren Materialtransport über die verschiedenen Stockwerke zu gewährleisten. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde versucht, anhand dieser Herausforderungen zentrale Anforderungen abzuleiten (vgl. Kapitel 4.3.1), welche für eine erfolgreiche Integration zwingend erfüllt werden müssen. Um diese Problematiken direkt in die Entscheidungsfindung mitaufnehmen zu können, wurden die definierten „KO-Kriterien“ in den Fragenkatalog integriert. Dadurch wird bereits bei der Analyse der Ausgangssituation ermöglicht, potenziellen Herausforderungen frühzeitig zu erkennen, indem die für den jeweiligen spezifischen Anwendungsfall relevanten Kriterien erfasst und somit im weiteren Verlauf der Methode gezielt berücksichtigt werden können.

Forschungsfrage 2: *Wie können verschiedene vertikale Transporttechnologien bewertet und ausgewählt werden, um die geeignetste Lösung für das definierte Zielsystem zu identifizieren?*

Zur effizienten Auswahl innerbetrieblicher vertikaler Transportmittel ist es notwendig, sowohl den Nutzen als auch die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Transporttechnologien zu bewerten. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Auswahlmethodik folgt einer siebenstufigen Vorgehensweise, deren einzelne Schritte in einer Excel-Datei eingebettet und untereinander verknüpft sind, um einen automatisierten Auswahlprozess zu ermöglichen. Als Hilfestellung bei der Informationsgewinnung und Analyse der Ausgangssituation dient der entwickelte Fragenkatalog, indem anhand vordefinierter Fragen wichtige „KO-Kriterien“ der Transportmittelauswahl und der zuvor identifizierten Herausforderungen bei der Planung vertikaler Transportmittel, systematisch erfasst werden. Dadurch können spezifische Daten erhoben werden, welche eine umfassende Grundlage zur Eingrenzung der Technologien bieten. Des Weiteren wird sichergestellt, dass alle relevanten Einflussgrößen und unternehmensspezifische Anforderungen frühzeitig ermittelt werden. Die Sammlung aller Daten erfolgt in einer vordefinierten Anforderungsliste, bei der sowohl die „KO-Kriterien“ aus dem Fragenkatalog und deren Ausprägungen gesammelt als auch „zusätzliche Kriterien“ anhand eines aus der Literatur entwickelten Kriterienkatalogs ergänzt werden können. Der Kriterienkatalog stellt dabei ein zentrales Element der entwickelten Methode dar und beinhaltet eine umfassende Sammlung an Kriterien der Technologieauswahl, welche als Hilfestellung für die Entscheidungsträger dienen. Um den Auswahlprozess angesichts der Vielzahl an vertikalen Transportmitteln effizienter zu gestalten, erfolgt eine Identifikation und Eingrenzung geeigneter Transportmittelalternativen. Diese Vorselektion basiert auf den zuvor in der Anforderungsliste definierten Forderungen („KO-Kriterien“), welche durch einen automatischen Abgleich mittels vordefinierter Standardkennwerten beurteilt werden. Wird ein Kriterium nicht erfüllt, so wird die Alternative aus dem weiteren Entscheidungsprozess eliminieren. Nach abgeschlossener Einschränkung der Alternativen können die, für die Nutzwertanalyse notwendigen Entscheidungskriterien aus dem Kriterienkatalog ausgewählt werden. Hierbei werden sowohl quantitative Kennwerte als auch qualitative Kriterien nach Bedarf ausgewählt, um eine vielseitige Entscheidung und einen Spielraum bei der unternehmensspezifischen Anpassung der Materialflussplanung zu ermöglichen. Diese Kriterien werden als „zusätzliche Kriterien“ in der Anforderungsliste gesammelt und durch den Entscheidungsträger in übergeordnete Kriteriengruppen zusammengeführt. Um die Präferenzen des Unternehmens in der Entscheidungsfindung abbilden zu können, erfolgt anschließend eine Zuordnung von Gewichtungsfaktoren zu den übergeordneten Gruppen und den einzelnen Entscheidungskriterien. Anschließend werden alle Kriterien und deren Gesamtgewichtung sowie die verbleibenden Transportmittelalternativen in die

Nutzwertmatrix überführt und hinsichtlich ihrer Zielerfüllung bewertet. Zur Berücksichtigung ökonomischer Aspekte erfolgt ergänzend zur Nutzwertanalyse eine Kostenvergleichsrechnung, welche die jährlichen Fix- und variablen Kosten der einzelnen Technologien gegenübergestellt. Die kombinierte Anwendung von Nutzwertanalyse und Kostenvergleichsrechnung ermöglicht dabei eine fundierte Auswahl vertikaler Transportmittel, bei der sowohl monetäre als auch nicht monetäre Aspekte getrennt voneinander bewertet und miteinander verglichen werden können. Durch die visuelle Aufbereitung der Berechnungen und Ergebnisse in Form von Tabellen und Diagramme wird eine nachvollziehbare und transparente Entscheidungsfindung ermöglicht.

Forschungsfrage 3: *Welcher Nutzen entsteht durch den Einsatz dieser Auswahlmethodik und welche Einschränkungen ergeben sich in der praktischen Anwendung?*

Um den Nutzen der entwickelten Methode bewerten zu können, wurde diese in Kapitel 5 von Personen aus der Industrie und Wissenschaft anhand praktischer Fallbeispiele angewendet und validiert. Die Methode zeichnet sich vor allem im frühen Planungsprozess aus, wenn begrenzte oder vermehrt ungenaue Informationen für die Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen. Im Vergleich zu den bestehenden, oft komplexen und undurchsichtigen Methoden zur Technologieauswahl bietet die vorliegende Methode eine transparente und intuitive Vorgehensweise. Der Entscheidungsträger wird dabei mittels leicht verständlicher und standardisierter Werkzeuge (Fragebogen, Anforderungsliste, Kriterienkatalog usw.) systematisch durch den Auswahlprozess geführt. Da in vielen Unternehmen oftmals nicht ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen, um bereits zu Beginn der Planung eine detaillierte Bewertung durchführen zu können, eignet sich die Methode besonders aufgrund ihrer intuitiven Vorgehensweise zur Analyse der Ausgangssituation. Sie ermöglicht eine schnelle und strukturierte Herangehensweise bei der Erfassung und Implementierung aller relevanter Daten, sodass eine erste vorläufige Auswahl und Einschätzung getroffen werden kann. Der standardisierte Fragenkatalog ermöglicht dabei vor allem zu Beginn der Materialflussplanung eine systematische Sammlung unternehmensspezifischer Informationen, da anhand strukturierter Fragen alle wichtigen Aspekte ermittelt werden können. Es werden dabei essenzielle Kriterien für die Planung einer Transportaufgabe sowie besondere Herausforderungen, welche sich bei der Planung und Integration vertikaler Transportmittel ergeben, erfasst. Dabei können vor allem unternehmensspezifische Anforderungen und infrastrukturelle Rahmenbedingungen präzise abgebildet und für den weiteren Verlauf des Planungsprozesses vermerkt werden. Dies erleichtert nicht nur die Planung vertikaler Fabrikkonzepte, sondern unterstützt Unternehmen durch eine einfache Sammlung aller relevanten Anforderungen und hilft dabei potenzielle Einschränkungen für den vertikalen Materialfluss schon gezielt zu Beginn des Planungsprozesses zu

berücksichtigen. Ein weiteres zentrales Element der Methode ist die automatische Identifikation geeigneter Alternativen. Diese gezielte Eingrenzung ermöglicht den weiteren Arbeitsaufwand zu reduzieren, indem ungeeignete Optionen frühzeitig ausgeschlossen und somit lediglich die für den Anwendungsfall relevanten Alternativen im weiteren Verlauf berücksichtigt werden. Die Bewertung erfolgt dabei auf Basis des beantworteten Fragebogens, indem bereits automatisch ein Abgleich der eingegebenen anwendungsspezifischen Kriterien mit hinterlegten Standardkennwerten relevanter Technologien vorgenommen wird. Dadurch wird ermöglicht, dass ungeeignete Alternativen bereits früh im Planungsprozess systematisch ausgeschlossen werden können. Die Methode erlaubt es somit, die Anzahl potenzieller Transporttechnologien einzugrenzen, ohne über tiefgehende Hintergrundinformationen und Vorkenntnisse der einzelnen vertikalen Transportmittel zu verfügen. Dies ermöglicht nicht nur erfahrenen Planern eine Eingrenzung der Alternativen durchzuführen, sondern auch weniger erfahrene Personen können, ohne viele Vorkenntnisse oder aufwändige und zeitintensive Einarbeitung die Methode anwenden. Dadurch wird eine effizientere, von Experten unabhängige Durchführung ermöglicht. Der in die Methodik integrierte Kriterienkatalog bietet eine Zusammenfassung wichtiger in der Literatur verankerten Aspekte der Technologieauswahl und dient dabei als Hilfestellung zur Identifikation relevanter Kriterien. Darin werden sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien angeführt, welche eine spezifische Anpassung an die vorliegende Ausgangssituation ermöglichen. Dieser Katalog fungiert als Nachschlagewerk, um Entscheidungsträgern bei der Auswahl von Entscheidungskriterien und der Identifikation von weniger offensichtlichen Parametern der Transportmittelauswahl zu helfen. Dies ermöglicht es den Entscheidungsträger relevante Aspekte systematisch auszuwählen, um eine objektive Auswahl treffen zu können. Zusätzlich liefert die Kostenvergleichsrechnung eine fundierte kommerzielle Bewertung, die eine frühzeitige Abschätzung der Kosten ermöglicht, indem lediglich ein paar zusätzliche Inputdaten angegeben werden müssen. Dies ermöglicht es, ökonomische Überlegungen bereits früh in der Planung zu berücksichtigen und somit eine weiterführende strategische Planung zu erleichtern. Anhand der kombinierten Anwendung von Fragebogen, Kriterienkatalog, Nutzwertanalyse und Kostenvergleichsrechnung wird eine strukturierte Entscheidungsfindung und ganzheitliche Betrachtung von technischen, funktionellen und wirtschaftlichen Faktoren ermöglicht. Der Einsatz standardisierter Werkzeuge ist wegbereitend für eine reproduzierbare und verständliche Ergebnisfindung, ohne dass ein erheblicher Schulungsaufwand erforderlich ist. Die Anwendung der Methode unterstützt Unternehmen nicht nur bei der Planung ihrer vertikalen Produktions- und Lagerprozessen, sondern stellt durch eine systematische Erfassung aller relevanten Rahmenbedingungen sowie der Berücksichtigung unternehmensspezifischen Präferenzen eine fundierte Grundlage für die Auswahl innerbetrieblicher vertikaler Transportmittel dar.

Durch die Anwendung der entwickelten Auswahlmethodik anhand der Fallbeispiele konnten auch einige Einschränkungen der Methode aufgefunden werden, welche bei der praktischen Nutzung zu beachten sind. Besonders zu Beginn des Planungsprozesses stehen oft nicht alle relevanten Informationen zur Verfügung. Da basierend auf den eingegebenen Daten weitere Entscheidungen getroffen werden, ist eine sorgfältige Überprüfung der verwendeten Informationen unabdingbar, um eine Bewertung mittels ungenauer oder unvollständiger Daten zu vermeiden. Dies kann im weiteren Verlauf eine Verzerrung der Bewertungsergebnisse und somit eine falsche Transportmittelauswahl zur Folge haben. Ein weiteres Problem, welches die praktische Anwendung einschränkt, stellt die Vielzahl an Varianten und Ausführungen der einzelnen Transportmitteltypen dar. Die Methode nutzt zwar zur Vorselektion eine Sammlung vordefinierte Technologiekennwerte, jedoch können sich die technischen Leistungsparameter der einzelnen vertikalen Transportmittel je nach Ausführung und Variante stark voneinander unterscheiden. Dies macht es unerlässlich, eine größere Datenbasis zu erstellen, welche es ermöglicht die Bandbreite an Technologien und deren entsprechende Kennwerte in die Entscheidungsfindung miteinzubeziehen. Dadurch kann die Identifikation geeigneter Alternativen präzisiert und in weiterer Folge auch die Entscheidungsfindung erleichtert werden. Trotz der strukturierten Vorgehensweise besteht zudem die Gefahr, dass die Entscheidungsfindung anhand der Nutzwertanalyse durch subjektive Einschätzungen und persönliche Präferenzen beeinflusst wird. Da die Auswahl, Gewichtung und Bewertung der einzelnen Entscheidungskriterien bei der Nutzwertanalyse durch den Entscheidungsträger erfolgt, können sich beispielsweise divergente Perspektiven, Erfahrungen, Werte und Vorlieben des Entscheidungsträgers auf das Auswahlverfahren auswirken und somit eine unbewusste Verzerrung der Ergebnisse hervorrufen. Die praktische Anwendbarkeit der Methodik setzt zudem voraus, dass die Durchführung üblicherweise durch einen Anwender erfolgt, der über gewisse Hintergrundinformationen oder Expertise zu den jeweiligen Technologien verfügt. Um ein belastbares Ergebnis der Nutzwertanalyse zu erhalten, wird daher zur korrekten Bewertung der Zielwerte ein fundiertes technisches Grundverständnis der vertikalen Transportmitteltechnologien gefordert. Wie aus den Fallbeispielen hervorgeht, kann bei fehlendem Fachwissen zwar eine solide Identifikation geeigneter Transportmittel erfolgen, jedoch führt der Mangel an Expertise zu einer fehlerhaften Bewertung der Zielwerte und somit zu einem falschen Ergebnis, welches nicht die tatsächliche Eignung der Transportmittel widerspiegelt. Zur Prävention dieser Aspekte, empfiehlt es sich zusätzliches Fachpersonal in den Prozess miteinzubeziehen und diese Schritte als Gruppe durchzuführen. Dies schafft eine unterstützende Umgebung und ermöglicht somit die Unsicherheiten bei der Bewertung zu verringern. Um eine fundierte Entscheidungsfindung auch für weniger erfahrene Anwender zu ermöglichen, kann als Weiterentwicklung der Methode eine zusätzliche Datenbasis, für die aus dem Kriterienkatalog zu entnehmenden Entscheidungskriterien aufgebaut werden, welche

dann als Grundlage zur Bewertung der einzelnen Transportmittel herangezogen wird. Obwohl die Methodik derzeit in einer Excel-Datei umgesetzt ist, stößt sie bei komplexen und umfangreichen Anwendungsfällen bereits an ihre Grenzen. Die Anwendung der Methode in Excel ermöglicht zwar eine unkomplizierte und einfache Durchführung, jedoch sind die Möglichkeiten der Datenverarbeitung und Automatisierung begrenzt. Aus diesem Grund erscheint eine Implementierung der Methode in eine andere Softwareanwendung als sinnvoll, um die Benutzerfreundlichkeit weiter zu erhöhen.

Abschließend ist zu betonen, dass es sich bei der entwickelten Auswahlmethode um kein exaktes Berechnungsverfahren handelt, sondern als strukturierte Entscheidungshilfe zu verstehen ist, die insbesondere zu Beginn des Planungsprozesses Anwendung findet. Sie dient vor allem dazu, basierend auf der vorliegenden Ausgangssituation und den häufig ungenauen Daten eine erste Technologieauswahl zu treffen und somit eine frühzeitige Einschätzung zu ermöglichen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen gilt es im weiteren Planungsverlauf zusätzliche fachliche Expertise miteinzubeziehen, um detaillierte technische und wirtschaftliche Analysen aufzustellen, welche notwendig sind, um schlussendlich eine konkrete Investitionsentscheidung treffen zu können.

6.2 Ausblick

Zusätzlich zu den zuvor in Kapitel 6.1 beantworteten Forschungsfragen gibt der letzte Abschnitt einen Ausblick auf Weiterentwicklungsmöglichkeiten der vorgestellten Auswahlmethode und zusätzlichen Forschungsbedarf.

