



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Fachgebiet Logistik

MASTERARBEIT

**Simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl
unter Anwendung von nichtlinearer
ganzzahliger Programmierung im Lausitzer
Revier**

Author: *Matrikelnummer:*
Leo Weyer 407373

Supervisor:
Prof. Dr. Straube
M.Sc. Maximilian Bähring

20. Mai 2025

Disclaimer

Gender-Disclaimer

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

KI-Disclaimer

In dieser wissenschaftlichen Arbeit wurden Künstliche-Intelligenz-(KI)-Technologien zur Unterstützung verschiedener Aspekte der Forschung eingesetzt. Die Nutzung umfasst die Rechtschreibkorrektur und die Generierung von Ideen.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die endgültige Verantwortung für die inhaltliche Richtigkeit, die kritische Reflexion und die Interpretation der Ergebnisse beim Autor dieser Arbeit liegt. Die KI diene lediglich als Werkzeug und nicht als Ersatz für das kritische und analytische Denken des Forschenden. Genutzte KIs werden daher in der eidesstattlichen Erklärung zu dieser Arbeit genannt und im Nutzungsumfang beschrieben.

Abstract

This thesis investigates the potential of integrated decision-making for facility location and transport mode selection within the context of industrial site planning. A simulation-based optimization model employing nonlinear integer programming was developed to support strategic planning processes, with a particular focus on the interplay between road and rail freight transport under regional constraints.

Grounded in a comprehensive theoretical framework, the regional level is identified as the most suitable spatial scale for integration, offering a balance between operational differentiation and strategic relevance. Scenario-based simulations, incorporating realistic cost parameters, reveal that simultaneous optimization can yield substantial cost savings compared to sequential approaches, especially under conditions of high and stable shipment volumes, sufficient transport distances, and supportive intermodal infrastructure and policy environments.

The findings underscore the relevance of integrated models for tactical logistics planning and provide a methodological foundation applicable to other geographic regions and intermodal configurations.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abstract | iii |
| Abbildungsverzeichnis | vi |
| Tabellenverzeichnis | vii |
| Glossar | vii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangslage und Problemstellung | 1 |
| 1.2 Methodik | 2 |
| 1.3 Zielbeschreibung und Vorgehensweise | 6 |
| 2 Theoretischer Hintergrund | 11 |
| 2.1 Standortplanung | 12 |
| 2.1.1 Idealtypischer Prozess | 15 |
| 2.1.2 Standortfaktoren auf regionaler Betrachtungsebene | 17 |
| 2.1.3 Moderne Ansätze in der Standortplanungsforschung | 29 |
| 2.2 Kombiniertes Verkehr | 31 |
| 2.2.1 Moderne Ansätze in der kombinierten Verkehrsplanung | 33 |
| 2.2.2 Regionale Anforderungen | 36 |
| 3 Durchführung der Simulationsstudie | 39 |
| 3.1 Aufgabendefinition | 40 |
| 3.2 Systemanalyse | 42 |
| 3.2.1 Beschreibung des realen Systems | 42 |
| 3.2.2 Konzeptmodell | 44 |
| 3.2.3 Validierung des Konzeptmodells | 46 |
| 3.3 Datenbeschaffung | 47 |
| 3.3.1 Benötigte Datenquellen | 47 |
| 3.3.2 Verantwortlichkeiten und Verfügbarkeit | 48 |
| 3.3.3 Validierung erhobener Daten | 49 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4 | Modellformalisierung | 49 |
| 3.4.1 | Modellformulierung für die Standort- und Verkehrsträgerwahl . . . | 50 |
| 3.4.2 | Zielfunktion | 50 |
| 3.4.3 | Nebenbedingungen | 52 |
| 3.4.4 | Validierung des formalen Modells | 55 |
| 3.5 | Datenaufbereitung | 56 |
| 3.5.1 | Distanzen | 57 |
| 3.5.2 | Kostenparameter | 59 |
| 3.5.3 | Unternehmensdaten | 62 |
| 3.6 | Implementierung | 62 |
| 3.7 | Experimente und Analyse | 64 |
| 3.7.1 | Analyse der Basislösung | 64 |
| 3.7.2 | Einfluss der Kostenrelation Straße–Schiene | 67 |
| 3.7.3 | Einfluss der Frachtkonsolidierungseffekte | 69 |
| 3.7.4 | Beantwortung der primären Forschungsfrage | 71 |
| 4 | Diskussion | 77 |
| 4.1 | Nachnutzung | 77 |
| 4.2 | Fazit und kritische Würdigung | 79 |
| 5 | Zusammenfassung | 81 |
| | Literaturverzeichnis | 83 |
| | Eidesstattliche Erklärung | 87 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Vorgehensmodell nach ASIM | 4 |
| 1.2 | Primäre und sekundäre Forschungsfragen der Arbeit | 6 |
| 2.1 | Idealtypischer Entscheidungsprozess | 16 |
| 2.2 | Räumliche Betrachtungsebenen der betrieblichen Standortplanung | 18 |
| 2.3 | Qualitative und quantitative Standortfaktoren | 21 |
| 2.4 | Betrachtete Standortfaktoren bewertet nach Einfluss auf den Gesamtent- scheidungsprozess der Standortplanung und der Variabilität auf regionaler Ebene (eigene Darstellung). | 28 |
| 2.5 | Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutsch- land (1990–2022) mit Zielpfad bis 2045 | 32 |
| 2.6 | Entwicklung des Forschungsschwerpunkts im intermodalen Verkehr | 34 |
| 3.1 | Kartendarstellung der Lausitz aus dem Lausitz Investor Guide | 43 |
| 3.2 | Schematische Darstellung des Konzeptmodells (eigene Darstellung). | 45 |
| 3.3 | Kostenentwicklung pro Transporteinheit für Ausführung des Modells mit freier Standortwahl und mit Festlegung auf Welzow (eigene Darstellung). | 66 |
| 3.4 | Modelllösungen für relativ erhöhte Transportkosten für Transporte über die Straße für Ausführung des Modells mit freier Standortwahl und mit Festlegung auf Ottendorf-Okrilla (eigene Darstellung). | 68 |
| 3.5 | Einfluss der Frachtkonsolidierungseffekte (ε) auf die Transportkosten (ei- gene Darstellung). | 70 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Verwendete Datenquellen und deren Inhalte | 48 |
| 3.2 | Indizes des mathematischen Modells | 54 |
| 3.3 | Parameter des mathematischen Modells | 55 |
| 3.4 | Entscheidungsvariablen des mathematischen Modells | 55 |
| 3.5 | Auszug aus der Tabelle der Straßendistanzen (in km) | 58 |
| 3.6 | Schienendistanzen zwischen den KV-Terminals (in km) | 58 |
| 3.7 | Kostenparameter des Modells (vorläufige Werte, bezogen auf Durchschnitts- distanzen) | 61 |
| 3.8 | Produktionsmengen pro Transport für unterschiedliche Standortgrößen . . | 62 |
| 3.9 | Transportkostenvergleich für drei Produktionsgrößen | 65 |
| 3.10 | Zentrale Aspekte und deren Relevanz für die simultane Planung von Standort- und Verkehrsträgerwahl | 75 |

Glossar

| | |
|------|--|
| ASIM | Arbeitsgemeinschaft Simulation |
| FTL | Vollständige Zugladungen "Full-Train Loads" |
| KV | Kombinierter Verkehr |
| LTL | Unvollständige Zugladungen "Less-Than-Train-Loads" |
| TE | Transporteinheit |
| V&V | Verifikation und Validierung |

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Durch die integrierte Betrachtung ursprünglich separierter Planungsbereiche konnten in der Vergangenheit in unterschiedlichsten Bereichen weitreichende Verbesserungen erzielt werden. Ein prägnantes Beispiel hierfür liefert die Entwicklung komplexer technischer Produkte im Rahmen des sogenannten „Concurrent Engineering“. Traditionell wurde die Produktgestaltung zunächst abgeschlossen, bevor die Fertigungsplanung erfolgte. Diese sequentielle Herangehensweise führte häufig dazu, dass spätere Fertigungsprozesse nicht optimal auf das zuvor erstellte Produktdesign abgestimmt waren. Erst die gleichzeitige, integrative Planung von Konstruktion und Produktion ermöglichte es, Fertigungszeiten zu verkürzen, Produktionskosten zu senken und gleichzeitig die Qualität des Endprodukts zu erhöhen, ohne dabei Kompromisse in einem der Teilbereiche eingehen zu müssen. Stattdessen entstand durch die parallele Abstimmung ein beidseitiger Mehrwert. Die Produktionsplanung profitierte von frühzeitigen Erkenntnissen aus dem Designprozess, während das Produktdesign wiederum durch direktes Feedback aus der Fertigungstechnik optimiert wurde. Dieses Beispiel ist anekdotisch, zeigt aber deutlich, dass durch eine leichte Anpassung der umfassten Grenzen die Planung praktisch profitieren kann. Ähnliche Beispiele, bei denen durch eine integrierte Betrachtung in einem Bereich deutliche Verbesserungen erreicht wurden, ohne in einem anderen Bereich Einbußen hinnehmen zu müssen, finden sich etwa in der kombinierten Stadt- und Verkehrsplanung, der vernetzten Energie- und Materialflussoptimierung in der Fabrikplanung sowie in ganzheitlichen Qualitäts- und Produktionsmanagementsystemen.

Die Idee, die Planungsgrundlage möglichst breit aufzustellen, ist nicht neu. Das Problem, das dieses Vorgehen mit sich bringt, ist allerdings, dass mit der Erweiterung der Planungsgrundlage um einzelne Aspekte beziehungsweise der Integration ganzer eigenständiger Planungsbereiche in eine gemeinsame übergeordnete Planung neben der Güte des Ergebnisses vor allem die Komplexität des Problems zunimmt. Mit der anhaltenden Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Rechnerarchitektur und der damit verfügbaren Rechenleistung lassen sich heute Optimierungsprobleme auf durchschnittlichen Privatrechnern in Sekunden lösen, die auf Hochleistungscomputern vor wenigen Jahrzehnten noch Wochen

1 Einleitung

benötigt haben. Aus der Möglichkeit, Modelle mit wachsender Komplexität zu nutzen, entsteht so gesehen die Notwendigkeit, periodisch die Möglichkeiten integrierter Planung verwandter Planungsbereiche zu evaluieren.

Zwei solcher verwandten Planungsbereiche könnten beispielsweise in der strategischen Standortplanung von Unternehmen und deren Transportplanung zu finden sein, wenn hierbei die Wahl des geeigneten Verkehrsträgers und damit verbundene Transportkosten integrativ in die Standortentscheidung eingebunden werden. Während Standortplanung und Verkehrsträgerwahl bislang häufig unabhängig voneinander getroffen wurden, legt der Erfolg integrativer Vorgehensweisen in anderen Bereichen nahe, dass auch hier synergetische Effekte generiert werden können. Die Herausforderung besteht darin, ein geeignetes methodisches Gerüst zu entwickeln, das beide Domänen, Standortwahl und Verkehrsträgereinsatz, auf sinnvolle Weise miteinander verknüpft.

Dazu werden im Zuge dieser Arbeit die Aspekte herausgestellt, die für eine erfolgreiche Integration von Standortplanung und Kombiniertes Verkehr (KV), also dem Gütertransport unter Nutzung mehrerer Verkehrsträger ohne Umladung der Ware selbst, wichtig sind. Diese Arbeit untersucht, unter welchen Bedingungen eine simultane Betrachtung von Standortplanung und Verkehrsträgerwahl wirtschaftlichen Mehrwert generieren kann. Dabei dient das Lausitzer Revier als Untersuchungsregion, um die theoretischen Überlegungen an konkreten Daten und Rahmenbedingungen zu erproben. Die Lausitz als Region bietet sich hervorragend für die Betrachtung an. Etwa ermöglicht ihr Strukturwandel ein praxisnahes Testfeld für neue, integrierte Planungsansätze. In Abschnitt 3.2.1 wird auf die Lausitz als Untersuchungsregion vertieft eingegangen. Abschließend wird in dieser anhand exemplarischer Szenarien wie veränderten Kostenparametern oder Transportmengen die Güte des Ansatzes und des im Zuge dessen entwickelten Modells überprüft.

1.2 Methodik

In dieser Sektion wird die Methodik eingeführt, die im Verlauf der Arbeit Anwendung findet. Es wird außerdem festgestellt, worauf der Fokus der Methodik liegt und was durch deren Anwendung erreicht werden soll.

In der wissenschaftlichen Praxis dient die Methodik nicht nur der Zielerreichung, sondern auch der Vermeidung systematischer Fehler, die die Aussagekraft der Ergebnisse beeinträchtigen könnten. In Simulationsstudien, die komplexe Systeme nachbilden, ist die Methodik von besonderer Bedeutung, da sie die gesamte Modellbildung, von der Datenbeschaffung über die Implementierung bis hin zur Validierung und Analyse, strukturiert.

1 Einleitung

Das Ziel ist, dass sowohl die Genauigkeit der Ergebnisse als auch deren Übertragbarkeit auf reale Szenarien maximiert wird.

Diese Arbeit greift etablierte Standards und Ansätze aus der Fachliteratur auf, um eine strukturierte und zielgerichtete Bearbeitung der Forschungsfragen zu ermöglichen. Dabei orientiert sich die Methodik an den Standards der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), wie sie in den Werken „Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik“ Rabe u. a. (2008) und „Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik“ Wenzel u. a. (2008) beschrieben sind. Diese Werke liefern ein systematisches Vorgehensmodell, das speziell für Simulationsstudien entwickelt wurde und sowohl die methodische Tiefe als auch die praktische Anwendbarkeit berücksichtigt.

Das der Arbeit zugrunde liegende Vorgehensmodell basiert auf der erweiterten Version des Ansatzes aus „Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik“. Es strukturiert den Prozess der Simulationsstudie in drei Hauptphasen: die Definitions- und Angebotsphase, die Durchführung der Simulationsstudie sowie die Nachnutzungsphase. Besonders die Definitions- und Angebotsphase ist durch klar definierte Arbeitspakete mit dokumentierten Zwischenergebnissen gekennzeichnet, wodurch eine hohe Transparenz und Qualität in der Modellentwicklung und -anwendung sichergestellt wird. Dieses strukturierte Vorgehen gewährleistet die Einhaltung methodischer Standards und erlaubt den Einsatz praxistauglicher Validierungstechniken. Die Methodik dieser Arbeit greift diese Struktur auf und erweitert sie gezielt, um den spezifischen Anforderungen der untersuchten Problemstellung gerecht zu werden.

Die Methodik dieser Arbeit verfolgt das Ziel, ein fundiertes und nachvollziehbares Vorgehen zur Entwicklung eines Simulationsmodells zu beschreiben, das die Fragestellung der Arbeit adressiert. Dazu wird untersucht, unter welchen theoretischen Voraussetzungen die Betrachtung am aussichtsreichsten ist, und es wird erläutert, warum die Lausitz als Versuchsregion diese erfüllt. Anschließend wird ein nichtlineares ganzzahliges Optimierungsmodell verwendet, um statische Simulationen verschiedener Szenarien durchzuführen. Ziel des Modells ist es, die simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl im Lausitzer Revier zu analysieren und die in dieser Betrachtung vermuteten Potenziale zu quantifizieren. Dabei werden auch der Einfluss von Kostenparametern sowie Transportmengen und Frachtkonsolidierungseffekten auf die Modelllösungen untersucht. Im Zentrum steht die Frage nach den notwendigen Gegebenheiten, sodass eine integrierte Betrachtung dieser beiden Themenbereiche einen wirtschaftlichen Mehrwert bietet.

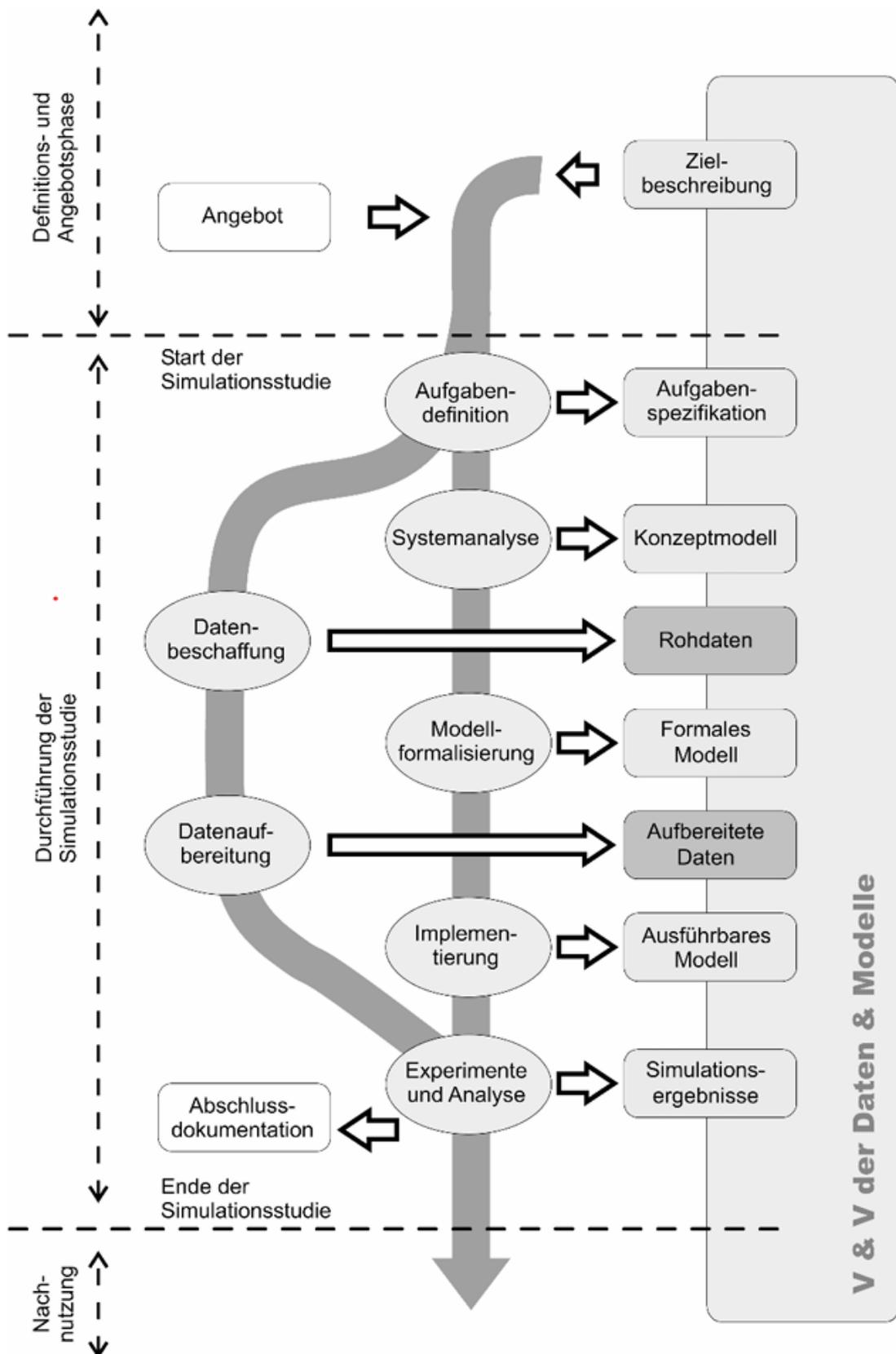


Abbildung 1.1: Vorgehensmodell nach ASIM Wenzel u. a. 2008, S. 6

1 Einleitung

Die erste Phase, die Definitions- und Angebotsphase, legt den methodischen Grundstein der Arbeit. Hier wird das Ziel der Simulationsstudie präzise definiert und in einer detaillierten Aufgabenbeschreibung festgehalten. Der zentrale Mechanismus, der in der Methodik zur Erreichung des Abschnittsziels, einer klaren Beschreibung der Ziele und deren Implikationen, vorgesehen ist, besteht in einer Feedbackschleife zwischen Auftraggeber und Durchführer der Simulationsstudie. Da in dieser Arbeit kein externer Auftraggeber involviert ist, wird dieser Mechanismus als Kontrollfunktion für die Validität und Sinnhaftigkeit der definierten Ziele mit einer Betrachtung des für die Zielbeschreibung relevanten theoretischen Hintergrundes ersetzt. Die Beschreibung der zu erreichenden Ziele wird im nachfolgenden Kapitel 1.3 vorgenommen.

Die Durchführung der Simulationsstudie umfasst die eigentliche Modellbildung, die Implementierung des Modells sowie die Durchführung und Analyse von Simulationsläufen. Diese Phase gliedert sich in sieben Schritte. Zunächst werden die in Abschnitt 1.3 definierten Ziele der Arbeit sowie die Erkenntnisse aus Kapitel 2 aufgegriffen und daraus spezifische Aufgaben für die Simulationsstudie abgeleitet. Daraufhin werden die Systemgrenzen des zu untersuchenden Systems einschließlich der benötigten Eingabeparameter in der Systemanalyse definiert und fließen in ein Konzeptmodell ein. Abschließend werden während der Datenbeschaffung relevante Datenquellen identifiziert und Daten zusammengetragen und in Abschnitt 3.5 aufbereitet. Während der Modellformalisierung wird das formale Modell entwickelt und die Funktionsweise von Zielfunktion, Nebenbedingungen, Entscheidungsvariablen und Parametern des Modells beschrieben. In der Implementierung werden die aufbereiteten Daten mit dem Modell zusammengeführt und im letzten Schritt in Abschnitt 3.7, werden die Simulationsergebnisse generiert und mittels derer die primäre Forschungsfrage beantwortet. Die Bearbeitungsabfolge der Arbeitspakete Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung und Experimente und Analyse ist dabei sequenziell in dieser Reihenfolge vorgesehen, während die Bearbeitung der Arbeitspakete der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung parallel erfolgen.

Ein zentraler Bestandteil dieser Phase ist die Verifikation und Validierung (V&V), die nach den in „Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik“¹ beschriebenen Techniken durchgeführt wird. Die Verifikation dient der Sicherstellung, dass das Modell technisch korrekt implementiert wurde, während die Validierung überprüft, ob das Modell die realen Zusammenhänge adäquat abbildet. Hierbei kommen regelmäßige Feedbackschleifen zum Einsatz, die eine kontinuierliche Abstimmung mit den Zielsetzungen der Arbeit sicherstellen.

Abschließend werden in der Nachnutzungsphase in Sektion 4.1 die Ergebnisse der Simula-

¹Rabe u. a. 2008, S. 93–111.

tionsstudie dokumentiert und deren Anwendbarkeit für zukünftige Fragestellungen sowie praktische Relevanz diskutiert und evaluiert. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Nachvollziehbarkeit und Anpassungsfähigkeit des Modells, sodass es auch in anderen Regionen oder unter veränderten Bedingungen verwendet werden kann.

1.3 Zielbeschreibung und Vorgehensweise

In dieser Sektion werden die primäre sowie die sekundären Forschungsfragen beschrieben und es wird ausgeführt, wie diese im weiteren Verlauf der Arbeit adressiert und beantwortet werden. Es wird zudem herausgearbeitet, welcher Beitrag zur Beantwortung der primären Forschungsfrage durch die Antworten auf die sekundären Forschungsfragen geleistet wird. Abschließend wird der weitere Aufbau der Arbeit beschrieben. Dabei wird der Inhalt der verbleibenden Sektionen kurz ausgeführt und es wird angemerkt, in welchen Sektionen es zur Beantwortung der jeweiligen Forschungsfragen kommt.

Primäre Forschungsfrage

Welche Aspekte sind entscheidend und wie müssen diese ausgestaltet sein, um mithilfe nichtlinearer ganzzahliger Programmierung durch die simultane Planung von Standort und Verkehrsträgerwahl eine Kostenreduktion gegenüber einer getrennten Planung zu erzielen?

Sekundäre Forschungsfragen:

Wie verläuft der Standardprozess der Standortwahl für neue Produktionsstandorte?

Welche Faktoren beeinflussen die Standortwahl und wann ist der Faktor Verkehr von übergeordneter Bedeutung?

Welche Voraussetzungen spielen eine Rolle für die Relevanz von kombiniertem Verkehr als Planungsproblem für eine Region?

Abbildung 1.2: Primäre und sekundäre Forschungsfragen der Arbeit

Die primäre Forschungsfrage dieser Arbeit lautet:

Welche Aspekte sind entscheidend und wie müssen diese ausgestaltet sein, um mithilfe nichtlinearer ganzzahliger Programmierung durch die simultane Planung von Standort und Verkehrsträgerwahl eine Kostenreduktion gegenüber einer getrennten Planung zu erzielen?

Die wesentlichen Elemente dieser Frage, die es zu beantworten gilt, sind

1 Einleitung

- die **relevanten Aspekte** für die wirtschaftlich vorteilhafte Integration von Standortplanung und Verkehrsträgerwahl und deren Beschaffenheiten,
- die **nichtlineare ganzzahlige Programmierung** als geeignetes Mittel, um das erwartete Potenzial zu heben,
- die **Standortplanung** als strategischer Planungsbereich
- der **kombinierte Verkehr** als operativer Planungsbereich und
- die **simultane** als Alternative zur **sequenziellen Planung**.

Das erste Element, die Frage nach den relevanten Aspekten und deren entsprechenden Ausgestaltungen, wird in dieser Arbeit an verschiedenen Stellen angeschnitten. Insbesondere im Kapitel Theoretischer Hintergrund und in den ersten Phasen der Durchführung der Simulationsstudie werden besagte Aspekte identifiziert, während speziell in Sektion Experimente und Analyse die notwendigen Beschaffenheiten der Attribute jener Aspekte herausgestellt werden.

Die nichtlineare ganzzahlige Programmierung als geeignetes Mittel, um die Integration der Planungsbereiche zu vollziehen, wird in Kapitel Theoretischer Hintergrund vorgestellt, wobei ihre große praktische Relevanz sowohl auf dem Gebiet der Standortplanung als auch im Bereich des kombinierten Verkehrs deutlich wird. Zudem wird durch die erfolgreiche Anwendung nichtlinearer ganzzahliger Programmierung zur Berechnung der Ergebnisse in Kapitel Experimente und Analyse, diese als geeignetes Mittel für den in dieser Arbeit untersuchten Anwendungsfall bestätigt.

Um das erste Planungsfeld, das in der Fragestellung der primären Forschungsfrage adressiert wird, abzubilden, werden im Zuge des Kapitels Theoretischer Hintergrund folgende sekundäre Forschungsfragen beantwortet:

Wie verläuft der Standardprozess der Standortwahl für neue Produktionsstandorte?

Welche Faktoren beeinflussen die Standortwahl und wann ist der Faktor „Verkehr“ von übergeordneter Bedeutung?

Die erste sekundäre Forschungsfrage dient, neben der Klärung allgemeiner Begriffsdefinitionen, dazu, das Forschungsfeld der Standortplanung in seiner Breite darzustellen. Im Rahmen der Beantwortung dieser Forschungsfrage wird eingeordnet, welche Art von Standortplanung für den Kontext der primären Forschungsfrage geeignet ist und aufgezeigt, wie für diese ein idealtypischer Planungsprozess aussehen kann. Anschließend wird auf dieser Grundlage abgeleitet, an welcher Stelle des Planungsprozesses eine Einbeziehung von Verkehr und insbesondere von Verkehrsträgerwahl den größten Nutzen zu haben verspricht. Darauf aufbauend fokussiert sich die zweite sekundäre Forschungsfrage, in

1 Einleitung

Sektion Standortfaktoren auf regionaler Betrachtungsebene, auf eine Vielzahl von Standortfaktoren und die Art und Weise, wie diese die Standortwahl beeinflussen. Darüber wird ein zentraler Aspekt identifiziert, der für die relative Bedeutung von Verkehr auf die Standortplanung von hoher Relevanz ist.

An das zweite adressierte Forschungs- und Planungsfeld, den kombinierten Verkehr, wird ebenfalls im Kapitel Theoretischer Hintergrund herangeführt, indem es in Grundzügen erläutert und von verwandten Feldern begrifflich abgegrenzt wird. Die dritte sekundäre Forschungsfrage dieser Arbeit widmet sich dem kombinierten Verkehr und lautet: *Welche Voraussetzungen spielen eine Rolle für die Relevanz von kombiniertem Verkehr als Planungsproblem für eine Region?* Hierbei steht der Aspekt der regionalen Voraussetzung im Fokus der Betrachtung und wird aus den Implikationen des kombinierten Verkehrs abgeleitet.

Das letzte Element der primären Forschungsfrage, das für eine vollumfängliche Beantwortung dieser thematisiert werden muss, ist die simultane Planung im Gegensatz zu einer sequenziellen Planung. Wobei insbesondere die Zulässigkeit des Vergleichs, für den Anwendungsfall dieser Arbeit, sichergestellt werden muss. Diese wird in Sektion Experimente und Analyse im Zusammenhang mit der Entwicklung der Untersuchungsszenarien diskutiert.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird in Kapitel 2 in Sektion 2.1 der Bereich der Standortplanung theoretisch untermauert. Es werden wichtige Begriffe definiert und aufgezeigt, wie ein exemplarischer Planungsprozess aussieht. Im Zuge der Beantwortung der ersten und zweiten Forschungsfrage wird aufgezeigt, an welcher Stelle im Prozess sich, insbesondere auch im Vergleich mit anderen Standortfaktoren, eine Einbindung von Verkehr in die Planung anbietet. Neben der Beantwortung dieser Forschungsfragen wird in dem Kapitel eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung gegeben.

Anschließend wird in Sektion 2.2 des selben Kapitels der Bereich des kombinierten Verkehrs beleuchtet. Neben der Erläuterung der Bedeutung des Begriffs des kombinierten Verkehrs wird dieser gegenüber verwandten Themenbereichen abgegrenzt. Anschließend wird die steigende Bedeutung von modellbasierten Lösungsansätzen illustriert und die Entwicklung des Bereiches der letzten Jahrzehnte exemplarisch zusammengefasst. Über die Beantwortung der dritten Forschungsfrage werden in diesem Kapitel außerdem die regionalen Anforderungen untersucht, die für die Größe des Potenzials in diesem Bereich ausschlaggebend sind.

In Kapitel 3 kommt es zur Durchführung der Simulationsstudie. Diese gliedert sich in sieben Abschnitte, die die in Sektion Methodik ausgeführten Phasen beinhalten:

- Aufgabendefinition (Sektion 3.1)

1 Einleitung

- Systemanalyse (Sektion 3.2)
- Datenbeschaffung (Sektion 3.3)
- Modellformalisierung (Sektion 3.4)
- Datenaufbereitung (Sektion 3.5)
- Implementierung (Sektion 3.6)
- Experimente und Analyse (Sektion 3.7)

In Sektion 3.1 (*Aufgabendefinition*) werden die Ziele und Rahmenbedingungen der Simulationsstudie konkretisiert. Dies geschieht auf Basis der im theoretischen Hintergrund identifizierten Standortfaktoren und Anforderungen an den kombinierten Verkehr. Sektion 3.2 (*Systemanalyse*) befasst sich mit der Analyse des Untersuchungsraumes, konkret dem Lausitzer Revier, um dessen Eignung als realitätsnahes Testfeld für das Modell zu bewerten und Systemgrenzen zu definieren. Die Sektion 3.3 (*Datenbeschaffung*) beschäftigt sich mit der Identifikation, Beschaffung und Bewertung relevanter Daten, insbesondere zu regionaler Infrastruktur, Verkehrsströmen und verfügbaren Standorten für eine Ansiedelung. Anschließend folgt in Sektion 3.4 (*Modellformalisierung*) die formale Entwicklung des simultanen Entscheidungsmodells zur Standort- und Verkehrsträgerwahl, wobei die zuvor identifizierten theoretischen Anforderungen berücksichtigt werden. Sektion 3.5 (*Datenaufbereitung*) erläutert die notwendigen Schritte zur Anpassung der beschafften Daten, um sie im Modell sinnvoll einsetzen zu können. In Sektion 3.6 (*Implementierung*) erfolgt anschließend die praktische Umsetzung des formalisierten Modells mithilfe geeigneter Software. Abschließend wird in Sektion 3.7 (*Experimente und Analyse*) die eigentliche Durchführung der Simulationsexperimente beschrieben. Die Ergebnisse werden analysiert, um die Bedingungen und relevanten Aspekte herauszuarbeiten, unter denen der simultane Planungsansatz Vorteile gegenüber der sequenziellen Planung bietet. Damit wird die primäre Forschungsfrage der Arbeit umfassend und fundiert beantwortet.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Simulationsstudie inhaltlich eingeordnet und mögliche Anwendungsszenarien sowie Limitationen diskutiert. Die Sektion 4.1 behandelt die potenzielle Nutzung des Modells in betrieblichen Entscheidungsprozessen sowie durch wirtschaftspolitische Institutionen. Es wird beschrieben, unter welchen Voraussetzungen und mit welchen erforderlichen Daten das Modell auf andere Regionen übertragbar ist und welche Anforderungen an Infrastruktur, Datenverfügbarkeit und räumliche Differenzierung bestehen. Darüber hinaus wird eine potenzielle Erweiterung der Modelllogik auf weitere Ausprägungen des kombinierten Verkehrs, insbesondere unter Einbindung des Verkehrsträgers Binnenschiff, thematisiert.

1 *Einleitung*

Die abschließende Sektion 4.2 zieht eine methodische und konzeptionelle Bilanz der Arbeit. Es wird zusammengefasst, welche methodischen Bausteine zur Beantwortung der primären Forschungsfrage beigetragen haben, welche Voraussetzungen für die Nutzung des Modells bestehen und welche Limitierungen sich aus den getroffenen Annahmen sowie der verwendeten Datenlage ergeben.

2 Theoretischer Hintergrund

Das Kapitel Theoretischer Hintergrund erarbeitet die theoretischen Grundlagen, die notwendig sind, um die primäre Forschungsfrage umfassend beantworten zu können. Zunächst wird der Bereich der Standortplanung eingeordnet, zentrale Begriffe definiert, relevante Modelle vorgestellt und der typische Entscheidungsprozess skizziert. Ziel ist es, ein fundiertes Verständnis dafür zu entwickeln, welche Faktoren bei der Standortwahl relevant sind und wie der Verkehr als Standortfaktor darin eingebettet ist.

Anschließend wird der kombinierte Verkehr (KV) eingeführt. Neben der begrifflichen Abgrenzung werden Bedeutung, Nutzen und Anwendungsbereiche dargestellt. Zudem werden die Voraussetzungen aufgezeigt, unter denen kombinierter Verkehr auf regionaler Ebene als integrativer Bestandteil strategischer Standortentscheidungen sinnvoll berücksichtigt werden kann.

Im weiteren Verlauf ist das Kapitel wie folgt aufgebaut:

Zunächst erfolgt eine kurze Einführung in die Standortplanung (Sektion 2.1), in der wesentliche Begriffe definiert werden. Ebenfalls werden in diesem Abschnitt verschiedene Arten von Standortplanung betrachtet und herausgearbeitet, welche Art für das vorliegende Problem relevant ist. Anschließend wird ein idealtypischer Standortplanungsprozess dargestellt (Sektion 2.1.1), und damit die erste sekundäre Forschungsfrage beantwortet. Darauf folgt eine ausgiebige Betrachtung verschiedener Standortfaktoren, bei der diese insbesondere in ein Verhältnis zur räumlichen Bezugsebene gesetzt werden wodurch die zweite sekundäre Forschungsfrage beantwortet wird (Sektion 2.1.2). Abschließend werden aktuelle Entwicklungen in der Standortplanungsliteratur zusammengefasst (Sektion 2.1.3).

Im Anschluss daran erfolgt eine Einführung in den kombinierten Verkehr (Sektion 2.2). Es werden zentrale Begriffe definiert und von verwandten Bereichen abgegrenzt. Anschließend wird die Entwicklung in der Literatur zum kombinierten Verkehr betrachtet (Sektion 2.2.1), insbesondere der Übergang zu modellgestützten Ansätzen. Abschließend werden regionale Anforderungen behandelt (Sektion 2.2.2), womit die dritte sekundäre Forschungsfrage beantwortet wird.

2.1 Standortplanung

Die Standortplanung, insbesondere die betriebliche, bildet einen zentralen Bestandteil der strategischen Unternehmensplanung und ist entscheidend für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen¹. Die strategische Planungsebene umfasst dabei langfristige und übergeordnete Entscheidungen zur Ausrichtung und Entwicklung des Gesamtunternehmens, einschließlich makroökonomischer Faktoren, Marktbedingungen und Unternehmenszielen². Die Ausgabe der betrieblichen Standortplanung besteht darin, Standortprobleme durch das Vorbereiten von Standortentscheidungen zu lösen³. Das Standortproblem bezeichnet in diesem Sinne das in der betrieblichen Standortplanung betrachtete Planungsproblem⁴, während die Standortentscheidung die, auf systematischen Analysen basierende, Bestimmung eines oder mehrerer Standorte darstellt⁵. Neben der betrieblichen werden in der Standortplanung zwei weitere Bereiche, die innerbetriebliche und die volkswirtschaftliche Standortplanung, beschrieben. Die innerbetriebliche Standortplanung, auch Layoutplanung, befasst sich mit der Positionierung von Objekten innerhalb eines Standortes, ist also eine Ebene unter der betrieblichen Standortplanung angesiedelt. Die volkswirtschaftliche Standortplanung, verankert in einem der Betriebswirtschaftslehre verwandten Teilbereich der Wirtschaftswissenschaften, hat eine gesamtwirtschaftspolitisch optimale Verteilung aller Standorte zum Ziel⁶. Der für diese Arbeit relevante Bereich der Standortplanung ist die betriebliche Standortplanung, da die Standortentscheidung von Unternehmen unterstützt werden soll. Innerbetriebliche Standortplanung ist erst anzuwenden, wenn die Standortentscheidung der betrieblichen Standortplanung bereits gefallen ist und volkswirtschaftliche Standortplanung verfolgt im Zweifel zur strategischen Unternehmensplanung einzelner Unternehmen konträre Ziele. Aufgrund von unterschiedlichen Interpretationen des Begriffs „Standort“ gestaltet sich dessen Definition in der Literatur heterogen⁷. Diese Arbeit orientiert sich an einem, über das reine Verständnis als geografische Entität hinausgehenden, weiteren Standortverständnis, das nicht nur den geografischen Ort der unternehmerischen Leistungserstellung umfasst, sondern auch dessen spezifische Eigenschaften sowie die umgebende wirtschaftliche Peripherie einbezieht⁸. Somit stellt der Standort ein interdependentes Bindeglied zwischen dem Unternehmen und dessen Umwelt dar⁹.

¹Bankhofer 2001, S. 41–42.

²Infrastruktursysteme IVI o. D.

³Wiendahl u. a. 2014, S. 419.

⁴Farahani und Hekmatfar 2009, S. 1.

⁵Grundig 2018; Bankhofer 2001, S. 41–43.

⁶Domschke 1996, S. 1–3.

⁷Bienert 1996, S. 11–12.

⁸Bienert 1996, S. 13; Bankhofer 2001, S. 13.

⁹Bankhofer 2001, S. 13.

Die Standortplanung ist von Natur aus multidisziplinär und umfasst wirtschaftswissenschaftliche, geografische sowie ingenieurwissenschaftliche Perspektiven¹⁰. Eine grundlegende Einordnung hat Meyer-Lindemann bereits 1951 entwickelt. Dieser teilt die Standortlehre in vier Standorttheorien¹¹:

- die **Standortbestimmungslehre**, die sich mit der Wahl des richtigen Standortes eines Unternehmens befasst,
- die **Standortwirkungslehre**, die sich mit den Wechselwirkungen und dem Zusammenspiel zwischen Standortentscheidung und Standort befasst,
- die **Standortentwicklungslehre**, die die Mechanismen in den Blick nimmt, die historisch betrachtet, die Standortweiterentwicklung begünstigen und
- die **Standortgestaltungslehre** die den wirtschaftspolitischen Gestaltungsraum beschreibt um Ansiedlungen volkswirtschaftlich vorteilhaft zu verteilen.

Aufgrund des Fokus dieser Arbeit auf die betriebliche Standortplanung steht dabei insbesondere die Standortbestimmungslehre im Vordergrund. Diese beschäftigt sich mit der Identifikation entscheidungsrelevanter Standortfaktoren sowie der Entwicklung von Methoden zur Bewertung und Auswahl geeigneter Standorte¹². Die Standortplanungslehre kann als eine Weiterentwicklung der Standortbestimmungslehre unter Verwendung eines moderneren Verständnisses eines Standortes verstanden werden und erweitert diese durch eine ganzheitliche Integration der Standortbestimmung in systematische Entscheidungsprozesse¹³. Anhand solch eines systematischen Entscheidungsprozesses wird in der nachfolgenden Sektion 2.1.1 untersucht, an welchem Punkt eine Integration mit dem Planungsfeld des Kombiniertes Verkehr sinnvollerweise umgesetzt werden sollte.

Standortentscheidungen besitzen aufgrund ihrer strategischen Bedeutung und langfristigen Bindungswirkung besondere Charakteristika, die für Unternehmen unabhängig ihrer Größe und Branche gelten¹⁴. Sie zeichnen sich durch ihre Langfristigkeit, Unsicherheit und Mehrkriterialität aus¹⁵. Die langfristige Bindung resultiert aus Planungshorizonten von gewöhnlicherweise fünf bis zehn Jahren¹⁶. Standortentscheidungen sind zudem mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da Prognosen zukünftiger Rahmenbedingungen mit zunehmendem Zeithorizont schwieriger werden und Entscheidungsträger typischerweise

¹⁰Kik u. a. 2022, S. 37–38.

¹¹Meyer-Lindemann 1951, S. 29.

¹²Schill 1990, S. 9–11.

¹³Goette 1994, S. 50.

¹⁴Wiendahl u. a. 2014, S. 421–423.

¹⁵Kik 2022, S. 13.

¹⁶Wiendahl u. a. 2014, S. 425.

risikoavers sind¹⁷. Aufgrund der Mehrkriterialität von Standortentscheidungen, bei denen zahlreiche qualitative und quantitative Standortfaktoren oft in Zielkonflikten zueinander stehen, ist die Ermittlung der bestmöglichen Kompromisslösung essenziell¹⁸.

Zur methodischen Unterstützung dieser komplexen Entscheidungen finden sich in der Literatur qualitative sowie quantitative Verfahren, um Standortprobleme zu adressieren. Qualitative Methoden umfassen heuristische Verfahren wie Argumentkataloge, Scoring- und Profilmethoden, während quantitative Methoden modellgestützte Verfahren aus Optimierung, Simulation, Spieltheorie und Investitionsrechnung umfassen¹⁹. Quantitative, modellbasierte Methoden, z.B. aus dem Bereich Operations Research, sind ebenfalls fest in der Standortplanung verwurzelt²⁰ und aufgrund ihrer Objektivität und methodischen Fundierung im Vergleich zu qualitativen Ansätzen vorzuziehen, insbesondere diskrete Optimierungsmodelle eignen sich für regionale Standortentscheidungen besonders gut²¹. Die Verwendung eines ganzzahlig nichtlinearen Optimierungsmodells, das sich als quantitative Methode im beschriebenen Sinne klassifizieren lässt, ist damit eine begründete Wahl für den Untersuchungszweck dieser Arbeit.

Trotz der verfügbaren methodischen Hilfsmittel zeigt sich in der Praxis häufig ein anderes Bild. Standortentscheidungen werden dort überwiegend intuitiv und heuristisch getroffen, wobei methodisch-objektive Verfahren wie die Nutzwertanalyse selten Anwendung finden²². Insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen spielen persönliche Motive eine große Rolle²³, während Großunternehmen öfter auf einfache Heuristiken wie Checklisten zurückgreifen und externe Berater in strukturierte Entscheidungsprozesse einbinden²⁴. Aufgrund der hohen Komplexität und strategischen Tragweite von Standortentscheidungen ist eine methodisch strukturierte Vorbereitung jedoch dringend zu empfehlen²⁵. Darüber hinaus kommt kommunalen Akteuren und weiteren Beteiligten, wie Projektentwicklern oder Beratern, eine essenzielle Bedeutung bei der Datenbereitstellung und als Bindeglied zwischen Unternehmen und Kommunen zu²⁶. Auch Standortentwicklungen spielen in der Praxis eine bedeutende Rolle, werden jedoch meist intuitiv und nicht systematisch berücksichtigt²⁷. Diese Arbeit leistet insofern einen Beitrag, die Diskrepanz zwischen theoretischem Wissen und Praxis zu verringern, als dass durch die Identifikation konkreter

¹⁷Maßmann 2006, S. 3–5.

¹⁸Farahani u. a. 2010.

¹⁹Ottmann und Lifka 2010, S. 73–80.

²⁰Bankhofer 2001, S. 17–18.

²¹Bankhofer 2001, S. 125–139.

²²Kik 2022, S. 22.

²³Płaziak und Szymański 2014.

²⁴Kik 2022, S. 23.

²⁵Kik 2022, S. 23.

²⁶Kik 2022, S. 23.

²⁷Kik 2022, S. 23.

Aspekte für eine erfolgversprechende Verwendung der in dieser Arbeit betrachteten quantitativen Methode das Risiko der Unternehmen für die Implementierung dieser gesenkt wird.

2.1.1 Idealtypischer Prozess

Im Rahmen dieser Arbeit ist es essenziell, zunächst ein klares Verständnis des Standardprozesses der Standortwahl zu gewinnen, um darauf aufbauend herauszuarbeiten, wie und an welcher Stelle Verkehr bzw. Verkehrsträgerwahl optimal integriert werden können. Diese Betrachtung beantwortet die erste sekundäre Forschungsfrage, die lautet: „Wie verläuft der Standardprozess der Standortwahl für neue Produktionsstandorte?“

Den Ablauf dieses Prozesses zu verstehen, ist essenziell, um ableiten zu können, an welcher Stelle des Prozesses eine Integration mit weiteren Planungsbereichen möglich ist. Zur Beantwortung der primären Forschungsfrage trägt die gewonnene Erkenntnis, an welcher Stelle des Planungsprozesses ein Unternehmen sich befinden muss, als einer der entscheidenden Faktoren bei, um eine erfolgreiche simultane Planung von Standort und Verkehrsträgerwahl zu ermöglichen.

Zentraler Begriff für die nachfolgende Beschreibung ist der des Standortfaktors. Der Begriff Standortfaktor wurde erstmals von Weber²⁸ beschrieben und bezeichnet ein Maß zur Beurteilung der Eignung potenzieller Standorte. Standortfaktoren können auch als Eigenschaften von Standorten beschrieben werden, die das Ergebnis der unternehmerischen Leistungserstellung direkt oder indirekt beeinflussen²⁹. Die konkrete Wirkung eines Standortfaktors hängt dabei von dessen spezifischer Ausprägung am Standort sowie von den individuellen Anforderungen eines Unternehmens ab, welche über die Zeit dynamischen Veränderungen ausgesetzt sind³⁰. Die von Unternehmen benötigten Ausprägungen von Standortfaktoren, sowie deren Relevanz können sich im Einzelfall stark unterscheiden und umfassen quantitative als auch qualitative Kriterien³¹. Zudem wird zwischen Muss-Faktoren („K.O.-Kriterien“) und Kann-Faktoren unterschieden³².

Ein idealtypischer Entscheidungsprozess der betrieblichen Standortplanung, der verschiedene Ansätze aus der Literatur aufgreift und vereint, wurde von Kik³³ formuliert und gliedert sich in vier klar abgegrenzte Phasen, die systematisch aufeinander aufbauen und eine strukturierte und zielgerichtete Entscheidungsfindung ermöglichen sollen:

²⁸Weber 1909, S. 16.

²⁹Maßmann 2006, S. 8; Bankhofer 2001, S. 24–26; Bienert 1996, S. 13.

³⁰Kik 2022, S. 10.

³¹Glatte 2017, S. 68–70; Pawellek 2014, S. 116.

³²Glatte 2017, S. 171.

³³Kik 2022, S. 14.

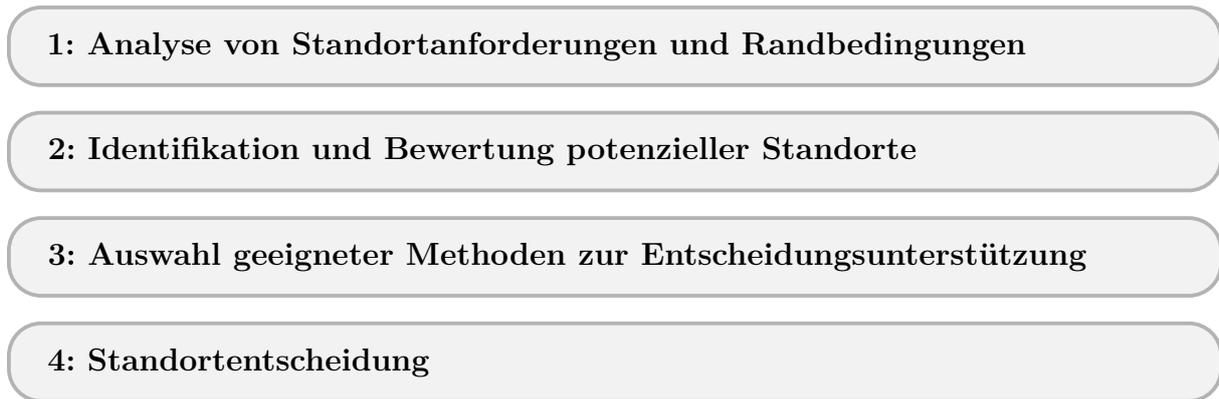


Abbildung 2.1: Idealtypischer Entscheidungsprozess (vgl. Kik 2022, S. 17)

In der ersten Phase, der **Analyse von Standortanforderungen und Randbedingungen**, werden zunächst entscheidungsrelevante Standortfaktoren identifiziert und konkrete Anforderungen formuliert. Dies umfasst sowohl substitutionale (Soll-) als auch limitationale (Muss-) Standortfaktoren. Die einzelnen Standortfaktoren werden zudem nach ihrer relativen Wichtigkeit gewichtet, wobei neben aktuellen Bedingungen auch zukünftige Entwicklungen antizipiert werden³⁴. Zusätzlich werden planerische Randbedingungen, wie beispielsweise Budgetgrenzen, festgelegt³⁵.

Die zweite Phase, **Identifikation und Bewertung potenzieller Standorte**, hat die konkrete Eingrenzung potenzieller Standorte zum Ziel. Zunächst wird dabei das geografische Interessengebiet definiert und anschließend werden potenzielle Standorte identifiziert. Je nach räumlicher Betrachtungsebene kann diese Eingrenzung in mehreren Stufen erfolgen, wobei zwischen einer Makroanalyse (Grobplanung) zur Eingrenzung einer größeren Anzahl von Standorten und einer Mikroanalyse (Feinplanung) zur detaillierten Standortbewertung differenziert wird³⁶.

In Phase Drei, **Auswahl geeigneter Methoden zur Entscheidungsunterstützung**, werden aus einer Vielzahl vorhandener Methoden der Standortplanung diejenigen ausgewählt, welche die spezifischen Anforderungen des Standortproblems am besten erfüllen. Die Herausforderung besteht darin, Methoden auszuwählen, die eine objektive und belastbare Entscheidungsgrundlage schaffen können³⁷.

Abschließend wird in der letzten Phase, der **Standortentscheidung**, basierend auf den methodisch hergeleiteten Entscheidungsempfehlungen eine konkrete Standortentscheidung

³⁴Glatte 2017, S. 172.

³⁵Pawellek 2014, S. 118.

³⁶Pawellek 2014, S. 118–120.

³⁷Bankhofer 2001, S. 43.

getroffen. Aufgrund der strategischen Bedeutung dieser Entscheidungen obliegt diese meist der Unternehmensleitung³⁸.

Dieser idealtypische Entscheidungsprozess ist universell auf unterschiedliche räumliche Betrachtungsebenen und Standortprobleme anwendbar und stellt die Grundlage dar, um fundierte Entscheidungen für Standortprobleme herbeizuführen. Dieser Entscheidungsprozess wird während des fünf- bis zehnjährigen Planungshorizontes für die Planung eines neuen Standortes periodisch für die einzelnen räumlichen Betrachtungsebenen durchlaufen. Je nach Betrachtungsebene werden dabei in Phase Eins andere Standortfaktoren für wichtig befunden und in Phase Drei unterschiedliche Methoden ausgewählt. Auch die in Phase Zwei betrachteten Standorte unterscheiden sich signifikant. Während ein Standort auf regionaler Ebene als der geografische Ort, einschließlich dessen Eigenschaften sowie der wirtschaftlichen Peripherie, ein Gewerbegebiet sein kann, kann dieser auf globaler Ebene ein Land oder sogar einen ganzen Kontinent bedeuten (vgl. 2.2).

Als Erkenntnis dieses Abschnittes kann festgehalten werden, dass für die Wahl eines nichtlinearen ganzzahligen Optimierungsmodells als Methode zur simultanen Planung von Standort- und Verkehrsträgerwahl, in Phase Drei des Entscheidungsprozesses, der Verkehr in Phase Eins als Standortfaktor von übergeordneter Bedeutung identifiziert werden muss. Dazu müssen auch die in Phase Zwei identifizierten Standorte bei diesem Standortfaktor ausreichend abweichende Merkmalsausprägungen aufweisen, sodass die Relevanz gegeben bleibt. An welcher Stelle im Gesamtentscheidungsfindungsprozess also auf welcher räumlichen Betrachtungsebene das der Fall sein kann und was die Bedingungen dafür sind, werden im nachfolgenden Kapitel untersucht.

2.1.2 Standortfaktoren auf regionaler Betrachtungsebene

Ziel dieses Abschnitts ist es, die zweite sekundäre Forschungsfrage zu beantworten, die untersucht, welche Faktoren die Standortwahl beeinflussen und insbesondere, an welcher Stelle im Gesamtentscheidungsprozess der Standortfaktor „Verkehr“ von übergeordneter Bedeutung ist. Die Beantwortung dieser Forschungsfrage trägt damit auch wesentlich zur Beantwortung der primären Forschungsfrage bei, da dadurch identifiziert wird, auf welcher räumlichen Ebene der simultane Planungsansatz für Standort- und Verkehrsträgerwahl den höchsten Nutzen verspricht.

Die räumlichen Betrachtungsebenen, auf denen Standortplanung erfolgt, können in global, regional und lokal unterschieden werden³⁹. Diese Ebenen unterscheiden sich bezüglich ih-

³⁸Pawellek 2014, S. 120.

³⁹Abele 2008, S. 104–107.

2 Theoretischer Hintergrund

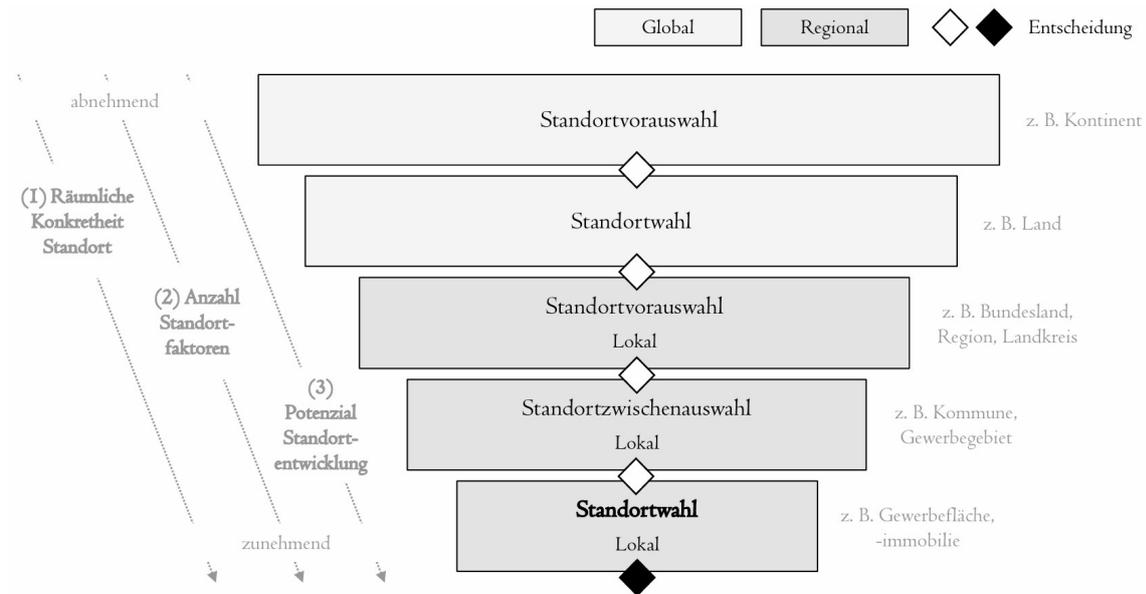


Abbildung 2.2: Räumliche Betrachtungsebenen der betrieblichen Standortplanung Kik 2022, S. 17

res Standortverständnisses, der Anzahl und Relevanz betrachteter Standortfaktoren sowie des Potenzials zur unternehmensseitigen Standortentwicklung⁴⁰. Ein Standort kann zum Beispiel in Abhängigkeit von der Betrachtungsebene als Kontinent, Land, Region, Kommune oder Gewerbefläche verstanden werden (vgl. 2.2). In dem Gesamtentscheidungsprozess, mit einem Zeithorizont von 5-10 Jahren, kommt es somit zur zyklischen Wiederholung des in 2.1 dargestellten Entscheidungsprozesses, wobei bei jeder Iteration eine Verschiebung auf eine engere geografische Betrachtungsebene festgestellt werden kann.

Die **globale Standortplanung** erfolgt meist zweistufig (Standortvorauswahl und Standortwahl) und berücksichtigt stark aggregierte Standorte auf Basis weniger, aber sehr essenzieller Standortfaktoren⁴¹. Der Verkehr als Standortfaktor ist auf dieser Ebene selten von entscheidender Bedeutung, da dieser von Standortfaktoren mit einem insgesamt größeren Einfluss auf die strategischen Ziele des Unternehmens (z.B. Zugang zu Absatzmärkten) oder die einen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen (z.B. Kosten für Arbeitskräfte) überschattet wird. Eine Situation, in der eine überragende Rolle von Verkehr als Standortfaktor auf globaler Ebene denkbar ist, ist beispielsweise die Wahl eines Produktionsstandortes für sehr günstig produzierbare und sehr aufwendig transportierbare Ware. Aber selbst in Sonderfällen, in denen der Verkehr den größten monetären Einfluss auf ein Standortproblem hat, können die Standortfaktoren mit Bezug zu den strategischen Unternehmenszielen in der Planung nicht ignoriert werden.

⁴⁰Wiendahl u. a. 2014, S. 431.

⁴¹Kinkel 2009, S. 60–62.

Die **regionale Standortplanung** erfolgt häufig dreistufig, beginnend mit der lokalen Standortvorauswahl (z.B. Bundesland), einer Standortzwischenauswahl (z.B. Kommune) und abschließend einer konkreten Standortwahl (z.B. Gewerbefläche). In der Praxis sind hierbei oft Vor-Ort-Besichtigungen sowie Gespräche mit kommunalen Akteuren üblich⁴². Auf regionaler Ebene lässt sich deutlich einfacher ein Szenario konstruieren, für das der Verkehr und insbesondere die Verkehrsträgerwahl besonders bedeutsam sind. Zum einen sind auf dieser Betrachtungsebene die meisten Muss-Standortfaktoren erfüllt, da diese üblicherweise bereits auf globaler Betrachtungsebene betrachtet wurden. Zum anderen sind viele Standortfaktoren innerhalb eines Bundeslandes annähernd gleich (z.B. Wirtschaftsförderung, Kosten für Arbeitskräfte, Kosten für Energie, etc.), während die Verkehrsanbindung einen signifikanten, standortabhängigen Einfluss auf die Gesamtkosten haben kann. Die Standortbewertung auf regionaler Ebene ist insbesondere relevant für kleine und mittelständische Unternehmen, da diese überwiegend national agieren und in Deutschland deutlich zahlreicher vertreten sind als Großunternehmen⁴³.

Die **lokale Standortplanung** fokussiert als letzte Stufe der regionalen Planung auf punktuelle Standortanalysen und spezifische Faktoren wie Flächengröße und -nutzbarkeit⁴⁴. Die Verkehrsträgerwahl auf dieser Betrachtungsebene in die Planung einzuführen, erscheint begrenzt aussichtsreich, da die Alternativstandorte in dieser Phase bereits eine hohe örtliche Proximität aufweisen.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich, dass der Standortfaktor Verkehr aufgrund seines operativen Charakters besonders auf einer frühen regionalen Betrachtungsebene relevant wird. Globale Betrachtungen von Standortproblemen fokussieren sich meist auf im Gesamtkontext einflussreichere Standortfaktoren. Wenn der Verkehr auf dieser Ebene als essenzieller Standortfaktor in die Planung miteinbezogen wird, dann passiert dies aus Komplexitätsgründen, nicht als Detailbetrachtung, wodurch ein erneutes Aufgreifen des Standortfaktors auf regionaler Ebene notwendig wird. Auf lokaler Ebene dagegen besteht kaum noch Optimierungspotenzial für die Standortplanung im Faktor Verkehr, da die zur Auswahl stehenden Standorte dort bereits auf einem engen geografischen Raum begrenzt und somit keine signifikanten operativen Kostenunterschiede mehr möglich sind. Somit bietet die **regionale Betrachtungsebene** die vielversprechendste Balance aus Variabilität und Einflussmöglichkeiten und ist außerdem besonders praktisch relevant aufgrund der hohen Zahl an potenziellen Planungsakteuren⁴⁵.

Um die zweite sekundäre Forschungsfrage, *”Welche Faktoren beeinflussen die Standort-*

⁴²Pawellek 2014, S. 120.

⁴³ *Unternehmen nach Unternehmensgröße in Deutschland* | Statista 2021.

⁴⁴Bienert 1996, S. 115.

⁴⁵ *Unternehmen nach Unternehmensgröße in Deutschland* | Statista 2021.

2 Theoretischer Hintergrund

wahl und wann ist der Faktor „Verkehr“ von übergeordneter Bedeutung?“, abschließend zu beantworten, muss, nachdem die regionale als geeignetste Betrachtungsebene etabliert worden ist, anschließend die Frage nach der **übergeordneten Bedeutung** des Verkehrs als Standortfaktor auf dieser untersucht werden. Dazu werden nachfolgend eine Auswahl qualitativer und quantitativer Standortfaktoren (vgl. 2.3) hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet. Die Relevanz setzt sich jeweils aus dem Einfluss eines Standortfaktors auf den Gesamtentscheidungsprozess und der Variabilität auf regionaler Ebene zusammen. Die Auswahl wesentlicher Standortfaktoren ist kein vollumfängliches Bild aller potenziellen Standortfaktoren, gibt aber einen guten Überblick über das Feld. Im Zuge der nachfolgenden Diskussion der 16 quantitativen und 4 qualitativen in 2.3 dargestellten Standortfaktoren werden sich Muster abzeichnen, die die Möglichkeit einer übergeordneten Stellung des Verkehrs in der regionalen Standortplanung unterstreichen.