Wie mittels der unterschiedlichen Fallstudien aufgezeigt wurde, lässt sich die Methode nicht als ein starres Instrument, sondern vielmehr als flexibles Rahmenkonzept verstehen, das individuell auf die spezifischen Anforderungen bei unterschiedlichen Anwendungsfällen angepasst werden kann. Um die Entscheidungsfindung in der Nutzwertanalyse auch für weniger erfahrenen Anwendern zu erleichtern, könnte der Kriterienkatalog mit zusätzlich Kennwerten und Daten der einzelnen Technologien erweitert werden. Durch diese hinterlegten Kennwerte wird ein Vergleich zwischen den einzelnen Technologien ermöglicht, wodurch eine automatisierte Zuordnung von Zielwerten zu den Entscheidungskriterien denkbar wäre. Dadurch könnte die Bewertung der einzelnen Alternativen auch mit weniger Vorwissen und Expertise durchgeführt werden, da diese bereits für manche Kriterien automatisch erfolgt. Eine weitere Ergänzung der entwickelten Methode, stellt die Weiterentwicklung der hinterlegten Standardkennwerte für vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel dar. Durch die Erweiterung des Transportmittelkatalogs, wäre eine noch präzisere Auswahl der unterschiedlicher Alternativen und diverser Varianten eines Transportmitteltyps denkbar. Zur Ausarbeitung eines solchen Transportmittelkataloges könnte eine

dynamische Datenbank in die Methodik integriert werden, welche die spezifischen Kennwerte kontinuierlich aktualisiert, um sicherzustellen, dass die Transportmittelauswahl basierend auf dem neusten Stand der Technik erfolgen kann. Dafür wäre beispielsweise ein Natural Language Processing (NLP)-Modell denkbar, welches automatisch diverse Informationen und Kennwerte aus Herstellerkatalogen, wissenschaftlicher Publikationen und Fachliteratur sowie Onlinedatenbanken extrahiert und automatisch in die Transportmitteldatenbank hinzufügt. Die Integration einer solch umfangreichen Datenbank könnte dazu führen, dass die Handhabung und Umsetzung in Excel unübersichtlich wird, wodurch die Implementierung der Methode in eine datenbankunterstützte Softwareanwendung eine sinnvolle Weiterentwicklung sein könnte. Darüber hinaus könnte die Methode in einer Webanwendung oder App überführt werden, welche anhand intuitiver Eingaben und interaktiven Visualisierungen die Benutzerfreundlichkeit noch weiter steigern könnte. Zudem wäre es dadurch möglich, dass mehrere Nutzer gleichzeitig auf den Auswahlprozess zugreifen können, um somit die interdisziplinäre Entscheidungsfindung in der Gruppe zu erleichtern, was wiederum die Anwendbarkeit im industriellen Kontext erheblich steigern könnte. Werden alle vorhandenen Daten zusätzlich auf einem cloudbasierten System hinterlegt, so kann die Methode nicht nur intern in einem Unternehmen, sondern auch standortunabhängig oder von Dritten genutzt werden. Ein weiterer vielversprechender Ansatz zur Weiterentwicklung und Forschung liegt in der Nutzung von Künstlicher Intelligenz (KI). Beispielsweise könnte KI eingesetzt werden, um anhand von 3D-Scannern die räumlichen Gegebenheiten eines Bestandsgebäudes zu analysieren und direkt relevante Rahmenbedingungen wie die Raumhöhe, vorhandene Schachtsysteme oder andere infrastrukturelle Einschränkungen selbstständig zu ermitteln und in die Methode einzubinden. Zusätzlich könnten 3D-Scanner und Sensoren dazu verwendet werden Echtzeitdaten des bestehenden Produktionsprozesses wie Transportfrequenz, Abmaße der Transporteinheit, Taktzeit usw. zu erfassen und in die Auswahlmethodik zu integrieren. Durch maschinelles Lernen besteht zudem die Möglichkeit, dass KI-basierte Algorithmen anhand von Best Practice Beispielen und historischer Auswahlentscheidungen bei der Materialflussplanungen über mehrere Stockwerke trainiert werden. Anhand dieser Daten kann das System aus vorangegangenen Entscheidungen lernen und somit vorausschauende Empfehlungen für den vorliegenden Anwendungsfall ableiten.

Der in diesem Kapitel beschriebene Ausblick zeigt ein erhebliches Potenzial zur Weiterentwicklung der Auswahlmethodik, indem durch diverse Datenbanken ein noch präziserer Vergleich der vielen vorhandenen Transportmitteltechnologien ermöglicht wird. Durch die Integration modernster Technologien wie NLP-Modellen, KI, Maschinelles Lernen lassen sich nicht nur die Genauigkeit und Anwenderfreundlichkeit der Methode erhöhen, sondern langfristig gesehen auch automatisierte Empfehlungen optimaler Transportlösungen bewerkstelligen.

7 Literaturverzeichnis

- Ackermann, K. (1993). *Geschoßbauten für Gewerbe und Industrie*. Dt. Verlag-Anst.
- Agarwal, D., & Bharti, P. S. (2022). A case study on AGV's alternatives selection problem. *International Journal of Information Technology*, 14(2), 1011–1023. <https://doi.org/10.1007/s41870-018-0223-z>
- Alao, M. A., Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Popoola, O. M. (2020). Multi-criteria decision based waste to energy technology selection using entropy-weighted TOPSIS technique: The case study of Lagos, Nigeria. *Energy*, 201, 117675. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117675>
- Arnold, D., & Furmans, K. (2005). *Materialfluss in Logistiksystemen* (7. Aufl.). New York: Springer.
- Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., & Tempelmeier, H. (2008). *Handbuch logistik*.
- Aruldos, M., Lakshmi, T. M., & Venkatesan, V. P. (2013). A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1), 31–43.
- Awasthi, A., Chauhan, S. S., & Omrani, H. (2011). Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12270–12280. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.005>
- Azhar, N., Mohamed Radzi, N. A., & Wan Ahmad, W. S. H. M. (2021). Multi-Criteria Decision Making: A Systematic Review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, 14. <https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443>
- Balezantis, T., Streimikiene, D., & Siksnyte-Butkiene, I. (2021). Energy storage selection for sustainable energy development: The multi-criteria utility analysis based on the ideal solutions and integer geometric programming for coordination degree. *Environmental Impact Assessment Review*, 91. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106675>
- Basílio, M. P., Pereira, V., Costa, H. G., Santos, M., & Ghosh, A. (2022). A Systematic Review of the Applications of Multi-Criteria Decision Aid Methods (1977–2022). *Electronics*, 11(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/electronics11111720>
- Bathen, A., Bunse, J., Gärtner, S., Meyer, K., Lindner, A., Schambelon, S., Schonlau, M., & Westhoff, S. (2019). *HANDBUCH URBANE PRODUKTION*.
- Bechmann, A. (1978). *Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung*.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>
- Belton, V. (1986). A comparison of the analytic hierarchy process and a simple multi-attribute value function. *European Journal of Operational Research*, 26(1), 7–21. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90155-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90155-4)
- Belton, V., & Stewart, T. (2012). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Springer Science & Business Media.
- Benoit, V., & Rousseaux, P. (2003). Aid for aggregating the impacts in Life Cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(2), 74. <https://doi.org/10.1007/BF02978430>
- Bokranz, R., & Landau, K. (2012). *Handbuch Industrial Engineering*. Schäffer-Poeschel.

- Braglia, M., Gabbrielli, R., & Miconi, D. (2001). Material handling device selection in cellular manufacturing. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 10(6), 303–315. <https://doi.org/10.1002/mcda.310>
- Brandt, H. S. (2008). *Stadt- und Stadtplanungsgeschichte*. W. Kohlhammer Verlag.
- Brans, J. P., Vincke, Ph., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)
- Breiting, A., & Knosala, R. (2013). *Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*. Springer-Verlag.
- Broß, F., Bräu, V., & Reinhart, G. (2017). Dimensionierung indirekter Bereiche in der Fabrikplanung: Modellierung indirekter Bereiche auf Basis unscharfer Planungsdaten in der frühen Phase der Fabrikplanung. *Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(6), 359–363. <https://doi.org/10.3139/104.111741>
- Bundesministerium der Finanzen. (2000). *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle „AV“)*—Bundesfinanzministerium—Themen. Bundesministerium der Finanzen. https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.html
- Büyüközkan, G., Feyzioğlu, O., & Göçer, F. (2018). Selection of sustainable urban transportation alternatives using an integrated intuitionistic fuzzy Choquet integral approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 186–207. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.005>
- Chakraborty, S. (2011). Applications of the MOORA method for decision making in manufacturing environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(9), 1155–1166. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2972-0>
- Chakraborty, S., & Banik, D. (2006). Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(11), 1237–1245. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2467-y>
- Chan, F. T. S., Chan, M. H., & Tang, N. K. H. (2000). Evaluation methodologies for technology selection. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1), 330–337. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00679-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00679-8)
- Chan, F. T. S., Ip, R. W. L., & Lau, H. (2001). Integration of expert system with analytic hierarchy process for the design of material handling equipment selection system. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(2), 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01038-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01038-X)
- Chen, C.-T., Lin, C.-T., & Huang, S.-F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 102(2), 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.03.009>
- Chu, T.-C., & Lin, Y.-C. (2003). A Fuzzy TOPSIS Method for Robot Selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(4), 284–290. <https://doi.org/10.1007/s001700300033>
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2013). *USE OF MULTI CRITERIA DECISION ANALYSIS TO SUPPORT LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT: AN ANALYSIS OF THE APPROPRIATENESS OF THE AVAILABLE METHODS*.

- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>
- Clausen, U., & Geiger, C. (Hrsg.). (2013). *Verkehrs- und Transportlogistik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34299-1>
- Cottin, C., & Döhler, S. (2013). *Risikoanalyse: Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00830-7>
- Cristea, M., Tîrnovan, R. A., Cristea, C., & Pică, C. S. (2018). A multi-criteria decision making approach in lighting technology selection for a production hall. *MATEC Web of Conferences* 184. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818404007>
- Dağdeviren, M. (2008). Decision making in equipment selection: An integrated approach with AHP and PROMETHEE. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(4), 397–406. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0091-7>
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). Qualitätskriterien in der empirischen Sozialforschung. In N. Döring & J. Bortz (Hrsg.), *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (S. 81–119). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5_3
- Dira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.04.001>
- Enzinger, S. (2017, Juni 12). *Bodenverbrauch gefährdet Lebensgrundlage der nächsten Generationen*. <https://www.umweltbundesamt.at/aktuelles/presse/news2017/news-170612>
- Enzinger, S. (2022, Dezember 2). *Bodenverbrauch in Österreich. 2022*. <https://www.umweltbundesamt.at/news221202>
- Enzyklo. (2024). Industriebranche. In *Enzyklo.de*. <https://www.enzyklo.de/Begriff/Industriebranche>
- Erbstößer, A.-C. (2016). *Produktion in der Stadt*. Technologiestiftung Berlin.
- Fabianek, P., Will, C., Wolff, S., & Madlener, R. (2020). Green and regional? A multi-criteria assessment framework for the provision of green electricity for electric vehicles in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102504. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102504>
- Fei, L., Xia, J., Feng, Y., & Liu, L. (2019). An ELECTRE-Based Multiple Criteria Decision Making Method for Supplier Selection Using Dempster-Shafer Theory. *IEEE Access*, 7, 84701–84716. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924945>
- Figueira, J. R., Mousseau, V., & Roy, B. (2016). ELECTRE Methods. In S. Greco, M. Ehrgott, & J. R. Figueira (Hrsg.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (S. 155–185). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_5
- Fischer, W., & Dittrich, L. (2013). *Materialfluß und Logistik: Potentiale vom Konzept bis zur Detailauslegung*. Springer-Verlag.
- Fottner, J., Galka, S., Habenicht, S., Klenk, E., Meinhardt, I., & Schmidt, T. (2022). Elemente der innerbetrieblichen Transportsysteme. In J. Fottner, S. Galka, S. Habenicht, E. Klenk, I. Meinhardt, & T. Schmidt (Hrsg.), *Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen: Fahrzeugsysteme* (S. 5–66). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63973-3_2
- Franzius, H. (1972). *Die methodische Zuordnung von Fördermittel und innerbetrieblicher Transportaufgabe*. Technische Hochschule Hannover.

- Friedrich, S., Weitz, S., & Luchsinger, Y. (2020). *Planung der vertikalen Fabrik*. Unity Consulting&Innovation AG. https://www.unity-consulting.com/fileadmin/unity/website/08_Veroeffentlichungen/2.PDFs-Artikel_Beitr%C3%A4ge/Planung_der_vertikalen_Fabrik.pdf
- Fritzsche, B., Namneck, A., Schwab, A., Kirchner, L., & Stonis, M. (2020). Wirtschaftlichkeitsbewertung von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport [Application/pdf]. *Volume 2020*, Issue 11. https://doi.org/10.2195/LJ_NOTREV_FRITZSCH_DE_202011_01
- Gaur, A. V., & Ronge, B. P. (2020). Ranking Material Handling Equipment Selection Criteria by AHP. In *Techno-Societal 2018* (S. 175–182). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16962-6_18
- Georgakellos, D. A. (2005). Technology selection from alternatives: A scoring model for screening candidates in equipment purchasing. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 02(01), 1–18. <https://doi.org/10.1142/S0219877005000393>
- Georgiadis, D. R., Mazzuchi, T. A., & Sarkani, S. (2013). Using multi criteria decision making in analysis of alternatives for selection of enabling technology. *Systems Engineering*, 16(3), 287–303. <https://doi.org/10.1002/sys.21233>
- Gershon, M., & Duckstein, L. (1983). An Algorithm for Choosing of a Multiobjective Technique. In P. Hansen (Hrsg.), *Essays and Surveys on Multiple Criteria Decision Making* (S. 53–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46473-7_6
- Ghazinoory, S., Daneshmand-Mehr, M., & Azadegan, A. (2013). Technology selection: Application of the PROMETHEE in determining preferences—a real case of nanotechnology in Iran. *Journal of the Operational Research Society*, 64(6), 884–897. <https://doi.org/10.1057/jors.2012.45>
- Giuliano, G. (1985). A multicriteria method for transportation investment planning. *Transportation Research Part A: General*, 19(1), 29–41. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(85\)90004-4](https://doi.org/10.1016/0191-2607(85)90004-4)
- Groover, M. P. (2001). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*.
- Grosseschallau, W. (2013). *Materialflußrechnung: Modelle und Verfahren zur Analyse und Berechnung von Materialflußsystemen*. Springer-Verlag.
- Gudehus, T. (2010). *Grundlagen· Strategien· Anwendungen*. (3. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg New York.
- Guitouni, A., & Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501–521. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3)
- Günthner, W. A., Wilke, M., & Heinecker, M. (2006). *Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen*.
- Haag, C., Schuh, G., Kreysa, J., & Schmelter, K. (2011). Technologiebewertung. In G. Schuh & S. Klappert (Hrsg.), *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2* (S. 309–366). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12530-0_11
- Hadi-Vencheh, A., & Mohamadghasemi, A. (2015). A new hybrid fuzzy multi-criteria decision making model for solving the material handling equipment selection problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(5), 534–550. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.880948>
- Haselsteiner, E., Frey, H., Laa, B., Madner, V., & Tschokert, L.-M. (2023). *Vertical URBAN Factory – Neue vertikale STADT-Fabriken: Modulare Modellkonzepte*