Zur weiteren Beantwortung der zweiten sekundären Forschungsfrage werden nachfolgend ausgewählte Standortfaktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf den Gesamtentscheidungsprozess sowie ihrer Variabilität auf regionaler Ebene bewertet:

2 Theoretischer Hintergrund

| | | | |
|---|--|--|---|
| <p>Infrastrukturen Ver- und Entsorgung (Wasser, Abfall, Energie) Dienstleistungsangebote Kommunikationsnetze Bildungs- und Schulungsangebote</p> | <p>Umweltauflagen Emissionsgrenzwerte Abwasser- und Abfallregelungen Naturschutzgebiete Luftreinhaltung</p> | <p>Energiequellen Kosten Verfügbarkeit (Strom, Gas, Öl) Eigenerzeugung</p> | <p>Politische und soziale Situation Politische Stabilität Investitionssicherheit Sozialordnung Streikhäufigkeit</p> |
| <p>Verkehr Anbindung (Straße, Schiene, Wasser, Luft) Nähe zu Beschaffungs- und Absatzmärkten Logistikkosten</p> | <p>Öffentliche Wirtschaftsförderung Förderprogramme Subventionen Günstige Kredite Infrastrukturförderung</p> | <p>Absatzmarkt Größe Kaufkraft Nähe zu Kunden Wettbewerbsintensität</p> | <p>Rohstoffe Verfügbarkeit Preise Nähe zu Rohstoffquellen</p> |
| <p>Nähe zu Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen Kooperationen (Hochschulen/Institute) Technologietransfer Innovationsnetzwerke</p> | <p>Agglomerations- und Führungsvorteile Nähe zu Zulieferern/Dienstleistern Gemeinsame Nutzungen (z. B. Energie, Entsorgung) Clusterbildung Potenzielle negative Effekte</p> | <p>Natürliche Bedingungen Klima (Temperatur, Niederschlag, Wind) Luftreinheit Geographische Gegebenheiten</p> | <p>Gesetzliche und tarifliche Rahmenbedingungen Arbeitsrecht (Arbeitszeit, Urlaub) Genehmigungsverfahren Sozialversicherung Bau- und Umweltschutzgesetze</p> |
| <p>Flächenverfügbarkeit Grundstücksform und -größe Bodenbeschaffenheit Erschließung, Altlasten Bebauungspläne</p> | <p>Arbeitskräfte Verfügbarkeit Qualifikation Lohn- und Lohnnebenkosten Arbeitsmoral</p> | <p>Steuern, Abgaben Steuerbelastung (Gewerbe-, Kapitalverkehrssteuer) Abgabensätze Steuererleichterungen</p> | |
| <p>Persönliche Gründe Heimatverbundenheit Familiäre Hintergründe Individuelle Vorlieben</p> | <p>Wohn- und Freizeitwert Lebensqualität Kulturelle Angebote Wohnraum Erholungswert</p> | <p>Mentalität Arbeitseinstellung Motivation Leistungsbereitschaft Technologieakzeptanz</p> | <p>Werbewirksamkeit des Standortes Standortimage Herkunfts-Goodwill („Made in ...“)</p> |

Abbildung 2.3: Qualitative (grau) und quantitative (weiß) Standortfaktoren (vgl. Kreis 2006, S. 62)

Politische und soziale Situation: Eine stabile politische Lage und ein ausreichendes Maß an sozialem Frieden sind wichtige Rahmenbedingungen für Investitionen. In einer globalen Perspektive ist ihr Einfluss auf die Standortwahl hoch und wird nicht selten als Muss-Standortfaktor eingestuft. Auf Ebene von Bundesländern oder zusammenhängenden Wirtschaftsregionen sind politische und soziale Unterschiede jedoch relativ gering ausgeprägt, weshalb dieser Standortfaktor im Normalfall für alle potenziellen Standorte gleich eingeschätzt werden muss. Dementsprechend ist die Variabilität dieses Faktors bei einer innerregionalen Standortsuche gering, weshalb sie in diesem Rahmen keine große Rolle mehr spielt.

Öffentliche Wirtschaftsförderung Maßnahmen der Wirtschaftsförderung umfassen Steuerentlastungen, Investitionszuschüsse oder kommunale Förderprogramme, aber auch die potenzialträchtige Möglichkeit zur unternehmensseitigen Entwicklung von Standorten nach Ansiedelungsentscheidung eines Unternehmens⁴⁶. Damit ist dieser Standortfaktor auf der kleingliedrigsten globalen Betrachtungsebene, bei der die Wahl einer Region und damit einer bestimmten Wirtschaftsförderung zur Disposition steht, von hoher Bedeutung. Dies führt zu einem durchaus gewichtigen *Einfluss* auf die Gesamtstandortentscheidung, da bei signifikanten Förderungen ein Standort attraktiver werden kann. Nach Feststehen einer Region und damit der dort tätigen Wirtschaftsförderung sind die Fördermöglichkeiten jedoch weitgehend identisch, sodass zwischen den Gemeinden meist nur kleine Differenzen bestehen. Entsprechend ist die *Variabilität* hier sehr gering.

Flächenverfügbarkeit Aus strategischer Sicht ist es mitunter entscheidend, ob prinzipiell Gewerbeflächen existieren und inwieweit diese erschlossen sind. Daher kann auch der Standortfaktor der Flächenverfügbarkeit als Muss-Standortfaktor betrachtet werden. Denn wenn keine Flächen zur Verfügung stehen, kommt naheliegenderweise keine Ansiedlung in Frage. Daher ist der *Einfluss* durchaus gegeben. Sobald allerdings kein Mangel an Gewerbeflächen besteht, verliert der Standortfaktor schnell an Bedeutung. In der vorliegenden Betrachtung sind allerdings viele Gewerbestandorte vorhanden, was der Datensatz der Wirtschaftsförderung Brandenburg/Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH (WFBB) (2024) zu Gewerbestandorten in der Lausitz, der in Sektion 3.3 eingeführt wird, zeigt. Gleichwohl können sich die Preise für Grün- oder Brachflächen spürbar unterscheiden, sodass die *Variabilität* innerhalb des Untersuchungsgebiets vergleichsweise hoch sein kann.

Gesetzliche und tarifliche Rahmenbedingungen Rechtsvorschriften (z. B. Genehmigungsverfahren, Arbeitszeiten) können große Auswirkungen auf die Produktionskosten und -volumen haben, weshalb dieser Standortfaktor ebenfalls auf globaler Betrachtungs-

⁴⁶Kik u. a. 2022.

ebene großen *Einfluss* auf die Standortentscheidung ausüben kann. Auf Betrachtungsebene von Bundesländern bzw. Wirtschaftsregionen, in denen die beteiligten Bundesländer eng kooperieren, sind jedoch nur kleine Unterschiede zu erwarten. Damit ist der *Einfluss* im auf den Gesamtkontext als mittel bis hoch, die *Variabilität* wiederum gering zu bewerten.

Verkehr Unter dem Faktor Verkehr fallen die Anbindungen per Straße, Schiene, Wasserweg oder Flugverkehr; ferner Aspekte wie Frachtsätze und Stauhäufigkeiten. Wie oben ausgeführt, kann dieser auf globaler und auch auf regionaler Betrachtungsebene für die Standortentscheidung eine gewichtige Lenkungsfunktion innehaben. Auf der regionalen Ebene umfassen diese Einflussmöglichkeiten insbesondere die mit der zukünftigen operativen Transportplanung zusammenhängenden Kosten. So kann die Güte der Lage eines Standortes, abhängig von Frachtsätzen einzelner Transportmittel, stark von der Anbindung an den jeweils vorteilhaften Verkehrsträger abhängen. Die Variabilität des Standortfaktors Verkehr auf regionaler Ebene ergibt sich aus dem Verhältnis der Transportkosten konkurrierender Transportmittel, während der Einfluss sich durch die absolute Höhe dieser bestimmt. Einflüsse Maut sowie CO₂-Kosten und deren zukünftige Entwicklungen sind dabei zu betrachten. Sowohl der *Einfluss* als auch die *Variabilität* sind also potenziell mit hohen Werten zu bewerten.

Rohstoffe Die Relevanz von Rohstoffverfügbarkeit als Standortfaktor ist auf regionaler Ebene erneut durch die geringe Ausprägung der *Variabilität* begrenzt. Die Verfügbarkeit lokaler Rohstoffe kann als strategisches Ziel für Unternehmen von immenser Bedeutung sein, wird aber in solchen Fällen bereits deutlich früher im Gesamtplanungsprozess auf globaler Betrachtungsebene mit in die Entscheidungsfindung einbezogen. Folglich ist der *Einfluss* auf den Gesamtentscheidungsprozess in Abhängigkeit von den jeweiligen Unternehmensaufrichtungen gering bis hoch, die *Variabilität* allerdings sehr gering, da auf regionaler Ebene große Unterschiede in der Verfügbarkeit von Rohstoffen nicht zu erwarten sind.

Absatzmarkt Der Absatzmarkt beeinflusst maßgeblich den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens und somit auch die Standortentscheidung. Auf globaler Ebene sind Unterschiede in Größe und Erreichbarkeit von Märkten enorm und häufig entscheidend für die Standortwahl. Innerhalb einer Region sind die Zugangsmöglichkeiten zu dem jeweiligen Absatzmarkt jedoch identisch, was bedeutet, dass die *Variabilität* zwischen den verfügbaren Standorten dieser Region minimal ist. Der *Einfluss* auf die Standortentscheidung kann wiederum unter Umständen sehr hoch sein, in Abhängigkeit davon, ob es zu den mit der Standortplanung zu erreichenden strategischen Zielen gehört, einen bestimmten Absatzmarkt zu erschließen.

Umweltauflagen Umweltauflagen können Standortentscheidungen besonders auf globaler oder internationaler Ebene stark beeinflussen, da sich diese deutlich voneinander unterscheiden. Innerhalb der Lausitz und allgemein auf regionaler Ebene sind die Umweltgesetze jedoch weitgehend einheitlich geregelt. Lediglich geringfügige Unterschiede wie z.B. ausgewiesene Naturschutzgebiete können punktuell existieren, weshalb die *Variabilität* insgesamt als niedrig bewertet wird. Der *Einfluss* dieses Standortfaktors auf die Gesamtstandortentscheidung ist als moderat einzustufen, da üblicherweise versucht wird, durch Umweltauflagen entstehende Wettbewerbsnachteile durch wirtschaftspolitische Instrumente auszugleichen.

Energiequellen Kosten und Verfügbarkeit von Energie können insbesondere auf internationaler Ebene erheblich schwanken und somit wesentliche Entscheidungsfaktoren darstellen. Ebenfalls innerhalb eines Landes auf Betrachtungsebene von Bundesländern oder Wirtschaftsregionen können noch große Unterschiede bestehen, nicht zuletzt aufgrund von Schwierigkeiten, den in einem Land verfügbaren Strom über das Netz zu verteilen. Für Deutschland ist bis 2045 ein Investitionsbedarf für Übertragungsnetze und Verteilnetze zusammengenommen ein Investitionsbedarf von 651 Milliarden Euro abzusehen, um dieses Problem zu beheben⁴⁷. Abgesehen von der Verfügbarkeit von ausreichend günstiger Energie, kann zusätzlich die Verfügbarkeit bestimmter ,insbesondere nachhaltiger, Erzeugungsquellen auf globaler Entscheidungsebene ausschlaggebend sein. Innerhalb einer Region sind jedoch die Unterschiede in Bezug auf beide dieser Problemfelder und damit die *Variabilität* gering. Der *Einfluss* auf den Gesamtentscheidungsprozess ist allerdings hoch, insbesondere für Unternehmen in Energieintensiven Branchen.

Steuern und Abgaben Die Höhe von Steuern und Abgaben fließen auf allen Betrachtungsebenen in die Standortplanung ein. Viele steuerliche Rahmenbedingungen sind mit der Wahl für eine Wirtschaftsregion zwar schon festgelegt, auf regionaler Ebene ist aber insbesondere die Gewerbesteuer zentral und kann innerhalb einer Region von Kommune zu Kommune variieren und somit Einfluss auf die Standortwahl nehmen⁴⁸. Damit ist diesem Standortfaktor moderate *Variabilität* zu attestieren und der *Einfluss* aufgrund der direkten Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Standorte als hoch zu bewerten.

Arbeitskräfte Die Verfügbarkeit von qualifizierten bezahlbaren Arbeitskräften ist ein bedeutender Faktor, der die Standortentscheidung beeinflussen kann, da Löhne und Rekrutierungskosten erheblichen Einfluss auf die Betriebskosten haben. Auch hier liegt der größte Gestaltungsspielraum, was diesen Standortfaktor angeht, auf globaler Ebene. Innerhalb einer Region sind Unterschiede allerdings durchaus noch wahrnehmbar. Vor allem

⁴⁷Bauermann u. a. 2024, S. 17.

⁴⁸Bundesrepublik Deutschland 2002.

zwischen städtischen Zentren und ländlichen Gebieten können diese hinsichtlich Verfügbarkeit und Qualifikation durchaus ausgeprägt sein. Unter Berücksichtigung eines meist entweder gut ausgebauten öffentlichen Regionalerkers oder eines gut ausgebautes Straßennetzes in Kombination mit Maßnahmen wie einer Pendlerpauschale muss die tatsächliche Bedeutung allerdings runtergestuft werden. Daher ist die *Variabilität* auf regionaler Ebene moderat und der *Einfluss* auf den Entscheidungsprozess insgesamt hoch einzuschätzen.

Mentalität Die Mentalität und Arbeitskultur einer Region stellen weiche Faktoren dar, deren Auswirkungen auf die Standortentscheidung jedoch schwer messbar und objektiv bewertbar sind. Innerhalb einer Region sind Unterschiede hinsichtlich Mentalität kaum operativ greifbar. Daher ist sowohl der *Einfluss* als auch die *Variabilität* dieses Faktors auf regionaler Ebene als gering einzustufen.

Werbewirksamkeit Die Werbewirksamkeit, verstanden als Imagegewinn durch Standortwahl, spielt insbesondere auf internationaler Ebene oder bei branchenbekannten Regionen eine Rolle. Innerhalb einer Region sind Image-Unterschiede zwischen einzelnen Gemeinden jedoch vernachlässigbar, wodurch sowohl der *Einfluss* als auch die *Variabilität* gering ausfallen.

Persönliche Gründe Individuelle Präferenzen und persönliche Motive von Entscheidungsträgern können Standortentscheidungen erheblich beeinflussen, auch innerhalb einer Region. Diese persönlichen Präferenzen variieren stark und unvorhersehbar, wodurch die *Variabilität* sehr hoch ausfällt. Der *Einfluss* auf die Gesamtentscheidung ist häufig, vor allem bei kleinen bis mittleren Unternehmensgrößen, moderat bis hoch, abhängig von der individuellen Bedeutung, die den persönlichen Gründen beigemessen wird⁴⁹.

Wohn- und Freizeitwert Wohn- und Freizeitwert beeinflussen die Attraktivität eines Standorts für Mitarbeiter und Führungskräfte, können jedoch innerhalb einer kleinen Region nur bedingt differieren. Unterschiede zwischen urbanen und ländlichen Gebieten können spürbar sein, aber insgesamt bleiben diese gering. Entsprechend ist die *Variabilität* als gering bis moderat und der *Einfluss* auf die Gesamtentscheidung als moderat zu bewerten.

Agglomerations- und Fühlungsvorteile Agglomerations- und Fühlungsvorteile entstehen durch räumliche Nähe zu Zulieferern, Kunden und Partnern. Auch dieser Standortfaktor kann von erheblicher strategischer Bedeutung für ein Unternehmen sein. Sobald die Entscheidung für eine Region aber gefallen ist entfällt der weitere Gestaltungsspielraum in diesem für die Gesamtstandortentscheidung relevantem Punkt. Die *Variabilität* ist somit gering, während der *Einfluss* auf den Gesamtentscheidungsprozess ebenfalls als

⁴⁹Płaziak und Szymański 2014.

moderat bis hoch bewertet werden kann, abhängig von der Branchenzugehörigkeit und dem Geschäftsmodell.

Nähe zu Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen Die Nähe zu Forschungseinrichtungen oder Universitäten kann Innovationen fördern und ist besonders für technologieintensive Branchen relevant. Innerhalb einer Region sind diese Einrichtungen meist auf wenige Standorte konzentriert, wodurch eine deutliche *Variabilität* entsteht. Der *Einfluss* auf die Standortwahl ist gering bis hoch. In Fällen, wo dieser Standortfaktor von großem Einfluss auf den Gesamtentscheidungsprozess ist, kann dieser die kostenoptimierte simultane Verkehrsträger- und Standortwahl als Hauptauswahlkriterium überschatten.

Natürliche Bedingungen Natürliche Bedingungen wie Klima oder geografische Lage sind auf globaler Ebene von Bedeutung, insbesondere im Bereich Risikomanagement, zeigen auf regionaler Ebene jedoch kaum nennenswerte Unterschiede. Daher fällt die *Variabilität* niedrig aus und der *Einfluss* auf die gesamte Standortentscheidung ist, abhängig von der Branche, entsprechend gering bis hoch.

Infrastrukturen (Ver-/Entsorgung, Kommunikation, Bildung) Die Qualität der Infrastruktur hinsichtlich Versorgung, Kommunikation und Bildung ist entscheidend für langfristige Standortvorteile. Innerhalb einer Region wie der Lausitz variieren diese Aspekte nur moderat zwischen urbanen und ländlichen Standorten. Somit ist die *Variabilität* moderat, während der *Einfluss* auf die Gesamtentscheidung aufgrund der grundlegenden Bedeutung der Infrastruktur als hoch eingeschätzt werden muss.

2 Theoretischer Hintergrund

Aus der isolierten Betrachtung der einzelnen Standortfaktoren auf regionaler Ebene und voneinander lassen sich einige Muster und Erkenntnisse ableiten. Während mit der fortlaufenden Eingrenzung des räumlichen Betrachtungsrahmens eine Zunahme von für eine Standortentscheidung relevanten Standortfaktoren festgestellt werden muss (vgl. 2.3), so findet parallel eine Entwertung der bereits in Zwischenstandortentscheidungen eingeflossenen Standortfaktoren statt. Ein Standortfaktor wird in Phase Eins des idealtypischen Entscheidungsprozesses auf der Betrachtungsebene eingeführt, auf der der Einfluss dieses Faktors auf die Gesamtentscheidung maximal ist. Mit der Standortentscheidung auf dieser Ebene sind die wesentlichen, diesen Standortfaktor betreffenden Entscheidungen gefallen und damit ist die Relevanz dieses Faktors auf nachfolgenden räumlichen Betrachtungsebenen stark eingeschränkt. Während also die Anzahl der für die Gesamtentscheidung relevanten Standortfaktoren über den Planungszeitraum kontinuierlich zunimmt, nimmt die Anzahl der auf der aktuellen Betrachtungsebene relevanten Standortfaktoren kontinuierlich ab.

Die folgende Abbildung 2.4 visualisiert die in diesem Abschnitt diskutierten Standortfaktoren anhand zweier Dimensionen: dem Einfluss auf den Gesamtentscheidungsprozess sowie der Variabilität innerhalb des betrachteten regionalen Raums. Aufgetragen sind die Faktoren entlang einer Matrix, in der die Y-Achse den Einfluss auf die finale Standortentscheidung abbildet, während die X-Achse die Variabilität der Faktoren auf regionaler Ebene darstellt. Die Bewertung dieser Dimensionen erfolgte auf Basis der durchgeführten Diskussion, die sowohl auf theoretischen Argumentationen als auch auf praktischen Erkenntnissen beruht. Dabei wurde geprüft, in welchem Maße ein Standortfaktor innerhalb der betrachteten Region zwischen verschiedenen Standortalternativen differenziert und wie stark dieser Faktor die Entscheidung im Rahmen der finalen Auswahl beeinflussen kann. Als Kriterium für die Einordnung in die Dimension „Einfluss“ diente insbesondere die potenzielle Steuerungswirkung des Faktors auf die langfristige Wirtschaftlichkeit und Eignung eines Standorts. Die Dimension „Variabilität“ berücksichtigt hingegen, wie stark sich die Ausprägungen eines Faktors zwischen Standorten innerhalb der Region unterscheiden. Die Darstellung zeigt deutlich, dass sich nur eine begrenzte Anzahl an Standortfaktoren als wirklich entscheidungsrelevant auf regionaler Ebene herauskristallisiert. Besonders auffällig ist dabei der Faktor Verkehr, der sowohl durch eine hohe Variabilität als auch durch einen ausgeprägten Einfluss auf die Entscheidung gekennzeichnet ist. Andere Faktoren wie Steuern und Abgaben oder Flächenverfügbarkeit weisen zwar moderate Variabilität auf, entfalten jedoch in der Regel geringeren unmittelbaren Einfluss oder sind durch vorangegangene Planungsschritte bereits weitgehend festgelegt.

Im vorliegenden Abschnitt wurden zunächst die verschiedenen räumlichen Betrachtungsebenen (global, regional und lokal) in der Standortplanung untersucht und argumentativ dargelegt, auf welcher dieser Ebenen der Standortfaktor Verkehr eine übergeordnete Rolle

2 Theoretischer Hintergrund

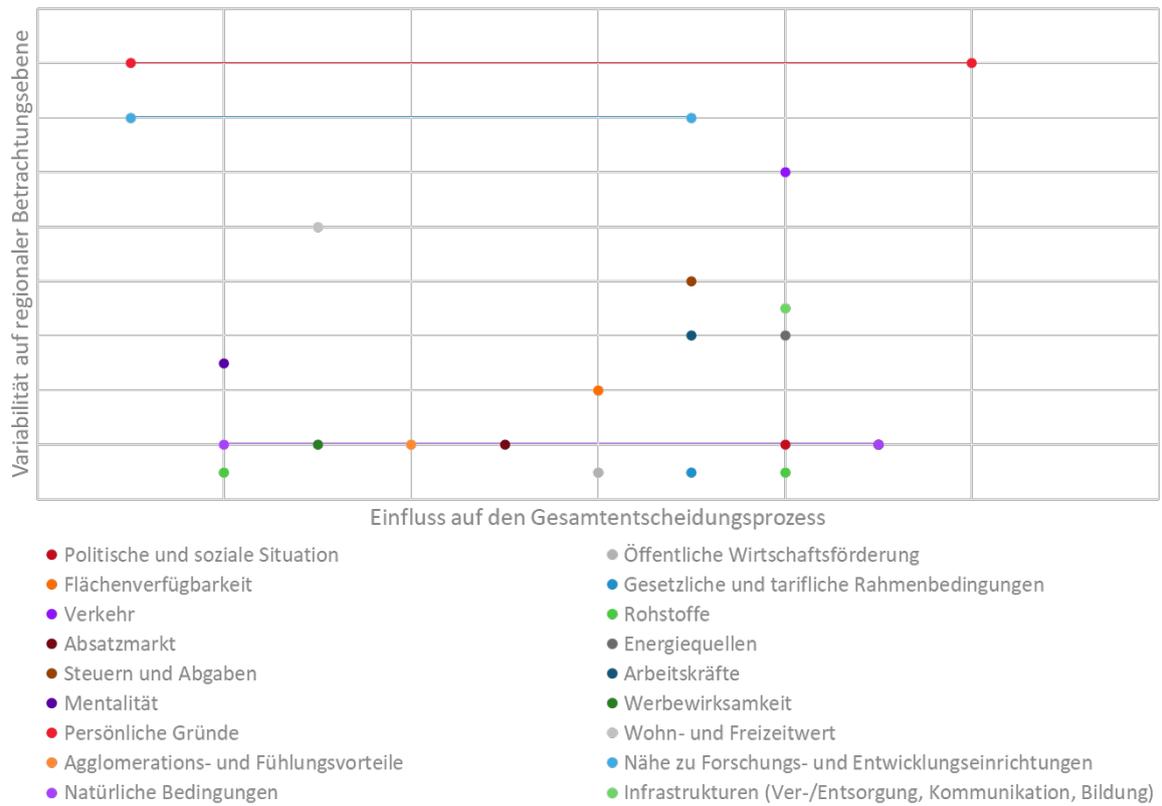


Abbildung 2.4: Betrachtete Standortfaktoren bewertet nach Einfluss auf den Gesamtentscheidungsprozess der Standortplanung und der Variabilität auf regionaler Ebene (eigene Darstellung).

einnehmen kann. Die Analyse ergab, dass die regionale Ebene aufgrund ihrer Kombination aus ausreichender Variabilität und einem immer noch beträchtlichen Einfluss auf operative Gesamtkosten optimal für eine simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl geeignet ist. Anschließend erfolgte eine detaillierte Bewertung von 19 Standortfaktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf den Gesamtentscheidungsprozess sowie ihrer Variabilität auf regionaler Ebene. Diese Bewertung bestätigte die Hypothese, dass der Faktor Verkehr auf regionaler Ebene eine herausragende Stellung einnimmt. Neben Verkehr wurden jedoch weitere relevante Aspekte identifiziert, die für eine erfolgreiche simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl zwingend berücksichtigt werden sollten. Hierzu zählen insbesondere Faktoren mit hohem Einfluss und ausreichender regionaler Variabilität, darunter die Verfügbarkeit von Flächen, Steuern und Abgaben sowie die Nähe zu Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen. Damit konnte die zweite sekundäre Forschungsfrage umfassend beantwortet werden: Es wurde geklärt, welche Standortfaktoren Einfluss nehmen und eindeutig herausgearbeitet, dass der Standortfaktor Verkehr speziell auf der regionalen Betrachtungsebene von übergeordneter Bedeutung ist. Für die primäre Forschungsfrage lässt sich daraus ableiten, dass ein simultaner Planungsansatz für Standort- und Verkehrsträgerwahl insbesondere dann wirtschaftlich vorteilhaft ist, wenn keine anderen Standortfaktoren mit hoher Relevanz und ausreichend Variabilität, wie potenziell die Nähe zu Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, dem Entgegenstehen oder mindestens den Gestaltungsspielraum stark einschränken.

2.1.3 Moderne Ansätze in der Standortplanungsforschung

Im folgenden Abschnitt werden anhand verschiedener Arbeiten exemplarisch Entwicklungen in der betrieblichen Standortplanungsforschung dargestellt und daraus resultierende Implikationen für den in dieser Arbeit verfolgten Modellansatz abgeleitet.

Seit den 2000er Jahren hat die Forschung im Bereich der Standortplanung wichtige Fortschritte erzielt. Insbesondere wurden zahlreiche Studien veröffentlicht, welche die theoretischen Grundlagen erweitert und praktische Anwendungen verbessert haben. Hierbei standen insbesondere die Integration stochastischer Elemente, hierarchischer Modelle, flussbasierter Nachfrage sowie integrierter Optimierungsansätze im Mittelpunkt.

Bereits im Jahr 2004 hoben Wang u. a. (2004) in ihrer Arbeit zur Modellierung stochastischer Nachfrage die Bedeutung unsicherer Nachfrageszenarien in der Standortplanung hervor. Obwohl stochastische Modelle grundsätzlich wertvolle Einblicke ermöglichen, wird in der vorliegenden Arbeit aus Gründen der Modelllaufzeit und der Annahme, dass Unternehmen bereits gesicherte Transportbedarfe liefern, bewusst auf eine explizite stochastische Modellierung verzichtet. Voraussetzung für die Anwendung des hier entwickelten

Modells ist somit, dass valide und stabile Transportmengen vorliegen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Yasenovskiy und Hodgson (2007) entwickelten 2007 ein hierarchisches Standort-Allokationsmodell, das insbesondere räumliche Interaktionen berücksichtigt. Während eine detaillierte hierarchische Standortplanung auf verschiedenen Betrachtungsebenen (global, regional, lokal) auch dieser Arbeit zugrunde liegt, wird der Fokus hier konkret auf der regionalen Ebene gelegt, um spezifische operative Kostenvorteile durch simultane Standort- und Verkehrsträgerplanung nutzbar zu machen.

Die Perspektive auf flussbasierte Nachfrage, also die Modellierung von Nachfrage nicht als einzelne, punktuelle Transporte, sondern als kontinuierliche Güterströme zwischen Quell- und Zielpunkten, wurde von Zeng u. a. (2010) in ihrem Modell explizit aufgegriffen. Diesem Ansatz folgend wird auch in dieser Arbeit die Transportnachfrage nicht punktuell, sondern als Verkehrsflüsse über die betrachteten Verkehrsträger interpretiert. Die Idee, Nachfrage flussbasiert abzubilden, bildet somit eine wichtige Grundlage für die hier verfolgte integrierte Betrachtung von Standort und Verkehrsträgerwahl.

Zhang u. a. (2010) präsentierten ebenfalls 2010 ein zweistufiges Standortmodell, das Netzwerkeffekte und Stauprobleme („A bilevel model for preventive healthcare facility network design with congestion“) miteinbezieht. Obwohl die direkte Übertragung dieser Modellierung nicht das Ziel dieser Arbeit ist, verdeutlicht das Konzept die Wichtigkeit, von Kapazitäts- und Auslastungsbetrachtungen in Regionen, in denen Engpassrisiken aufgrund von fehlender oder nicht ausreichend ausgebauter Infrastruktur bestehen.

Aktuelle Forschungsansätze, wie jene von Zheng u. a. (2019) zur integrierten Optimierung von Standort-, Lagerbestands- und Routingproblemen („Integrated optimization of location, inventory and routing in supply chain network design“), zeigen klar die Vorteile einer simultanen Optimierung mehrerer logistischer Dimensionen. Yuchi u. a. (2021) erweitern diesen Ansatz in ihrer Studie zum Standort-Lager-Routenplanungsproblem („Hybrid heuristic for the location-inventory-routing problem in closed-loop supply chain“) um Aspekte geschlossener Lieferketten und betonen die praktische Relevanz hybrider Heuristiken, um solche komplexen Planungsprobleme effizient zu lösen.

Das in Kapitel 3 entwickelte Modell nimmt zentrale Aspekte dieser Entwicklungen auf, indem es die Vorteile simultaner Standort- und Verkehrsträgerplanung gezielt adressiert. Dabei wird jedoch bewusst auf zusätzliche Komplexitätsebenen wie Lagerplanung und geschlossene Lieferketten verzichtet, um die Kernfrage nach den entscheidenden Einflussgrößen einer simultanen, verkehrsträgeroptimierten Standortplanung explizit und effizient zu untersuchen.

2.2 Kombiniertes Verkehr

Der Kombinierte Verkehr beschreibt den Transport von Gütern mithilfe mindestens zweier unterschiedlicher Verkehrsträger, wobei standardisierte Ladeeinheiten wie Container oder Wechselbrücken eingesetzt werden. Ein wesentliches Merkmal des kombinierten Verkehrs ist dabei, dass die Güter beim Wechsel zwischen den Verkehrsträgern nicht einzeln umgeschlagen, sondern in den jeweiligen Ladeeinheiten verbleiben und lediglich zwischen spezifischen Umschlagpunkten bewegt werden. Dies ermöglicht eine effiziente Verbindung der Vorteile verschiedener Verkehrsträger, beispielsweise die Flexibilität und Erreichbarkeit des Straßengüterverkehrs mit der Kapazität und Umweltfreundlichkeit des Schienenverkehrs.

Die Nutzung des kombinierten Verkehrs kann Unternehmen vielfältige Vorteile bieten, insbesondere hinsichtlich der Kosteneffizienz bei mittleren bis langen Transportdistanzen. Durch Bündelung und Konsolidierung großer Frachtmengen ergeben sich Einsparpotenziale bei Transportkosten. Darüber hinaus können Unternehmen ökologische und regulatorische Vorteile nutzen, da insbesondere die Einbindung der Schiene zu reduzierten CO₂-Emissionen und damit einer verbesserten Umweltbilanz führt. Angesichts steigender regulatorischer Anforderungen und wachsender Transportvolumina gewinnt der kombinierte Verkehr zunehmend an Bedeutung für die betriebliche Logistikplanung.

Ein Blick auf die jüngsten Entwicklungen im Güterverkehr in Deutschland verdeutlicht die zunehmende Relevanz des kombinierten Verkehrs. Im Jahr 2022 betrug die Beförderungsmenge im kombinierten Verkehr 123,4 Millionen Tonnen, was einem Anteil von 2,7% an der Gesamtbeförderungsmenge von rund 4.460 Millionen Tonnen entspricht. Innerhalb der letzten zehn Jahre stieg die beförderte Menge im kombinierten Verkehr um etwa 25%⁵⁰. Noch deutlicher fällt die Entwicklung beim Anteil an der Beförderungsleistung aus: Hier lag der kombinierte Verkehr bei 59,3 Milliarden Tonnenkilometern, was 8,4% der gesamten Güterverkehrsleistung (703 Milliarden Tonnenkilometer) entspricht. Davon entfielen 7,8% auf den Transport per Schiene und 0,7% auf den per Wasserstraße durchgeführten Anteil⁵¹. Diese Zahlen unterstreichen die zunehmende Bedeutung des kombinierten Verkehrs insbesondere für überregionale Transporte mit hohen Distanzen und großen Transportmengen.

Auch unter klimapolitischen Gesichtspunkten spielt der kombinierte Verkehr eine zentrale Rolle. Der Verkehrssektor verfehlt in Deutschland regelmäßig seine Klimaziele. Im Jahr 2022 lagen die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen bei rund 150 Millionen Tonnen und damit deutlich über dem Zielwert von 133 Millionen Tonnen, wie er im Klimaschutzgesetz

⁵⁰Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr e.V. 2023, S. 4.

⁵¹Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr e.V. 2023, S. 4.

2 Theoretischer Hintergrund

vorgesehen ist. Ohne erhebliche Verlagerungen von Straßentransporten auf klimafreundlichere Verkehrsträger wie die Schiene lassen sich diese Ziele nicht erreichen. Abbildung 2.5 verdeutlicht die Emissionsentwicklung und macht die Lücke zwischen realem Ausstoß und Zielvorgaben anschaulich sichtbar.

Ein fortlaufendes Verfehlen der nationalen Klimaziele im Verkehrssektor bleibt jedoch nicht folgenlos. Gemäß europäischer Vorgaben aus der Lastenteilungsverordnung drohen bei Nichterfüllung der Klimaziele erhebliche Strafzahlungen. Für Deutschland könnten bei einem Fortschreiben aktueller Entwicklungen im Verkehrssektor bis zu 50 Milliarden Euro an Zahlungsverpflichtungen anfallen, sofern keine wirksamen Gegenmaßnahmen ergriffen werden⁵². Diese drohenden Kosten erhöhen den politischen Handlungsdruck deutlich und machen eine tiefgreifende Verkehrswende wahrscheinlich.

Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass der kombinierte Verkehr künftig noch stärker gefördert und infrastrukturell ausgebaut wird. Er stellt eine zentrale Maßnahme dar, um kosteneffizient CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu senken und europarechtliche Verpflichtungen zu erfüllen. Damit steigt auch die planerische Relevanz des kombinierten Verkehrs für Unternehmen und öffentliche Akteure im Rahmen logistischer Standortentscheidungen.

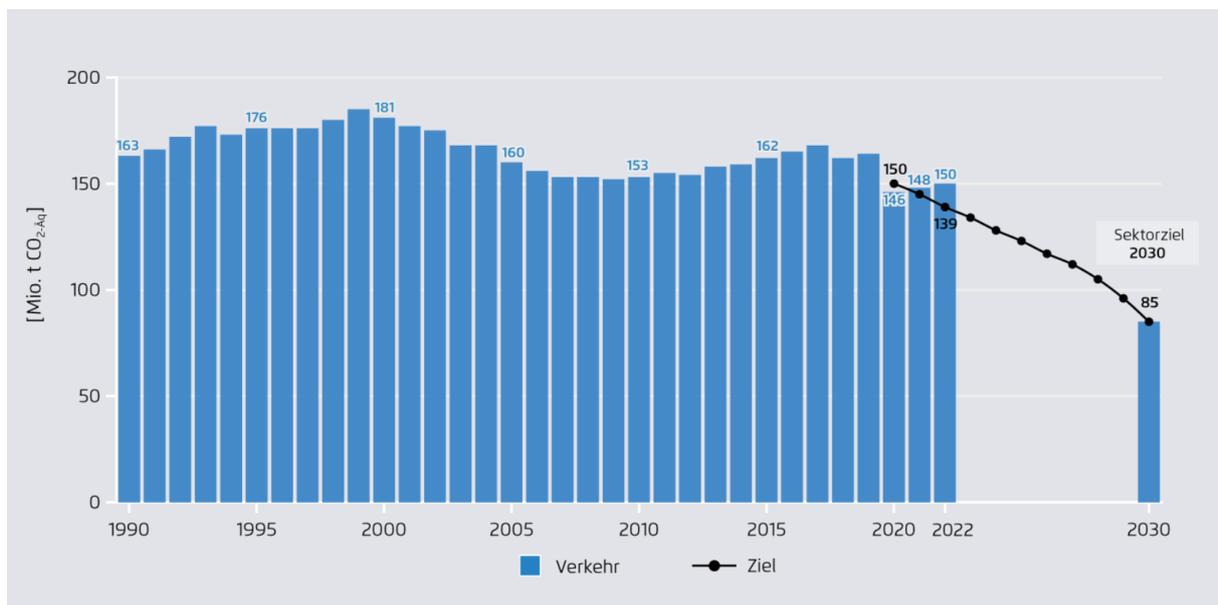


Abbildung 2.5: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutschland (1990–2022) mit Zielpfad bis 2045 Agora Verkehrswende 2023

Für die Bearbeitung der primären Forschungsfrage ist der kombinierte Verkehr somit von

⁵²Agora Verkehrswende 2024, S. 5–7.

zentraler Bedeutung, da er die simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl ermöglicht und so potenziell erhebliche Kostenvorteile gegenüber einer rein straßenbasierten Logistiklösung bietet. Zur begrifflichen Einordnung haben sich in der Literatur unterschiedliche Terminologien herausgebildet. Häufig verwendet werden neben dem Begriff „kombinierter Verkehr“ auch die Bezeichnungen multimodaler und intermodaler Verkehr⁵³. Während multimodaler Transport allgemein den Gütertransport mittels mindestens zwei verschiedener Verkehrsträger bezeichnet⁵⁴, beschreibt der intermodale Transport speziell die Beförderung in einer durchgängigen, einheitlichen Transporteinheit ohne Güterumschlag beim Wechsel der Verkehrsträger⁵⁵. Kombiniertes Verkehr stellt eine weitere Spezifizierung des intermodalen Verkehrs dar, bei der insbesondere die Verkehrsträger Eisenbahn, Binnenschiff und Seeschiff im Vordergrund stehen⁵⁶. In der vorliegenden Arbeit wird speziell der kombinierte Verkehr zwischen Eisenbahn und Lastkraftwagen betrachtet, im Gegensatz zum ausschließlichen Transport auf der Straße. Diese Abgrenzung bildet die Grundlage für den simultanen Planungsansatz.

2.2.1 Moderne Ansätze in der kombinierten Verkehrsplanung

Zur Integration des kombinierten Verkehrs in die Standortplanung ist es hilfreich, die Entwicklung der Forschungsansätze in diesem Bereich nachzuvollziehen und daraus Implikationen für die Modellierung der simultanen Standort- und Verkehrsträgerwahl abzuleiten.

Seit 1990 ist im Feld des Kombinierten Verkehrs eine Veränderung des Forschungsschwerpunktes von der Erforschung grundlegender Prinzipien und Verbesserungsmöglichkeiten im operativen Bereich hin zur Modellierung intermodaler Transportsysteme zu beobachten. Die Untersuchung von Mar Agamez-Arias und Moyano-Fuentes (2017, S. 786) zeigt, dass sich der Fokus der Forschung im Bereich des intermodalen Verkehrs im Zeitraum von 1990 bis 2009 primär auf grundlegende Prinzipien sowie der Verbesserung der Funktionsweise intermodaler Verkehrssysteme richtete. In dieser Phase lag das Verhältnis der entsprechenden Arbeiten zu Studien im Bereich der Modellierung intermodaler Verkehrssysteme bei 57 zu 26. Im Zeitraum von 2010 bis 2016 änderte sich der Forschungsschwerpunkt signifikant: Das Verhältnis verschob sich auf 50 zu 55 zugunsten der Modellierungsforschung. Zusätzlich stieg die Gesamtanzahl der Studien in beiden Bereichen deutlich an, was die zunehmende Bedeutung von Modellierungsmethoden im intermodalen Verkehr

⁵³Stadieseifi u. a. 2014, S. 2.

⁵⁴UNECE 2010, S. 157.

⁵⁵Crainic und Kim 2006, S. 2.

⁵⁶UNECE 2010, S. 157.

verdeutlicht. Abbildung 2.6 illustriert anschaulich die zunehmende Bedeutung des Forschungsbereichs und insbesondere der Modellierung, indem das oben genannte Verhältnis in Arbeiten pro Jahr dargestellt wird.

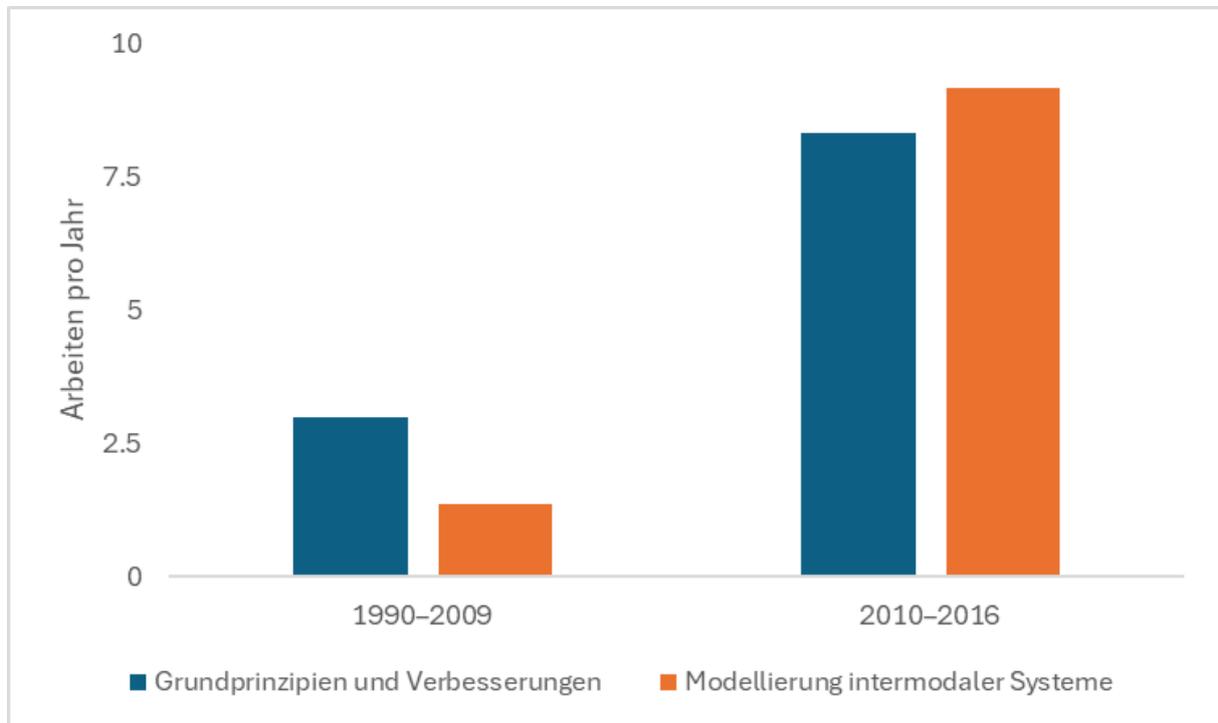


Abbildung 2.6: Entwicklung des Forschungsschwerpunkts im intermodalen Verkehr: Verhältnis von Studien zu Grundprinzipien und Verbesserungen gegenüber Modellierung intermodaler Systeme im Zeitraum 1990–2016 Mar Agamez-Arias und Moyano-Fuentes 2017, S. 786.

Bereits 1990 betonte Slack (1990), dass intermodale Transportzentren entscheidend zur Effizienzsteigerung im Güterverkehr beitragen und somit strategisch relevante Faktoren für Standortentscheidungen darstellen können. Im Jahr 2004 identifizierten Bontekoning u. a. (2004) in ihrer Literaturübersicht zentrale Forschungslücken und hoben hervor, dass durch eine integrierte Betrachtung verschiedener Verkehrsträger signifikante Optimierungspotenziale realisiert werden können. Ebenfalls im Jahr 2004 zeigten Macharis und Bontekoning (2004), dass traditionelle Optimierungsmodelle, die auf einzelne Verkehrsträger beschränkt sind, unzureichend sind, um intermodale Transportprobleme angemessen zu lösen. Sie argumentierten, dass Methoden des Operations Research (OR) entscheidend sind, um effiziente Lösungen für kombinierte Transportnetzwerke zu finden. Diese Arbeiten liefern wichtige methodische Grundlagen, auf die das in dieser Arbeit entwickelte Modell zurückgreifen kann.

Ein weiterer bedeutender Beitrag erfolgte 2011 durch Macharis u. a. (2011), die einen Rahmen zur Entscheidungsunterstützung im intermodalen Verkehr entwickelten. Dieses

Rahmenwerk bezieht sich auf die simultane Optimierung von Standort- und Verkehrsträgerwahl, was direkte Bezüge zur Problemstellung der vorliegenden Arbeit aufweist und wertvolle Hinweise zur methodischen Umsetzung liefert, insbesondere in Bezug auf die Einordnung relevanter Transportmodi.

Ein Meilenstein für die spezifische Kombination Straße-Schiene bildet die Arbeit von Bierwirth u. a. (2012), die ein Modell zur operativen Auswahl von Verkehrsträgern entwickelten. Ihr Ansatz untersuchte den Wettbewerb zwischen Straßen- und intermodalem Verkehr hinsichtlich der Frachtkonsolidierung und der Transportkosten auf einer Modellbasis. Die Ergebnisse zeigten, dass intermodale Transporte wirtschaftlich sein können, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind, wie beispielsweise geringere Transportkosten pro Einheit und Kilometer im Schienenverkehr im Vergleich zum Straßenverkehr sowie eine Mindestentfernung, ab der der Schienenverkehr kosteneffizienter wird. Ihr Modell berücksichtigt realistische Kostensätze und Konsolidierungseffekte und bietet somit eine fundierte Basis für die Optimierung von Transportentscheidungen in einem Netzwerk mit konkurrierenden Schienen- und Straßentransportdiensten. Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass die Konsolidierung von Fracht und die Nutzung von Vollständige Zugladungen "Full-Train Loads" (FTL) im Vergleich zu Unvollständige Zugladungen "Less-Than-Train-Loads" (LTL) erhebliche Kostenvorteile bieten können. Damit werden die von Macharis und Bontekoning (2004) beschriebenen Konzepte der Optimierung von Transportketten und der Netzplanung im intermodalen Güterverkehr aufgegriffen und praktisch umgesetzt. In Kapitel 3 wird dieses Modell aufgegriffen und um die Entscheidungsebene des Produktionsstandortes erweitert.

Weitere relevante Ansätze liefern Liu u. a. (2014) mit ihrer Optimierung globaler intermodaler Schifffahrtsnetzwerke sowie Mathisen und Hanssen (2014) mit ihrer umfassenden Literaturübersicht zur akademischen Forschung im intermodalen Güterverkehr. Diese Arbeiten bieten methodische Anregungen und ermöglichen die systematische Identifikation relevanter Faktoren und Forschungslücken, welche in der vorliegenden Modellierung berücksichtigt werden.

Zusammenfassend verdeutlichen die aufgezeigten Entwicklungen in der Forschung zum kombinierten Verkehr die zentrale Bedeutung modellbasierter Ansätze für die simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl. Sie betonen insbesondere die Relevanz einer integrierten Betrachtung verschiedener Verkehrsträger sowie die entscheidende Rolle effizienter Modellierungsansätze zur Realisierung von Kostenvorteilen und Effizienzgewinnen, was exakt der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit entspricht.

2.2.2 Regionale Anforderungen

Ziel dieses Abschnitts ist es, die dritte sekundäre Forschungsfrage dieser Arbeit zu beantworten: „*Welche Voraussetzungen spielen eine Rolle für die Relevanz von kombiniertem Verkehr als Planungsproblem für eine Region?*“ Die Beantwortung dieser Forschungsfrage ermöglicht es, zu identifizieren, welche regionalen Rahmenbedingungen notwendig sind, damit eine simultane Planung von Standort- und Verkehrsträgerwahl gegenüber einer sequenziellen Planung erhebliche Kostenvorteile erzielen kann. Diese Erkenntnisse unterstützen wiederum direkt die Beantwortung der primären Forschungsfrage, indem sie klarstellen, unter welchen regionalen Bedingungen ein simultanes Planungsmodell besondere praktische Relevanz besitzt.

Die bisherigen Analysen in diesem Kapitel verdeutlichen, dass die wesentlichen Potenziale des Kombiniertes Verkehr in der Kosteneffizienz durch Bündelung von Transportmengen, in der Nutzung spezifischer Vorteile der jeweiligen Verkehrsträger und in der Verringerung externer Kosten, wie Emissions- oder Straßenverkehrskosten, liegen⁵⁷. Aus diesen Potenzialen lassen sich spezifische regionale Anforderungen ableiten, die erfüllt sein müssen, damit der KV zu einem signifikanten Planungsproblem für regionale Standortentscheidungen wird.

Eine zentrale regionale Voraussetzung für die Relevanz von KV ist die Existenz geeigneter Verkehrsinfrastrukturen. Intermodaler Verkehr im Allgemeinen und insbesondere die Kombination von Straße und Schiene erfordert Verladepunkte, die in dieser Arbeit nachfolgend als KV-Terminals referenziert werden, sowie eine entsprechende Straßen- und Schieneninfrastruktur. Terminals für den KV müssen nicht nur vorhanden, sondern auch ausreichend leistungsfähig sein, um eine zeitnahe und effiziente Abwicklung der Transportprozesse zu gewährleisten⁵⁸. Eine Region ohne Zugang zu einer gut ausgebauten KV-Infrastruktur bietet dementsprechend kaum Potenziale für Kosten- oder Zeitvorteile durch intermodale Transporte. Weiterhin bestimmt die Lage dieser Infrastruktur innerhalb der Region, wie signifikant der Einfluss auf die Standortentscheidung von Unternehmen sein kann.

Die Transportdistanz zwischen den Produktions- und Abnahmestellen ist ebenfalls eine bedeutende regionale Voraussetzung für die Relevanz von KV. Der KV entfaltet sein Kostensenkungspotenzial gegenüber reinem Straßenverkehr in der Regel erst ab mittleren bis längeren Distanzen⁵⁹. Eine Region, in der Produktionsstandorte und relevante Absatzmärkte sehr nahe beieinander liegen, bietet folglich weniger Möglichkeiten, Vorteile aus der Nutzung des KV zu ziehen. Hingegen begünstigen Regionen, die überregionalen

⁵⁷Bierwirth u. a. 2012, S. 199.

⁵⁸Macharis und Bontekoning 2004, S. 412–413.

⁵⁹Bierwirth u. a. 2012, S. 198.

2 Theoretischer Hintergrund

Handel betreiben, bei denen Transportdistanzen typischerweise 300 bis 600 Kilometer überschreiten, signifikant die Nutzung von KV⁶⁰. Ein ausreichend hohes und regelmäßiges Transportaufkommen ist zudem erforderlich, um Skaleneffekte des KV, effizient zu nutzen und somit Fixkosten für Terminals und Infrastruktur sinnvoll zu verteilen.

Die wirtschaftliche und industriespezifische Struktur einer Region bestimmt maßgeblich das Transportvolumen und die Transportart. So bietet sich insbesondere für produktionsintensive Branchen mit großen und konstanten Transportmengen der KV an, da die damit verbundene Möglichkeit der Bündelung und regelmäßigen Nutzung von Infrastruktur am stärksten zum Tragen kommt. Im Gegensatz dazu generieren Regionen, die überwiegend Dienstleistungen anbieten oder sehr fragmentierte und unregelmäßige Transportbedarfe haben, deutlich weniger Potenziale für KV. Des Weiteren können spezifische Branchenanforderungen hinsichtlich Ladung, Zeitsensitivität und Güterarten entscheidend dafür sein, ob KV für die regionalen Unternehmen attraktiv ist. Beispielsweise eignen sich standardisierte Güter, die eine relativ flexible Lieferzeit erlauben, besser für die Nutzung des KV als hochgradig zeitsensitive Güter.

Eine wesentliche regionale Voraussetzung für die Relevanz des KV ergibt sich auch aus dem politisch-regulatorischen Umfeld. Staatliche oder kommunale Förderprogramme, Infrastrukturinvestitionen und regulatorische Rahmenbedingungen, wie Emissionsbeschränkungen oder Lkw-Fahrverbote, können erheblich zur Attraktivität des KV beitragen. Wenn die regionalen politischen Akteure die Nutzung intermodaler Systeme aktiv unterstützen und die Infrastruktur kontinuierlich ausbauen, steigt die Wettbewerbsfähigkeit dieser Verkehrsalternative erheblich gegenüber reinen Straßenverkehren. Regionen, die eine solche Unterstützung bieten, sind deshalb für den Einsatz eines simultanen Standort- und Verkehrsträgermodells besonders interessant.

Zuletzt sind regionale Nachhaltigkeitsziele und Umweltauforderungen ein weiterer entscheidender Faktor. In Regionen, in denen Umweltauflagen zunehmend verschärft und CO₂-Kosten internalisiert werden, steigt der Druck, umweltfreundliche Verkehrsträger wie den Schienenverkehr in Transportketten zu integrieren. Der KV gewinnt daher insbesondere in Regionen an Bedeutung, die klare Nachhaltigkeitsziele verfolgen oder sogar gesetzlich vorgeschriebene Emissionsreduktionsziele einzuhalten haben. In einem solchen Kontext bietet KV einen klaren strategischen Vorteil für Unternehmen, deren Transportvolumen signifikant ist und die gleichzeitig emissionsintensive Straßentransporte reduzieren wollen oder müssen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass der KV dann besonders relevant für regionale Planungsentscheidungen wird, wenn geeignete Verkehrsinfrastrukturen verfügbar, signifikan-

⁶⁰Macharis u. a. 2011, S. 168.

te Transportdistanzen und Aufkommen gegeben, sowie günstige wirtschaftliche, politische und umweltpolitische Rahmenbedingungen vorhanden sind. Werden diese Voraussetzungen erfüllt, entsteht für Unternehmen ein klarer Anreiz, Standortentscheidungen simultan mit der Verkehrsträgerwahl zu planen, um sowohl Kosten- als auch Wettbewerbsvorteile zu realisieren. Die dritte sekundäre Forschungsfrage lässt sich damit folgendermaßen beantworten: Die Relevanz des kombinierten Verkehrs als Planungsproblem für eine Region hängt maßgeblich von infrastrukturellen Rahmenbedingungen, Transportentfernungen und -volumina, wirtschaftlicher Struktur, politischer Unterstützung und Umweltzielen der Region ab.

Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich für die primäre Forschungsfrage die wichtige Ableitung, dass ein simultaner Ansatz zur Standort- und Verkehrsträgerplanung insbesondere dort erhebliche Kostenvorteile gegenüber der sequenziellen Planung verspricht, wo die genannten regionalen Voraussetzungen erfüllt sind. Es sind daher für eine simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl insbesondere Regionen geeignet,

- die sich durch interregionalen Handel und damit verbundene für den KV ausreichende Transportdistanzen auszeichnen,
- in denen es eine gut ausgebaute Schiene- und Straßeninfrastruktur einschließlich genügend KV-Terminals gibt,
- die Wirtschaftsstrukturen aufweisen, die für Unternehmen interessant sind,
- die hohe und regelmäßige Transportvolumina aufweisen und in denen politische und regulatorische Rahmenbedingungen herrschen und
- in denen Schienenverkehr im Vergleich zum Transport über die Straße bevorzugt wird.

Wenn diese Aspekte entsprechend ausgestaltet sind, bildet eine Region also das ideale Anwendungsfeld für den in dieser Arbeit verfolgten simultanen Modellansatz.

3 Durchführung der Simulationsstudie

Im vorangegangenen Kapitel wurden die theoretischen Grundlagen zu den Themen Standortplanung und kombinierter Verkehr ausführlich dargelegt. Dabei wurde insbesondere herausgearbeitet, auf welcher räumlichen Betrachtungsebene und unter welchen regionalen Voraussetzungen die simultane Planung von Standort- und Verkehrsträgerwahl erhebliche Vorteile verspricht. Diese Erkenntnisse dienen nun als Ausgangspunkt für die Durchführung der Simulationsstudie, in der das simultane Planungsmodell entwickelt und anschließend praktisch angewandt wird, um dessen Potenziale zur Kostensenkung gegenüber einer sequenziellen Planung empirisch zu untersuchen.

Ziel des Kapitels ist es, aufbauend auf den theoretisch gewonnenen Einsichten, die primäre Forschungsfrage der Arbeit umfassend zu beantworten. Dazu wird mithilfe einer Simulationsstudie untersucht, wie sich eine simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl konkret auswirkt und welche Faktoren hierbei entscheidend sind. Die relevanten Aspekte, die im Kapitel 2 herausgestellt wurden, insbesondere die regionalen Anforderungen wie Infrastrukturverfügbarkeit, Transportdistanz und -aufkommen sowie die umweltpolitischen Rahmenbedingungen, bilden hierbei die Grundlage der konkreten Modellausgestaltung und Szenarioentwicklung.

Die Durchführung der Simulationsstudie gliedert sich in die aufeinander aufbauenden Schritte der *Aufgabendefinition*, *Systemanalyse*, *Datenbeschaffung*, *Modellformalisierung*, *Datenaufbereitung*, *Implementierung* sowie der abschließenden *Experimente und Analyse*. Diese Struktur orientiert sich am etablierten Vorgehensmodell aus Rabe u. a. (2008), erweitert in Wenzel u. a. (2008), das ursprünglich die Ausarbeitung separater Dokumente für jede Phase vorsieht. Zur Vermeidung von Wiederholungen und zur klaren Einbettung in die vorliegende Arbeit wurde das Vorgehensmodell jedoch angepasst, sodass die einzelnen Schritte sektionsweise abgehandelt werden. Der Inhalt und das Vorgehen der nachfolgenden Sektionen wurden in Sektion 1.3 beschrieben.

In Sektion 3.1 (*Aufgabendefinition*) werden die Ziele und Rahmenbedingungen der Simulationsstudie konkretisiert. Dies geschieht auf Basis der im theoretischen Hintergrund identifizierten Standortfaktoren und Anforderungen an den kombinierten Verkehr. Sektion 3.2 (*Systemanalyse*) befasst sich mit der Analyse des Untersuchungsraumes, konkret

dem Lausitzer Revier, um dessen Eignung als realitätsnahes Testfeld für das Modell zu bewerten und Systemgrenzen zu definieren.

3.1 Aufgabendefinition

Die Aufgabendefinition bildet die Grundlage für die nachfolgenden Schritte der Simulationsstudie. Ziel dieses Abschnitts ist es, die in der Zielbeschreibung Anforderungen in konkrete Aufgaben zu übersetzen, die im Rahmen der Durchführung der Simulationsstudie bearbeitet werden können. Dazu wird eine Aufgabenspezifikation erstellt, die sowohl die Ziele als auch die damit verbundenen Grenzen der Simulationsstudie klar definiert und abgrenzt. Die Grundlage dafür bilden insbesondere die im Kapitel des theoretischen Hintergrundes erarbeiteten Erkenntnisse, welche die entscheidenden Aspekte für die erfolgreiche simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl bereits identifiziert haben.

Im Zuge der theoretischen Betrachtung in Abschnitt 2.1.2 wurde festgestellt, dass die regionale Betrachtungsebene für eine simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl besonders geeignet ist. Daraus ergibt sich als erste Aufgabe die **Auswahl einer geeigneten Untersuchungsregion**. Zur Gewährleistung der Praxisrelevanz der Simulationsstudie ist eine Region auszuwählen, die der in Kapitel 2 ermittelten geeigneten räumlichen Betrachtungsebene, der regionalen Betrachtungsebene, entspricht. Diese Region muss zudem den spezifischen regionalen Anforderungen des kombinierten Verkehrs gerecht werden, insbesondere in Bezug auf infrastrukturelle Rahmenbedingungen, Transportentfernungen und -volumina, wirtschaftlicher Struktur, politischer Unterstützung und Umweltzielen (vgl. Sektion 2.2.2). Diese Aufgabe wird in Sektion 3.2 bearbeitet.

Weiterhin ist für die erfolgreiche Beantwortung der primären Forschungsfrage ein geeigneter Modellierungsansatz erforderlich, der die simultane Planung von Standort und Verkehrsträgerwahl ermöglicht. Diese Anforderung ergibt sich aus den Erkenntnissen über die Integration logistischer Prozesse und intermodaler Verkehrssysteme, wie sie im theoretischen Hintergrundkapitel behandelt wurden (vgl. Sektion 2.1.3 und 2.2.1). Daraus folgt die **Auswahl eines geeigneten Modellierungsansatzes** als weitere konkrete Aufgabe. Es muss dabei ein Modellierungsansatz ausgewählt werden, der geeignet ist, simultane Standortentscheidungen und Verkehrsträgerwahl abzubilden. Aufgrund der Zielsetzung und Anforderungen dieser Arbeit liegt dabei der Fokus auf nichtlinearer ganzzahliger Programmierung, die sich in der Literatur als besonders geeignet für derartige Fragestellungen herausgestellt hat (vgl. Sektionen 2.1.3 und 2.2.1). Die Auswahl und detaillierte Ausarbeitung des Modellierungsansatzes erfolgt in Sektion 3.4.

Für die praktische Umsetzung des Modells und zur Sicherstellung valider Ergebnisse ist die Nutzung realistischer Frachtkostensätze unabdingbar. Dies wurde im theoretischen Hintergrund insbesondere im Zusammenhang mit der Relevanz des Standortfaktors „Verkehr“ identifiziert (vgl. Sektion 2.1.2). Hieraus resultiert die Aufgabe der **Berechnung realistischer Frachtkostensätze**. Es müssen Frachtkostensätze für die in der Studie im Fokus stehenden Verkehrsträger ermittelt werden. Dabei sollen neben den reinen Transportkosten auch CO₂-Bepreisungen und Mautgebühren berücksichtigt werden, da diese Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit des kombinierten Verkehrs haben können. Diese Aufgabe wird innerhalb der Sektion 3.5 bearbeitet.

Zusätzlich zu den spezifischen Aufgabenstellungen, die direkt aus dem theoretischen Hintergrund abgeleitet wurden, ergeben sich weitere unterstützende Aufgaben, die zur erfolgreichen Durchführung der Studie unerlässlich und bereits in der durch die Methodik vorgegebenen weiteren Struktur verankert sind:

- **Datenbeschaffung:** Die Erhebung von relevanten Daten bezüglich Infrastruktur, Verkehrsmengen und regionalen Rahmenbedingungen ist essenziell, um die Modellierung realistisch gestalten zu können. Diese Aufgabe wird in Sektion 3.3 bearbeitet.
- **Implementierung und Durchführung der Simulation:** Die praktische Umsetzung des ausgewählten Modellierungsansatzes mithilfe geeigneter Softwarelösungen stellt eine zentrale Aufgabe der Studie dar. Die Implementierung erfolgt in Sektion 3.6.
- **Experimentdesign und Ergebnisanalyse:** Zur fundierten Beantwortung der primären Forschungsfrage sind gezielte Simulationsläufe notwendig, in denen unterschiedliche Szenarien hinsichtlich Transportmengen und Kostenstrukturen untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind anschließend hinsichtlich der identifizierten Erfolgsfaktoren des simultanen Planungsansatzes zu analysieren. Diese abschließende Aufgabe wird in Sektion 3.7 behandelt.

Die hier spezifizierten Aufgaben bilden insgesamt den methodischen Rahmen für die Durchführung der Simulationsstudie. Durch ihre Bearbeitung wird die Grundlage geschaffen, die relevanten Aspekte für die simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl umfassend zu analysieren und somit die primäre Forschungsfrage dieser Arbeit eindeutig und praxisnah beantworten zu können.

3.2 Systemanalyse

Die Systemanalyse bildet den ersten inhaltlichen Schritt in der Durchführung der Simulationsstudie und erfüllt zwei zentrale Aufgaben. Zunächst wird in Abschnitt 3.2.1 das reale System beschrieben und die Wahl des Lausitzer Reviers als geeignete Region für die Simulationsstudie wird ausführlich anhand der in Abschnitt 2.2.2 festgehaltenen Anforderungen und der Erkenntnisse zur idealen räumlichen Betrachtungsebene aus Abschnitt 2.1.2 begründet. Anschließend wird in Abschnitt 3.2.2 ein Konzeptmodell entwickelt, das als verbindende Schnittstelle zwischen dem realen System und der modelltechnischen Umsetzung dient. Abschließend wird in Abschnitt 3.2.3 die Validität des entwickelten Konzeptmodells überprüft, um sicherzustellen, dass es die Anforderungen des realen Systems ausreichend abbildet.