- für mehrgeschossige Urbane Produktion am Beispiel Wien (S. 245–262). https://doi.org/10.1007/978-3-662-66771-2_13
- Haselsteiner, E., Frey, H., Madner, V., Grob, L.-M., Winder, M., Schwaigerlehner, K., & Haselsteiner, J. (2019). *VERTICAL urban FACTORY - Innovative Konzepte der vertikalen Verdichtung von Produktion und Stadt. Teil 1: Produktion und Stadt im Kontext*. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/39774>
- Haurant, P., Oberti, P., & Muselli, M. (2011). Multicriteria selection aiding related to photovoltaic plants on farming fields on Corsica island: A real case study using the ELECTRE outranking framework. *Energy Policy*, 39(2), 676–688. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.040>
- Helbing, K. W. (2010). *Handbuch Fabrikprojektierung*. Springer-Verlag.
- Hevner, A. R. (2007). *A Three Cycle View of Design Science Research*. 19.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hoffmeister, W. (2008). *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen*. BWV Verlag.
- Hompel, M. ten, Schmidt, T., & Dregger, J. (2018). *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*. Springer-Verlag.
- Hoppe, N. H., & Freitag, M. (2023). Implementation and evaluation of an assistance software to support decision-making, design and simulation setup for automated guided vehicle systems. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 10345–10350. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1045>
- Hoppe, N., Rolfs, L., Petzoldt, C., Putzka, A., & Freitag, M. (2022). Planung und anforderungsgerechte Auswahl von FTS/Requirement-appropriate recommendation for automated guided vehicle systems. *wt Werkstattstechnik online*, 112, 232–237. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-04-32>
- Hummel, J. M., & IJzerman, M. J. (2011). The Past and Future of the AHP in Health Care Decision Making. *Proceedings of the XI Symposium ISAHP 2011*, nr. 111-1/6. <https://research.utwente.nl/en/publications/the-past-and-future-of-the-ahp-in-health-care-decision-making>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Methods for Multiple Attribute Decision Making. In C.-L. Hwang & K. Yoon (Hrsg.), *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey* (S. 58–191). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- İç, Y. T. (2012). An experimental design approach using TOPSIS method for the selection of computer-integrated manufacturing technologies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(2), 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.09.005>
- Ishfaq, S., Ali, S., & Ali, Y. (2018). Selection of Optimum Renewable Energy Source for Energy Sector in Pakistan by Using MCDM Approach. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2(1), 61–71. <https://doi.org/10.1007/s41660-017-0032-z>
- Jeffery, M. (2004). Return on Investment Analysis for E-business Projects. In H. Bidgoli (Hrsg.), *The Internet Encyclopedia* (1. Aufl.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/047148296X.tie154>
- Jiamruangjarus, P., & Naenna, T. (2016). An integrated multi-criteria decision-making methodology for conveyor system selection. *Cogent Engineering*, 3(1), 1158515. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1158515>

- Jiang, Z., Zhang, H., & Sutherland, J. (2011). Development of multi-criteria decision making model for remanufacturing technology portfolio selection. *Journal of Cleaner Production - J CLEAN PROD*, 19, 1939–1945. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.010>
- Julistiono, E. K., Oldfield, P., & Cardellicchio, L. (2023). Vertical Extensions: Stakeholder Perspectives on Development Decisions and Construction Strategies. *Journal of Architectural Engineering*, 29(2), 04023010. <https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1474>
- Jünemann, R., & Schmidt, T. (1999). *Materialflußsysteme. Systemtechnische Grundlagen*. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/290056>
- Kangas, A., Kangas, J., & Pykäläinen, J. (2001). Outranking methods as tools in strategic natural resources planning. *Silva Fennica*, 35(2). <https://doi.org/10.14214/sf.597>
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2013). Material Handling Equipment Selection Using Weighted Utility Additive Theory. *Journal of Industrial Engineering*, 2013(1), 268708. <https://doi.org/10.1155/2013/268708>
- Karim, R., & Karmaker, C. (2016). Machine Selection by AHP and TOPSIS Methods. *American Journal of Industrial Engineering(AJIE)*, 4, 7–13. <https://doi.org/10.12691/ajie-4-1-2>
- Kengpol, A., & O'Brien, C. (2001). The development of a decision support tool for the selection of advanced technology to achieve rapid product development. *International Journal of Production Economics*, 69(2), 177–191. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00016-5)
- Kettner, H., Schmidt, J., & Greim, H.-R. (1984). *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung*. Hanser.
- Kharat, M. G., Raut, R. D., Kamble, S. S., & Kamble, S. J. (2016). The application of Delphi and AHP method in environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 27(4), 427–440. <https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2014-0133>
- Kharitonov, V. V., & Kosterin, N. N. (2017). Criteria of return on investment in nuclear energy. *Nuclear Energy and Technology*, 3(3), 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2017.08.006>
- Khatri, J., & Srivastava, M. (2016). Technology selection for sustainable supply chains. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*, 15(3), 275–289. https://doi.org/10.1386/tmsd.15.3.275_1
- Klaus, P., & Krieger, W. (2013). *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Springer-Verlag.
- Klüver, C., Klüver, J., & Schmidt, J. (2012). *Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren: Soft Computing und verwandte Techniken*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2510-0>
- Koether, R. (2018). *Taschenbuch der Logistik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Köhler, G. (1992). Methodik und Problematik einer mehrstufigen Expertenbefragung. In J. H. P. Hoffmeyer-Zlotnik (Hrsg.), *Analyse verbaler Daten: Über den Umgang mit qualitativen Daten* (S. 318–332). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-322-90092-0_11
- Kolli, S., & Parsaei, H. R. (1992). Multi-criteria analysis in the evaluation of advanced manufacturing technology using promethee. *Computers & Industrial Engineering*, 23(1), 455–458. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(92\)90159-H](https://doi.org/10.1016/0360-8352(92)90159-H)

- Komax. (2020). *Vertikale Fabrik – Komax hat zukunftsweisenden Neubau bezogen | Komax*. <https://www.komaxgroup.com/de/stories/vertical-factory-komax-has-moved-into-a-groundbreaking-new-building>
- König, H. (2017). Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten. *Endbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt und des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, Gröbenzell*.
- Kröll. (2007). *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung*.
- Kruse, R., Borgelt, C., Klawonn, F., Moewes, C., Steinbrecher, M., & Braune, C. (2015). *Computational Intelligence. Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, FuzzySystemen und Bayes-Netze*. (2. Aufl.). Springer Fachmedien. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-10904-2>
- Kubaschewski, M. (2016). *Ansatz zur dreidimensionalen Layoutplanung bei heterogener Raumgröße*. Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016.
- Kuechler, W., & Vaishnavi, V. (2008). The emergence of design research in information systems in North America. *Journal of Design Research*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.1504/JDR.2008.019897>
- Kühnapfel, J. B. (2019). *Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb*. Springer-Verlag.
- Kühnapfel, J. B. (2021). *Scoring und Nutzwertanalysen: Ein Leitfaden für die Praxis*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kulak, O. (2005). A decision support system for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments. *Expert Systems with Applications*, 29(2), 310–319. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.04.004>
- Kutzner, C., Lucas, F., Sönmez, C., Stonis, M., & Nyhuis, P. (2020). Methode zur automatisierten Transportmittelauswahl mittels Fuzzy-Logik [Application/pdf]. *Volume* 2020, *Issue* 12. https://doi.org/10.2195/LJ_NOTREV_KUTZNER_DE_202012_01
- Kutzner, C., Stonis, M., & Nyhuis, P. (2019). Konzept eines Expertensystems zur automatisierten Layout- und Transportmittelplanung: Automatisierte und integrierte Layout- und Transportsystemplanung unter Berücksichtigung logistischer und wirtschaftlicher Zielgrößen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114(3), 91–95. <https://doi.org/10.3139/104.112054>
- Lamb, M., & Gregory, M. (1997). Industrial concerns in technology selection. *Innovation in Technology Management. The Key to Global Leadership. PICMET '97*, 206–208. <https://doi.org/10.1109/PICMET.1997.653333>
- Leonhardt, T., & Anders, M. (2019). Hebezeuge und Kransysteme. In T. Schmidt (Hrsg.), *Innerbetriebliche Logistik* (S. 63–71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57930-5_3
- Lewis, J. R. (2002). Psychometric Evaluation of the PSSUQ Using Data from Five Years of Usability Studies. *International Journal of Human-Computer Interaction*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447318.2002.9669130>
- LIANG, G.-S., & WANG, M.-J. J. (1991). A fuzzy multi-criteria decision-making method for facility site selection. *International Journal of Production Research*, 29(11), 2313–2330. <https://doi.org/10.1080/00207549108948085>
- Liu, M., Qin, W., & Yang, S. (2023). Analysis of the Advantages and Disadvantages of Four Comprehensive Evaluation Methods. *Frontiers in Business, Economics and Management*, 9(3), 162–167. <https://doi.org/10.54097/fbem.v9i3.9578>

- Maniya, K. D., & Bhatt, M. G. (2011). A multi-attribute selection of automated guided vehicle using the AHP/M-GRA technique. *International Journal of Production Research*, 49(20), 6107–6124. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.518988>
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research - Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516–571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Martin, H. (2013). *Praxiswissen Materialflußplanung: Transportieren, Handhaben, Lagern, Kommissionieren*. Springer-Verlag.
- Martin, H. (2016). *Transport- und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit*. Springer-Verlag.
- Martin, H. (2021). *Technische Transport- und Lagerlogistik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-34037-7>
- Mavris, D. N., & Kirby, M. R. (1999). TECHNOLOGY IDENTIFICATION, EVALUATION, AND SELECTION FOR COMMERCIAL TRANSPORT AIRCRAFT. *For Presentation at the 58th Annual Conference Of Society of Allied Weight Engineers, Inc. San Jose, California*.
- Mergias, I., Moustakas, K., Papadopoulos, A., & Loizidou, M. (2007). Multi-criteria decision aid approach for the selection of the best compromise management scheme for ELVs: The case of Cyprus. *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), 706–717. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.071>
- Mirhosseyni, S. H. L., & Webb, P. (2009). A Hybrid Fuzzy Knowledge-Based Expert System and Genetic Algorithm for efficient selection and assignment of Material Handling Equipment. *Expert Systems with Applications*, 36(9), 11875–11887. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.04.014>
- Mitra, D. S., & Goswami, S. S. (2019). Selection of the Desktop Computer Model by AHP-TOPSIS Hybrid MCDM Methodology. 6(1). http://ijrar.com/upload_issue/ijrar_issue_20542876.pdf
- Mitra, S., & Goswami, S. S. (2019). Application of Simple Average Weighting Optimization Method in the Selection of Best Desktop Computer Model. *Advanced Journal of Graduate Research*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.21467/ajgr.6.1.60-68>
- Muerza, V., de Arcocha, D., Larrodé, E., & Moreno-Jiménez, J. M. (2014). The multicriteria selection of products in technological diversification strategies: An application to the Spanish automotive industry based on AHP. *Production Planning & Control*, 25(8), 715–728. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.798089>
- Mühlbacher, A. C., & Kaczynski, A. (2013). Der Analytic Hierarchy Process (AHP): Eine Methode zur Entscheidungsunterstützung im Gesundheitswesen. *PharmacoEconomics German Research Articles*, 11(2), 119–132. <https://doi.org/10.1007/s40275-014-0011-8>
- Nalmpantis, D., Roukouni, A., Genitsaris, E., Stamelou, A., & Naniopoulos, A. (2019). Evaluation of innovative ideas for Public Transport proposed by citizens using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *European Transport Research Review*, 11(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0356-6>
- Neufert, E. (2016). *Neufert Bauentwurfslehre: Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlage, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte mit dem Menschen als Maß und Ziel : Handbuch für den Baufachmann, Bauherrn, Lehrenden und Lernenden* (41., überarbeitete und aktualisierte Auflage). Springer Vieweg.

- Noosten, D. (2018). *Investitionsrechnung: Eine Einführung für Architekten und Bauingenieure*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-18996-9>
- Onut, S., Kara, S. S., & Mert, S. (2009). Selecting the suitable material handling equipment in the presence of vagueness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(7), 818–828. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1897-3>
- Ordoobadi, S. M. (2013). Application of AHP and Taguchi loss functions in evaluation of advanced manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9–12), 2593–2605. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4676-0>
- ÖROK. (2023). Flächeninanspruchnahme und Versiegelung in Österreich Kontextinformationen und Beschreibung der Daten für das Referenzjahr 2022. *ÖSTERREICHISCHE RAUMORDNUNGSKONFERENZ (ÖROK)*. <https://www.oerok.gv.at/raum/daten-und-grundlagen/ergebnisse-oesterreich-2022#:~:text=Neben%20Wohnsiedlungen%20sind%20Industrie%2D%2C%20Gewerbe,einer%20steigenden%20Nachfrage%20nach%20FI%C3%A4chen.>
- Oubahman, L., & Duleba, S. (2021). *Evaluation of urban public transport by using PROMETHEE method*.
- Pahl, G., & Beitz, W. (2018). *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung* (9. Aufl.). Springer-Verlag GmbH Deutschland. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7>
- Park, Y.-B. (1996). ICMES: Intelligent consultant system for material handling equipment selection and evaluation. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), 325–333. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(96\)84195-1](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)84195-1)
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- Pfeifer, H. (2013). *Grundlagen der Fördertechnik*. Springer-Verlag.
- Pfohl, H.-C. (2018). *Logistiksysteme*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56228-4>
- Rappaport, N. (2016). Preserving the Modernist Vertical Urban Factory. *Cuaderno de Notas*, 17, Article 17. <https://doi.org/10.20868/cn.2016.3487>
- Republik Österreich. (2020). *Regierungsprogramm 2020-2024 Aus Verantwortung für Österreich*. Bundeskanzleramt Österreich Ballhausplatz 2, 1010 Wien.
- Ritchey, T. (1998). Fritz Zwicky, morphologie and policy analysis. *16th EURO conference on operational analysis, Brussels*.
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision*, 31(1), 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>
- Rudolf Ölz Meisterbäcker GmbH. (2019). *Bekanntnis zum Standort Vorarlberg Ölz der Meisterbäcker erweitert Bäckerei im Wallenmahd*. [https://www.oelz.com/media/4686/download/2019-11-21%20Presseinformation_Oelz_Erweiterung_Ba%CC%88ckerei_Wallenmahd.pdf?v%](https://www.oelz.com/media/4686/download/2019-11-21%20Presseinformation_Oelz_Erweiterung_Ba%CC%88ckerei_Wallenmahd.pdf?v%20)
- Saaty, T. L. (1990). The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9–26.
- Salvador, G., Moura, M., Campos, P., Cardoso, P., Espadinha-Cruz, P., & Godina, R. (2024). ELECTRE applied in supplier selection – a literature review. *Procedia Computer Science*, 232, 1759–1768. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.174>

- Samah, M. A. A., & Manaf, L. A. (2010). *Application of AHP Model for Evaluation of Solid Waste Treatment Technology*. 1.
- Sánchez-Lozano, J. M., Serna, J., & Dolón-Payán, A. (2015). Evaluating military training aircrafts through the combination of multi-criteria decision making processes with fuzzy logic. A case study in the Spanish Air Force Academy. *Aerospace Science and Technology*, 42, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2014.12.028>
- Sauro, J., & Lewis, J. R. (2016). *Quantifying the User Experience: Practical Statistics for User Research*. Morgan Kaufmann.
- Sawant, V. B., & Mohite, S. S. (2009). Investigations on Benefits Generated By Using Fuzzy Numbers in A TOPSIS Model Developed For Automated Guided Vehicle Selection Problem. In H. Sakai, M. K. Chakraborty, A. E. Hassanien, D. Ślęzak, & W. Zhu (Hrsg.), *Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining and Granular Computing* (S. 295–302). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10646-0_36
- Scheffler, M. (2013). *Grundlagen der Fördertechnik—Elemente und Triebwerke*. Springer-Verlag.
- Schenk, M., Wirth, S., & Müller, E. (2013). *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. Springer-Verlag.
- Schuh, G., & Klappert, S. (Hrsg.). (2011). *Technologiemanagement*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12530-0>
- Schulte, C. (2013). *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*. Vahlen.
- Shen, Y.-C., Chang, S.-H., Lin, G. T. R., & Yu, H.-C. (2010). A hybrid selection model for emerging technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1), 151–166. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.05.001>
- Soénus, Dr. U. S., & Wimmers, Prof. Dr. S. (2021). *Studie „Gewerbeflächen stapeln“*. <https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/5111800/b8e357f1523314550bc41f90b4dabd97/studie-gewerbeflaechen-stapeln-data.pdf>
- Sola, A. V. H., & Mota, C. M. de M. (2012). A multi-attribute decision model for portfolio selection aiming to replace technologies in industrial motor systems. *Energy Conversion and Management*, 57, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.013>
- Soufi, Z., David, P., & Yahouni, Z. (2021). A methodology for the selection of Material Handling Equipment in manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.193>
- Statistik Austria. (2023). *Verteilung der Bruttowertschöpfung in Österreich nach Wirtschaftssektoren von 2012 bis 2022*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/217604/umfrage/anteile-der-wirtschaftssektoren-am-bruttoinlandsprodukt-oesterreichs/>
- Statistik Austria. (2024). *Anzahl der bewilligten neuen Nichtwohngebäude in Österreich nach Gebäudearten im Jahr 2023*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/421471/umfrage/anzahl-der-bewilligten-nichtwohngebäude-in-oesterreich-nach-bauweise/>
- Steck, D. (1997). Methode zur Technologiewahl bei der Produktentwicklung in der Elektronikindustrie. *EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH*.
- Stengler, M. (2012). *Bestandskonforme Weiternutzung von Fabriken*.
- Štreimikienė, D. (2013). Assessment of energy technologies in electricity and transport sectors based on carbon intensity and costs. *Technological and Economic Development of Economy*, 19(4), 606–620.