3.2.1 Beschreibung des realen Systems

Zur Durchführung der Simulationsstudie wurde das Lausitzer Revier ausgewählt. Diese Region erfüllt in besonderem Maße die Anforderungen an eine regionale Betrachtungsebene, wie sie in Abschnitt 2.1.2 als geeignet identifiziert wurden, während sie sich gleichzeitig durch ihre Größe und ihre Stellung als etablierte zusammenhängende Wirtschaftsregion in die regionale Betrachtungsebene einordnen lässt, für die in Abschnitt 2.1.2 der Standortfaktor Verkehr als potenziell besonders relevant identifiziert wurde. Die Lausitz erstreckt sich geografisch über sechs Landkreise der beiden Bundesländer Brandenburg und Sachsen sowie der kreisfreien Stadt Cottbus. Diese sind historisch durch die lange Förderung der großen Braunkohlevorkommen der Region zusammengewachsen und zeichnen sich daher durch enge wirtschaftspolitische und regulatorische Koordination wichtiger Rahmenbedingungen innerhalb des Wirtschaftsraums aus. Hinsichtlich kommunaler Hebesätze der Gewerbesteuer sind zwar leichte Unterschiede zu verzeichnen, diese Differenzen sind jedoch relativ gering und die Gewerbesteuer insgesamt im deutschlandweiten Kontext vergleichsweise niedrig, sodass der Einfluss der Verkehrsanbindung sowie der Verkehrsträgerwahl besonders deutlich herausgestellt werden kann (vgl. Abbildung 3.1).

3 Durchführung der Simulationsstudie

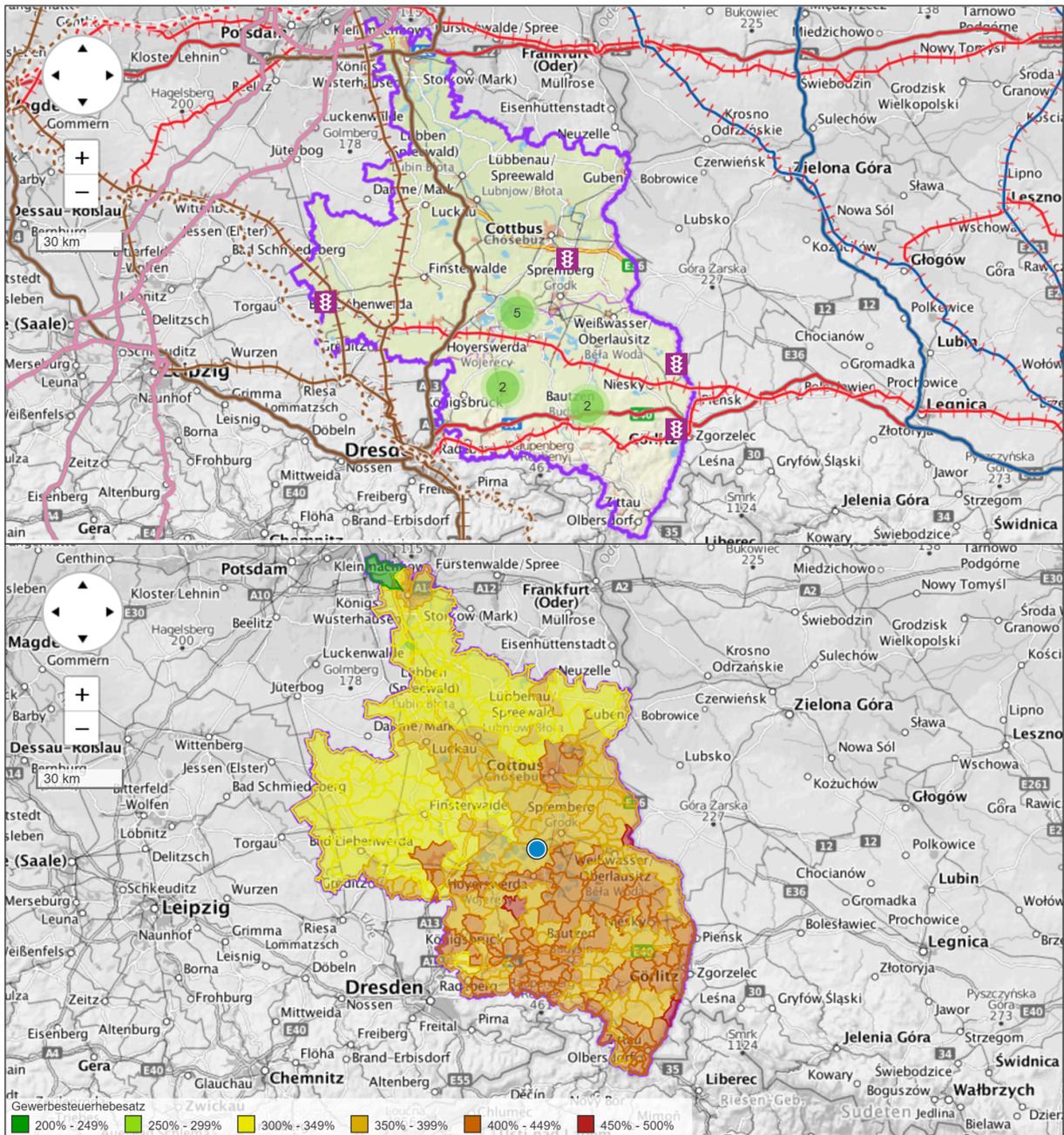


Abbildung 3.1: Kartendarstellung der Lausitz aus dem Lausitz Investor Guide (WFBB) und (WFS) o. D.

Die Eignung der Lausitz als Untersuchungsgebiet für den kombinierten Verkehr ergibt sich wesentlich aus ihrer historisch gewachsenen Infrastruktur. Das Lausitzer Revier verfügt über ein dichtes, ehemals intensiv für den Braunkohletransport genutztes Schienennetz, ergänzt durch Autobahnen und Bundesstraßen. Diese vorhandenen parallelen Infrastrukturen bieten einen großen Gestaltungsspielraum, was die Wahl des Mittels für ausgehende Transporte angeht und ermöglichen an einem Praxisbeispiel realitätsnahe Modellierung von Transportprozessen und bieten optimale Voraussetzungen für die Bewertung alternativer Transportmodi. Darüber hinaus befinden sich in der Region diverse Gewerbe-

und Industrieareale, darunter auch rekultivierte ehemalige Tagebauflächen, welche unterschiedliche infrastrukturelle Erschließungen aufweisen. Dadurch entsteht eine realistische Variabilität hinsichtlich Standort- und Verkehrsträgerwahl, die für die Simulationsstudie erforderlich ist.

Zudem erfährt die Lausitz aktuell einen umfassenden wirtschaftlichen und infrastrukturellen Strukturwandel, der durch politische und finanzielle Förderprogramme von Bund und Ländern unterstützt wird¹. Diese Rahmenbedingungen erhöhen zusätzlich die Relevanz einer integrierten Betrachtung von Standort- und Verkehrsträgerwahl, da Infrastruktur-entscheidungen explizit als wesentliche Bausteine für die regionale Entwicklung formuliert werden².

Die Systemgrenzen des Lausitzer Reviers als reales System für die Durchführung einer Simulationsstudie zur simultanen Standort- und Verkehrsträgerwahl lassen sich wie folgt definieren:

- Räumliche Grenzen: Das Lausitzer Revier mit Teilen Brandenburgs und Sachsens.
- Räumliche Betrachtungsebene: Regionale Standortplanung.
- Zeitliche Grenze: Langfristige Planungsperspektive aus der Standortplanung.
- Inhaltliche Grenze: Fokus auf Transportprozesse der Verkehrsträger Straße und Schiene; andere Transportarten werden nicht berücksichtigt.

Durch die hier vorgenommene Systembeschreibung ist sichergestellt, dass das Lausitzer Revier die im theoretischen Hintergrund abgeleiteten Anforderungen für die regionale Standortplanung und den kombinierten Verkehr erfüllt.

3.2.2 Konzeptmodell

Das Konzeptmodell dient als zentrales Bindeglied zwischen der realen Welt und der Simulationsmodellierung. Es strukturiert das Untersuchungsfeld und definiert die für die Simulationsstudie relevanten Beziehungen und Systembestandteile. Im Folgenden wird dieses Konzeptmodell detailliert beschrieben.

¹Klimaschutz (BMWK) 2020.

²(ZWL) 2021, S. 17.

3 Durchführung der Simulationsstudie

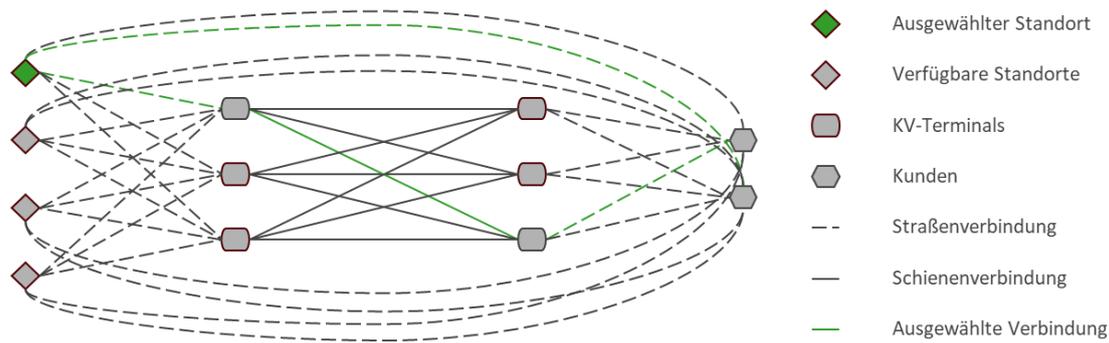


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Konzeptmodells (eigene Darstellung).

Das Konzeptmodell orientiert sich an einer monolithischen Struktur, ist also nicht in Teilsysteme untergliedert. Es zielt darauf ab, die simultane Entscheidungsfindung zur Wahl eines Produktionsstandortes und des Verkehrsträgers unter Berücksichtigung realistischer Transportkostenstrukturen abzubilden. Das Modell berücksichtigt mehrere verfügbare potenzielle Standorte, die über Straßen- und Schienenverbindungen sowohl direkt mit Kunden als auch mit KV-Terminals verbunden sind. Die Entscheidung für einen Standort ist dabei abhängig von der optimalen Wahl der Verkehrsträger und den damit verbundenen Kosten. Bei feststehenden Liefermengen für alle zu beliefernden Kunden werden daher parallel alle Kombinationen aus Ausgangsstandort(en) und Transportmittel(n) verglichen, wobei für verschiedene Kunden auch unterschiedliche Transportmodi möglich sein sollen und je nach Konfiguration ein oder mehrere Standorte vom Modell gewählt werden können.

Während die Transportkosten der Straße über durchschnittliche Kilometerkostensätze realistisch abgebildet werden können, erfordert der Schienentransport eine detaillierte Modellierung der Kostenstrukturen, insbesondere die Unterscheidung zwischen Vollständige Zugladungen "Full-Train Loads" (FTL) und Vollständige Zugladungen "Full-Train Loads" (FTL)³. Diese Differenzierung ist notwendig, um die ökonomischen Effekte von Frachtkonsolidierungen im Modell abzubilden, die einen wesentlichen Einfluss auf die Verkehrsträgerwahl besitzen.

Das Modell berücksichtigt als Eingabegrößen die verfügbaren Standorte, spezifische Kostenparameter der Verkehrsträger sowie kundenspezifische Transportvolumina. Durch Variation dieser Eingabeparameter im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wird es möglich sein, unterschiedliche Szenarien realitätsnah zu evaluieren. Ausgabegrößen des Modells

³Bierwirth u. a. 2012, S. 203.

umfassen die Gesamttransportkosten, die ausgewählten Verkehrsträger sowie den ausgewählten Standort bzw. die ausgewählten Standorte.

Abschließend ist das Konzeptmodell als allgemeingültiger Ansatz konzipiert, der potenziell auf andere Regionen mit vergleichbarer Datenbasis übertragen werden könnte. Das Modell baut methodisch auf dem Ansatz von Bierwirth u. a. (2012) auf und erweitert diesen insbesondere um die Dimension der Standortwahl.

3.2.3 Validierung des Konzeptmodells

Die Validierung des Konzeptmodells dient dazu, sicherzustellen, dass es die relevanten Aspekte des realen Systems angemessen und vollständig abbildet. Gemäß VDI-Richtlinie 3633 bedeutet Validierung die kontinuierliche Überprüfung der ausreichenden Übereinstimmung zwischen Modell und Originalsystem, wobei besonders darauf geachtet wird, ob „das Modell das Verhalten des realen Systems genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“⁴.

Die Validierung beginnt bereits mit der Definition des realen Systems, setzt sich über die Entwicklung des Konzeptmodells fort und begleitet letztendlich jeden Schritt der Modellentwicklung. Sie umfasst dabei sowohl die Überprüfung der verwendeten Eingangsdaten hinsichtlich ihrer Validität als auch die Prüfung, ob das Modell den realen Gegebenheiten und Zielsetzungen der Studie gerecht wird.

Für die vorliegende Arbeit bedeutet dies konkret, dass das Konzeptmodell in engem Bezug zu den zuvor aufgestellten Anforderungen und systemtheoretischen Erkenntnissen aus dem Kapitel Theoretischer Hintergrund validiert wurde. Dazu werden die systematische Beschreibung des Lausitzer Reviers sowie bestehende Literatur und Datenquellen genutzt, um sicherzustellen, dass sämtliche relevanten Aspekte in das Konzeptmodell integriert wurden und dessen Aussagekraft gewährleistet ist. Dies bildet die Grundlage für die weitere Modellentwicklung und Implementierung im nachfolgenden Kapitel.

Für die vorliegende Arbeit bedeutet dies konkret, dass das Konzeptmodell auf Grundlage der zuvor aufgestellten Anforderungen und Erkenntnisse aus dem Kapitel Theoretischer Hintergrund anhand von Plausibilitätsprüfungen validiert wird. Dabei wird überprüft, ob das Konzeptmodell tatsächlich alle relevanten Standorte, Verkehrsverbindungen und KV-Terminals abbilden kann, die im realen System der Lausitz existieren und ob alle relevanten Rahmenbedingungen mit in Betracht gezogen wurden. Dabei sind insbesondere die Nichtbetrachtungen der Verkehrsträger Schiff bzw. Binnenschiff und des Flugzeugs als

⁴Rabe u. a. 2008, S. 15–16.

potenziell konkurrierende Transportmodi zu erklären. Transporte zu Wasser werden dabei im Konzeptmodell nicht berücksichtigt, aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten innerhalb der Lausitz und der eingeschränkten Konkurrenzfähigkeit, für vor allem kleine und mittelgroße Unternehmen, bei denen die nochmals größeren Frachtkonsolidierungseffekte nicht zu tragen kommen würden. Das Flugzeug als Transportmittel kommt nur in Sonderfällen in regelmäßigen Kundenlieferungen zum Einsatz und ist damit zwar für Notfallsituationen, aber nicht für einen langen Planungshorizont, wie er in dieser Arbeit angelegt wird, relevant. Grundsätzlich müssten außerdem bei sowohl Wasser- als auch Lufttransport weitere Bewertungskriterien betrachtet werden, also lediglich die in dieser Arbeit zentralen Kosten.

Durch regelmäßige Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse der einzelnen Phasen der Simulationsstudie wird gewährleistet, dass diese auf den vorangegangenen Erkenntnissen aufsetzen und mit der Zielstellung der Arbeit im Einklang bleiben. Für das Konzeptmodell bedeutet das, dass es die realen Gegebenheiten und Anforderungen des Lausitzer Reviers vollständig und realitätsnah abbilden können muss. Diese systematische Vorgehensweise legt die Grundlage für die verlässliche Implementierung und Nutzung des Modells in den folgenden Schritten der Simulationsstudie.

3.3 Datenbeschaffung

Die Datenbeschaffung bildet die Grundlage für die Modellierung und Simulation der simultanen Standort- und Verkehrsträgerwahl. In diesem Abschnitt werden die relevanten Datenquellen systematisch identifiziert und die Qualitätssicherungsmaßnahmen erläutert. Dabei wird insbesondere auf die Herkunft, Verfügbarkeit und Plausibilität der beschafften Daten eingegangen.

3.3.1 Benötigte Datenquellen

Für die Modellierung sind verschiedene Eingabeparameter erforderlich, darunter Entfernungen zwischen den Knotenpunkten, verfügbare Standorte für die Standortwahl, Kostenstrukturen für Straße und Schiene, verfügbare KV-Terminals sowie Transportvolumina. Diese Parameter beeinflussen die Berechnung der optimalen Standortwahl sowie die Bewertung der Verkehrsträgeroptionen. Die verwendeten Datenquellen lassen sich in öffentliche und selbsterstellte Daten unterteilen. Öffentliche Daten stammen aus amtlichen und wissenschaftlichen Quellen, während selbsterstellte Daten auf Annahmen und Testdatensätzen basieren. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Datenquellen.

Tabelle 3.1: Verwendete Datenquellen und deren Inhalte

| Öffentliche Datenquellen |
|---|
| Wirtschaftsförderung Berlin-Brandenburg: Liste potenzieller Gewerbestandorte mit Koordinaten. |
| Kraftfahrtbundesamt: Warenströme basierend auf Mautstatistiken zwischen NUTS3-Regionen |
| OpenStreetMap: Straßennetzdaten für die Berechnung von Straßenverbindungen und Distanzen |
| Selbsterstellte Datenquellen |
| Eigene Annahmen und Testdaten: Konstruierte Szenarien für Transportvolumina und Kostensätze. |

Die wesentlichen Daten für das Modell lassen sich in mehrere Kategorien unterteilen. Erstens sind für jeden Standort gewisse Daten erforderlich. Zentral sind dabei die Entfernungen jedes potenziellen Standortes zu allen relevanten Knotenpunkten. Diese lassen sich über deren Koordinaten bzw. die Koordinaten der anderen relevanten Knotenpunkte, namentlich den KV-Terminals und Kunden unter Verwendung verfügbarer Routinedienste und begründeter Annahmen ermitteln. Des Weiteren sind Kostenstrukturen ein wichtiger Bestandteil der Modellierung, einschließlich Betriebskosten für verschiedene Verkehrsmittel, Mauttarife und CO₂-Bepreisung. Abschließend werden für das Erstellen der Szenarien Daten zu mautpflichtigen Warentransporten zwischen NUTS3-Regionen des Kraftfahrtbundesamtes herangezogen⁵.

3.3.2 Verantwortlichkeiten und Verfügbarkeit

Die Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen und unterliegen variierenden Verfügbarkeits- und Aktualitätszyklen. Öffentliche Daten werden überwiegend durch Institutionen wie das Kraftfahrtbundesamt oder die Wirtschaftsförderung Brandenburg bereitgestellt⁶. Geoinformationsdaten zur Straßennetzstruktur werden aus OpenStreetMap extrahiert, während Schienennetzinformationen von Bahnbetreibern und Verkehrsverbänden stammen⁷. Unternehmensinterne Daten, wie real beobachtete Transportströme, liegen in dieser Arbeit nicht vor, sodass mit Annahmen und Testdatensätzen gearbeitet wird.

Zur Sicherstellung der Datenqualität werden mehrere Maßnahmen ergriffen. Erstens wird stark die Aktualität der Datenquellen geachtet, insbesondere in Bezug auf Mauttarife, Emissionskosten und Standortverfügbarkeiten⁸. Zweitens werden Plausibilitätsprüfungen durchgeführt, um Fehler in den Datensätzen frühzeitig zu identifizieren. Drittens wird

⁵Kraftfahrtbundesamt 2022.

⁶Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH (WFBB) 2024; Kraftfahrtbundesamt 2022.

⁷Contributors 2024.

⁸Kraftfahrtbundesamt 2022.

die Konsistenz der Datenquellen geprüft, indem unterschiedliche Quellen miteinander abgeglichen werden. Dies betrifft insbesondere Entfernungsangaben, die sowohl aus Routingdiensten als auch aus GIS-basierten Berechnungen stammen können. Dadurch wird sichergestellt, dass die Eingabedaten konsistent und belastbar für die weitere Modellierung sind.

3.3.3 Validierung erhobener Daten

Die erhobenen Daten werden systematisch überprüft, um Inkonsistenzen oder fehlerhafte Werte zu erkennen. Hierbei kommen verschiedene Methoden zur Anwendung. Zunächst werden Wertebereiche überprüft, um sicherzustellen, dass keine unrealistischen Werte in die Simulation eingehen. Beispielsweise dürfen Transportkosten nicht negativ sein, und Entfernungen zwischen Standorten müssen den realen Gegebenheiten entsprechen. Zudem werden Dubletten in den Datensätzen identifiziert und bereinigt, um Mehrfachzählungen zu vermeiden⁹.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Umgang mit fehlenden Daten. Falls für bestimmte Standorte keine vollständigen Kostendaten vorliegen, werden Ersatzwerte anhand vergleichbarer Standorte oder durch Näherungsverfahren ermittelt. In Fällen, in denen essenzielle Parameter nicht zuverlässig bestimmt werden können, erfolgt eine Ausklammerung der betroffenen Standorte aus der Simulation. Diese methodische Vorgehensweise stellt sicher, dass das Modell auf einer konsistenten und validen Datengrundlage basiert.

Die systematische Datenüberprüfung trägt maßgeblich zur Aussagekraft der Simulation bei. Da die Standort- und Verkehrsträgerwahl wesentlich von den zugrunde liegenden Kostendaten abhängt, ist eine fehlerfreie und konsistente Datenbasis von zentraler Bedeutung. Durch die beschriebenen Plausibilitätsprüfungen wird sichergestellt, dass die Ergebnisse der Modellierung belastbar sind und realistische Szenarien abbilden. Dies ermöglicht eine fundierte Analyse der Potenziale einer integrierten Standort- und Transportentscheidung und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Phasen der Simulationsstudie.

3.4 Modellformalisierung

Die Phase der Modellformalisierung umfasst die präzise Spezifikation und Strukturierung des Konzeptmodells in formaler Form, um die spätere Implementierung zu ermöglichen¹⁰.

⁹Rabe u. a. 2008, S. 174–176.

¹⁰Rabe u. a. 2008, S. 75.

Auf Basis der im Konzeptmodell entwickelten Inhalte werden die Modellkomponenten formalisiert. Aufbauend auf den Erkenntnissen und Anforderungen, die im Theoretischen Hintergrund sowie in der Systemanalyse entwickelt wurden, erfolgt die Formalisierung und anschließende Erklärung des Modells, das gleichzeitig die Standort- und Verkehrsträgerwahl im Kontext des kombinierten Verkehrs integriert betrachtet. Ziel ist die Sicherstellung einer präzisen, klaren und nachvollziehbaren Modellstruktur, die sowohl den Anforderungen der Praxis als auch den theoretischen Grundlagen entspricht.

3.4.1 Modellformulierung für die Standort- und Verkehrsträgerwahl

In diesem Abschnitt wird die formale Formulierung eines nichtlinearen ganzzahligen Optimierungsmodells zur Standort- und Verkehrsträgerwahl vorgestellt. Dazu setzt das nachfolgend vorgestellte Modell auf einem Ansatz aus dem Bereich des kombinierten Verkehrs von Bierwirth u. a. (2012) auf. Deren Entscheidungslogik bildet insbesondere die Verkehrsträgerwahl für den Vergleich zwischen Straße und Schiene, aber auch die Frachtkonsolidierungseffekten, ab und ist gleichzeitig so übersichtlich gestaltet, dass durch die Ergänzung um eine weitere Entscheidungsdimension die Komplexität beherrschbar bleibt. Ziel des Modells ist es, die Gesamtkosten für den Transport zwischen Produktionsstandorten und zu beliefernden Kunden unter Berücksichtigung der Verkehrsträger Straße und Schiene und des Ausgangsstandortes bzw. der Ausgangsstandorte als Variablen zu minimieren. Der Modellansatz erweitert eine Formulierung aus dem Forschungsbereich des Kombinierten Verkehr von Bierwirth u. a. (2012), um die Möglichkeit, den Ausgangsstandort der Transporte auszuwählen, und ermöglicht auf diese Weise eine Verwendung des Ansatzes im Kontext der regionalen Standortplanung.

3.4.2 Zielfunktion

Die Zielfunktion minimiert die Gesamtkosten des Transports, die sich aus Transportkosten für den Direkttransport per LKW von Tür zu Tür (c^{D2D}), Vorlaufkosten zum KV-Terminal in der Ausgangsregion (c^{pre}), Nachlaufkosten vom KV-Terminal in der Zielregion (c^{post}), sowie Kosten für den Transport per Zug als FTL (c^{FTL}) und LTL (c^{LTL}) zusammensetzen:

3 Durchführung der Simulationsstudie

$$\begin{aligned}
\min Z = & \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} x_{pk} \cdot d_{pk} \cdot c^{D2D} && \text{(Direkttransportkosten Straße)} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{tl \in TL} x_{p,tl} \cdot d_{p,tl} \cdot c^{pre} && \text{(Vorlaufkosten KV-Terminal)} \\
& + \sum_{tz \in TZ} \sum_{k \in K} x_{tz,k} \cdot d_{tz,k} \cdot c^{post} && \text{(Nachlaufkosten KV-Terminal)} \\
& + \sum_{tl \in TL} \sum_{tz \in TZ} (y_{tl,tz} + z_{tl,tz}) \cdot cap^{FTL} \cdot d_{tl,tz} \cdot c^{FTL} && \text{(Transportkosten FTL)} \\
& + \sum_{tl \in TL} \sum_{tz \in TZ} x_{tl,tz}^{LTL} \cdot d_{tl,tz} \cdot c^{LTL} && \text{(Transportkosten LTL)}
\end{aligned}$$

Der erste Term der Zielfunktion beschreibt die Kosten für den Direkttransport von Produktionsstandorten $p \in P$ zu den Kundenstandorten $k \in K$. Die Transportmenge x_{pk} wird mit der entsprechenden Distanz d_{pk} und dem Kostensatz für Direkttransporte c^{D2D} multipliziert.

Die Vor- und Nachlaufkosten werden im zweiten und dritten Term beschrieben. Der zweite Term stellt die Vorlaufkosten dar, also die Kosten für den vorgelagerten (*pre*) Transport vom Produktionsstandort p zum KV-Terminal $tl \in TL$, bevor der Hauptlauf beginnt. Diese Kosten ergeben sich aus der Transportmenge $x_{p,tl}$, der Distanz $d_{p,tl}$ und dem Kostensatz c^{pre} . Im dritten Term werden die Nachlaufkosten betrachtet, welche die Kosten für den nachgelagerten (*post*) Transport vom KV-Terminal $tz \in TZ$ zu den Kundenstandorten k nach Abschluss des Hauptlaufs umfassen. Analog werden hier Menge $x_{tz,k}$, Distanz $d_{tz,k}$ und Kostensatz c^{post} herangezogen.

Der vierte Term erfasst die Transportkosten für vollständig ausgelastete Züge (FTL) zwischen den KV-Terminals der Ausgangsregion tl und denen der Zielregion tz . Dabei bestimmen die Variablen $y_{tl,tz}$ und $z_{tl,tz}$, wie viele vollständig ausgelastete Züge benötigt werden. Die Kosten resultieren aus der Distanz $d_{tl,tz}$ und dem Kostensatz c^{FTL} .

Der letzte Term repräsentiert die Kosten für Transporte im LTL-Modus, bei denen kleinere Mengen auf Zügen transportiert werden, die nicht vollständig ausgelastet sind. Die Menge $x_{tl,tz}^{LTL}$ wird mit der Distanz $d_{tl,tz}$ und dem Kostensatz c^{LTL} multipliziert, was eine detaillierte Kostenbetrachtung für Teilladungen ermöglicht.

3.4.3 Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen gewährleisten die Einhaltung von Transportanforderungen, Kapazitäten sowie logistischen Vorgaben im Modell:

1. Bedarfsdeckung und Produktionsaktivität:

$$\sum_{tl \in TL} x_{p,tl} + \sum_{k \in K} x_{p,k} = q_p \cdot s_p \quad \forall p \in P \quad (3.1)$$

Diese Bedingung stellt sicher, dass die Produktionsmenge eines Standorts vollständig entweder direkt zu den Kunden oder über KV-Terminals transportiert wird. Ein Standort kann nur Mengen senden, wenn er aktiv ist ($s_p = 1$).

2. Gleichgewicht KV-Terminals Ausgangsregion:

$$\sum_{p \in P} x_{p,tl} = \sum_{tz \in TZ} x_{tl,tz} \quad \forall tl \in TL \quad (3.2)$$

Hier wird das Gleichgewicht am KV-Terminal in der Ursprungsregion hergestellt, indem festgelegt wird, dass alle eingehenden Transporte von Produktionsstandorten in der Summe den ausgehenden Transporten der KV-Terminals in Richtung der KV-Terminals der Zielregion entsprechen müssen.

3. Gleichgewicht KV-Terminals Zielregion:

$$\sum_{tl \in TL} x_{tl,tz} = \sum_{k \in K} x_{tz,k} \quad \forall tz \in TZ \quad (3.3)$$

Diese Bedingung stellt äquivalent zur zweiten Nebenbedingung für die KV-Terminals in der Zielregion sicher, dass sämtliche Transporte, die am KV-Terminal der Zielregion ankommen, anschließend zu den Kunden weitergeleitet werden.

4. Nachfragerfüllung der Kunden:

$$\sum_{p \in P} x_{p,k} + \sum_{tz \in TZ} x_{tz,k} = n_k \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

Durch diese Nebenbedingung wird erreicht, dass die Nachfrage jedes Kunden entweder über eine Direktlieferung über die Straße oder einen Transport von einem KV-Terminal aus der Zielregion vollständig gedeckt wird. Implizit wird durch diese Nebenbedingung

zusätzlich die Höhe der benötigten Produktionskapazitäten mit der Nachfragemenge über die Gleichgewichtsbedingungen 2 und 3 verknüpft.

5. Anzahl benötigter FTL-Transporte:

$$y_{tl,tz} \geq \frac{x_{tl,tz}}{\text{cap}^{FTL}} - 1 \quad \forall tl \in TL, tz \in TZ \quad (3.5)$$

Die Anzahl benötigter FTL-Züge wird über eine eigene Binärvariable $y_{tl,tz}$ definiert, indem die jeweils allokierte Transportmenge $x_{tl,tz}$ mit der Kapazität eines vollen Zuges cap^{FTL} ins Verhältnis gesetzt wird (Ich kann das mathematisch akkurater erklären, ist das hier sinnvoll?). Diese Formulierung gewährleistet eine möglichst effiziente Auslastung der Schienentransporte.

6. Zusätzliche FTL-Kapazitäten:

$$\text{cap}^{FTL} \cdot z_{tl,tz} \geq x_{tl,tz} - y_{tl,tz} \cdot \text{cap}^{FTL} - \text{cap}_{break_even}^{FTL} \quad \forall tl \in TL, tz \in TZ \quad (3.6)$$

Diese Regelung prüft, ob zusätzliche, nicht vollständig ausgelastete FTL-Züge notwendig sind, und aktiviert diese entsprechend. Dabei wird eine Situation mitbetrachtet, in der ein FTL-Zug nicht vollständig ausgelastet werden kann, es aber trotzdem wirtschaftlicher ist, einen weiteren ganzen Zug für die übrige Transportmenge zu buchen, als auf LTL Transporte umzusteigen. $\text{cap}_{break_even}^{FTL}$ ist dabei die Menge an Transporteinheiten, die die Grenze der Wirtschaftlichkeit eines weiteren FTL-Zuges kennzeichnet. Liegt also die Restmenge, als die Transportmenge auf einer gegebenen Relation abzüglich dessen, was in Ganzzügen transportiert wird, unterhalb dieser Grenze, so wird kein weiterer Ganzzug für den Transport ausgewählt. Die Nebenbedingung regelt also den Grenzfall zwischen FTL- und LTL-Transporten.

7. LTL-Transportmengen:

$$x_{tl,tz}^{LTL} \geq x_{tl,tz} - (y_{tl,tz} + z_{tl,tz}) \cdot \text{cap}^{FTL} \quad \forall tl \in TL, tz \in TZ \quad (3.7)$$

In dieser Nebenbedingung wird die Menge bestimmt, die im LTL-Modus transportiert wird. Diese setzt sich aus der Resttransportmenge zwischen KV-Terminals der Ausgangsregion und KV-Terminals der Zielregion zusammen, die nicht mehr wirtschaftlich per FTL befördert werden kann.

8. Aktivierung Produktionsstandorte:

$$\sum_{tl \in TL} x_{p,tl} + \sum_{k \in K} x_{p,k} \leq q_p \cdot s_p \quad \forall p \in P \quad (3.8)$$

Nebenbedingung 8 stellt sicher, dass Standorte nur Transporte aussenden können, wenn sie vom Modell über die Entscheidungsvariable s_p aktiviert sind.

9. Maximale Anzahl aktiver Produktionsstandorte:

$$\sum_{p \in P} s_p \leq pr \quad (3.9)$$

Die Anzahl aktivierter Standorte wird in dieser Nebenbedingung, auf die vorgegebene Obergrenze pr beschränkt. Diese spiegelt die Anzahl an Standorten wieder, die in der Region eröffnet werden sollen.

10. Nichtnegativität und Variablentypen:

$$x_{ij}, x_{tl,tz}^{LTL}, y_{tl,tz} \geq 0, \quad x_{ij}, x_{tl,tz}^{LTL}, y_{tl,tz} \in \mathbb{Z} \quad (3.10)$$

$$z_{tl,tz}, s_p \in \{0, 1\} \quad (3.11)$$

Zuletzt werden, um die richtige Funktionsweise der beschriebenen Bedingungen sicherzustellen, Nichtnegativität der Variablen und die korrekte Variablentypen (ganzzahlig bzw. binär) definiert.

Tabelle 3.2: Indizes des mathematischen Modells

| Indizes | Beschreibung |
|--------------|---|
| $p \in P$ | Potenzielle Produktionsstandorte |
| $k \in K$ | Kundenstandorte |
| $tl \in TL$ | KV-Terminals der Ursprungsregion (Lausitzer Revier) |
| $tz \in TZ$ | KV-Terminals der Zielregion |
| $i, j \in N$ | Knotenpunkte allgemein |

Tabelle 3.3: Parameter des mathematischen Modells

| Parameter | Beschreibung |
|---------------------------|---|
| d_{ij} | Entfernung zwischen Knoten i und j |
| c^{D2D} | Kosten pro Transporteinheit für Direkttransport (Door-to-Door) |
| c^{pre} | Kosten pro Transporteinheit für Vorlauf zum Terminal |
| c^{post} | Kosten pro Transporteinheit für Nachlauf vom Terminal |
| c^{FTL} | Kosten pro Transporteinheit für Full-Train-Load Transporte |
| c^{LTL} | Kosten pro Transporteinheit für Less-than-Full-Train-Load Transporte |
| q_p | Produktionskapazität am Standort p |
| n_k | Nachgefragte Menge des Kunden k |
| cap^{FTL} | Kapazität eines vollen Zuges (FTL) |
| $cap_{break_even}^{FTL}$ | Mindestanzahl Transporteinheiten zur Wirtschaftlichkeit eines zusätzlichen FTL-Zugs |
| pr | Maximale Anzahl aktivierbarer Produktionsstandorte |

Tabelle 3.4: Entscheidungsvariablen des mathematischen Modells

| Variablen | Beschreibung |
|-----------------|---|
| x_{ij} | Anzahl Transporteinheiten Straße zwischen Knoten i, j |
| $x_{l_{tl,tz}}$ | Anzahl Transporteinheiten im LTL-Modus (Schiene) zwischen Terminals tl, tz |
| $y_{tl,tz}$ | Anzahl FTL-Züge zwischen Terminals tl, tz |
| $z_{tl,tz}$ | Binärvariable für Aktivierung zusätzlicher FTL-Züge zwischen Terminals tl, tz |
| s_p | Binärvariable, ob Produktionsstandort p aktiviert ist (1) oder nicht (0) |

Die Tabellen (3.2, 3.3, 3.4) geben einen systematischen Überblick über die verwendeten Indizes, Parameter und Entscheidungsvariablen. Diese formalisierte Darstellung unterstützt die Implementierung und gewährleistet Transparenz sowie eine klare Strukturierung, indem jede Modellkomponente eindeutig definiert und nachvollziehbar gemacht wird.

3.4.4 Validierung des formalen Modells

Die Validierung des formalen Modells erfolgt durch einen systematischen Abgleich mit dem zuvor definierten Konzeptmodell sowie den Anforderungen des realen Systems, um sicherzustellen, dass sämtliche Aspekte präzise umgesetzt wurden. Konkret wird für die

Standortwahl überprüft, ob die Variablen zur Aktivierung von Produktionsstandorten (s_p) und deren Kapazitäten (q_p) konsistent mit den Anforderungen der regionalen Standortplanung gemäß Abschnitt 2.1.2 sind. Dabei wird insbesondere verifiziert, ob das Modell den räumlichen Anforderungen und Standortfaktoren genügt, die zuvor als relevant identifiziert wurden. Dies umfasst insbesondere die Überprüfung, ob Standortentscheidungen sinnvoll und plausibel von den vorgegebenen Standortfaktoren wie Flächenverfügbarkeit, Verkehrsanbindung und regionalen Rahmenbedingungen beeinflusst werden.

Hinsichtlich der Verkehrsträgerwahl wird geprüft, ob die Modalauswahl (FTL, LTL und Direktverkehr) korrekt und umfassend durch die entsprechenden Variablen (x_{ij} , $x_{tl,tz}^{LTL}$, $y_{tl,tz}$, $z_{tl,tz}$) sowie durch die zugehörigen Kostensätze (c^{D2D} , c^{pre} , c^{post} , c^{FTL} , c^{LTL}) im Modell dargestellt wird. Diese Prüfung berücksichtigt explizit die aus dem theoretischen Hintergrund abgeleiteten Anforderungen bezüglich der Relevanz und spezifischen Kostenstruktur des kombinierten Verkehrs. Dabei wird insbesondere analysiert, ob die Kostenzusammensetzung des Modells plausibel und nachvollziehbar ist und ob sie den realen, aus der Literatur und Praxis bekannten Verhältnissen entspricht.

Schließlich erfolgt eine Validierung der logischen Konsistenz und Vollständigkeit der Nebenbedingungen durch einen Abgleich mit der praktischen Realität der Transportprozesse in der Lausitz. Insbesondere wird geprüft, ob die modellierten logistischen Anforderungen, einschließlich Transportflüsse, Kapazitätsbeschränkungen, Produktionsaktivitäten und Gleichgewichtsbedingungen an Terminals, mit verfügbaren infrastrukturellen Daten und Erfahrungswerten vereinbar sind. Dazu zählt insbesondere die Prüfung, ob die Transportströme logisch sowie infrastrukturell nachvollziehbar zwischen Standorten, Terminals und Kunden modelliert wurden.

Die Durchführung dieser umfassenden Validierung soll verhindern, dass in der Implementierungsphase logische oder inhaltliche Inkonsistenzen sichtbar werden, die die Güte der Ergebnisse in Zweifel ziehen könnten. Damit wird gewährleistet, dass das formale Modell sowohl theoretisch fundiert als auch praktisch anwendbar ist und somit die Ziele und Anforderungen dieser Arbeit erfüllt.

3.5 Datenaufbereitung

Im folgenden Abschnitt der Datenaufbereitung werden aus den in Abschnitt 3.3 genannten Datenquellen die Daten generiert, die für die Implementierung des formalen Modells in Abschnitt 3.6 und wichtiger für dessen nachfolgende Verwendung in Abschnitt Experimente und Analyse notwendig sind. Dafür müssen alle Eingabeparameter des mathematischen Modells aufgelistet in Tabelle 3.3 bestimmt werden.

Die unternehmensabhängigen Daten der folgenden Abschnitte sind an ein Beispielunternehmen angelehnt, das einen neuen Standort plant und sich auf globaler Betrachtungsebene für die Lausitz als Wirtschaftsregion entschieden hat (vgl. 2.1.2). Dieses Unternehmen befindet sich nun vor der Auswahl einer geeigneten Methode zur Entscheidungsunterstützung der Standortentscheidung auf regionaler Betrachtungsebene, entsprechend der dritten Phase des idealtypischen Entscheidungsprozesses (vgl. 2.1.1). Es wird des weiteren angenommen, dass das Unternehmen plant, von diesem neuen Standort einen Kunden aus Bayern zu beliefern. Anschaulich könnte das Unternehmen beispielsweise planen, Batterien als Zulieferer für BMW in München zu produzieren. Dabei hätte sich das Lausitzer Revier möglicherweise auf globaler Ebene aufgrund des Standortfaktors der Energiekosten gegen Bayern beispielsweise wegen besseren Werten im Standortfaktor Agglomerations- und Führungsvorteile durchgesetzt. Wichtig ist hierbei, dass dieses Beispiel bewusst einfach gehalten ist, um die Zusammenhänge und Wirkungsweise des Optimierungsmodells in Abschnitt Experimente und Analyse sauber darstellen zu können, dabei aber dennoch realitätsnah zu bleiben. Verkehrsdaten des Kraftfahrtbundesamtes zeigen beispielsweise starke Warenströme über die Straße in Richtung Süden, und die Batteriebranche siedelt sich aktuell verstärkt in der Lausitz an.

Die Aufbereitung dieser Daten wird nachfolgend in drei Abschnitten abgehandelt. Abschnitt 3.5.1 befasst sich mit der Ermittlung der Distanzen der Knotenpunkte des, in den betrachteten Systemgrenzen liegenden, Transportnetzwerks (vgl. Abschnitt 3.2.1). Außerdem wird eine geeignete Aufbereitungsform der Distanzinformationen diskutiert und ausgewählt. Anschließend folgt in Abschnitt 3.5.2 die Berechnung aller im formalen Modell definierten Kostenparameter (c^{D2D} , c^{pre} , c^{post} , c^{FTL} , c^{LTL}), sowie der mit denen in Zusammenhang stehenden Parameter (cap^{FTL} , $cap_{break_even}^{FTL}$). In Abschnitt 3.5.3 wird dann die Art und Beschaffenheit der für die Nutzung des Modells benötigten Unternehmensdaten beschrieben und für ein Beispielunternehmen, auf Annahmen basierend, festgelegt.

3.5.1 Distanzen

Für die vorliegende Betrachtung sind zwei Arten von Distanzen zu ermitteln. **Straßendistanzen** zwischen Knotenpunkten des Transportnetzwerks, also die Distanzen zwischen potenziellen Produktionsstandorten und KV-Terminals der Ausgangsregion, potenziellen Produktionsstandorten und Kundenstandorten sowie KV-Terminals der Zielregion und Kundenstandorten, werden dazu über die Routingfunktion der Open-Street-Map berechnet¹¹. Für die Ermittlung der **Schienendistanzen** zwischen den KV-Terminals der Ausgangsregion und den KV-Terminals der Zielregion ist kein vergleichbarer Dienst der Open-

¹¹OpenStreetMap Contributors 2024.

3 Durchführung der Simulationsstudie

Railway-Map verfügbar, weshalb auf den Trassenfinder der DB InfraGO AG zurückgegriffen wurde.

Zur Berechnung der Straßendistanzen wurden zunächst die geographischen Koordinaten aller relevanten Knotenpunkte erfasst. Die Standortdaten für potenzielle Produktionsstandorte in der Lausitz stammen aus einer von der Wirtschaftsförderung Brandenburg bereitgestellten Liste mit insgesamt 673 Gewerbestandorten¹². Die Koordinaten der KV-Terminals sowie des Kundenstandorts, hier exemplarisch des BMW-Werks in München, wurden manuell mithilfe von Google Maps ermittelt. Zur Sicherstellung der Konsistenz und weiteren Verarbeitung wurden alle Koordinaten einheitlich in das World Geodetic System 1984 (WGS84) konvertiert. Die eigentliche Berechnung der Straßendistanzen erfolgte anschließend automatisiert über die ORSM-Routingfunktion in R-Studio. Ein exemplarischer Ausschnitt der ermittelten Straßendistanzen ist in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Auszug aus der Tabelle der Straßendistanzen (in km)

| Standort | Falkenberg | Elsterwerda | Kodersdorf | Frachtterminal | Schwarzheide | Königs Wusterhausen | BMW Werk |
|------------|------------|-------------|------------|----------------|--------------|---------------------|----------|
| Cottbus | 109,3 | 83,5 | 54,7 | 88,6 | 54,7 | 111,7 | 557,8 |
| Zeuthen | 119,3 | 144,9 | 116,3 | 183,7 | 116,3 | 8,4 | 584,6 |
| Vetschau | 84,9 | 90,9 | 62,3 | 104,4 | 62,3 | 87,2 | 565,2 |
| Spremberg | 102,9 | 76,0 | 47,2 | 73,0 | 47,2 | 124,3 | 550,3 |
| Heideblick | 44,0 | 58,5 | 60,0 | 140,1 | 60,0 | 79,1 | 562,8 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Für die Bestimmung der Schienendistanzen zwischen den KV-Terminals in der Lausitz und denen der Zielregion wurden mittels des Trassenfinders der DB InfraGO AG Schienenverbindungen untersucht¹³. Der Trassenfinder ist ein Auskunftssystem für eine Routensuche auf dem deutschen Schienennetz und eignet sich daher gut für das definierte Beispiel. Die daraus resultierenden Schienendistanzen sind in Tabelle 3.6 aufgeführt:

Tabelle 3.6: Schienendistanzen zwischen den KV-Terminals (in km)

| Terminal | Eching | München-Johanneskirchen | München-Riem |
|-------------------------------|--------|-------------------------|--------------|
| Rangierbahnhof Falkenberg | 530,2 | 566,9 | 572,4 |
| RailPort Elsterwerda | 517,5 | 554,3 | 559,1 |
| Container Terminal Kodersdorf | 629,3 | 666,1 | 728,8 |
| Frachtterminal Lausitz | 614,4 | 651,2 | 713,9 |
| Terminal Schwarzheide | 545,3 | 582,0 | 644,8 |
| METRANS Königs Wusterhausen | 651,1 | 687,9 | 726,5 |

¹²Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH (WFBB) 2024.

¹³AG o. D.

Für die Datenstruktur wurde bewusst auf eine vollständige Distanzmatrix, wie sie das formale Modell vorsieht, verzichtet, um redundante Daten zu vermeiden und die Menge an verarbeiteten Daten effizient zu reduzieren. Da die Transportdistanzen als richtungsunabhängig betrachtet werden und interne Distanzen zwischen den Produktionsstandorten der Lausitz für das Modell nicht relevant sind, genügt eine tabellarische Darstellung der relevanten Distanzinformationen (siehe Tabelle 3.5, Tabelle 3.6).

3.5.2 Kostenparameter

Um valide Ergebnisse mit dem Modell erzielen zu können, ist eine realitätsnahe und differenzierte Betrachtung der Transportkosten erforderlich. Zur Bestimmung der Kostenparameter wird auf etablierte Methoden aus der Literatur zurückgegriffen, die für die Modellierung multimodaler Transportketten geeignet sind. Konkret dienen die von Janic (2008) hergeleiteten und von Bierwirth u. a. (2012) angewendeten Kostenfunktionen für Straßen- und Schienenverkehr als Basis. Diese Kostenfunktionen berücksichtigen die abnehmenden Kosten pro Transporteinheit (TE) und Kilometer, wobei eine TE dabei als eine LKW-Ladung definiert ist, bei zunehmender Distanz und basieren auf empirisch ermittelten Zusammenhängen aus europäischen Transportdaten.

Die von Janic (2008, S. 1334–1336) auf Grundlage empirischer Beobachtungen vorgeschlagene Kostenfunktion für den Straßentransport lässt sich durch folgende inverse Funktion ausdrücken:

$$c_{\text{road}}(d) = 5.46\text{€} \cdot d^{-0.278} \quad (3.12)$$

Dabei nimmt der Kostensatz ($c_{\text{road}}(d)$) pro gefahrenem Kilometer mit zunehmender Distanz (d) ab, da sich Fixkosten auf eine größere Fahrstrecke verteilen und gleichzeitig die Durchschnittsgeschwindigkeiten steigen, was die zeitabhängigen Kosten reduziert.

Für den Schienentransport wird die Kostenfunktion in Abhängigkeit vom Bruttogewicht eines Zuges (w) und der Distanz (d) beschrieben¹⁴:

$$c_{\text{rail}}(d, w) = 0.58\text{€} \cdot w^{0.74} \cdot d^{-0.26} \quad (3.13)$$

Aus dieser Funktion lässt sich durch die Annahme eines durchschnittlichen Zuggewichts von 1560 Tonnen und einer typischen Zugkapazität von 38 Transporteinheiten die Kosten-

¹⁴Janic 2008, S. 1334–1336.

3 Durchführung der Simulationsstudie

funktion pro TE ableiten¹⁵:

$$c_{\text{rail}}^{\text{TE}}(d) = \frac{0.58\text{€} \cdot 1560^{0.74} \cdot d^{-0.26}}{38} \quad (3.14)$$

Um diese Werte für das Jahr 2025 und einen durchschnittlichen Planungszeitraum von 30 Jahren anzupassen, wird die Kostenentwicklung sowohl im Straßen- als auch im Schienen-güterverkehr berücksichtigt. Ziel ist es, die in Janic (2008) erhobenen Basiswerte durch eine auf empirischen Marktdaten basierende Fortschreibung realitätsnah zu aktualisieren, um auf dieser Grundlage belastbare Transportkostensätze für die Modellierung der Vorlauf-, Hauptlauf- und Nachlaufkosten im Simulationsmodell zu definieren. Für den Straßentransport ist zwischen 2012 und 2025 eine deutliche Zunahme der Transportleistung um 54,7% bei einem Umsatzwachstum der Branche von lediglich 25,4% zu beobachten¹⁶. Daraus ergibt sich ein Rückgang des Umsatzes pro Transportleistung um jährlich durchschnittlich 1,34%. Extrapoliert auf den Zeitraum 2008–2025 und anschließend nochmals auf einen Planungszeitraum von 30 Jahren ergibt sich eine Reduktion der Straßenkosten aus Janic (2008) um 35%. Im Gegensatz dazu zeigen die Daten für den Schienentransport einen inversen Trend: Hier ist der Umsatz im selben Zeitraum stärker angestiegen als die Transportleistung (55% gegenüber 25%), wodurch eine jährliche Kostensteigerung von durchschnittlich 2,07% resultiert¹⁷. Daraus folgt eine Erhöhung der Schienenkosten um 92% gegenüber den Basiswerten aus Janic (2008, S. 1334–1336). Die angepassten Kostensätze bilden dann die Basis für die Berechnung der fünf spezifischen Kostenparameter des Modells.

$$c_{\text{road}}^{\text{new}}(d) = 0,65 \cdot 5,46\text{€} \cdot d^{-0,278} \quad (3.15)$$

$$c_{\text{rail}}^{\text{new}}(d, w) = 1,92 \cdot 0.58\text{€} \cdot w^{0,74} \cdot d^{-0,26} \quad (3.16)$$

Für die Kostenparameter c^{D2D} , c^{pre} und c^{post} werden die durchschnittlichen Straßendistanzen zwischen den jeweils relevanten Knotenpunkten (Produktionsstandorte, KV-Terminals und Kunden) herangezogen und die Kosten entsprechend berechnet. Die Kostensätze für die Schiene c^{FTL} und c^{LTL} beruhen auf durchschnittlichen Schienendistanzen zwischen den KV-Terminals der Ausgangs- und Zielregion. Hierbei wird für LTL ein Zuschlag erhoben, da in diesem Modus Mehraufwand durch den Wegfall von Frachtkonsoli-

¹⁵Bierwirth u. a. 2012, S. 203.

¹⁶Transportleistung im deutschen Straßenverkehr bis 2025 | Statista 2024; Prognose: Umsatz der Branche Güterbeförderung im Straßenverkehr in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Milliarden Euro) | Statista 2024.

¹⁷Schienengüterverkehr - Umsatz in Deutschland | Statista 2021; Transportleistung im Straßenverkehr in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2025 | Statista 2021.

3 Durchführung der Simulationsstudie

dierungseffekten und somit höhere Stückkosten entstehen. Der LTL-Kostensatz lässt sich daher auf TE-Basis als ein linearer Aufschlag ϵ auf den c^{FTL} -Satz modellieren¹⁸:

$$c^{LTL} = \epsilon \cdot c^{FTL}, \quad \text{mit } \epsilon > 1 \quad (3.17)$$

In den in Abschnitt 3.7 betrachteten Szenarien wird ϵ mit Werten im Bereich 1,0 bis 1,3 untersucht.

Da LTL-Transporte auf TE-Basis teurer sind, besteht ein wirtschaftlicher Anreiz zur Konsolidierung. Die Frage, ob eine Transportmenge im FTL oder im LTL durchgeführt werden soll, hängt daher vom Verhältnis der Kosten c^{LTL} und c^{FTL} sowie der Transportmenge $x_{tl,tz}$ ab. Die kritische Grenze, ab der ein zusätzlicher (nicht voll ausgelasteter) Blockzug kosteneffizienter ist als LTL-Transport, ist die sogenannte Break-even-Kapazität. Sie ergibt sich gemäß Bierwirth u. a. (2012) zu:

$$\text{cap}_{break_even}^{FTL} = \frac{c^{FTL}}{c^{LTL}} \cdot \text{cap}^{FTL} \quad (3.18)$$

Diese Beziehung stellt sicher, dass zusätzliche FTL-Züge nur dann eingeplant werden, wenn sie gegenüber LTL-Transporte einen Kostenvorteil bieten.

In Tabelle 3.7 sind die für die in Abschnitt 3.5.1 ermittelten Distanzen berechneten Kostenparameter für das Modell dargestellt.

Tabelle 3.7: Kostenparameter des Modells (vorläufige Werte, bezogen auf Durchschnittsdistanzen)

| Parameter | Beschreibung | Wert |
|----------------------------------|--|-------------------|
| c^{D2D} | Direkttransport per LKW (durchschn. d_{pk}) | 0,62 €/TE-km |
| c^{pre} | Vorlauf zum Terminal (durchschn. d_{ptl}) | 0,99 €/TE-km |
| c^{post} | Nachlauf vom Terminal (durchschn. d_{tzk}) | 1,68 €/TE-km |
| c^{FTL} | Zugtransport FTL (durchschn. d_{tltz}) | 1,27 €/TE-km |
| c^{LTL} | Zugtransport LTL ($\epsilon \cdot c^{FTL}$) | 1,40-1,78 €/TE-km |
| cap^{FTL} | Maximale TE-Anzahl pro Blockzug | 38 TEs |
| $\text{cap}_{break_even}^{FTL}$ | Break-even TE-Anzahl für FTL gegenüber LTL | 27-35 TEs |

¹⁸Janic 2008, S. 1334–1336.

3.5.3 Unternehmensdaten

Zur Durchführung der Simulationsstudie wird ein exemplarisches Unternehmen betrachtet, das eine Produktionsstätte im Lausitzer Revier neu errichten möchte. Im Rahmen der Modellierung wird angenommen, dass sich das Unternehmen bereits auf globaler Betrachtungsebene für die Lausitz als Wirtschaftsregion entschieden hat (vgl. Abschnitt 2.1.2). Das Unternehmen soll weiterhin planen, vom neuen Standort das BMW-Werk in München regelmäßig zu beliefern. Wie in Abschnitt 3.5 erläutert, handelt es sich bei diesem Fallbeispiel um ein bewusst vereinfachtes, aber realitätsnahes Szenario, das die Entscheidungslogik und Wirksamkeit des entwickelten Modells nachvollziehbar und transparent abbilden soll. Die dafür erforderlichen unternehmensspezifischen Eingabedaten, insbesondere die Produktionsmengen, werden nachfolgend spezifiziert.

Die Transportmengen werden dabei auf Basis von drei unterschiedlichen Szenarien betrachtet, die sich in der Produktionskapazität unterscheiden. Zur realitätsnahen Einordnung erfolgt die Angabe in s, die auf volle LKW-Ladungen normiert sind, wobei unterstellt wird, dass dreimal wöchentlich ausgeliefert wird. Die Produktionskapazitäten wurden auf Grundlage typischer Unternehmensprofile aus der Branche und unter Annahme kontinuierlicher Belieferung gleichmäßig über das Jahr verteilt:

Tabelle 3.8: Produktionsmengen pro Transport für unterschiedliche Standortgrößen

| Standortgröße | Jahresproduktion (TEs) | TEs pro Transport (bei 3 Lieferungen pro Woche) |
|-----------------------|------------------------|---|
| Kleiner Standort | 5.000 | 32 |
| Mittelgroßer Standort | 15.000 | 96 |
| Großer Standort | 30.000 | 192 |

Diese Werte dienen als Grundlage für die in Kapitel 3.7 durchgeführten Simulationsläufe.

3.6 Implementierung

Ziel dieses Kapitels ist es, die Umsetzung des in Kapitel 3.4 formulierten Optimierungsmodells in ein funktionsfähiges Computerprogramm zu dokumentieren. Die Implementierung erfolgt in der Programmiersprache Julia mithilfe des Modellierungsframeworks JuMP und

des Solvers Gurobi. Damit wird mit der Bereitstellung einer operativen Entscheidungsunterstützung zur gleichzeitigen Wahl von Produktionsstandorten und geeigneten Verkehrsträgern ein zentraler Bestandteil der in Kapitel 3.1 formulierten Aufgaben bearbeitet.

Die technische Umsetzung orientiert sich grundsätzlich eng am formalen Modell, erfordert jedoch an mehreren Stellen Anpassungen an die Syntax und Datenlogik der verwendeten Tools. Eine wesentliche Abweichung betrifft die Strukturierung der Indizes. Während das formale Modell die Netzwerkknotten in semantisch getrennten Mengen P , TL , TZ und K abbildet, wird in der Implementierung aus Gründen der Speicherökonomie und Zugriffsgeschwindigkeit mit einem zusammengeführten Indexsystem gearbeitet. Diese technische Aggregation bedingt komplexere Indexoperationen innerhalb der Formulierung (z. B. $x[tl + P + K, tz + TL]$), verändert jedoch nicht die semantische Trennung der Knotentypen und beeinträchtigt somit nicht die Modelllogik.

Auch bei der Einbindung der Distanzinformationen wurde von einer einheitlichen Matrixstruktur abgewichen. Stattdessen werden die relevanten Distanzen in spezifisch benannten Teilmatrizen (D_{P_TL} , D_{P_K} , D_{TL_TZ} , D_{TZ_K}) organisiert. Die technische Trennung ermöglicht eine präzisere Adressierung der relevanten Verbindungen und reduziert den Speicherbedarf, da redundante Distanzangaben vermieden werden. Die Implementierung der Zielfunktion erfolgt entsprechend der fünf definierten Kostenkomponenten (D2D, Vorlauf, Nachlauf, FTL, LTL), wobei jede Komponente separat über eigene Schleifenstrukturen realisiert ist. Die Zuordnung der jeweiligen Kosten zu den richtigen Transportflüssen erfolgt über die in Abschnitt 3.5 vorbereiteten Matrizen.

In Bezug auf die Entscheidungsvariablen wird die Transportmenge in einem gemeinsamen zweidimensionalen Array x abgebildet, wobei die Interpretation des jeweiligen Eintrags durch den Indexbereich bestimmt wird. Die separate Modellierung von FTL- und LTL-Transporten erfolgt über die Variablen y , z und xl , analog zur Formulierung im mathematischen Modell. Die Standortwahl wird durch die Binärvariablen s_p abgebildet.

Die Überprüfung der Implementierung erfolgte durch gezielte Testszenarien unter Verwendung der in Kapitel 3.5 generierten Daten. Dabei wurden unter anderem Sonderfälle mit nur einem aktiven Produktionsstandort sowie Extremfälle mit hohen Transportdistanzen simuliert, um die korrekte Umsetzung der Konsolidierungslogik zu validieren. Die Ergebnisse wurden durch manuelle Kontrollrechnungen überprüft. Insbesondere wurde sichergestellt, dass die break-even-Kapazität korrekt berücksichtigt wird und die Binärvariable z nur dann aktiviert wird, wenn die Nutzung eines zusätzlichen FTL wirtschaftlich ist. Die vollständige Funktionalität des Modells wurde durch die erfolgreiche Berechnung optimaler Lösungen mit dem Gurobi-Solver bestätigt, wobei die berechneten Lösungen sowohl in ihrer Struktur als auch in ihrem Kostenverhalten den Erwartungen entsprachen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die vorgenommenen technischen Anpassungen keinen Einfluss auf die inhaltliche Integrität des Modells haben. Die Implementierung stellt eine funktionsfähige und valide Abbildung der mathematischen Modellformulierung dar und erfüllt die Zielsetzung der Arbeit, eine belastbare Entscheidungsunterstützung zur simultanen Auswahl von Produktionsstandort und Verkehrsträger zu entwickeln.

3.7 Experimente und Analyse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationsstudie vorgestellt, analysiert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die simultane Wahl von Produktionsstandort und Verkehrsträger bewertet. Aufbauend auf dem in den vorherigen Kapiteln spezifizierten Optimierungsmodell sowie den in Abschnitt 3.5 aufbereiteten Eingangsdaten wird untersucht, unter welchen Rahmenbedingungen die simultane Betrachtung von Standort- und Verkehrsträgerwahl besonders entscheidungsrelevant ist.

Ziel dieses Kapitels ist es, auf Basis experimenteller Szenarien Erkenntnisse darüber zu gewinnen, welche strukturellen, verkehrslogistischen oder unternehmensspezifischen Faktoren maßgeblich die Ergebnisse der simultanen Optimierung beeinflussen. Diese Erkenntnisse liefern einen entscheidenden Beitrag zur Beantwortung der primären Forschungsfrage dieser Arbeit.

Der Aufbau dieses Kapitels gliedert sich wie folgt: Zunächst wird in Abschnitt 3.7.1 das Optimierungsergebnis für das Beispielunternehmen unter Verwendung der in Abschnitt 3.5.2 ermittelten Basiskostensätze analysiert. Dabei wird für die drei in Abschnitt 3.5.3 definierten Absatzszenarien geprüft, inwiefern das Modell einen Mehrwert gegenüber alternativen Herangehensweisen zur Standortwahl bietet. Im Anschluss wird in Abschnitt 3.7.3 der Einfluss der modellierten Frachtkonsolidierungseffekte im Schienenverkehr untersucht, indem der LTL-Aufschlagparameter ε variiert wird. Abschließend wird in Abschnitt 3.7.2 eine Sensitivitätsanalyse zur Entwicklung der Kostenrelationen zwischen Straße und Schiene durchgeführt, um zu ermitteln, wie robust die Standortwahl gegenüber verkehrsträgerbedingten Preisentwicklungen ist. Die Ergebnisse dieser drei Analysen bilden die Grundlage für die finale Beantwortung der primären Forschungsfrage in Abschnitt 3.7.4.

3.7.1 Analyse der Basislösung

In einem ersten Schritt wird das Modell unter Verwendung der in Abschnitt 3.5.2 berechneten Transportkostensätze auf das Beispielunternehmen angewendet. Für die drei in Abschnitt 3.5.3 definierten Produktionsszenarien wird jeweils die kosteneffizienteste

3 Durchführung der Simulationsstudie

Lösung ermittelt. Die Optimierung wird dabei unter der Nebenbedingung durchgeführt, dass lediglich ein Produktionsstandort gewählt werden soll.