- Svatoňová, T., Herák, D., & Kabutey, A. (2015). Financial Profitability and Sensitivity Analysis of Palm Oil Plantation in Indonesia. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(4), 1365–1373. <https://doi.org/10.11118/actaun201563041365>
- Tabucanon, M. T., Batanov, D. N., & Verma, D. K. (1994). Decision support system for multicriteria machine selection for flexible manufacturing systems. *Computers in Industry*, 25(2), 131–143. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(94\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0166-3615(94)90044-2)
- Taschner, P. M. (2023). *Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung industriell genutzter Drohnen für den intralogistischen Materialtransport in Österreich* [Thesis, Technische Universität Wien]. <https://doi.org/10.34726/hss.2023.111434>
- TAXSERVICES. (o.D.). TAXSERVICES | Lohnnebenkosten. <https://www.taxservices.at/lohnnebenkosten/>
- Tuzkaya, G., Gülsün, B., Kahraman, C., & Özgen, D. (2010). An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. *Expert Systems with Applications*, 37(4), 2853–2863. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.004>
- Ulubeyli, S., & Kazaz, A. (2009). A multiple criteria decision-making approach to the selection of concrete pumps. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(4), 369–376. <https://doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.369-376>
- Umweltbundesamt. (2008). *(Bau)Land in Sicht Gute Gründe für die Verwertung industrieller und gewerblicher Brachflächen*.
- VDI. (2009). *VDI-Richtlinie 5200. Entwurf Fabrikplanung-Planungsvorgehen*. Verein Deutscher Ingenieure [VDI], Düsseldorf.
- VDI. (2011). *VDI-Richtlinie 2710 Produktion und Logistik Analyse der Wirtschaftlichkeit fahrerloser Transportsysteme (FTS)*. Beuth Verlag GmbH.
- Vecoplan. (o.D.). VKV - Vertikal Kettenförderer | Vecoplan. <https://vecoplan.com/de/produkte/foerdern/kettenfoerderer/vkv-vertikal-kettenfoerderer>
- Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). *An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods*. 10(2).
- Verma, P. K., Kumar, R., & Goindi, G. S. (2021). Evaluation of Material Handling Using MCDM Techniques: A Case Study. In P. M. Pandey, P. Kumar, & V. Sharma (Hrsg.), *Advances in Production and Industrial Engineering* (S. 389–401). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5519-0_30
- vom Brocke, J., Hevner, A., & Maedche, A. (2020). Introduction to Design Science Research. In J. vom Brocke, A. Hevner, & A. Maedche (Hrsg.), *Design Science Research. Cases* (S. 1–13). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4_1
- Wehking, K.-H. (2020). Fördertechnik. In K.-H. Wehking (Hrsg.), *Technisches Handbuch Logistik 1: Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik* (S. 511–652). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-60867-8_9
- Weijters, B., Cabooter, E., & Schillewaert, N. (2010). The effect of rating scale format on response styles: The number of response categories and response category labels. *International Journal of Research in Marketing*, 27(3), 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2010.02.004>
- Wepner, M., Egger, K., & Umweltbundesamt (Hrsg.). (2004). *Wiedernutzungspotenzial industrieller Brachflächen in Österreich*. Umweltbundesamt GmbH.
- Wiendahl, H.-H., Richard, J., & Nyhuis, P. (2023). *Handbuch Fabrikplanung, Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

- Wimmer, E. (2024). *Der raumplanerische Umgang mit flächeneffizienten Betriebsgebieten*. Technische Universität Wien.
- Wrona, T. (2013). *Globalisierung und Strategien der vertikalen Integration: Analyse — empirische Befunde — Gestaltungsoptionen*. Springer-Verlag.
- Wrycza, P., Rotgeri, M., & ten Hompel, M. (2017). Spielzeitreduktion autonomer Drohnen für den Transport eiliger Güter durch den Einsatz automatisierter Lastaufnahmemittel im Kontext eines ganzheitlich automatisierten Gesamtsystems [Application/pdf]. *Volume 2017, Issue 10*. https://doi.org/10.2195/LJ_PROC_WRYCZA_DE_201710_01
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zangemeister, C. (1976). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik* (4. Aufl.).
- Zubair, M., Maqsood, S., Omair, M., & Noor, I. (2019). *Optimization of Material Handling System through Material Handling Equipment Selection*.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessmodell in der DSRM (eigene Darstellung in Anlehnung an Peffers et al., 2007).....	5
Abbildung 2: Struktureller Aufbau der Arbeit (Eigene Darstellung)	7
Abbildung 3: Einteilung des Materialtransportes innerhalb des Betriebsgeländes (Eigene Darstellung in Anlehnung an Martin (2021)).....	9
Abbildung 4: Bestandteile eines Transportes (Eigene Darstellung).....	10
Abbildung 5: Einteilung der Transportmittel (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Günthner et al., 2006)	13
Abbildung 6: Einteilung vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel für den mehrgeschossigen Materialtransport (Eigene Darstellung)	14
Abbildung 7: Ansätze zur Entscheidungsfindung (Eigene Darstellung in Anlehnung an MKRKDTTH & SURKSH (1986) und NAIK & Chakravarty (1992)).....	36
Abbildung 8: Verteilung der Publikationen nach Forschungsbereichen (Eigene Darstellung)	47
Abbildung 9: Verteilung der Entscheidungsmethoden in den Ingenieurwissenschaften (Eigene Darstellung).....	47
Abbildung 10: Ablauf der Methode (Eigene Darstellung).....	68
Abbildung 11: Vorgehensweise mit Input- und Outputparametern (Eigene Darstellung)	71
Abbildung 12: Bewertungsschema der Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung)	87
Abbildung 13: Analyse der bewerteten Entscheidungskriterien Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	105
Abbildung 14: Analyse der Kostengruppen Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	110
Abbildung 15: Analyse der bewerteten Entscheidungskriterien Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	114
Abbildung 16: Analyse der Kostengruppen Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	115
Abbildung 17: Analyse der Kostengruppen Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)	120
Abbildung 18: Vorlage Fragebogen zur Validierung der Methode (Eigene Darstellung)	2
Abbildung 19: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 1 (Eigene Darstellung)	1
Abbildung 20: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 2 (Eigene Darstellung)	2
Abbildung 21: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 3 (Eigene Darstellung)	3
Abbildung 22: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 4 (Eigene Darstellung)	4

9 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der relativen Gruppengewichtung (Eigene Darstellung)	84
Formel 2: Berechnung der relativen Gewichtung der einzelnen Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung)	84
Formel 3: Gesamtgewichtung eines Entscheidungskriteriums (Eigene Darstellung)	84
Formel 4: Berechnung Gewichteter Teilnutzwert einer Alternative bezogen auf das Entscheidungskriterium (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Schuh & Klappert, 2011))	88
Formel 5: Berechnung Gesamtnutzwert einer Alternative (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Schuh & Klappert, 2011))	88
Formel 6: Gesamtkosten einer Alternative pro Jahr (Eigene Darstellung)	89
Formel 7: Berechnung der jährlichen Fixkosten (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))	91
Formel 8: Berechnung der jährlichen Abschreibungen für die getätigte Investitionssumme (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))	91
Formel 9: Berechnung der jährlichen Zinskosten für die getätigte Investitionssumme (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))	92
Formel 10: Berechnung der variablen Kosten (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Martin, 2016))	92
Formel 11: Berechnung der Gesamtzeit je Transportaufgabe (Eigene Darstellung)	93
Formel 12: Berechnung der Transportzeit (Eigene Darstellung)	93
Formel 13: Berechnung der Einsatzdauer pro Jahr (Eigene Darstellung)	94
Formel 14: Berechnung der Transportfrequenz pro Jahr (Eigene Darstellung)	94
Formel 15: Berechnung des Personalfaktors (Eigene Darstellung)	94
Formel 16: Berechnung der Energiekosten pro Jahr (Eigene Darstellung)	95
Formel 17: Berechnung der Instandhaltungskosten pro Jahr (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fottner et al., 2022))	96
Formel 18: Berechnung der Personalkosten pro Jahr (Eigene Darstellung)	96

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Kennwerte von Aufzügen (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))	15
Tabelle 2: Ausgewählte Kennwerte eines Säulenhebers (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))	15
Tabelle 3: Ausgewählte Kennwerte eines RGBs (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))	16
Tabelle 4: Ausgewählte Kennwerte eines Kettenförderers (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))	18
Tabelle 5: Ausgewählte Kennwert eines C- & S-Förderer (Eigene Darstellung vgl. Martin, (2021); Hompel et al., (2018))	18
Tabelle 6: Ausgewählte Kennwert für Kreisförderer (Eigene Darstellung vgl. Hompel et al., (2018))	19
Tabelle 7: Ausgewählte Kennwert einer Druckluftförderanlage (Eigene Darstellung vgl. (Wehking, 2020))	20
Tabelle 8: Ausgewählte Kennwert eines Becherwerks (Eigene Darstellung vgl. (Martin, 2021))	20
Tabelle 9: Best Practice Beispiele für vertikale Gebäudeerweiterungen und mehrstöckige Produktion (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Haselsteiner et al., 2019))	31
Tabelle 10: Methoden aus der Literatur zur innerbetrieblichen Transportmittelauswahl (Eigene Darstellung)	49
Tabelle 11: Vergleich der der in der Literatur verwendeten Methoden zur Technologiebewertung und -auswahl (Eigene Darstellung)	56
Tabelle 12: Verwendete Auswahlkriterien in der Literatur (Eigene Darstellung)	59
Tabelle 13: KO-Kriterien zur Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel (Eigene Darstellung)	63
Tabelle 14: Kriterienliste bezüglich allgemeiner Anforderungen (Eigene Darstellung)	63
Tabelle 15: Kriterien bezüglich des Transportprozess (Eigene Darstellung)	64
Tabelle 16: Kriterien bezüglich des Transportmittels (Eigene Darstellung)	66
Tabelle 17: Fragebogen zur Analyse der Ausgangssituation (Eigene Darstellung) ..	77
Tabelle 18: Schematische Auswahl zusätzliche Kriterien aus dem Kriterienkatalog (Eigene Darstellung)	79
Tabelle 19: Anforderungsliste Transportmittelauswahl (Eigene Darstellung)	79
Tabelle 20: Identifikation und Vorauswahl möglicher Alternativen (Eigene Darstellung)	80
Tabelle 21: Auflistung und Beschreibung der ausgewählten Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung)	83
Tabelle 22: Schematische Gewichtung der Entscheidungskriterien (Eigene Darstellung in Anlehnung an Kühnapfel (2021))	85

Tabelle 23: Schematische Darstellung einer fehlerhaften Gewichtung (Eigene Darstellung)	85
Tabelle 24: Nutzwertanalyse zur Bewertung innerbetrieblicher vertikaler Transportmittelalternativen (Eigene Darstellung in Anlehnung an (Schuh & Klappert, 2011))	88
Tabelle 25: Zusammensetzung der Gesamtkosten (Eigene Darstellung)	90
Tabelle 26: Allgemeine Inputdaten zur kommerziellen Bewertung (Eigene Darstellung)	90
Tabelle 27: Transportmittelspezifische Inputdaten zur kommerziellen Bewertung (eigene Darstellung)	91
Tabelle 28: Nebenrechnung notwendiger Parameter zur kommerziellen Bewertung (Eigene Darstellung)	95
Tabelle 29: Kommerzielle Bewertung (Eigene Darstellung)	97
Tabelle 30: PSSUQ-Fragebogen zur Validierung (Eigene Darstellung)	101
Tabelle 31: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	104
Tabelle 32: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	104
Tabelle 33: Analyse der kommerziellen Bewertung Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	106
Tabelle 34: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	108
Tabelle 35: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	108
Tabelle 36: Analyse der Kriterienruppen Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	109
Tabelle 37: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	113
Tabelle 38: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	113
Tabelle 39: Entscheidungskriterien Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)	118
Tabelle 40: Nutzwertmatrix Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)	118
Tabelle 41: Analyse der kommerziellen Bewertung Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)	119
Tabelle 42: Standardkennwerte vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel (Eigene Darstellung)	1
Tabelle 43: Fragenkatalog Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	1
Tabelle 44: Anforderungsliste Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	2
Tabelle 45: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	2
Tabelle 46: Gewichtung Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	3
Tabelle 47: Kommerzielle Bewertung Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)	3
Tabelle 48: Fragenkatalog Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	4
Tabelle 49: Anforderungsliste Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	5
Tabelle 50: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	5
Tabelle 51: Gewichtung Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	6
Tabelle 52: Kommerzielle Bewertung Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)	6
Tabelle 53: Fragenkatalog Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	7
Tabelle 54: Anforderungsliste Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	8

Tabelle 55: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	8
Tabelle 56: Gewichtung Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)	9
Tabelle 57: Kommerzielle Bewertung Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung).....	9
Tabelle 58: Fragenkatalog Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung).....	10
Tabelle 59: Anforderungsliste Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung).....	11
Tabelle 60: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)	11
Tabelle 61: Gewichtung Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)	12

11 Abkürzungsverzeichnis

DSRM	Design Science Research Methodology
THM	Transporthilfsmittel
KLT	Kleinladungsträger
GLT	Großladungsträger
€	Euro
h	Stunde
d	Tag
a	Jahr
max.	maximal
m	Meter
mm	Millimeter
Kg	Kilogramm
m/s	Meter pro Sekunde
kW	Kilowatt
vgl.	vergleiche
u./o.Ä.	und/oder Ähnliche/s
z.B.:	Zum Beispiel
usw.	und so weiter
bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
etc.	et cetera
AHP	Analytischer Hierarchieprozess
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
NPV	Net present value - Kapitalwertmethode
IRR	Internal rate of return -Methode des internen Zinsfluss
PBP	Payback period - Amortisationszeit
ROI	Rreturn on investment - Kapitalrendite
MCDM	Multiple Criteria Decisions Making - multikriteriellen Entscheidungsfindung
MODM	Multiple Objective Decisions Making
MADM	Multiple Attribute Decision Making
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MHE	Material handling equipment
MHESP	Material handling equipment selection problem
FTS	Fahrerloses Transportfahrzeuges
F	Forderungen
W	Wünsche
MTM	„Methods Time Measurement“
LKW	Lastkraftwagen
PKW	Personenkraftwagen
KI	Künstliche Intelligenz
ML	Maschinelles Lernen
NLP	Natural Language Processing

12 Anhang

Inhaltsverzeichnis

Anhang A: Standardkennwerte vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel	1
Anhang B: Vorlage PSSUQ-Fragebogen zur Validierung der Methode	2
Anhang C: Fallbeispiele	1
Anhang C1: Fallbeispiele 1	1
Anhang C2: Fallbeispiele 2	4
Anhang C3: Fallbeispiele 3	7
Anhang C4: Fallbeispiele 4	10
Anhang D: Ausgefüllte PSSUQ-Fragebögen der Fallbeispiele	1
Anhang D1: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 1	1
Anhang D2: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 2	2
Anhang D3: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 3	3
Anhang D4: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 4	4

Anhang A: Standardkennwerte vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel

Transportmittelkennwerte für schwere Transporteinheiten (>200 kg)										
		Lastenaufzug	Säuleneheber	Angetriebene Rollenbahn mit Schrägförderung	C-/S-Umlauförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber	Hubgerät	Portalheber	Vertikalspeicher
Nr.	Kennwerte									
1	Transporthilfsmittel	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Europaletten, Kartonage, Säcke	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-, Fertigprodukte, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger
2	Max. Tragfähigkeit [kg]	20000	2000	2000	2000	1000	3000	1500	3000	500
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	6000x4000x2000	2000x1600x3000	1200x800x1200	1200x800x1200	1200x800x1200	1200x800x1200	1200x1200x3000	1200x1200x3000	1200x800x1200
4	Investitionssumme [€]	35.000,00 €	40.000,00 €	25.000,00 €	75.000,00 €	45.000,00 €	60.000,00 €	25.000,00 €	30.000,00 €	40.000,00 €
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	240	2000	4000	2500	3000	2000	1500	1800	2500
6	Max. Hubhöhe [m]	50	27	10	20	10	30	14	20	15
7	Transportgeschwindigkeit in [m/s]	1	1,5	2	1	1	4	0,8	1,3	1
8	Antriebsleistung in [kW]	11	5,5	3	15	10	7,5	5,5	7	8
9	Umkehrbare Förderrichtung	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
10	Gleichzeitiger Transport in beide Richtungen möglich	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
11	Instandhaltungsfaktor [%/a]	8	7	6	8	9	8	7	7	8