Zur Bewertung des Modellergebnisses wird der durch das Modell identifizierte optimale Produktionsstandort in zwei Vergleichsperspektiven analysiert: Erstens werden die daraus resultierenden Transportkosten mit den durchschnittlichen Transportkosten aller 673 potenziellen Gewerbestandorte verglichen. Zweitens erfolgt ein Vergleich mit einem zentral gelegenen Gewerbestandort in Welzow (Koordinaten: 14.15004805, 51.57951623), der stellvertretend für eine intuitive Standortwahl innerhalb der Lausitz steht. Die Verkehrsträgerwahl erfolgt für beide Vergleichsperspektiven ebenfalls über die Verwendung des Modells. Auf diese Weise lässt sich quantifizieren, welchen wirtschaftlichen Vorteil die simultane Optimierung gegenüber vereinfachten Standortwahlstrategien bietet.

Die Ergebnisse der drei Szenarien sind in Tabelle 3.9 dargestellt. Dabei zeigt sich ein konsistenter Vorteil der modellgestützten Entscheidung. In allen Szenarien identifiziert das Modell das Gewerbegebiet in Ottendorf-Okrilla als optimalen Standort, mit gleichbleibender Transportwahl direkt über die Straße zum BMW-Werk. Dies spricht für eine robuste Struktur der optimalen Lösung im Kontext der gegebenen Infrastruktur- und Kostendaten.

Tabelle 3.9: Transportkostenvergleich für drei Produktionsgrößen

| TEs pro Lieferung | Modelllösung | Welzow | Durchschnitt |
|-------------------|--------------|------------|--------------|
| 32 | €9.274,93 | €10.589,10 | €10.646,93 |
| 96 | €27.824,78 | €31.767,31 | €31.940,78 |
| 192 | €55.649,57 | €63.534,62 | €63.881,56 |

Die Analyse zeigt deutlich, dass die modellgestützte simultane Entscheidung sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Transportmengen zu Kosteneinsparungen führt. Im Vergleich zur intuitiven Standortwahl in Welzow betragen die Transportkosten für den optimalen Standort für alle Szenarien ungefähr 78,6% der Transportkosten. Im Vergleich zum Durchschnitt aller möglichen Standorte ergibt sich sogar ein noch leicht größerer Kostenvorteil.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Kostenentwicklungen der Szenarien annähernd linear verlaufen und das Verhältnis zwischen diesen damit konstant ist. Damit wäre das Potenzial des Modells nicht direkt abhängig von der Produktionsmenge eines Unternehmens. Um das zu vertieft zu untersuchen, werden im Anschluss die Modelllösungen für Welzow als festgelegten Standort und freie Standortwahl aus allen Gewerbestandorten gegenübergestellt für eine Produktionsmenge im Bereich von 1-100 Transporteinheiten.

3 Durchführung der Simulationsstudie

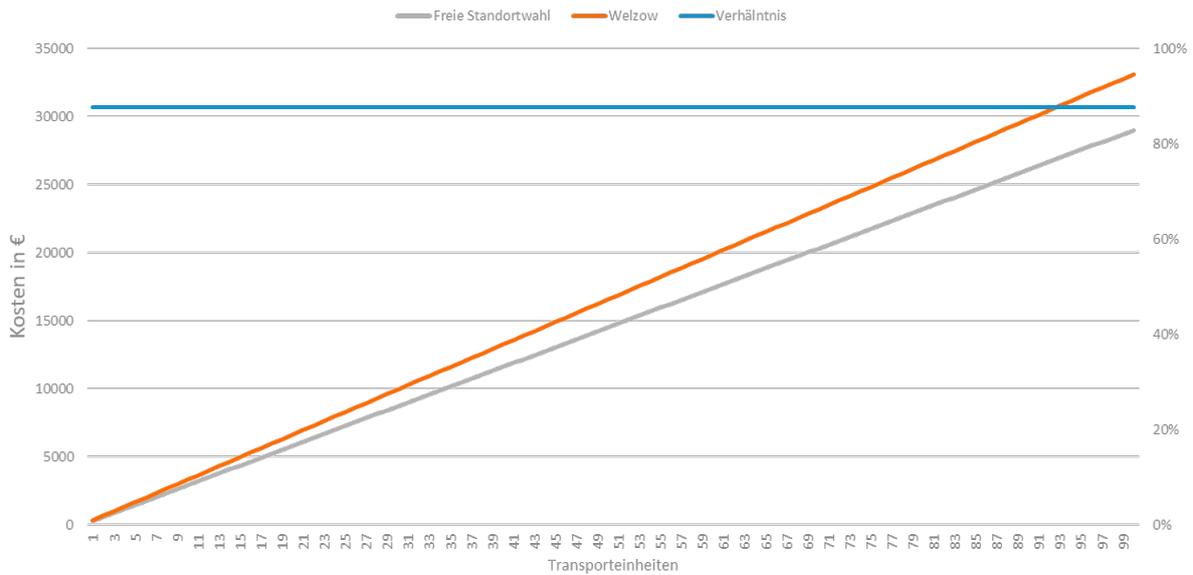


Abbildung 3.3: Kostenentwicklung pro Transporteinheit für Ausführung des Modells mit freier Standortwahl und mit Festlegung auf Welzow (eigene Darstellung).

Die in Tabelle 3.3 dargestellten Ergebnisse bestätigen die Annahme eines linearen Verlaufs der Kostenentwicklungen und damit einhergehend eines weitgehend konstanten Kostenverhältnisses. Die Linearität ergibt sich dabei aus der ausschließlichen Verwendung der Straße als Transportträger, da die in Abschnitt 3.5.2 errechneten Kostensätze für die Straße als Verkehrsträger eine nahezu absolute Vorteilhaftigkeit gegenüber der Schiene als Verkehrsträger bedeuten. Lediglich der Kostensatz für den Nachlauftransport von den KV-Terminals in der Zielregion ist höher als der Kostensatz für Transporte über die Schiene.

Diese Ergebnisse belegen allerdings trotz der eingeschränkten Lösungsdiversität die Wirtschaftlichkeit einer simultanen Standort- und Verkehrsbetrachtung. Durch die Verwendung des Modells als Entscheidungsunterstützung kann, im Falle einer obsoleten Verkehrsträgerentscheidung, noch immer das Potenzial einer reinen Center-of-Gravity-Analyse gehoben werden. Im betrachteten Fall schlägt sich das in der Wahl des Gewerbegebietes in Ottendorf-Okrilla im Süden des Lausitzer Reviers als Produktionsstandort nieder, der die geringste Distanz zum BMW-Werk aufweist. Dabei können 12,4% der Transportkosten im Gegensatz zu den Vergleichsperspektiven eingespart werden. Die konstante Wahl desselben optimalen Standorts über alle Szenarien hinweg deutet zudem auf die Robustheit und Konsistenz der Modelllösung hin.

Um das volle Potenzial des Modells zu erfassen, werden in den nächsten Abschnitten die Kostenparameter variiert. Dabei steht das Verhältnis von Frachtkosten für Gütertransporte über die Straße und Gütertransporte über die Schiene, aber auch das Kostenverhältnis zwischen FTL- und LTL Transporten im Mittelpunkt der Betrachtung.

3.7.2 Einfluss der Kostenrelation Straße–Schiene

Die in Abschnitt 3.5.2 berechneten Transportkostensätze basieren auf einer Fortschreibung der von Janic (2008) publizierten Werte, unter Berücksichtigung historischer Entwicklungen von Transportleistung und Branchenumsätzen. Diese Herangehensweise stellt einen methodisch nachvollziehbaren, aber dennoch vereinfachenden Näherungswert dar. Insbesondere im Kontext einer langfristigen Standortplanung über mehrere Jahrzehnte hinweg kann nicht ohne Weiteres davon ausgegangen werden, dass sich die in der Vergangenheit beobachteten Relationen zwischen Straßengüter- und Schienengüterverkehrskosten auch in Zukunft fortschreiben lassen.

Es gibt mehrere strukturelle und wirtschaftliche Entwicklungen, die eine abweichende, insbesondere stärkere Kostensteigerung im Straßengüterverkehr erwarten lassen. Dazu zählen vor allem:

- der anhaltende Mangel an qualifizierten LKW-Fahrern, der bereits heute zu steigenden Personalkosten führt,
- eine Ausweitung der LKW-Maut auf das gesamte Straßennetz sowie zusätzliche Belastungen durch CO₂-Zertifikate,
- politische Bestrebungen, den Modal Shift durch gezielte Förderung des Schienengüterverkehrs zu beschleunigen,
- infrastrukturelle Engpässe und Staukosten, die überproportional auf den Straßengüterverkehr wirken.

Diese Entwicklungen sprechen dafür, dass der heute beobachtete Kostenvorteil der Straße gegenüber der Schiene künftig nicht sicher gegeben ist, sondern sich perspektivisch wieder umkehren könnte. Um den Einfluss dieser Annahmen auf die Standortentscheidung zu analysieren, wird im Folgenden das Modell für eine Variation der Straßentransportkosten genutzt. Dabei werden die Kostensätze c^{D2D} , c^{pre} und c^{post} schrittweise erhöht, während die Schienenkostensätze c^{FTL} und c^{LTL} konstant gehalten werden.

Ziel der Analyse ist es, die Sensitivität der Standortwahl im Hinblick auf Veränderungen der relativen Verkehrsträgerkosten zu untersuchen. Es soll herausgefunden werden, ab welchen Schwellenwerten eine Verkehrsträgerverlagerung in Richtung Schiene stattfindet und was sich an Potenzial für Einsparungen daraus ergibt. Mittels dieser experimentellen Untersuchung des Verhältnisses der Verkehrsträgerkosten wird auch ein weiterer direkter Beitrag zur Beantwortung der primären Forschungsfrage geleistet, indem dieses als Aspekt für eine erfolgreiche simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl festgehalten wird.

3 Durchführung der Simulationsstudie

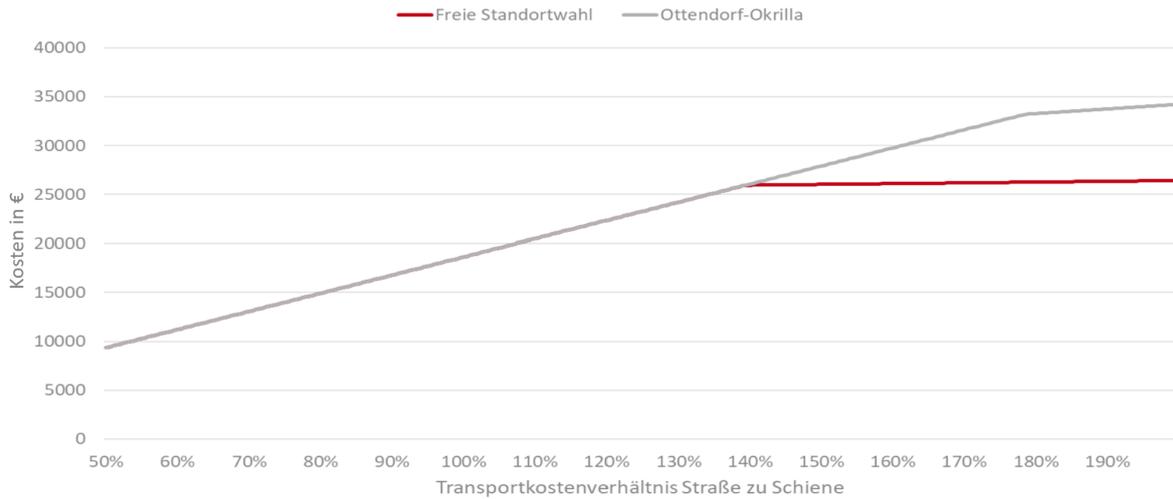


Abbildung 3.4: Modelllösungen für relativ erhöhte Transportkosten für Transporte über die Straße für Ausführung des Modells mit freier Standortwahl und mit Festlegung auf Ottendorf-Okrilla (eigene Darstellung).

In Tabelle 3.4 werden die Kosten für die Modelllösungen mit freier Standortwahl sowie für den in der vorangegangenen Analyse identifizierten kostenminimalen Produktionsstandort Ottendorf-Okrilla unter sukzessive ansteigenden Straßentransportkostensätzen dargestellt. Dabei wurden c^{D2D} , c^{pre} und c^{post} schrittweise erhöht und als nach Distanzen gewichteter Durchschnitt im Verhältnis zu c^{LTL} auf der X-Achse abgebildet. Zu erkennen ist, dass die Standortwahl für das Gewerbegebiet Ottendorf-Okrilla bis zu einem Transportkostenverhältnis von 139%, also einem 39% höheren durchschnittlichen Transportkosten für den Verkehrsträger Straße als für den Verkehrsträger Schiene kostenminimal bleibt. Anschließend ist die Verbindung vom Gewerbegebiet Elsterwerda über die KV-Terminals RailPort Elsterwerda und München-Johanneskirchen weiter zum BMW Werk optimal. Für das Gewerbegebiet Ottendorf-Okrilla als Ausgangsstandort ist der Transport mittels kombiniertem Verkehr sogar erst für ein Transportkostenverhältnis von 180% von ökonomischem Vorteil. Der Grund dafür, dass für die Vorteilhaftigkeit des kombinierten Verkehrs gegenüber Straßendirekttransporten die Transportkosten für den Schienengütertransport deutlich unter denen für den Straßentransport liegen müssen, liegt an dem Anteil der Straßentransporte an den Kosten für den kombinierten Verkehr. Die in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen vergleichsweise hohen Kostenparameter c^{pre} und c^{post} für den Vorlauf- und Nachlauftransport von den KV-Terminals sind dabei ausschlaggebend. Die Analyse zeigt deutlich, dass die simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl besonders sensibel auf Veränderungen im Verhältnis der Verkehrsträgerkosten reagiert. Solange der Kostenvorteil des Straßentransports gegenüber dem kombinierten Verkehr besteht, dominiert der Direkttransport per LKW als optimale Lösung.

Besonders aufschlussreich ist dabei der Vergleich mit einem fest vorgegebenen Standort.

Wird wie im Fall von Ottendorf-Okrilla keine simultane Optimierung von Standort und Verkehrsträgerwahl vorgenommen, sondern nur der optimale Transportmodus für einen fixierten Standort bestimmt, so tritt eine Umstellung auf den Schienengüterverkehr selbst bei stark erhöhten Straßenverkehrskosten erst vergleichsweise spät ein. Dies zeigt deutlich, dass bei einer sequenziellen Planungslogik, bei der der Standort zuerst und der Transportmodus nachgelagert gewählt wird, erhebliches Einsparpotenzial ungenutzt bleibt. Die simultane Wahl ermöglicht hingegen, bereits bei moderater Veränderung der Kostenrelationen die vorteilhaftere Kombination aus Standort und Verkehrsträger zu erkennen und umzusetzen.

Für die Beantwortung der primären Forschungsfrage lässt sich aus dieser Analyse ein weiterer zentraler Aspekt ableiten, der zu einer erfolgreichen simultanen Standort- und Verkehrsträgerwahl beitragen kann. Erstens spielt die relative Kostenstruktur zwischen Straße und Schiene eine zentrale Rolle. Wenn sich die Transportkosten für kombinierten Verkehr und Direkttransporte die Waage halten, kann durch die Verkehrsträgerwahl in der Standortplanung ein deutlich größeres Potenzial gehoben werden. Dabei spielen die Vor- und Nachlaufkosten gerade im Kontext der simultanen Betrachtung eine entscheidende Rolle. Diese Erkenntnis stärkt damit den in Abschnitt 2.2.2 identifizierten Aspekt ausreichenden Vorhandenseins von KV-Terminals in einer Region, da andernfalls die Vor- und Nachlaufkosten noch stärker ins Gewicht fallen würden.

3.7.3 Einfluss der Frachtkonsolidierungseffekte

Ein zentrales Merkmal des entwickelten Modells ist die explizite Berücksichtigung von Frachtkonsolidierungseffekten im Schienengüterverkehr. Das Modell differenziert dabei zwischen vollständig ausgelasteten Blockzügen (FTL) und weniger ausgelasteten Transporten (LTL). Für Transporte im LTL-Modus wird dabei ein Aufschlagsfaktor ε verwendet, der die zusätzlichen Kosten pro Transporteinheit gegenüber dem günstigeren FTL-Modus abbildet.

Um den Einfluss dieser Frachtkonsolidierungseffekte auf die Standort- und Verkehrsträgerentscheidung zu analysieren, wird in einem Szenario eine relative Kostenvorteilhaftigkeit des Schienentransports angenommen, indem die Kostenparameter für den Straßentransport durchschnittlich auf das 1,5-fache der Kosten des Schienentransports festgelegt werden. Diese Annahme stellt sicher, dass Schienentransporte grundsätzlich attraktiv sind und somit die Auswirkungen unterschiedlicher Konsolidierungseffekte sichtbar werden.

Ziel dieser Analyse ist es, die Auswirkung des Aufschlagsfaktors ε auf die Standort- und Verkehrsträgerwahl zu untersuchen. Die Variation von ε erlaubt es, die ökonomische Relevanz der Auslastung von Ganzzügen und damit der Konsolidierungspotenziale im kombi-

3 Durchführung der Simulationsstudie

nierten Verkehr besser zu verstehen. Ein steigender Aufschlagsfaktor ε entspricht hierbei einer zunehmenden Diskrepanz zwischen LTL- und FTL-Kosten, was dazu führt, dass weniger vollständige Züge wirtschaftlich unattraktiv werden. Dies erhöht die sogenannte *break-even-capacity*, also die Transportmenge, ab der es günstiger wird, einen zusätzlichen Ganzzug einzusetzen anstatt Transporteinheiten im LTL-Modus zu verschicken.

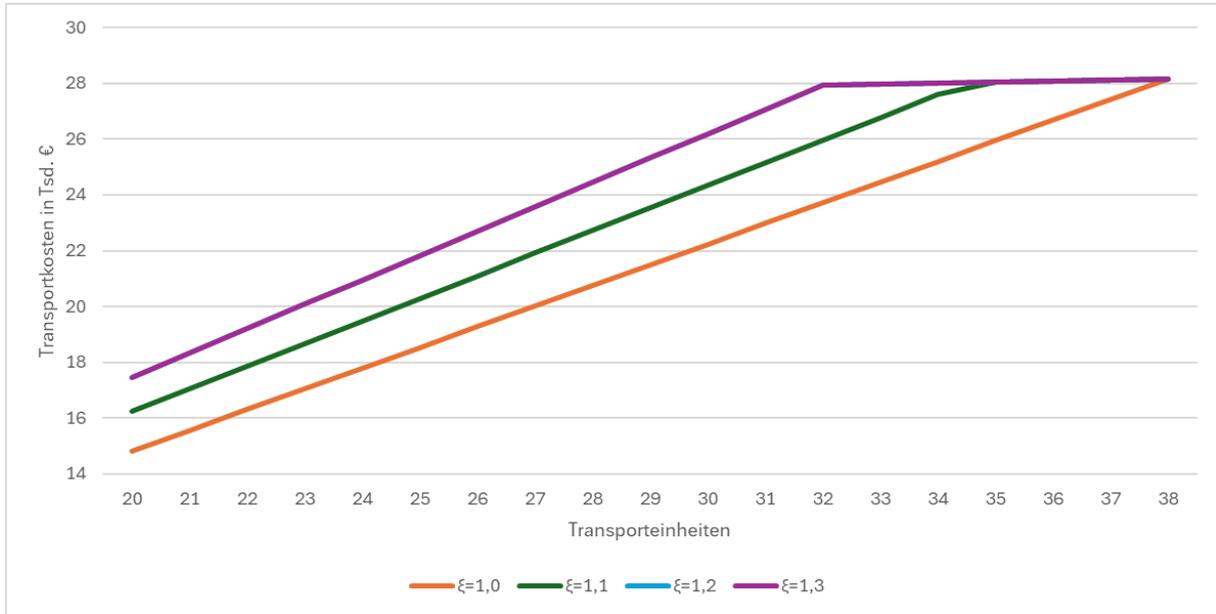


Abbildung 3.5: Einfluss der Frachtkonsolidierungseffekte (ε) auf die Transportkosten (eigene Darstellung).

In der Abbildung 3.5 zeigt sich deutlich, wie sich unterschiedliche Werte von ε auf die Transportkosten auswirken. Mit zunehmendem ε steigen die Transportkosten insbesondere bei Mengen von Transporteinheiten zwischen $1 + \text{cap}^{FTL} \cdot n$ und der $1 + \text{cap}_{break_even}^{FTL} \cdot n$ überproportional stark an. Dies ist darin begründet, dass der Einsatz eines Ganzzugs erst ab einer höheren $\text{cap}_{break_even}^{FTL}$ wirtschaftlich rentabel wird. So verschieben sich mit steigendem ε die sichtbaren Knickpunkte in den Kurven nach rechts. Diese Knickpunkte markieren genau jene Transportmengen, bei denen ein zusätzlicher Ganzzug erstmals vollständig wirtschaftlich ausgelastet werden kann und LTL-Transporte vermieden werden. Ab einem Wert von 1,3 für ε hat, für das gegebene Verhältnis zwischen Kosten für den kombinierten Verkehr und Straßendirekttransport, eine weitere Erhöhung von ε keine Auswirkungen auf die Ergebnisse des Modells, da direkt von D2D- zu FTL-Transporten übergegangen wird.

Aus diesen Ergebnissen folgt ein wichtiger Aspekt, der zur Beantwortung der primären Forschungsfrage beitragen kann. Für eine erfolgreiche simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl ist es essenziell, die Höhe des Aufschlagsfaktors ε , also das Kostenverhältnis zwischen LTL- und FTL-Transporten, zu berücksichtigen. Ist ε hoch, besteht nur bei einer

sehr engen Spanne an Transportmengen ein ökonomischer Vorteil des Schienentransports, nämlich exakt zwischen *break-even-capacity* und der Maximalkapazität eines Ganzzuges. Außerhalb dieser Spanne verliert der Schienentransport im kombinierten Verkehr seine relative Vorteilhaftigkeit, da entweder ein zu teurer LTL-Modus genutzt werden muss oder die Transportmenge nicht zur wirtschaftlichen Auslastung eines ganzen Zuges ausreicht.

Damit lässt sich festhalten, dass das Verhältnis zwischen den Transportkosten pro Transporteinheit im LTL-Modus und den Transportkosten pro Ganzzug (FTL) im Schienengüterverkehr entscheidend für die Höhe des durch die simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl realisierbaren Kostensenkungspotenzials ist. Ein zu hoher Aufschlagsfaktor für LTL-Transporte führt dazu, dass der Schienengüterverkehr nur bei entsprechend hoher Zugauslastung wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber Straßendirekttransporten bleibt. Dies wiederum begrenzt das Kostensenkungspotenzial des Modells, insbesondere bei geringeren Transportmengen, für die keine ausreichende Auslastung zur Bildung von Ganzzügen erreicht werden kann.

3.7.4 Beantwortung der primären Forschungsfrage

Ziel dieser Arbeit war es, die relevanten Aspekte sowie deren notwendige Ausgestaltungen zu identifizieren, die eine simultane Planung von Standortwahl und Verkehrsträgerwahl mittels nichtlinearer ganzzahliger Programmierung gegenüber einer sequenziellen Planung wirtschaftlich maximal vorteilhaft machen. Zur systematischen Beantwortung der primären Forschungsfrage wurden zunächst im Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen gelegt, in denen der Standortplanung und im Kontext dieser dem kombinierten Verkehr als den beiden zentralen Planungsbereichen besondere Bedeutung zukommt. Darauf aufbauend erfolgte eine empirische Überprüfung anhand einer umfangreichen Simulationsstudie in Kapitel 3. Die daraus resultierenden Ergebnisse und Erkenntnisse, insbesondere aus Sektion 3.7, fließen nun in die abschließende Beantwortung der primären Forschungsfrage ein.

Ein zentraler Befund der theoretischen Analyse in Kapitel 2 ist, dass die wirtschaftlichen Vorteile einer simultanen Planung von Standortwahl und Verkehrsträgerwahl wesentlich durch eine Reihe von Bedingungen beeinflusst werden, deren Ausgestaltung die ökonomische Effizienz maßgeblich bestimmt. Die Standortplanung wurde hierbei als strategische Entscheidungsebene identifiziert, auf der langfristige Bindungen entstehen und erhebliche finanzielle Investitionen erforderlich sind, während der kombinierte Verkehr als operative Ebene betrachtet wurde, deren Optimierung kurzfristig und kontinuierlich stattfindet. Für die Verknüpfung beider Planungsbereiche bietet die nichtlineare ganzzahlige Programmierung als methodisches Instrument geeignete Lösungsverfahren, insbesondere zur

simultanen Optimierung komplexer Entscheidungsprobleme, die durch diskrete Standortentscheidungen und kontinuierliche Transportentscheidungen charakterisiert sind.

Die Ergebnisse aus der Simulationsstudie in Kapitel 3, insbesondere aus den in den Abschnitten 3.7.1 bis 3.7.3 durchgeführten Experimenten in Verbindung mit den in Kapitel 2 aufgezeigten Grundlagen, zeigen eindeutig, dass bestimmte Aspekte maßgeblich sind, um durch eine simultane Planung tatsächlich substanzielle Kostenvorteile zu realisieren. Konkret lassen sich diese in drei übergeordnete Kategorien, den infrastrukturellen Rahmenbedingungen, Markt- und Transportcharakteristika sowie methodischen Voraussetzungen zusammenfassen. Die infrastrukturellen Rahmenbedingungen umfassen vor allem eine ausreichende und optimal verteilte Verfügbarkeit intermodaler Terminals sowie eine qualitativ hochwertige und kapazitiv angemessene Verkehrsinfrastruktur für Schiene und Straße. Unter Markt- und Transportcharakteristika fallen primär ein hinreichend großes Transportvolumen, geeignete Gütereigenschaften für intermodale Transporte, sowie ausreichend lange Transportdistanzen, bei denen intermodale Transporte Kostenvorteile gegenüber reinem Straßengüterverkehr realisieren können. Die methodischen Voraussetzungen betreffen die Datenqualität, die Güte der Kostenprognose sowie die Wahl eines geeigneten Optimierungsmodells.

Die empirischen Untersuchungen aus Kapitel 3 bestätigen darüber hinaus, dass die simultane Planung in Abhängigkeit der genannten Aspekte und ihrer optimalen Ausprägung substanzielle Einsparungen gegenüber einer separaten Planung der Standortwahl und der Verkehrsträgerwahl ermöglicht. Im konkreten Anwendungsfall konnten deutliche Kosteneinsparungen durch die simultane Optimierung realisiert werden, die insbesondere im Falle von idealen Transportmengen für die Auslastung ganzer Züge und einer Kostenentwicklung, bei der beide Transportmodi langfristig konkurrenzfähig bleiben.

Um die primäre Forschungsfrage vollumfänglich zu beantworten, werden nachfolgend alle identifizierten Aspekte nochmals aufgegriffen und deren Interdependenzen untereinander herausgestellt, um daraus einen idealen Anwendungsfall für das in dieser Arbeit entwickelte nichtlineare ganzzahlige Optimierungsmodell zur simultanen Planung von Standort- und Verkehrsträgerwahl abzuleiten.

Der erste zentrale Aspekt stellt die räumliche Betrachtungsebene dar. In Sektion 2.1.2 wurde argumentativ abgeleitet, dass die regionale Ebene optimal geeignet ist, da sie ausreichende Variabilität im Standortfaktor Verkehr bietet, während andere Standortfaktoren mit größerem Einfluss auf den Gesamtentscheidungsprozess auf dieser Ebene aufgrund von eingeschränktem Gestaltungsspielraum eine untergeordnete Rolle spielen. Zugleich sind operative Kostenvorteile des kombinierten Verkehrs auf dieser Ebene effizient nutzbar und bürgen ein großes Einsparungspotenzial bei rechtzeitiger Einbindung in den Planungsprozess. Insbesondere liegt hier ein guter Kompromiss zwischen strategischer Rele-

vanz und operativer Optimierbarkeit vor. Die Eignung der regionalen Betrachtungsebene als Ausgangspunkt für eine erfolgreich simultane Standort- und Verkehrsträgerplanung ist dabei allerdings stark von den Gegebenheiten in der Region abhängig, für die sich auf übergeordneter Betrachtungsebene entschieden wurde. Die Verkehrsinfrastruktur, politische Unterstützung und andere regionale Standortfaktoren müssen dabei im Einzelfall auf Kompatibilität und Relevanz überprüft werden, da diese auf regionaler Ebene signifikante Unterschiede aufweisen können.

Die Standortfaktoren auf regionaler Ebene, insbesondere Steuern und Abgaben, Flächenverfügbarkeit sowie die Nähe zu Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, die ausführlich in Sektion 2.1.2 besprochen wurden, sind ein weiterer Aspekt. Diese beeinflussen die konkrete Standortauswahl maßgeblich und können, abhängig von der Relevanz der Standortfaktoren im Einzelnen für das Unternehmen, das einen Standort plant, die Frage nach einer optimalen Verkehrsträgerwahl in den Hintergrund rücken. Unter Umständen können aus anderen Standortfaktoren resultierende Bedingungen zusätzliche Einschränkungen für das beschriebene Modell machen oder die Grundgesamtheit an infrage kommenden Gewerbegrundstücken reduzieren.

Die Verkehrsinfrastruktur als eigener Aspekt, ebenfalls intensiv in Sektion 2.2.2 behandelt, beschreibt die Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von KV-Terminals sowie Straßen- und Schienenverbindungen. Eine Region mit dichter und gut angebundener Infrastruktur erhöht signifikant die Wirtschaftlichkeit und somit die Attraktivität des Kombinierten Verkehrs, da eine verbesserte Infrastruktur die Fixkosten pro Transporteinheit reduziert und somit die Gesamtkosten deutlich senkt. Das wiederum führt zu einem gesteigerten Angebot an Transportlösungen für Unternehmen und der Notwendigkeit für Unterstützung in zunehmend komplexen Entscheidungen. Die Infrastruktur hängt unmittelbar von politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie Investitionsstrategien ab.

Es wurden außerdem in Sektion 2.2.2 und Sektion 2.2.1 das Transportvolumen und die Transportdistanz als wesentliche Aspekte herausgestellt. Insbesondere für Transporte im KV sind ausreichende Distanzen erforderlich, da mit zusätzlicher Distanz die Transportkosten pro Einheit des kombinierten Verkehrs signifikant geringer ausfallen, weil die Vor- und Nachlaufkosten anteilig weniger ins Gewicht fallen. Dieser Aspekt ist insbesondere verwoben mit dem Verhältnis der Kosten für den kombinierten Verkehr und für den Direkttransport über die Straße. Die Distanz, ab der KV wirtschaftlich vorteilhaft ist, hängt insbesondere davon und der Transportmenge pro Transportauftrag ab.

Der Aspekt des relativen Kostenverhältnisses der Transportmodi Kombiniertes Verkehr und Straßendirekttransport wurde in Abschnitt 3.7.1 identifiziert und anschließend in Abschnitt 3.7.2 untersucht. Wenn der kombinierte Verkehr nicht konkurrenzfähig ist, reduziert sich das durch Verwendung des Modells adressierte Planungsproblem zu einer

Center-of-Gravity-Analyse. Vollständiges Kostensenkungspotenzial kann durch das Modell nur realisiert werden, wenn tatsächlich eine Wahl des Verkehrsträgers erfolgen muss. Auch das in Abschnitt 3.7.3 untersuchte Verhältnis zwischen Stücktransportkosten und Kosten für den Transport via Ganzzug kann den Lösungsraum des Modells für viele Transportmengen erheblich beschränken.

Weiterhin hängt das Potenzial der simultanen Standort- und Verkehrsträgerwahl von der wirtschaftlichen und industriespezifischen Struktur und der politischen und regulatorischen Unterstützung einer Region ab. Diese Aspekte beziehen sich direkt auf die Region, die im Zentrum der Betrachtung steht und werden in Sektion 2.2.2 ausgeführt. Diese bestimmt nicht nur das Transportaufkommen, sondern auch die Transportart und Ladungszusammensetzung. Regionen, die geprägt sind von Industrien mit standardisierten Gütern, bieten ein großes Potenzial für den kombinierten Verkehr und sind daher prädestiniert dafür, die Verkehrsträgerwahl frühzeitig in die Planung einzubinden. Politische und regulatorische Unterstützung beeinflusst dabei von der anderen Seite erheblich den Erfolg intermodaler Transportlösungen durch Förderprogramme, Infrastrukturinvestitionen oder regulatorische Vorgaben wie Fahrverbote, Emissionsobergrenzen. Eine konsequente Unterstützung auf regionaler Ebene erhöht damit den Anreiz für Unternehmen, ihre Standortentscheidungen simultan mit der Wahl von Verkehrsträgern zu planen, um die Potenziale, die der KV inne hat, bestmöglich auszuschöpfen.