Transportmittelkennwerte für leichte Transporteinheiten (≤ 200 kg)										
		Lastenaufzug	Säuleneheber	Angetriebene Rollenbahn mit Schrägförderung	C-/S-Umlauförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber	Hubgerät	Portalheber	Vertikalspeicher
Nr.	Kennwert									
1	Transporthilfsmittel	Behälter, Gepäck, Gefäße, Tablare, Säcke, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-Fertigprodukte, Trays, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Schachteln, Behälter, Gepäck, Kartons, Europaletten, Werkstückträger, stapelbares Palettengestell	Behälter, Gepäck, Kartonage, Säcke, Trays, Tablare, Gefäß	Behälter, Gepäck, Kartonage, Säcke, Trays, Tablare, Gefäß	Behälter, Gepäck, Gefäße, Tablare, Säcke, Rohstoffe, Halbfertig-Fertigprodukte, Trays, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Gefäße, Tablare, Säcke, Rohstoffe, Halbfertig-Fertigprodukte, Trays, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Gefäße, Tablare, Säcke, Europaletten, Rohstoffe, Halbfertig-Fertigprodukte, Trays, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Gefäße, Tablare, Säcke, Rohstoffe, Halbfertig-Fertigprodukte, Trays, Europalette, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger	Behälter, Gepäck, Gefäße, Tablare, Säcke, Rohstoffe, Halbfertig-Fertigprodukte, Trays, Gitterbox, stapelbares Palettengestell, Werkzeugträger
2	Max. Tragfähigkeit [kg]	200	200	200	200	200	200	200	50	150
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	1250x1150x1500	1200x800x1200	1000x800x800	600x800x600	900x700x1200	1200x800x1200	1200x800x1200	1200x800x1200	800x600x400
4	Investitionssumme [€]	30.000,00 €	20.000,00 €	15.000,00 €	60.000,00 €	40.000,00 €	25.000,00 €	10.000,00 €	20.000,00 €	45.000,00 €
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	300	1300	5000	10000	16000	2500	1500	1300	4000
6	Max. Hubhöhe [m]	10	22	5	13	17	15	5	20	10
7	Transportgeschwindigkeit in [m/s]	3	8	2	0,8	2	1,5	2	2	1
8	Antriebsleistung in [kW]	2	8	3	5	4	2	7,5	5	5
9	Umkehrbare Förderrichtung	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
10	Gleichzeitiger Transport in beide Richtungen möglich	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
11	Instandhaltungsfaktor [%/a]	8	7	6	8	9	8	7	7	8

Tabelle 42: Standardkennwerte vertikaler innerbetrieblicher Transportmittel (Eigene Darstellung)

Anhang B: Vorlage PSSUQ-Fragebogen zur Validierung der Methode



Fragebogen zur Validierung der entwickelten Methodik zur „Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmitteltechnologien“

Hinweis: Dieser Fragebogen dient zur Bewertung und Validierung der entwickelten Methode.

Bitte beantworten Sie die einzelnen Aussagen anhand der angegebenen Skalen indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie „N/A“ (nicht zu beantworten) an und begründen Sie dies in der darunter angeführten Zeile. Falls Sie gegebenenfalls ergänzende Anmerkungen haben, können Sie diese auch in den entsprechenden „Kommentar“ Zeilen vermerken.

1. Insgesamt bin ich zufrieden damit wie einfach, die Methode anzuwenden ist.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

2. Es war leicht die Methode anzuwenden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

3. Ich konnte die notwendigen Schritte mit dieser Methode effektiv durchführen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

4. Ich fühlte mich bei der Nutzung der Methode sicher.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

5. Es war leicht, die Struktur und den Umgang mit der Methode zu erlernen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

6. Ich glaube, dass ich diese Methode schnell produktiv anwenden kann.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

7. Die Methode bietet eine klare Anleitung und Hilfestellung bei auftretenden Fehlern.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

8. Falls ich einen Fehler gemacht habe, konnte ich diesen leicht erkennen und korrigieren.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

9. Die bereitgestellten Informationen (z.B.: Hinweise, Fragebogen, Kriterienkatalog, usw.) waren verständlich und hilfreich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

10. Es war einfach die benötigten Informationen zu finden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

11. Die vorhandenen Informationen haben mir bei der Bewältigung der Entscheidungsfindung sehr geholfen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

12. Die Struktur der Eingabe- und Ergebnisdarstellung ist klar aufgebaut.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

13. Die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse war übersichtlich und verständlich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

14. Mir hat die Nutzung der Methode in Excel gefallen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

15. Die Methode bietet alle Funktionen und Anpassungsmöglichkeiten, die ich erwartet habe.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

16. Insgesamt bin ich mit der Auswahlmethodik zufrieden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Kommentar:

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Abbildung 18: Vorlage Fragebogen zur Validierung der Methode (Eigene Darstellung)

Anhang C: Fallbeispiele

Anhang C1: Fallbeispiel 1

Fragebogen zur Analyse der Ausgangssituation					
Nr.	Fragen	Antwort		Ausprägung und Kommentar	
		Ja	Nein		
1. Transportgut					
zutreffende Ausprägung mit einem "X" markieren					
1.1	Um welche Art von Transportgut handelt es sich?		☒ Stückgut ☐ Schüttgut ☐ Flüssigkeit	Gas	
1.2	Welche Transporthilfsmittel werden für den Transport verwendet?		☒ Europaletten ☐ Gitterbox ☐ Werkzeugträger ☐ Rohstoffe ☐ Trays ☒ Behälter ☐ Kartonnage	Kleinladungsträger (KLT) Gefäße Tablette Säcke Gepäck stapelbares Palettengestell	
1.3	Welche maximale Abmaße hat das Transportgut mit dem Transporthilfsmittel (Angabe von: Länge x Breite x Höhe in [mm])?			1200x800x1200	
1.4	Welches Transportgewicht muss pro Einheit befördert werden? (Gewicht in [kg])			200	
1.5	Gibt es Unregelmäßigkeiten in der Lastverteilung? (z.B.: bei Fluide die sich bewegen, dezentraler Schwerpunkt usw.)		X		
1.6	Gibt es besondere Eigenschaften der zu transportierenden Güter? Wenn ja, welche?		☐ heiß ☐ kalt ☒ sperrig ☐ zerbrechlich ☐ nass ☐ trocken ☐ klebrig	neigt zum Kippen / Rutschen schmutzig stoßempfindlich Lebensmittel magnetisch korrosionsanfällig	
1.7	Ist das Transportgut als gefährlich einzustufen? Wenn Ja, warum?		☒ entflammbar ☐ explosiv ☐ giftig	ätzend	
2. Allgemeine Anforderungen					
2.1	Müssen spezielle gesetzliche Bestimmungen oder Vorschriften berücksichtigt werden?		X		
2.2	Gibt es Einschränkungen in den Platzverhältnissen oder durch spezielle bauliche Vorgaben, die Installation eines vertikalen Transporthilfsmittels beeinflussen könnten?		X	Maschinen Regale Tore Versorgungsleitungen Traglast Boden lichte Höhe	Schienen Schächte Säule tragende Wände
2.3	Herrschen besondere betriebliche Umgebungsbedingungen, welche Einfluss auf das Transportmittel haben? Wenn ja, welche?		X	Vibration Chemikalien normale Luftfeuchtigkeit erhöhte Luftfeuchtigkeit klimatisierte Räume erhöhte Temperatur (> 30° Celsius) niedrige Temperatur (< 5° Celsius) Hygieneanforderung	Dampf Verunreinigungen Staub Späne oder andere feine Partikel magnetische oder elektrische Felder Öle, Fette
3. Transportprozess					
3.1	Wie hoch ist die tägliche Transportfrequenz (Einheiten pro Tag)?			20	
3.2	Tritt die Transportaufgabe regelmäßig auf?		X	gelegentlich	
3.3	Über wieviele Stockwerke muss die Einheit transportiert werden können?			2	
3.4	Wie hoch sind die Stockwerke, die durch das Transportmittel bedient werden sollen (in [m])?			5	
3.5	Ist das Transportmittel die einzige Möglichkeit, das Transportgut zwischen den Geschossen zu befördern?		X		
3.6	Muss ein Transport in beide Richtungen gleichzeitig möglich sein?		X		
3.7	Muss die Förderrichtung umgekehrt werden können?		X		
3.8	Dient der vertikale Transportprozess als Schnittstelle zwischen zwei unterschiedlichen Produktionsprozessen?		X		
3.9	Werden während des Transportes mehrere Quellen (Beladestellen) und Senken (Abgabestellen) bedient?		X		
3.10	Wie erfolgt die Bereitstellung des Transportgutes am Ausgangspunkt?		☐ von Hand ☒ Stapler ☐ Kran ☒ Hubwagen	Roboter Rollenbahn Bandförderer	
3.11	Wie erfolgt die Entnahme bzw. Weiterbeförderung nach dem stockwerksübergreifendem Transport?		☐ von Hand ☒ Stapler ☐ Kran ☒ Hubwagen	Roboter Rollenbahn Bandförderer	
3.12	Muss das neue Transportmittel an bestehende Förder- oder Transportsysteme angebunden werden?		X		
4. Transportmittel					
4.1	Muss eine hohe Zuverlässigkeit gewährleistet werden?		X		
5. Wirtschaftlichkeit					
5.1	An wievielen Tagen im Jahr wird in der Produktion gearbeitet? [d/a]			220	
5.2	Wieviele Arbeitsstunden pro Tag werden gearbeitet? [h/d]			24	
5.3	Was für ein Zinssatz wird für die Fremdfinanzierung verlangt? [%]			0	
5.4	Wie hoch ist der Fremdfinanzierungsanteil bei der Investition? [%]			0	
5.5	Wie hoch ist das durchschnittliche brutto Jahresgehalt des Logistikmitarbeiters? [€]			45000	
5.6	Wie hoch ist der aktuelle Strompreis in [€/kWh]?			0,15	

Tabelle 43: Fragenkatalog Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Legende			Anforderungsliste für die Transportmittelauswahl	
Relevanz		Symbol		
Forderung		F		
Wunsch		W		
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
1	Art des Transportgutes	F	Stückgut	
2	Transporthilfsmittel	F	Europaletten, Behälter	Es müssen nicht nur flache Transporthilfsmittel befördert werden, sondern auch mit Füßen wie z.B. das stapelbare Palettengestell
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	F	1200x800x1200	
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	F	200	Das maximal zu transportierende Gewicht / Entspricht der mind. Tragfähigkeit des Transportmittels
5	Unregelmäßige Lastverteilung	-	Nein	
6	Besondere Eigenschaften und Zustand Transportgut	-	Nein	
7	Gefahrgut	-	Nein	
8	Zusätzliche Gesetzesbestimmungen	-	Nein	
9	Einschränkungen der Platzverhältnisse oder durch spezielle bauliche Vorgaben	-	Nein	
10	Besondere Bedingungen in der Betriebsumgebung	-	Nein	
11	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	F	20	
12	Regelmäßiger Transport	-	Ja	Es werden 130 Einheiten pro Tag produziert und in kontinuierlichen Intervallen transportiert
13	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	F	5	Stockwerkhöhe 5m
14	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	F	10	Insgesamt müssen die 3 Stockwerke: EG, 1. OG, 2. OG miteinander verbunden werden
15	Einzigste Transportmöglichkeit	-	Ja	
16	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	-	Nein	
17	Umkehrbare Förderrichtung	F	Ja	
18	Anfahren mehrerer Quellen und Senken	-	Nein	
19	Schnittstelle zwischen zwei Produktionsprozessen	-	Nein	
20	Bereitstellung des Transportgutes	F	Stapler, Hubwagen	
21	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	F	Stapler, Hubwagen	
22	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/ Transportsysteme	-		
23	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	F	Ja	Ausfallrate, Verfügbarkeit, Störanfälligkeit, durchschnittliche Lebensdauer, usw.
Hilfestellung: A. Kriterienkatalog			Zusätzliche Anforderungen	
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
22	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen	W		Berücksichtigung zukünftiger Fabrikerweiterung
23	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit	W		Umweltverträglichkeit, Recyclingfähigkeit usw.
24	Synchronisation	W		Abstimmung mit dem Materialfluss in anderen Stockwerken
25	Platzbedarf/Flächenbedarf	W		Bauliche Beschränkungen, benötigte Stellfläche
26	Flexibilität Layoutänderung	W		Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen an Standorten (Quelle, Senke, Lage)
27	Anwendungsfreundlichkeit	W		Bedienkomfort, Übersichtlichkeit, Kennzeichnungen, Haptic usw.
28	Energieverbrauch	W		Stromverbrauch in kWh
29	Sauberkeit	F		Transportmittel soll keine Verschmutzungen verursachen z.B.: Fett- oder Ölaustritt, Staubeentwicklung; Besonders wichtig wenn hohe Hygieneanforderungen gefordert sind
30	Automatisierungsgrad	W		Grad der eigenständigen Abwicklung von Transportaufgaben (manuell bis vollautomatisch)
35				

Tabelle 44: Anforderungsliste Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Legende			Transportmittel								
Relevanz (Symbol)			Lastenaufzug	Säulenheber	Angetriebene Rollenbahn mit Schrägförderung	C-/S-Umlaufförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber	Hubgerät	Portalheber	Vertikalspeicher
Geeignet (✓)											
Nicht geeignet (X)											
Nr.	Forderungen	Ausprägung									
1	Art des Transportgutes	Stückgut	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Transporthilfsmittel	Europaletten, Behälter	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	1200x800x1200	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓	X
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	10	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓
8	Umkehrbare Förderrichtung	Ja	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
9	Bereitstellung des Transportgutes	Stapler, Hubwagen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	Stapler, Hubwagen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	Ja									
12	Sauberkeit										
16											

Transportmittel die für den Anwendungsfall in Frage kommen:

Lastenaufzug, Säulenheber, Schachtheber

Tabelle 45: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Gewichtung								
Kriteriengruppe		Absolute Gruppen Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Gruppen Gewichtung	Kriterien		Absolute Kriterien Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Kriterien Gewichtung	Gewichtung gesamt
I	k _i	A _i	G _i	i	k _i	A _k	G _k	G _i = G _i * G _k
I	Effizienz	40	40%	1	Synchronisation	30	30%	12%
				2	Automatisierungsgrad	30	30%	12%
				3	Anwendungsfreundlichkeit	40	40%	16%
				4			0%	0%
				5			0%	0%
				Summe	100	100%		
II	Flexibilität	40	40%	1	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen	50	50%	20%
				2	Flexibilität Layoutänderung	50	50%	20%
				3			0%	0%
				4			0%	0%
				5			0%	0%
				Summe	100	100%		
III	Umwelt	20	20%	1	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit	10	10%	2%
				2	Platzbedarf/Flächenbedarf	20	20%	4%
				3	Energieverbrauch	20	20%	4%
				4	Sauberkeit	50	50%	10%
				5				
				Summe	100	100%		
Summe der Gewichte		100	100%					100%

Tabelle 46: Gewichtung Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Allgemeine Inputdaten	Wert
Transportfrequenz [Einheiten/d]	20
Transportweg [m]	10
Arbeitstage pro Jahr [d/a]	220
Arbeitsstunden pro Tag [h/d]	24
Abschreibungszeitraum [a]	15
Fremdfinanzierungsanteil [%]	0
Bruttogehalt Mitarbeiter pro Jahr [€/a]	45.000,00 €
Zinssatz [%]	4
Strompreis [€/kWh]	0,15

Transportmittelspezifische Inputdaten	Lastenaufzug	Säulenheber	Schachtheber
Investitionssumme [€]	30.000,00	20.000,00	25.000,00
Geschwindigkeit [m/s]	3	8	1,5
Handhabungszeit [s/Einheit]	10	12	15
Leistung [kW]	2	8	2
Instandhaltungsfaktor [%/a]	8	7	8

Nebenrechnung notwendiger Parameter	Lastenaufzug	Säulenheber	Schachtheber
Transportzeit [s/Einheit]	7	3	13
Gesamtzeit pro Einheit [s/Einheit]	17	15	28
Einsatzdauer in Stunden pro Jahr [h/a]	20	18	35
Transportfrequenz pro Jahr [Einheiten/a]	4400	4400	4400
Personalfaktor	0,23	0,28	0,35

Kommerzielle Bewertung			
Auswertung	Lastenaufzug	Säulenheber	Schachtheber
Jährliche Abschreibung [€/a]	2.000,00	1.333,33	1.666,67
Zinskosten [€/a]	-	-	-
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.000,00	1.333,33	1.666,67
Energiekosten [€/a]	6,11	21,27	10,39
Instandhaltungskosten [€/a]	2.400,00	1.400,00	2.000,00
Personalkosten pro Jahr [€/a]	104,17	125,00	156,25
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.510,28	1.546,27	2.166,64
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.000,00	1.333,33	1.666,67
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	2.510,28	1.546,27	2.166,64
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	4.510,28	2.879,60	3.833,31
Rangordnung	3	1	2

Tabelle 47: Kommerzielle Bewertung Fallbeispiel 1 (Eigene Darstellung)

Anhang C2: Fallbeispiel 2

Fragebogen zur Analyse der Ausgangssituation				
Nr.	Fragen	Antwort		Ausprägung und Kommentar
		Ja	Nein	
1. Transportgut				
zutreffende Ausprägung mit einem "X" markieren				
1.1	Um welche Art von Transportgut handelt es sich?			☒ Stückgut ☐ Schüttgut ☐ Flüssigkeit Gas
1.2	Welche Transporthilfsmittel werden für den Transport verwendet?			☒ Europaletten ☐ Gitterbox ☐ Werkzeugträger ☐ Rohstoffe ☐ Trays ☐ Behälter ☐ Kartonnage Kleinladungsträger (KLT) Gefäße Table Säcke Gepäck ☒ stapelbares Palettengestell ☒ Palette mit Stahlkäfig
1.3	Welche maximale Abmaße hat das Transportgut mit dem Transporthilfsmittel (Angabe von: Länge x Breite x Höhe in [mm])?			1200x1000x2200
1.4	Welches Transportgewicht muss pro Einheit befördert werden? (Gewicht in [kg])			1500
1.5	Gibt es Unregelmäßigkeiten in der Lastverteilung? (z.B.: bei Fluiden die sich bewegen, dezentraler Schwerpunkt usw.)		X	
1.6	Gibt es besondere Eigenschaften der zu transportierenden Güter? Wenn ja, welche?			☐ heiß ☐ kalt ☐ sperrig ☒ zerbrechlich ☐ nass ☐ trocken ☐ klebrig ☐ entflammbar ☒ explosiv ☐ giftig neigt zum Kippen / Rutschen schmutzig stoßempfindlich Lebensmittel magnetisch korrosionsanfällig
1.7	Ist das Transportgut als gefährlich einzustufen? Wenn ja, warum?		X	☐ ätzend ☐
2. Allgemeine Anforderungen				
2.1	Müssen spezielle gesetzliche Bestimmungen oder Vorschriften berücksichtigt werden?		X	
2.2	Gibt es Einschränkungen in den Platzverhältnissen oder durch spezielle bauliche Vorgaben, die die Installation eines vertikalen Transportmittels beeinflussen könnten?		X	Maschinen Regale ☒ Tore Versorgungsleitungen Traglast Boden lichte Höhe Schienen Schächte Säule tragende Wände
2.3	Herrschen besondere betriebliche Umgebungsbedingungen, welche Einfluss auf das Transportmittel haben? Wenn ja, welche?		X	Vibration Chemikalien normale Luftfeuchtigkeit erhöhte Luftfeuchtigkeit ☒ klimatisierte Räume erhöhte Temperatur (> 30° Celsius) niedrige Temperatur (< 5° Celsius) Hygieneanforderung Dampf Verunreinigungen Staub Späne oder andere feine Partikel magnetische oder elektrische Felder Öle, Fette
3. Transportprozess				
3.1	Wie hoch ist die tägliche Sportfrequenz (Einheiten pro Tag)?			1200
3.2	Tritt die Transportaufgabe regelmäßig auf?		X	☐ gelegentlich ☒ stoßweise ☐ saisonal
3.3	Über wie viele Stockwerke muss die Einheit transportiert werden können?			1
3.4	Wie hoch sind die Stockwerke, die durch das Transportmittel bedient werden sollen (in [m])?			4,5
3.5	Ist das Transportmittel die einzige Möglichkeit, das Transportgut zwischen den Geschossen zu befördern?		X	
3.6	Muss ein Transport in beide Richtungen gleichzeitig möglich sein?		X	
3.7	Muss die Förderrichtung umgekehrt werden können?		X	
3.8	Dient der vertikale Transportprozess als Schnittstelle zwischen zwei unterschiedlichen Produktionsprozessen?		X	
3.9	Werden während des Transportes mehrere Quellen (Beladestellen) und Senken (Abgabestellen) bedient?		X	
3.10	Wie erfolgt die Bereitstellung des Transportgutes am Ausgangspunkt?			☐ von Hand ☐ Stapler ☐ Kran ☐ Hubwagen ☒ Roboter ☒ Rollenbahn ☐ Bandförderer
3.11	Wie erfolgt die Entnahme bzw. Weiterbeförderung nach dem stockwerksübergreifenden Transport?			☐ von Hand ☐ Stapler ☐ Kran ☐ Hubwagen ☒ Roboter ☒ Rollenbahn ☐ Bandförderer
3.12	Muss das neue Transportmittel an bestehende Förder- oder Transportsysteme angebunden werden?	X		Rollenbahn
4. Transportmittel				
4.1	Muss eine hohe Zuverlässigkeit gewährleistet werden?	X		
5. Wirtschaftlichkeit				
5.1	An wie vielen Tagen im Jahr wird in der Produktion gearbeitet? [d/a]			230
5.2	Wie viele Arbeitsstunden pro Tag werden gearbeitet? [h/d]			24
5.3	Was für ein Zinssatz wird für die Fremdfinanzierung verlangt? [%]			0
5.4	Wie hoch ist der Fremdfinanzierungsanteil bei der Investition? [%]			0
5.5	Wie hoch ist das durchschnittliche brutto Jahresgehalt des Logistikmitarbeiters? [€]			40000
5.6	Wie hoch ist der aktuelle Strompreis in [€/kWh]?			0,18

Tabelle 48: Fragenkatalog Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Legende			Anforderungsliste für die Transportmittelauswahl	
Relevanz	Symbol			
Forderung	F			
Wunsch	W			
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
1	Art des Transportgutes	F	Stückgut	
2	Transporthilfsmittel	F	Europaletten, stapelbares Palettengestell, Palette mit	
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	F	1200x1000x2200	
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	F	1500	
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	F	1200	
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	F	4,5	
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	F	4,5	
8	Umkehrbare Förderrichtung	-	Nein	
9	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	-	Nein	
10	Unregelmäßige Lastverteilung	-	Nein	
11	Besondere Eigenschaften und Zustand Transportgut	-	Nein	
12	Gefahrgut	-	Nein	
13	Zusätzliche Gesetzesbestimmungen	-	Nein	
14	Einschränkungen der Platzverhältnisse oder durch spezielle bauliche Vorgaben	-	Nein	
15	Besondere Bedingungen in der Betriebsumgebung	-	Nein	
16	Regelmäßiger Transport	-	Ja	
17	Einzige Transportmöglichkeit	-	Ja	
18	Anfahren mehrerer Quellen und Senken	-	Nein	
19	Schnittstelle zwischen zwei Produktionsprozessen	-	Nein	
20	Bereitstellung des Transportgutes	F	Rollenbahn	
21	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	F	Rollenbahn	
22	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/ Transportsysteme	F	Ja, Rollenbahn	
23	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	F	Ja	

Hilfestellung:	A. Kriterienkatalog	Zusätzliche Anforderungen		
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
22	Integration in bestehende Produktionsstruktur	F		Einfluss auf die bestehenden Produktionsabläufe und Materialflüsse
23	Vertikal und horizontaler Transport	W		Muss eine Kombination aus vertikaler und horizontaler Bewegung ausgeführt werden
24	Platzbedarf/Flächenbedarf	W		Bauliche Beschränkungen, benötigte Stellfläche
25	Flexibilität Förderfrequenz	W		Transportfähigkeit unterschiedlicher Förderleistung/-kapazität (Einheiten/h oder Einheiten/d)
26	Flexibilität Layoutänderung	W		Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen an Standorten (Quelle, Senke, Lage)
27	Instandhaltung	W		Wartungsaufwand, Ersatzteilversorgung, Haltbarkeit, Reparaturfreundlichkeit
28	Genauigkeit	W		Präzision beim Be- und Entladen der Güter; wichtig bei hoher Automatisierung
29	Automatisierungsgrad	W		Grad der eigenständigen Abwicklung von Transportaufgaben (manuell bis vollautomatisch)
30	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	W		Fähigkeit zur Integration bestehender Transporttechnologien wie z.B.: Förderbänder, Roboter, FTS usw.
35				

Tabelle 49: Anforderungsliste Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Legende			Transportmittel								
Relevanz (Symbol)			Lastenaufzug	Säulenheber	Angetriebene Rollenbahn mit Schrägförderung	C-/S-Umlaufförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber	Hubgerät	Portalheber	Vertikalspeicher
Geeignet (✓)											
Nicht geeignet (X)											
Nr.	Forderungen	Ausprägung									
1	Art des Transportgutes	Stückgut	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Transporthilfsmittel	Europaletten, stapelbares Palettengestell, Palette mit Stahlkäfig	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	1200x1000x2200	X	✓	X	X	X	X	✓	✓	X
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	1500	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	X
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	1200	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	4,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	4,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Umkehrbare Förderrichtung	Nein	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	Nein	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Bereitstellung des Transportgutes	Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/ Transportsysteme	Ja, Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	Ja	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	Integration in bestehende Produktionsstruktur		X	✓	X	X	X	✓	✓	✓	✓
28											

Transportmittel die für den Anwendungsfall in Frage kommen:

Säulenheber, Portalheber, Hubgerät

Tabelle 50: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Gewichtung								
Kriteriengruppe		Absolute Gruppen Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Gruppen Gewichtung	Kriterien		Absolute Kriterien Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Kriterien Gewichtung	
I	k _i	A _i	G _i	i	k _i	A _k	G _k	G _i = G _i * G _k
I	Systemintegration	40	40%	1	Integration in bestehende	35	35%	14%
				2	Automatisierungsgrad	25	25%	10%
				3	Genauigkeit	20	20%	8%
				4	Instandhaltung	20	20%	8%
				5			0%	0%
					Summe	100	100%	
II	Flexibilität	15	15%	1	Flexibilität Förderfrequenz	60	60%	9%
				2	Flexibilität Layoutänderung	40	40%	6%
				3			0%	0%
				4			0%	0%
				5			0%	0%
					Summe	100	100%	
III	Infrastruktur	45	45%	1	Platzbedarf/Flächenbedarf	25	25%	11%
				2	Vertikal und horizontaler Transport	30	30%	14%
				3	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	45	45%	20%
				4			0%	0%
				5			0%	0%
					Summe	100	100%	
Summe der Gewichte		100	100%					100%

Tabelle 51: Gewichtung Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Allgemeine Inputdaten	Wert
Transportfrequenz [Einheiten/d]	1200
Transportweg [m]	4,5
Arbeitsstage pro Jahr [d/a]	230
Arbeitsstunden pro Tag [h/d]	24
Abschreibungszeitraum [a]	15
Fremdfinanzierungsanteil [%]	0
Bruttolohn Mitarbeiter pro Jahr [€/a]	40.000,00 €
Zinssatz [%]	4
Strompreis [€/kWh]	0,18

Transportmittelspezifische Inputdaten	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Investitionssumme [€]	40.000,00 €	30.000,00 €	25.000,00 €
Hubgeschwindigkeit [m/s]	1,5	1,3	0,8
Handhabungszeit [s/Einheit]	3	6	4
Leistung [kW]	5,5	7	5,5
Instandhaltungsfaktor [%/a]	7	8	7

Nebenrechnung notwendiger Parameter	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Transportzeit [s/Einheit]	6	7	11
Gesamtzeit pro Einheit [s/Einheit]	9	13	15
Einsatzdauer in Stunden pro Jahr [h/a]	690	991	1169
Transportfrequenz pro Jahr [Einheiten/a]	276000	276000	276000
Personalfaktor	4,17	8,33	5,56

Kommerzielle Bewertung			
Auswertung	Säulenheber	Portalheber	Hubgerät
Jährliche Abschreibung [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Zinskosten [€/a]	-	-	-
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Energiekosten [€/a]	683,10	1.248,37	1.157,48
Instandhaltungskosten [€/a]	2.800,00	2.400,00	1.750,00
Personalkosten pro Jahr [€/a]	1.666,67	3.333,33	2.222,22
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	5.149,77	6.981,70	5.129,70
Fixkosten pro Jahr [€/a]	2.666,67	2.000,00	1.666,67
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	5.149,77	6.981,70	5.129,70
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	7.816,43	8.981,70	6.796,36
Rangordnung	2	3	1

Tabelle 52: Kommerzielle Bewertung Fallbeispiel 2 (Eigene Darstellung)

Anhang C3: Fallbeispiel 3

Fragebogen zur Analyse der Ausgangssituation				
Nr.	Fragen	Antwort		Ausprägung und Kommentar
		Ja	Nein	
1. Transportgut				
				<i>zutreffende Ausprägung mit einem "X" markieren</i>
1.1	Um welche Art von Transportgut handelt es sich?		☒ Stückgut ☐ Schüttgut ☐ Flüssigkeit	Gas
1.2	Welche Transporthilfsmittel werden für den Transport verwendet?		☐ Europaletten ☐ Gitterbox ☐ Werkzeugträger ☐ Rohstoffe ☐ Trays ☒ Behälter ☐ Kartontage	Kleinladungsträger (KLT) Gefäße Table Säcke Gepäck stapelbares Palettengestell
1.3	Welche maximale Abmaße hat das Transportgut mit dem Transporthilfsmittel (Angabe von: Länge x Breite x Höhe in [mm])?			600 x 400 x 320
1.4	Welches Transportgewicht muss pro Einheit befördert werden? (Gewicht in [kg])			20
1.5	Gibt es Unregelmäßigkeiten in der Lastverteilung? (z.B.: bei Fluiden die sich bewegen, dezentraler Schwerpunkt usw.)		☒	
1.6	Gibt es besondere Eigenschaften der zu transportierenden Güter? Wenn ja, welche?	☒	☐ heiß ☐ kalt ☐ sperrig ☐ zerbrechlich ☐ nass ☒ trocken ☐ klebrig ☐ entflammbar ☒ explosiv ☐ giftig	neigt zum Kippen / Rutschen schmutzig stoßempfindlich Lebensmittel magnetisch korrosionsanfällig
1.7	Ist das Transportgut als gefährlich einzustufen? Wenn Ja, warum?		☒	
2. Allgemeine Anforderungen				
2.1	Müssen spezielle gesetzliche Bestimmungen oder Vorschriften berücksichtigt werden?		☒	
2.2	Gibt es Einschränkungen in den Platzverhältnissen oder durch spezielle bauliche Vorgaben, die Installation eines vertikalen Transportmittels beeinflussen könnten?	☒	☒ Maschinen ☐ Regale ☐ Tore ☐ Versorgungsleitungen ☐ Traglast Boden ☐ lichte H ₀ Zeichnungsfläche	Schienen Schächte Säule tragende Wände ☒ Rollenbahn
2.3	Herrschen besondere betriebliche Umgebungsbedingungen, welche Einfluss auf das Transportmittel haben? Wenn ja, welche?	☒	☒ Vibration ☐ Chemikalien ☐ normale Luftfeuchtigkeit ☐ erhöhte Luftfeuchtigkeit ☐ klimatisierte Räume ☐ erhöhte Temperatur (> 30° Celsius) ☐ niedrige Temperatur (< 5° Celsius) ☐ Hygieneanforderung	Dampf Verunreinigungen ☒ Staub ☒ Späne oder andere feine Partikel magnetische oder elektrische Felder Öle, Fette
3. Transportprozess				
3.1	Wie hoch ist die tägliche Transportfrequenz (Einheiten pro Tag)?			2200
3.2	Tritt die Transportaufgabe regelmäßig auf?	☒	gelegentlich	saisonal
3.3	Über wie viele Stockwerke muss die Einheit transportiert werden können?			1
3.4	Wie hoch sind die Stockwerke, die durch das Transportmittel bedient werden sollen (in [m])?			6
3.5	Ist das Transportmittel die einzige Möglichkeit, das Transportgut zwischen den Geschossen zu befördern?		☒	
3.6	Muss ein Transport in beide Richtungen gleichzeitig möglich sein?		☒	
3.7	Muss die Förderrichtung umgekehrt werden können?		☒	
3.8	Dient der vertikale Transportprozess als Schnittstelle zwischen zwei unterschiedlichen Produktionsprozessen?	☒		
3.9	Werden während des Transportes mehrere Quellen (Beladestellen) und Senken (Abgabestellen) bedient?		☒	
3.10	Wie erfolgt die Bereitstellung des Transportgutes am Ausgangspunkt?		☐ von Hand ☐ Stapler ☐ Kran ☐ Hubwagen	☐ Roboter ☒ Rollenbahn ☐ Bandförderer
3.11	Wie erfolgt die Entnahme bzw. Weiterbeförderung nach dem stockwerksübergreifenden Transport?		☐ von Hand ☐ Stapler ☐ Kran ☐ Hubwagen	☐ Roboter ☒ Rollenbahn ☐ Bandförderer
3.12	Muss das neue Transportmittel an bestehende Förder- oder Transportsysteme angebunden werden?	☒		Rollenbahn
4. Transportmittel				
4.1	Muss eine hohe Zuverlässigkeit gewährleistet werden?	☒		
5. Wirtschaftlichkeit				
5.1	An wie vielen Tagen im Jahr wird in der Produktion gearbeitet? [d/a]			350
5.2	Wie viele Arbeitsstunden pro Tag werden gearbeitet? [h/d]			24
5.3	Was für ein Zinssatz wird für die Fremdfinanzierung verlangt? [%]			0
5.4	Wie hoch ist der Fremdfinanzierungsanteil bei der Investition? [%]			0
5.5	Wie hoch ist das durchschnittliche brutto Jahresgehalt des Logistikmitarbeiters? [€]			40000
5.6	Wie hoch ist der aktuelle Strompreis in [€/kWh]?			0,18

Tabelle 53: Fragenkatalog Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Legende			Anforderungsliste für die Transportmittelauswahl	
Relevanz		Symbol		
Forderung		F		
Wunsch		W		
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
1	Art des Transportgutes	F	Stückgut	
2	Transporthilfsmittel	F	Behälter	
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	F	600 x 400 x 320	
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	F	20	
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	F	2200	
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	F	6	
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	F	6	
8	Umkehrbare Förderrichtung	-	Nein	
9	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	-	Nein	
10	Unregelmäßige Lastverteilung	-	Nein	
11	Besondere Eigenschaften und Zustand Transportgut	F	trocken	
12	Gefahrgut	-	Nein	
13	Zusätzliche Gesetzesbestimmungen	-	Nein	
14	Einschränkungen der Platzverhältnisse oder durch spezielle bauliche Vorgaben	F	Maschinen	
15	Besondere Bedingungen in der Betriebsumgebung	F	Vibration, Staub, Späne oder andere feine Partikel	
16	Regelmäßiger Transport	-	Ja	
17	Einzigste Transportmöglichkeit	F	Nein,	
18	Anfahren mehrerer Quellen und Senken	-	Nein	
19	Schnittstelle zwischen zwei Produktionsprozessen	F	Ja	
20	Bereitstellung des Transportgutes	F	Rollenbahn	
21	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	F	Rollenbahn	
22	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/ Transportsysteme	F	Ja, Rollenbahn	
23	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	F	Ja	

Hilfestellung: A. Kriterienkatalog			Zusätzliche Anforderungen	
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
22	Integration in bestehende Systeme	F		Fähigkeit zur Integration in bestehende Systeme; Hängt eng mit dem Automatisierungsgrad zusammen; z.B.: Schnittstellen zu ERP-Systemen
23	Synchronisation	W		Abstimmung mit dem Materialfluss in anderen Stockwerken
24	Platzbedarf/Flächenbedarf	W		Bauliche Beschränkungen, benötigte Stellfläche
25	Flexibilität Förderfrequenz	W		Transportfähigkeit unterschiedlicher Förderleistung/-kapazität (Einheiten/h oder Einheiten/d)
26	Instandhaltung	W		Wartungsaufwand, Ersatzteilversorgung, Haltbarkeit, Reparaturfreundlichkeit
27	Nutzungsgrad	W		Auslastung des Transportmittels; Verhältnis tatsächlicher Nutzung der Kapazitäten zur theoretisch
28	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	F		Fähigkeit zur Integration bestehender Transporttechnologien wie z.B.: Förderbänder, Roboter, FTS usw.
29	Hindernisbildung	W		Beeinträchtigung durch Platzbedarf für andere Transportmittel oder Personen; Bildung von Engstellen
30	Vibration	F		Vibration aufgrund der Stanzmaschinen

Tabelle 54: Anforderungsliste Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Legende			Transportmittel								
Relevanz (Symbol)			Lastenaufzug	Säulenheber	Angetriebene Rollenbahn mit Schrägförderung	C-/S-Umlaufförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber	Hubgerät	Portalheber	Vertikalspeicher
Geeignet (✓)											
Nicht geeignet (X)											
Nr.	Forderungen	Ausprägung									
1	Art des Transportgutes	Stückgut	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Transporthilfsmittel	Behälter	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	600 x 400 x 320	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	2200	X	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	6	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	6	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓
	Umkehrbare Förderrichtung	Nein	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	Nein	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Besondere Eigenschaften und Zustand Transportgut	trocken	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	Einschränkungen der Platzverhältnisse oder durch spezielle bauliche Vorgaben	Maschinen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	Besondere Bedingungen in der Betriebsumgebung	Vibration, Staub, Späne oder andere feine Partikel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	Einzigste Transportmöglichkeit	Nein,	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	Schnittstelle zwischen zwei Produktionsprozessen	Ja	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	Bereitstellung des Transportgutes	Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
16	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/ Transportsysteme	Ja, Rollenbahn	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
18	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	Ja	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
19	Integration in bestehende Systeme		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
20	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik		X		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
21	Vibration		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
28											

Transportmittel die für den Anwendungsfall in Frage kommen:
C-/S-Umlaufförderer, Paternoster Förderer, Schachtheber

Tabelle 55: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Gewichtung								
Kriteriengruppe		Absolute Gruppen Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Gruppen Gewichtung	Kriterien		Absolute Kriterien Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Kriterien Gewichtung	
I	k_i	A_i	G_i	i	k_i	A_k	G_k	$G_i = G_i \cdot G_k$
I	Infrastruktur	70	75%	1	Synchronisation	25	25%	19%
				2	Integration in bestehende Systeme	20	20%	15%
				3	Platzbedarf/Flächenbedarf	15	15%	11%
				4	Hindernisbildung	10	10%	8%
				5	Kompatibilität mit anderen Transportmitteln & Fördertechnik	30	30%	23%
					Summe	100	100%	
II	Betriebsbedingungen	30	25%	1	Flexibilität Förderfrequenz	45	45%	11%
				2	Vibration	35	35%	9%
				3	Instandhaltung	10	10%	3%
				4	Nutzungsgrad	10	10%	3%
				5			0%	0%
					Summe	100	100%	
Summe der Gewichte		100	100%					100%

Tabelle 56: Gewichtung Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Allgemeine Inputdaten	Wert
Transportfrequenz [Einheiten/d]	2200
Transportweg [m]	6
Arbeitstage pro Jahr [d/a]	350
Arbeitsstunden pro Tag [h/d]	24
Abschreibungszeitraum [a]	15
Fremdfinanzierungsanteil [%]	0
Bruttogehalt Mitarbeiter pro Jahr [€/a]	40.000,00 €
Zinssatz [%]	4
Strompreis [€/kWh]	0,18

Transportmittelspezifische Inputdaten	C-/S-Umlaufförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber
Investitionssumme [€]	60.000,00 €	40.000,00 €	25.000,00 €
Hubgeschwindigkeit [m/s]	0,8	2	1,5
Handhabungszeit [s/Einheit]	3	3	5
Leistung [kW]	5	4	2
Instandhaltungsfaktor [%/a]	8	8	8

Nebenrechnung notwendiger Parameter	C-/S-Umlaufförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber
Transportzeit [s/Einheit]	15	6	8
Gesamtzeit pro Einheit [s/Einheit]	18	9	13
Einsatzdauer in Stunden pro Jahr [h/a]	3850	1925	2781
Transportfrequenz pro Jahr [Einheiten/a]	770000	770000	770000
Personalfaktor	7,64	7,64	12,73

Kommerzielle Bewertung			
Auswertung	C-/S-Umlaufförderer	Paternoster Förderer	Schachtheber
Jährliche Abschreibung [€/a]	4.000,00	2.666,67	1.666,67
Zinskosten [€/a]	-	-	-
Fixkosten pro Jahr [€/a]	4.000,00	2.666,67	1.666,67
Energiekosten [€/a]	3.465,00	1.386,00	1.001,00
Instandhaltungskosten [€/a]	4.800,00	3.200,00	2.000,00
Personalkosten pro Jahr [€/a]	3.055,56	3.055,56	5.092,59
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	11.320,56	7.641,56	8.093,59
Fixkosten pro Jahr [€/a]	4.000,00	2.666,67	1.666,67
Variable Kosten pro Jahr [€/a]	11.320,56	7.641,56	8.093,59
Gesamtkosten pro Jahr [€/a]	15.320,56	10.308,22	9.760,26
Rangordnung	3	2	1

Tabelle 57: Kommerzielle Bewertung Fallbeispiel 3 (Eigene Darstellung)

Anhang C4: Fallbeispiel 4

Fragebogen zur Analyse der Ausgangssituation					
Nr.	Fragen	Antwort		Ausprägung und Kommentar	
		Ja	Nein		
1. Transportgut					
				zutreffende Ausprägung mit einem "X" markieren	
1.1	Um welche Art von Transportgut handelt es sich?			☒ Stückgut ☐ Schüttgut ☐ Flüssigkeit	☐ Gas ☐ _____
1.2	Welche Transporthilfsmittel werden für den Transport verwendet?			☒ Europaletten ☐ Gitterbox ☐ Werkzeugträger ☐ Rohstoffe ☐ Trays ☐ Behälter ☐ Kartontage	☐ Kleinladungsträger (KLT) ☐ Gefäße ☐ Tablare ☐ Säcke ☐ Gepäck ☐ stapelbares Palettengestell ☐ Palette mit Stahlkäfig
1.3	Welche maximale Abmaße hat das Transportgut mit dem Transporthilfsmittel (Angabe von: Länge x Breite x Höhe in [mm])?			1200x800x1500	
1.4	Welches Transportgewicht muss pro Einheit befördert werden? (Gewicht in [kg])			1500	
1.5	Gibt es Unregelmäßigkeiten in der Lastverteilung? (z.B.: bei Fluiden die sich bewegen, dezentraler Schwerpunkt usw.)		X		
1.6	Gibt es besondere Eigenschaften der zu transportierenden Güter? Wenn ja, welche?	X		☐ heiß ☐ kalt ☐ sperrig ☐ zerbrechlich ☐ nass ☒ trocken ☐ klebrig	☐ neigt zum Kippen / Rutschen ☐ schmutzig ☐ stoßempfindlich ☐ Lebensmittel ☐ magnetisch ☐ korrosionsanfällig
1.7	Ist das Transportgut als gefährlich einzustufen? Wenn Ja, warum?		X	☐ entflammbar ☒ explosiv ☐ giftig	☐ ätzend ☐ _____
2. Allgemeine Anforderungen					
2.1	Müssen spezielle gesetzliche Bestimmungen oder Vorschriften berücksichtigt werden?		X		
2.2	Gibt es Einschränkungen in den Platzverhältnissen oder durch spezielle bauliche Vorgaben, die Installation eines vertikalen Transporthilfsmittels beeinflussen könnten?	X		☐ Maschinen ☐ Regale ☒ Tore ☐ Versorgungsleitungen ☐ Traglast Boden ☐ lichte Höhe	☐ Schienen ☐ Schächte ☐ Säule ☐ tragende Wände ☐ _____
2.3	Herrschen besondere betriebliche Umgebungsbedingungen, welche Einfluss auf das Transportmittel haben? Wenn ja, welche?	X		☐ Vibration ☐ Chemikalien ☐ normale Luftfeuchtigkeit ☒ erhöhte Luftfeuchtigkeit ☐ klimatisierte Räume ☐ erhöhte Temperatur (> 30° Celsius) ☐ niedrige Temperatur (< 5° Celsius) ☐ Hygieneanforderung	☐ Dampf ☐ Verunreinigungen ☒ Staub ☐ Späne oder andere feine Partikel ☐ magnetische oder elektrische Felder ☐ Öle, Fette ☐ _____
3. Transportprozess					
3.1	Wie hoch ist die tägliche Transportfrequenz (Einheiten pro Tag)?			20	
3.2	Tritt die Transportaufgabe regelmäßig auf?	X		☐ gelegentlich ☐ stoßweise	☐ saisonal ☐ _____
3.3	Über wie viele Stockwerke muss die Einheit transportiert werden können?			1	
3.4	Wie hoch sind die Stockwerke, die durch das Transportmittel bedient werden sollen (in [m])?			4,5	
3.5	Ist das Transportmittel die einzige Möglichkeit, das Transportgut zwischen den Geschossen zu befördern?	X			
3.6	Muss ein Transport in beide Richtungen gleichzeitig möglich sein?		X		
3.7	Muss die Förderrichtung umgekehrt werden können?	X			
3.8	Dient der vertikale Transportprozess als Schnittstelle zwischen zwei unterschiedlichen Produktionsprozessen?		X		
3.9	Werden während des Transportes mehrere Quellen (Beladestellen) und Senken (Abgabestellen) bedient?		X		
3.10	Wie erfolgt die Bereitstellung des Transportgutes am Ausgangspunkt?			☐ von Hand ☒ Stapler ☐ Kran ☐ Hubwagen	☐ Roboter ☐ Rollenbahn ☐ Bandförderer
3.11	Wie erfolgt die Entnahme bzw. Weiterbeförderung nach dem stockwerksübergreifenden Transport?			☒ von Hand ☐ Stapler ☐ Kran ☐ Hubwagen	☐ Roboter ☐ Rollenbahn ☐ Bandförderer
3.12	Muss das neue Transportmittel an bestehende Förder- oder Transportsysteme angebunden werden?		X		
4. Transportmittel					
4.1	Muss eine hohe Zuverlässigkeit gewährleistet werden?	X			
5. Wirtschaftlichkeit					
5.1	An wie vielen Tagen im Jahr wird in der Produktion gearbeitet? [d/a]			220	
5.2	Wie viele Arbeitsstunden pro Tag werden gearbeitet? [h/d]			16	
5.3	Was für ein Zinssatz wird für die Fremdfinanzierung verlangt? [%]			0	
5.4	Wie hoch ist der Fremdfinanzierungsanteil bei der Investition? [%]			0	
5.5	Wie hoch ist das durchschnittliche brutto Jahresgehalt des Logistikmitarbeiters? [€]			45000	
5.6	Wie hoch ist der aktuelle Strompreis in [€/kWh]?			0,2	

Tabelle 58: Fragenkatalog Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

Legende			Anforderungsliste für die Transportmittelauswahl	
Relevanz	Symbol			
Forderung	F			
Wunsch	W			
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
1	Art des Transportgutes	F	Stückgut	
2	Transporthilfsmittel	F	Europaletten	
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	F	1200x800x1500	
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	F	1500	
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	F	20	
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	F	4,5	
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	F	4,5	
8	Umkehrbare Förderrichtung	F	Ja	
9	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	-	Nein	
10	Unregelmäßige Lastverteilung	-	Nein	
11	Besondere Eigenschaften und Zustand Transportgut	F	trocken	
12	Gefahrgut	-	Nein	
13	Zusätzliche Gesetzesbestimmungen	-	Nein	
14	Einschränkungen der Platzverhältnisse oder durch spezielle bauliche Vorgaben	F	Tore, Versorgungsleitungen	
15	Besondere Bedingungen in der Betriebsumgebung	F	Staub, Späne oder andere feine Partikel	
16	Regelmäßiger Transport	-	Ja	
17	Einzigste Transportmöglichkeit	-	Ja	
18	Anfahren mehrerer Quellen und Senken	-	Nein	
19	Schnittstelle zwischen zwei Produktionsprozessen	-	Nein	
20	Bereitstellung des Transportgutes	F	Stapler	
21	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	F	von Hand	
22	Notwendigkeit zur Anbindung an bestehende Förder-/ Transportsysteme	-	Nein	
23	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	F	Ja	
Hilfestellung: A. Kriterienkatalog			Zusätzliche Anforderungen	
Nr.	Forderung und Wünsche	F/W	Ausprägung	Kommentar
22	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen	W		Berücksichtigung zukünftiger Fabriksanforderungen
23	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit	W		Umweltverträglichkeit, Recyclingfähigkeit usw.
24	Synchronisation	W		Abstimmung mit dem Materialfluss in anderen Stockwerken
25	Platzbedarf/Flächenbedarf	W		Bauliche Beschränkungen, benötigte Stellfläche
26	Flexibilität/Layoutänderung	W		Anpassungsfähigkeit bei Veränderungen an Standorten (Quelle, Senke, Lage)
27	Anwendungsfreundlichkeit	W		Bedienkomfort, Übersichtlichkeit, Kennzeichnungen, Haptic usw.
28	Energieverbrauch	W		Stromverbrauch in kWh
29	Sauberkeit	F		Transportmittel soll keine Verschmutzungen verursachen z.B.: Fett- oder Ölaustritt, Staubentwicklung; Besonders wichtig wenn hohe Hygieneanforderungen gefordert sind
30	Automatisierungsgrad	W		Grad der eigenständigen Abwicklung von Transportaufgaben (manuell bis vollautomatisch)
35				

Tabelle 59: Anforderungsliste Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

Legende			Transportmittel								
Relevanz (Symbol)			Lastenaufzug	Säulenheber	Angetriebene Rollenbahn mit Schrägförderung	C-/S-Umlaufrörder	Paternoster Förderer	Schachtheber	Hubgerät	Portalheber	Vertikalspeicher
Geeignet (✓)											
Nicht geeignet (X)											
Nr.	Forderungen	Ausprägung									
1	Art des Transportgutes	Stückgut	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Transporthilfsmittel	Europaletten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Max. Abmessung der Transporteinheit LxBxH in [mm]	1200x800x1500	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓	X
4	Transportgewicht pro Einheit in [kg]	1500	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	X
5	Transportfrequenz [Einheiten/pro Tag]	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Vertikale Förderhöhe pro Stockwerk in [m]	4,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Vertikale Förderstanz insgesamt in [m]	4,5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Umkehrbare Förderrichtung	Ja	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	✓
8	Erforderlicher Transport in beide Richtungen gleichzeitig	Nein	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Besondere Eigenschaften und Zustand Transportgut	trocken	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	Einschränkungen der Platzverhältnisse oder durch spezielle bauliche Vorgaben	Tore, Versorgungsleitungen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	Besondere Bedingungen in der Betriebsumgebung	Staub, Späne oder andere feine Partikel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	Bereitstellung des Transportgutes	Stapler	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	Entnahme bzw. Weiterbeförderung des Transportgutes	von Hand	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	Notwendigkeit einer hohen Zuverlässigkeit	Ja	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
16	Sauberkeit		X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17											

Tabelle 60: Identifikation geeigneter Alternativen Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

Gewichtung								
Kriteriengruppe		Absolute Gruppen Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Gruppen Gewichtung	Kriterien		Absolute Kriterien Gewichtung Punktevergabe 0-100	Relative Kriterien Gewichtung	
I	k_i	A_i	G_i	i	k_i	A_k	G_k	$G_i = G_i * G_k$
I	Systemintegration	20	20%	1	Anwendungsfreundlichkeit	40	40%	8%
				2	Automatisierungsgrad	15	15%	3%
				3	Platzbedarf/Flächenbedarf	40	40%	8%
				4	Synchronisation	5	5%	1%
				5		0	0%	0%
					Summe	100	100%	
II	Flexibilität	70	70%	1	Berücksichtigung zukünftiger Erweiterungen	60	60%	42%
				2	Flexibilität Layoutänderung	40	40%	28%
				3		0	0%	0%
				4		0	0%	0%
				5		0	0%	0%
					Summe	100	100%	
III	Nachhaltigkeit	10	10%	1	Energieverbrauch	50	50%	5%
				2	Sauberkeit	20	20%	2%
				3	Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit	30	30%	3%
				4		0	0%	0%
				5		0	0%	0%
					Summe	100	100%	
Summe der Gewichte		100	100%					100%

Tabelle 61: Gewichtung Fallbeispiel 4 (Eigene Darstellung)

Anhang D: Ausgefüllte PSSUQ-Fragebögen der Fallbeispiele

Anhang D1: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 1



Fragebogen zur Validierung der entwickelten Methodik zur „Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmitteltechnologien“

Hinweis: Dieser Fragebogen dient zur Bewertung und Validierung der entwickelten Methode.

Bitte beantworten Sie die einzelnen Aussagen anhand der angegebenen Skalen indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie „N/A“ (nicht zu beantworten) an und begründen Sie dies in der darunter angeführten Zeile. Falls Sie gegebenenfalls ergänzende Anmerkungen haben, können Sie diese auch in den entsprechenden „Kommentar“ Zeilen vermerken.

1. Insgesamt bin ich zufrieden damit wie einfach, die Methode anzuwenden ist.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Fragen könnten besser erklärt/eindeutiger sein, Kriterienkatalog ist überfordernd lang

2. Es war leicht die Methode anzuwenden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: siehe oben

3. Ich konnte die notwendigen Schritte mit dieser Methode effektiv durchführen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: alle relevanten Aspekte da, Bewertung in Nutzwertmatrix erfordert Wissen über Technologien

4. Ich fühlte mich bei der Nutzung der Methode sicher.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Ergebnisse und Berechnung schlüssig

5. Es war leicht, die Struktur und den Umgang mit der Methode zu erlernen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Struktur gut sichtbar, Fragebogen teils uneindeutig

6. Ich glaube, dass ich diese Methode schnell produktiv anwenden kann.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: schnell zu erlernen, bessere Datenbasis der Technologien nötig

7. Die Methode bietet eine klare Anleitung und Hilfestellung bei auftretenden Fehlern.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐		☐

Kommentar: teils durch Datenüberprüfung in Excel, sonst kaum Fehlerhandling

8. Falls ich einen Fehler gemacht habe, konnte ich diesen leicht erkennen und korrigieren.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☒

Kommentar: durch angeleitete Abarbeitung nicht relevant

9. Die bereitgestellten Informationen (z.B.: Hinweise, Fragebogen, Kriterienkatalog, usw.) waren verständlich und hilfreich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: hilfreich, aber teils mehr Information nötig

10. Es war einfach die benötigten Informationen zu finden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: gut strukturiert

11. Die vorhandenen Informationen haben mir bei der Bewältigung der Entscheidungsfindung sehr geholfen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: klar, wie Ergebnis entstanden ist, mehr Datenbasis vorteilhaft

12. Die Struktur der Eingabe- und Ergebnisdarstellung ist klar aufgebaut.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

13. Die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse war übersichtlich und verständlich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

14. Mir hat die Nutzung der Methode in Excel gefallen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: einfach zu bedienen und anzupassen, bessere Führung in anderen Tools möglich

15. Die Methode bietet alle Funktionen und Anpassungsmöglichkeiten, die ich erwartet habe.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

16. Insgesamt bin ich mit der Auswahlmethodik zufrieden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Abbildung 19: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 1 (Eigene Darstellung)

Anhang D2: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 2



Fragebogen zur Validierung der entwickelten Methodik zur „Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmitteltechnologien“

Hinweis: Dieser Fragebogen dient zur Bewertung und Validierung der entwickelten Methode.

Bitte beantworten Sie die einzelnen Aussagen anhand der angegebenen Skalen indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie „N/A“ (nicht zu beantworten) an und begründen Sie dies in der darunter angeführten Zeile. Falls Sie gegebenenfalls ergänzende Anmerkungen haben, können Sie diese auch in den entsprechenden „Kommentar“ Zeilen vermerken.

1. Insgesamt bin ich zufrieden damit wie einfach, die Methode anzuwenden ist.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Gute strukturierte Vorgehensweise

2. Es war leicht die Methode anzuwenden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Kriterienkatalog ist ein wenig lang

3. Ich konnte die notwendigen Schritte mit dieser Methode effektiv durchführen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Schrittweiser Aufbau sehr schlüssig

4. Ich fühlte mich bei der Nutzung der Methode sicher.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Vorwissen zu den einzelnen Technologien notwendig

5. Es war leicht, die Struktur und den Umgang mit der Methode zu erlernen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Fragebogen ist hilfreich zur Informationsgewinnung, Klare Vorgehensweise

6. Ich glaube, dass ich diese Methode schnell produktiv anwenden kann.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Einfache Bedienung durch automatische Datenübernahme

7. Die Methode bietet eine klare Anleitung und Hilfestellung bei auftretenden Fehlern.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Fehler wurden vereinzelt angezeigt

8. Falls ich einen Fehler gemacht habe, konnte ich diesen leicht erkennen und korrigieren.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

9. Die bereitgestellten Informationen (z.B.: Hinweise, Fragebogen, Kriterienkatalog, usw.) waren verständlich und hilfreich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Haben bei der Entscheidungsfindung geholfen

10. Es war einfach die benötigten Informationen zu finden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

11. Die vorhandenen Informationen haben mir bei der Bewältigung der Entscheidungsfindung sehr geholfen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Fragenkatalog und Kriterienkatalog waren hilfreich

12. Die Struktur der Eingabe- und Ergebnisdarstellung ist klar aufgebaut.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

13. Die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse war übersichtlich und verständlich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

14. Mir hat die Nutzung der Methode in Excel gefallen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Einfache Datenübertragung zwischen den Tabellenblättern

15. Die Methode bietet alle Funktionen und Anpassungsmöglichkeiten, die ich erwartet habe.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Kriterien können individuell zusammengestellt werden

16. Insgesamt bin ich mit der Auswahlmethodik zufrieden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Abbildung 20: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 2 (Eigene Darstellung)

Anhang D3: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 3



Fragebogen zur Validierung der entwickelten Methodik zur „Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmitteltechnologien“

Hinweis: Dieser Fragebogen dient zur Bewertung und Validierung der entwickelten Methode.

Bitte beantworten Sie die einzelnen Aussagen anhand der angegebenen Skalen indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie „N/A“ (nicht zu beantworten) an und begründen Sie dies in der darunter angeführten Zeile. Falls Sie gegebenenfalls ergänzende Anmerkungen haben, können Sie diese auch in den entsprechenden „Kommentar“ Zeilen vermerken.

1. Insgesamt bin ich zufrieden damit wie einfach, die Methode anzuwenden ist.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Gute strukturierte Vorgehensweise

2. Es war leicht die Methode anzuwenden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Übersichtlicher Aufwand, Eingabe durch visuelle Darstellungen vereinfacht

3. Ich konnte die notwendigen Schritte mit dieser Methode effektiv durchführen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: strukturierte Vorgehensweise

4. Ich fühlte mich bei der Nutzung der Methode sicher.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Bewertung in der Nutzwertanalyse benötigt Vorwissen

5. Es war leicht, die Struktur und den Umgang mit der Methode zu erlernen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: hilfreich war die Schritt für Schritt Abarbeitung und Eingabe der Daten

6. Ich glaube, dass ich diese Methode schnell produktiv anwenden kann.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

7. Die Methode bietet eine klare Anleitung und Hilfestellung bei auftretenden Fehlern.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐		☐

Kommentar: Es wird kurz als Hinweis beschrieben, ansonsten ist mir nichts aufgefallen

8. Falls ich einen Fehler gemacht habe, konnte ich diesen leicht erkennen und korrigieren.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☒

Kommentar: habe keine Fehler gemacht bzw. es wurde nichts angezeigt

9. Die bereitgestellten Informationen (z.B.: Hinweise, Fragebogen, Kriterienkatalog, usw.) waren verständlich und hilfreich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Teilweise gut, jedoch mehr Informationen zu Technologien notwendig

10. Es war einfach die benötigten Informationen zu finden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: alles klar ersichtlich

11. Die vorhandenen Informationen haben mir bei der Bewältigung der Entscheidungsfindung sehr geholfen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Fragenkatalog war sehr gut zur Informationsgewinnung

12. Die Struktur der Eingabe- und Ergebnisdarstellung ist klar aufgebaut.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

13. Die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse war übersichtlich und verständlich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

14. Mir hat die Nutzung der Methode in Excel gefallen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: War einfach zu verwenden, jedoch wäre eine Webanwendung oä. noch besser

15. Die Methode bietet alle Funktionen und Anpassungsmöglichkeiten, die ich erwartet habe.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

16. Insgesamt bin ich mit der Auswahlmethodik zufrieden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar: Durchführung war strukturiert und einfach, jedoch mehr Vorwissen notwendig

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Abbildung 21: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 3 (Eigene Darstellung)

Anhang D4: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 4



Fragebogen zur Validierung der entwickelten Methodik zur „Auswahl vertikaler innerbetrieblicher Transportmitteltechnologien“

Hinweis: Dieser Fragebogen dient zur Bewertung und Validierung der entwickelten Methode.

Bitte beantworten Sie die einzelnen Aussagen anhand der angegebenen Skalen indem Sie die entsprechende Zahl ankreuzen. Wenn eine Aussage nicht zutrifft, kreuzen Sie „N/A“ (nicht zu beantworten) an und begründen Sie dies in der darunter angeführten Zeile. Falls Sie gegebenenfalls ergänzende Anmerkungen haben, können Sie diese auch in den entsprechenden „Kommentar“ Zeilen vermerken.

1. Insgesamt bin ich zufrieden damit wie einfach, die Methode anzuwenden ist.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

2. Es war leicht die Methode anzuwenden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

3. Ich konnte die notwendigen Schritte mit dieser Methode effektiv durchführen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

4. Ich fühlte mich bei der Nutzung der Methode sicher.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

5. Es war leicht, die Struktur und den Umgang mit der Methode zu erlernen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

6. Ich glaube, dass ich diese Methode schnell produktiv anwenden kann.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

7. Die Methode bietet eine klare Anleitung und Hilfestellung bei auftretenden Fehlern.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

8. Falls ich einen Fehler gemacht habe, konnte ich diesen leicht erkennen und korrigieren.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

9. Die bereitgestellten Informationen (z.B.: Hinweise, Fragebogen, Kriterienkatalog, usw.) waren verständlich und hilfreich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

10. Es war einfach die benötigten Informationen zu finden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

11. Die vorhandenen Informationen haben mir bei der Bewältigung der Entscheidungsfindung sehr geholfen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

12. Die Struktur der Eingabe- und Ergebnisdarstellung ist klar aufgebaut.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

13. Die visuelle Aufbereitung der Ergebnisse war übersichtlich und verständlich.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

14. Mir hat die Nutzung der Methode in Excel gefallen.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

15. Die Methode bietet alle Funktionen und Anpassungsmöglichkeiten, die ich erwartet habe.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

16. Insgesamt bin ich mit der Auswahlmethodik zufrieden.

Stimme voll und ganz zu	1	2	3	4	5	6	7	Stimme überhaupt nicht zu	N/A
☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐

Kommentar:

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Abbildung 22: PSSUQ-Fragebogen Fallbeispiele 4 (Eigene Darstellung)