Die Ausgestaltung der nichtlinearen ganzzahligen Optimierung wurde schließlich explizit in Sektion 2.2.1 sowie umfassend in Kapitel 3 behandelt. Hier zeigt sich, dass die Komplexität und Struktur der nichtlinearen ganzzahligen Programmierung entscheidend ist, um die vielfältigen Kostenstrukturen, Transportanforderungen und Standortfaktoren simultan optimal abzubilden. Eine zu starke Vereinfachung könnte relevante Faktoren unzureichend darstellen, während eine zu komplexe Modellierung die praktische Anwendbarkeit einschränkt. Diese Modellierung steht in direkter Interdependenz zu den zuvor genannten Faktoren, da sie die Variabilität und Bedeutung der einzelnen Faktoren erst operativ abbildet und deren potenzielle Wechselwirkungen mathematisch aufzeigt.

Tabelle 3.10: Zentrale Aspekte und deren Relevanz für die simultane Planung von Standort- und Verkehrsträgerwahl

| Aspekt (Sektion) | Relevanz und kurze Beschreibung |
|--|---|
| Räumliche Betrachtungsebene (2.1.2) | Die regionale Ebene bietet ausreichende Variabilität im Verkehrssektor und ermöglicht operative Kostenvorteile. Sie stellt einen guten Kompromiss zwischen strategischer Relevanz und operativer Optimierbarkeit dar, vorausgesetzt, regionale Gegebenheiten (z. B. Infrastruktur, politische Rahmenbedingungen) sind geeignet. |
| Standortfaktoren (Steuern, Flächen, Forschungseinrichtungen) (2.1.2) | Standortfaktoren beeinflussen maßgeblich die Standortwahl. Sie definieren den Rahmen, in dem eine simultane Planung erfolgen kann, und können je nach Gewichtung die Frage der Verkehrsträgerwahl zurückstellen. |
| Verkehrsinfrastruktur (2.2.2) | Eine gut ausgebaute Verkehrsinfrastruktur (inklusive KV-Terminals, Straßen- und Schienenverbindungen) senkt die Fixkosten pro Transporteinheit und erhöht die Wirtschaftlichkeit des kombinierten Verkehrs. |
| Transportvolumen und -distanz (2.2.2, 2.2.1) | Ausreichende Distanzen und hohes Transportvolumen ermöglichen Skaleneffekte. Längere Transportwege verringern anteilig Vor- und Nachlaufkosten und machen den kombinierten Verkehr wirtschaftlich attraktiver. |
| Kostenrelationen (3.7.1, 3.7.2) | Das relative Kostenverhältnis zwischen kombiniertem Verkehr und Direkttransport bestimmt, ob das Modell das volle Einsparungspotenzial realisieren kann, andernfalls ist das Modell für das Planungsproblem überkomplex. |
| Wirtschaftliche Struktur (2.2.2) | Die industriespezifische Struktur einer Region, insbesondere standardisierte Produktionsprozesse, beeinflusst sowohl das Transportaufkommen als auch die Eignung für kombinierten Verkehr. |
| Politische und regulatorische Unterstützung (2.2.2) | Förderprogramme, Infrastrukturinvestitionen und regulatorische Maßnahmen (z. B. CO ₂ -Kosten, Fahrverbote) schaffen die Voraussetzungen, damit Unternehmen Standort- und Verkehrsträgerwahl simultan planen und so von intermodalen Lösungen profitieren. |
| Nichtlineare ganzzahlige Optimierung (2.2.1, 3) | Eine differenzierte Modellierung mittels nichtlinearer ganzzahliger Programmierung ermöglicht es, komplexe Kostenstrukturen und Wechselwirkungen zwischen Standortfaktoren, Transportanforderungen und intermodaler Umsetzung angemessen abzubilden. Dabei stellt ein ausgewogenes Modell die praktische Umsetzbarkeit sicher. |

3 Durchführung der Simulationsstudie

Um mithilfe nichtlinearer ganzzahliger Programmierung durch die simultane Planung von Standort und Verkehrsträgerwahl eine größtmögliche Kostenreduktion gegenüber einer getrennten Planung zu erzielen, müssen die in dieser Arbeit identifizierten entscheidenden Aspekte folgendermaßen ausgestaltet sein:

Das Unternehmen, das einen neuen Standort plant, sollte sich in einem Planungsprozess auf regionaler Betrachtungsebene befinden, da diese einen optimalen Kompromiss zwischen strategischer Entscheidungsrelevanz und operativer Optimierbarkeit bietet. Es sollte über hohe und stabile Transportvolumina verfügen und Kunden in größerer Entfernung beliefern, sodass Skaleneffekte des kombinierten Verkehrs zum Tragen kommen. Die Kostenrelation zwischen kombiniertem Verkehr und Direkttransport muss dabei für weite Distanzen zugunsten des intermodalen Ansatzes ausfallen, damit überhaupt eine verkehrsträgerbezogene Optimierung erforderlich wird. Im Entscheidungsprozess dürfen andere Standortfaktoren auf regionaler Ebene wie Flächenverfügbarkeit, Steuern und Abgaben oder die Nähe zu Forschungseinrichtungen zwar relevant sein, sollten aber keine dominanten Einschränkungen darstellen, die die Lösungsraum im Verkehrsträgerbereich signifikant einschränken.

Die Region, auf die sich auf vorhergehender Betrachtungsebene festgelegt wurde, muss eine leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur mit gut angebundenen KV-Terminals sowie einer dichten Schienen- und Straßenanbindung bereitstellen. Sie sollte durch eine produktionsintensive Wirtschaftsstruktur mit standardisierten, nicht zeitkritischen Gütern geprägt sein, die regelmäßige und planbare Transporte ermöglicht. Die regionalen Standortfaktoren müssen vom Verkehr dominiert sein, sodass dieser einen realen Einfluss auf die wirtschaftliche Standortwahl ausübt. Zusätzlich sollte eine klare politische und regulatorische Unterstützung gegeben sein, etwa durch gezielte Fördermaßnahmen, Investitionen in Intermodalinfrastruktur oder verkehrspolitische Rahmenbedingungen, die den Einsatz des kombinierten Verkehrs gezielt begünstigen.

Die methodischen Voraussetzungen müssen durch eine geeignete Modellstruktur gewährleistet werden, die komplexe Abhängigkeiten zwischen Standortfaktoren und Verkehrsträgereinsatz aufgreift, ohne dabei in der praktischen Anwendung zu überfordern. Die nichtlineare ganzzahlige Optimierung muss in der Lage sein, realistische Kostenverläufe, Transportvolumina, Kapazitätsgrenzen und Entscheidungshierarchien in einer integrierten Planungslogik zusammenzuführen.

Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, können die Potenziale der simultanen Planung vollständig ausgeschöpft und signifikante Kosteneinsparungen gegenüber einer sequenziellen Herangehensweise realisiert werden.

4 Diskussion

4.1 Nachnutzung

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell zur simultanen Planung von Standort und Verkehrsträgerwahl auf regionaler Ebene zeigt ein hohes Anwendungspotenzial für verschiedene planerische und strategische Kontexte. Die experimentellen Ergebnisse verdeutlichen, dass das Modell sensitiv auf zentrale Kostenparameter reagiert und damit eine fundierte Entscheidungsunterstützung in dynamischen Planungsszenarien bieten kann. Die erfassten Transportkostenverteilungen sowie die resultierende Verkehrsträgerwahl zeigen deutlich, wie wirtschaftliche Effekte durch politische Maßnahmen wie Maut- oder CO₂-Regulierungen beeinflusst werden können.

Die primäre Zielgruppe für die Anwendung des Modells sind Unternehmen, die sich innerhalb eines bestehenden Standortentscheidungsprozesses befinden und zwischen mehreren regionalen Alternativen wählen müssen. Besonders geeignet ist das Modell für den taktischen Einsatz, wenn die übergeordnete Standortwahl für eine bestimmte Region bereits getroffen wurde und die Bewertung konkreter Alternativen innerhalb dieser Region ansteht. Durch die strukturierte Gegenüberstellung verschiedener Standort- und Verkehrsträgerkombinationen können Unternehmen fundierte Entscheidungen über langfristige Kostenstrukturen treffen und Transportstrategien entwickeln, die unter Berücksichtigung externer Kostenfaktoren ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind.

Darüber hinaus bietet das Modell auch einen erheblichen Mehrwert für wirtschaftsnahe Institutionen wie Wirtschaftsförderungseinrichtungen, regionale Entwicklungsagenturen oder kommunale Planungsstellen. Diese Akteure können das Modell nutzen, um systematisch zu analysieren, wie sich Infrastrukturmaßnahmen, Förderprogramme oder regulatorische Eingriffe auf die Attraktivität bestimmter Standorte für logistikintensive Unternehmen auswirken. Indem das Modell konkrete Aussagen zur Bedeutung verkehrlicher Anbindung und zur Sensitivität gegenüber politischen Steuerungsinstrumenten liefert, können gezielt Investitionsschwerpunkte identifiziert und wirtschaftspolitische Entscheidungen evidenzbasiert vorbereitet werden.

Eine Übertragung auf andere Regionen ist außerdem grundsätzlich möglich, sofern bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Dazu zählt das Vorhandensein einer ausreichend differenzierten und aktuellen Datengrundlage, insbesondere zu verfügbaren Gewerbeflächen, regionaler Verkehrsinfrastruktur mit Fokus auf KV-Terminals, Schienennetz und Straßenzugang, Transportkostenparametern sowie wirtschaftlichen Standortfaktoren wie Steuerbelastung oder Förderbedingungen. Die Arbeit bietet hierfür eine strukturierte methodische Blaupause, um vergleichbare Datengrundlagen systematisch zu erheben, relevante Standortfaktoren zu klassifizieren und Szenarien aufzubauen. Auch die analytischen Schritte zur Bewertung der Parameterempfindlichkeit und zur Ableitung idealer Planungskonstellationen können auf andere Kontexte übertragen werden.

Die Modelllogik selbst ist demnach grundsätzlich um andere Formen des kombinierten Verkehrs erweiterbar. Besonders relevant erscheint hierbei die Integration des Verkehrsträgers Binnenschiff im Zusammenspiel mit Straße und Schiene. In Regionen mit geeigneter Hafeninfrastruktur und ausreichend großer Transportmengen könnten durch die noch stärkere Frachtbündelung und die im Vergleich zur Schiene teilweise niedrigeren Transportkosten zusätzliche Einsparpotenziale erschlossen werden. Die Erweiterung des Modells um weitere intermodale Relationen würde eine differenziertere Abbildung realer Logistiknetze ermöglichen und so die Anwendungsbreite des Simulationsansatzes deutlich steigern.

Für eine erfolgreiche Übertragbarkeit in andere Regionen ist darüber hinaus sicherzustellen, dass diese über eine gewisse infrastrukturelle Ausgangsbasis verfügen und realistische Optionen für intermodale Transporte bestehen. Regionen ohne KV-Terminals oder mit sehr geringen Transportvolumina eignen sich nur bedingt für eine Anwendung des Modells, da wesentliche Optimierungspotenziale nicht genutzt werden könnten. Weiterhin ist eine gewisse Flexibilität in der Standortwahl auf regionaler Ebene erforderlich, da das Modell auf der Annahme basiert, dass zwischen mehreren Standortalternativen mit unterschiedlicher verkehrlicher Anbindung gewählt werden kann.

Insgesamt kann das Modell, ergänzt durch geeignete Visualisierungs- und Anwendungstools, auch einem erweiterten Nutzerkreis zugänglich gemacht werden. Die Entwicklung benutzerfreundlicher Interfaces sowie die Einbindung in digitale Planungssysteme könnten die praktische Nutzbarkeit für regionale Planungsträger erheblich erhöhen und die datengetriebene Planung im Zuge des Strukturwandels in wirtschaftlich transformierenden Regionen unterstützen. ausschöpfen wollen.

4.2 Fazit und kritische Würdigung

Die vorliegende Arbeit hat ein Simulationsmodell entwickelt, das die simultane Planung von Standort- und Verkehrsträgerwahl mithilfe nichtlinearer ganzzahliger Optimierung ermöglicht. Durch die theoretische Herleitung, die Ableitung entscheidungsrelevanter Aspekte und die experimentelle Analyse wurde gezeigt, unter welchen Bedingungen der kombinierte Planungsansatz gegenüber einer sequenziellen Herangehensweise ökonomische Vorteile entfalten kann. Besonders relevant ist der Ansatz für Standortentscheidungen auf regionaler Betrachtungsebene, bei denen die Variabilität verkehrlicher Merkmale signifikant ist und andere Standortfaktoren keine übergeordneten Restriktionen darstellen. Die Realitätsnähe eines solchen Szenarios wurde in Abschnitt 2.1.2 in Form einer Diskussion behandelt. Durch diese kann nicht abschließend bewiesen werden, dass in der Praxis ein Szenario mit isoliert überragender Bedeutung des Standortfaktors Verkehr existiert. Aus der Betrachtung geht allerdings hervor, dass der Verkehr auf regionaler räumlicher Betrachtungsebene mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Standortfaktor mit hoher Relevanz für den Planungsprozess ist. Das entwickelte Modell sollte daher, abhängig von dem spezifischen Anwendungsfall, durch weitere Entscheidungsunterstützung ergänzt werden, um nicht abgedeckte, relevante Standortfaktoren zu berücksichtigen.

Das Modell adressiert die zunehmende Komplexität logistikbezogener Standortentscheidungen in einem Kontext wachsender regulatorischer Anforderungen und volatiler Kostenstrukturen. Durch die integrierte Betrachtung von Standort und Verkehrsträgerwahl sowie die Sensitivitätsanalyse relevanter Parameter können Entscheidungsgrundlagen geschaffen werden, die sowohl unternehmensintern als auch auf Ebene wirtschaftspolitischer Institutionen nutzbar sind. Die Arbeit liefert zudem eine methodische Struktur, die bei Vorliegen geeigneter Daten auf andere Regionen übertragbar ist.

Gleichzeitig sind die Ergebnisse dieser Arbeit im Lichte bestimmter Einschränkungen zu interpretieren. Die Validierung des Modells erfolgte auf Basis synthetischer Parameter und idealtypischer Annahmen. Eine Anwendung mit realen Unternehmensdaten, insbesondere hinsichtlich konkreter Transportvolumina, Kundenstandorte und individueller Standortanforderungen, wurde nicht durchgeführt. Entsprechend können keine generalisierbaren Aussagen über exakte Einsparpotenziale getroffen werden. Diese hängen maßgeblich von unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen ab und sind stets einzelfallabhängig zu bewerten.

Des Weiteren ist kritisch anzumerken, dass die in Abschnitt 3.5.2 verwendeten Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Transportkosten für Straßen- und Schienengüterverkehr basierend auf Umsatz- und Leitungsentwicklungen der vergangenen Jahre langfristig zu einer potenziellen Einschränkung der Relevanz des kombinierten Verkehrs auf regionaler

4 *Diskussion*

Ebene führen könnten. Sollte sich der derzeitige Kostenanstieg bei Schienentransporten ungebrochen fortsetzen, würde dies dazu führen, dass der kombinierte Verkehr auf breiter Basis konkurrenzunfähig wird. In einem solchen Szenario wäre die Verkehrsträgerwahl nicht mehr Teil eines zu optimierenden Entscheidungsproblems, was die Notwendigkeit und den Nutzen des simultanen Planungsansatzes in der vorliegenden Form deutlich reduziert. Das Modell müsste in solchen Fällen entsprechend angepasst werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die entwickelte Methodik ein hohes Potenzial für die Unterstützung datenbasierter Standortentscheidungen bietet. Gleichzeitig zeigt sich, dass deren Nutzen und Aussagekraft wesentlich von der Kontextualisierung, der Datenverfügbarkeit und der realen Entwicklung externer Kostenparameter abhängig sind. Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten somit eine belastbare konzeptionelle Grundlage, die in zukünftigen Arbeiten durch empirische Anwendungen, Echtzeitdatenintegration und operative Weiterentwicklung des Modells gezielt ausgebaut werden kann.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Potenziale einer simultanen Planung von Standortwahl und Verkehrsträgerwahl im Kontext industrieller Standortentscheidungen. Ziel war es, ein Simulationsmodell zu entwickeln, das mithilfe nichtlinearer ganzzahliger Optimierung fundierte Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl geeigneter Produktionsstandorte und Transportmodi bietet. Im Fokus steht dabei die Kombination von Straßen- und Schienengüterverkehr unter besonderer Berücksichtigung regionaler Rahmenbedingungen.

Ausgehend von einer systematischen theoretischen Fundierung wurden zunächst zentrale Aspekte der Standortplanung und des kombinierten Verkehrs analysiert. Dabei konnte die regionale Betrachtungsebene als besonders geeignet für eine integrierte Planung identifiziert werden, da sie ausreichende Differenzierungsmöglichkeiten im Standortfaktor Verkehr bietet und gleichzeitig strategisch relevante Entscheidungen zulässt. Aufbauend auf dieser Analyse wurde ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, das es erlaubt, standort- und verkehrsbezogene Entscheidungsvariablen simultan zu bestimmen. In einer anschließenden Simulationsstudie wurden auf Basis realitätsnaher Parameter verschiedene Szenarien hinsichtlich ihrer Kostenwirkungen analysiert. Ein besonderer Fokus lag dabei auf den Verhältnissen zwischen Transportkosten für Straßen- und Schienengütertransporten sowie dem Verhältnis von Preisen für Stücktransporte im Schienengüterverkehr gegenüber Ganzzugtransporten.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine simultane Planung unter bestimmten Bedingungen deutliche Kostenvorteile gegenüber einer sequenziellen Herangehensweise bieten kann. Besonders wirkungsvoll ist der kombinierte Ansatz, wenn hohe und stabile Transportvolumina mit mittleren bis großen Distanzen, eine gute intermodale Infrastruktur sowie politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen zur Förderung des Schienengüterverkehrs gegeben sind. Das entwickelte Modell bietet zudem eine methodische Grundlage zur Durchführung von Szenarioanalysen und kann auf andere Regionen und alternative Verkehrsmodi übertragen werden.

Insgesamt leistet die Arbeit einen Beitrag zur Weiterentwicklung integrierter Entscheidungsmodelle in der Standort- und Logistikplanung. Sie zeigt, dass durch die Kombi-

5 Zusammenfassung

nation betriebswirtschaftlicher und verkehrslogistischer Perspektiven realitätsnahe und praxisrelevante Handlungsempfehlungen generiert werden können. Die Implementierung des Modells in reale Planungskontexte erfordert jedoch eine weitergehende Validierung mit unternehmensspezifischen Daten sowie eine laufende Anpassung an sich verändernde externe Rahmenbedingungen.

Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard (2008). *Global production : a handbook for strategy and implementation*. ISBN: 978-3-540-71652-5.
- AG, DB InfraGO (o. D.). *Trassenfinder*.
- Agora Verkehrswende (Jan. 2023). *Verkehrssektor verfehlt 2022 erneut Klimaziel*. Pressemitteilung vom 4. Januar 2023. URL: <https://www.agora-verkehrswende.de/aktuelles/verkehrssektor-verfehlt-2022-erneut-klimaziel>.
- (2024). *Verkehrswende als Mehrwert*. Zugriff am 07. Mai 2025.
- Bankhofer, Udo (2001). *Industrielles Standortmanagement: Aufgabenbereiche, Entwicklungstendenzen ...* - Udo Bankhofer - Google Books. Springer. ISBN: 978-3-8244-7511-7.
- Bauermann, Tom, Patrick Kaczmarczyk und Tom Krebs (2024). *Ausbau der Stromnetze: Investitionsbedarfe*.
- Bienert, Michael Leonhard (1996). *Standortmanagement: Methoden und Konzepte für Handels- und ...* - Michael L. Bienert - Google Books. Bd. 194. Springer. ISBN: 978-3-409-13293-0.
- Bierwirth, Christian, Thomas Kirschstein und Frank Meisel (Nov. 2012). „On Transport Service Selection in Intermodal Rail/Road Distribution Networks“. In: *Business Research* 5 (2), S. 198–219. ISSN: 21982627. DOI: [10.1007/BF03342738](https://doi.org/10.1007/BF03342738).
- Bontekoning, Yvo M., Cathy Macharis und Joris J. Trip (Jan. 2004). „Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 38.1, S. 1–34. ISSN: 0965-8564. DOI: [10.1016/j.tra.2003.06.001](https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.06.001).
- Bundesrepublik Deutschland (2002). *§16 Hebesatz*. https://www.gesetze-im-internet.de/gewstg/_16.html. Gewerbesteuergesetz (GewStG).
- Contributors, OpenStreetMap (2024). *OpenStreetMap - Geodaten und Straßennetzdaten*. Zugriff am 4. März 2025.
- Crainic, Teodor Gabriel und K.H. Kim (Jan. 2006). „Intermodal Transportation“. In: *Transportation* 14, S. 467–537.
- Domschke, Wolfgang. (1996). „Logistik : Standorte“. In.
- Farahani, Reza Zanjirani und Masoud Hekmatfar (2009). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies* - Google Books. Springer. ISBN: 978-3-7908-2151-2.

- Farahani, Reza Zanjirani, Maryam SteadieSeifi und Nasrin Asgari (Juli 2010). „Multiple criteria facility location problems: A survey“. In: *Applied Mathematical Modelling* 34 (7), S. 1689–1709. ISSN: 0307-904X. DOI: [10.1016/J.APM.2009.10.005](https://doi.org/10.1016/J.APM.2009.10.005).
- Glatte, Thomas (2017). „Kompendium Standortstrategien für Unternehmensimmobilien“. In: ISSN: 1615-6013.
- Goette, Thomas (1994). *Standortpolitik internationaler Unternehmen*. Deutscher Universitätsverlag. ISBN: 978-3824402052.
- Grundig, Claus-Gerold (2018). *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen - Claus-Gerold Grundig - Google Books*. Carl Hanser. ISBN: 978-3-446-44215-3.
- Infrastruktursysteme IVI, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und (o. D.). *Entscheidungsunterstützung auf den drei Ebenen der Instandhaltungsplanung - Fraunhofer IVI*.
- Janic, Milan (Dez. 2008). „An assessment of the performance of the European long intermodal freight trains (LIFTS)“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42 (10), S. 1326–1339. ISSN: 0965-8564. DOI: [10.1016/J.TRA.2008.06.008](https://doi.org/10.1016/J.TRA.2008.06.008).
- Kik, David (2022). *Zur modellbasierten Entscheidungsunterstützung von Unternehmen in der regionalen Standortplanung und -entwicklung - TU Berlin*.
- Kik, David, Matthias Gerhard Wichmann und Thomas Stefan Spengler (Jan. 2022). „Decision support framework for the regional facility location and development planning problem“. In: *Journal of Business Economics* 92 (1), S. 115–157. ISSN: 18618928. DOI: [10.1007/S11573-021-01050-Z/TABLES/8](https://doi.org/10.1007/S11573-021-01050-Z/TABLES/8).
- Kinkel, Steffen (2009). *Erfolgsfaktor Standortplanung: In- und ausländische Standorte richtig bewerten - Google Books*. Springer. ISBN: 978-3-662-07079-6.
- Klimaschutz (BMWK), Bundesministerium für Wirtschaft und (2020). *Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen (StStG)*. Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 37, S. 1795, verkündet am 14.08.2020. Zuletzt abgerufen am 18.02.2025.
- Kraftfahrtbundesamt (2022). *Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge – Güterverkehr 2010-2022*. Zugriff am 4. März 2025.
- Kreus, Arno (2006). *Fundamente Kursthemen: Industrie / Dienstleistungen*. Klett. ISBN: 3623294306.
- Liu, Zhiyuan u. a. (2014). „Global Intermodal Liner Shipping Network Design“. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 61, S. 28–39. DOI: [10.1016/j.tre.2013.10.006](https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.10.006).
- Macharis, C. und Y. M. Bontekoning (März 2004). „Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review“. In: *European Journal of Operational Research* 153 (2), S. 400–416. ISSN: 0377-2217. DOI: [10.1016/S0377-2217\(03\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00161-9).
- Macharis, Cathy u. a. (Dez. 2011). „A decision support framework for intermodal transport policy“. In: *European Transport Research Review* 3 (4), S. 167–178. ISSN: 18670717. DOI: [10.1007/S12544-011-0062-5/TABLES/5](https://doi.org/10.1007/S12544-011-0062-5/TABLES/5).

- Mar Agamez-Arias, Anny del und José Moyano-Fuentes (Nov. 2017). „Intermodal transport in freight distribution: a literature review“. In: *Transport Reviews* 37 (6), S. 782–807. ISSN: 14645327. DOI: [10.1080/01441647.2017.1297868](https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297868).
- Mathisen, Terje Andreas und Thor Erik Sandberg Hanssen (Jan. 2014). „The Academic Literature on Intermodal Freight Transport“. In: *Transportation Research Procedia* 3, S. 611–620. ISSN: 2352-1465. DOI: [10.1016/J.TRPRO.2014.10.040](https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2014.10.040).
- Maßmann, Matthias (2006). *Kapazitierte stochastisch-dynamische Facility-Location-Planung: Modellierung ...* - Matthias Maßmann - Google Books. Deutscher Universitätsverlag. ISBN: 978-3-8350-0221-0.
- Meyer-Lindemann, H U (1951). *Typologie der Theorien des Industriestandortes*. Dorn.
- OpenStreetMap Contributors (2024). *OpenStreetMap Routing*. URL: <https://www.openstreetmap.org> (besucht am 23.04.2024).
- Ottmann, Matthias und Stephan Lifka (2010). „Methoden der Standortanalyse“. In: *Geowissen kompakt*.
- Pawellek, Günther (2014). *Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung* - Günther Pawellek - Google Books. Springer. ISBN: 978-3-662-43727-8.
- Prognose: Umsatz der Branche Güterbeförderung im Straßenverkehr in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Milliarden Euro) | Statista* (2024).
- Płaziak, Monika und Anna Irena Szymańsk (Jan. 2014). „Importance of Personal Factor in Decisions on Locating Enterprises“. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 110, S. 373–380. ISSN: 1877-0428. DOI: [10.1016/J.SBSPRO.2013.12.881](https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2013.12.881).
- Rabe, Markus, Sigrid Wenzel und Sven Spieckermann (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-540-35282-2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-35282-2).
- Schiengüterverkehr - Umsatz in Deutschland | Statista* (2021).
- Schill, Carl Otto (1990). *Industrielle Standortplanung : eine theoretische Konzeption und deren praktische Anwendung*. Lang. ISBN: 9783631424964.
- Slack, Brian (Feb. 1990). „Intermodal Transportation in North America and the Development of Inland Load Centers“. In: *The Professional Geographer* 42.1, S. 72–83. ISSN: 1467-9272. DOI: [10.1111/j.0033-0124.1990.00072.x](https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1990.00072.x).
- Stadieseifi, M. u. a. (Feb. 2014). „Multimodal freight transportation planning: A literature review“. In: *European Journal of Operational Research* 233 (1), S. 1–15. ISSN: 03772217. DOI: [10.1016/J.EJOR.2013.06.055](https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2013.06.055).
- Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr e.V. (2023). *Zahlen und Fakten 2023*. Zugriff am 07. Mai 2025.
- Transportleistung im deutschen Straßenverkehr bis 2025 | Statista* (2024).
- Transportleistung im Straßenverkehr in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2025 | Statista* (2021).

- UNECE (Okt. 2010). „Illustrated Glossary for Transport Statistics 4th Edition“. In: *Illustrated Glossary for Transport Statistics 4th Edition*. DOI: [10.1787/9789282102947-EN](https://doi.org/10.1787/9789282102947-EN).
- Unternehmen nach Unternehmensgröße in Deutschland / Statista (2021).
- Wang, Qian, Rajan Batta und Christopher M. Rump (Feb. 2004). „Facility location models for immobile servers with stochastic demand“. In: *Naval Research Logistics (NRL)* 51 (1), S. 137–152. ISSN: 1520-6750. DOI: [10.1002/NAV.10110](https://doi.org/10.1002/NAV.10110).
- Weber, A (1909). *Über den Standort der Industrien. Teil I: Reine Theorie des Standorts*. JCB Mohr, S. 16–57.
- Wenzel, Sigrid u. a. (2008). *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-540-35276-1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-35276-1).
- (WFBB), Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH und Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH (WFS) (o. D.). *Karte | Lausitz Investor Guide*.
- Wiendahl, Hans-Peter, Jürgen Reichardt und Peter Nyhuis (Apr. 2014). „Handbuch Fabrikplanung : Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten“. In: *Handbuch Fabrikplanung*. DOI: [10.3139/9783446437029](https://doi.org/10.3139/9783446437029).
- Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH (WFBB) (Aug. 2024). *Liste von verfügbaren Gewerbestandorten in der Lausitz*. Datenquelle.
- Yasenovskiy, Vladimir und John Hodgson (Sep. 2007). „Hierarchical location-allocation with spatial choice interaction modeling“. In: *Annals of the Association of American Geographers* 97 (3), S. 496–511. ISSN: 00045608. DOI: [10.1111/J.1467-8306.2007.00560.X](https://doi.org/10.1111/J.1467-8306.2007.00560.X).
- Yuchi, Qunli u. a. (Mai 2021). „Hybrid heuristic for the location-inventory-routing problem in closed-loop supply chain“. In: *International Transactions in Operational Research* 28 (3), S. 1265–1295. ISSN: 14753995. DOI: [10.1111/ITOR.12621](https://doi.org/10.1111/ITOR.12621).
- Zeng, Weiping, Ignacio Castillo und M. John Hodgson (Dez. 2010). „A Generalized Model for Locating Facilities on a Network with Flow-Based Demand“. In: *Networks and Spatial Economics* 10 (4), S. 579–611. ISSN: 1566113X. DOI: [10.1007/S11067-008-9073-8/TABLES/5](https://doi.org/10.1007/S11067-008-9073-8/TABLES/5).
- Zhang, Yue u. a. (Dez. 2010). „A bilevel model for preventive healthcare facility network design with congestion“. In: *IIE Transactions* 42 (12), S. 865–880. ISSN: 0740817X. DOI: [10.1080/0740817X.2010.491500](https://doi.org/10.1080/0740817X.2010.491500).
- Zheng, Xiaojin, Meixia Yin und Yanxia Zhang (März 2019). „Integrated optimization of location, inventory and routing in supply chain network design“. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 121, S. 1–20. ISSN: 0191-2615. DOI: [10.1016/J.TRB.2019.01.003](https://doi.org/10.1016/J.TRB.2019.01.003).
- (ZWL), Zukunftswerkstatt Lausitz (2021). *Lausitz 2050: Entwicklungsstrategie der Zukunftswerkstatt Lausitz*. Online-Publikation. Zuletzt abgerufen am 18.02.2025.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit „Simultane Standort- und Verkehrsträgerwahl unter Anwendung von nichtlinearer ganzzahliger Programmierung im Lausitzer Revier“ selbständig angefertigt und keine fremde Hilfe in Anspruch genommen habe. Alle Textstellen sowie Darstellungen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche einzeln kenntlich gemacht.

Ferner erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit in keinem anderen Studiengang und an keiner anderen Stelle als Prüfungsleistung verwendet wurde.

Im Rahmen der Anfertigung dieser Arbeit habe ich generative KI-Modelle von OpenAI (GPT-3.5/4.0, insbesondere die Varianten o3, 4o, 4o-mini, 4o-mini-high und 4.5) ausschließlich unterstützend eingesetzt. Die Nutzung beschränkte sich auf Formulierungshilfen, sprachliche Überarbeitungen sowie Vorschläge zur Strukturierung und Formatierung einzelner Textabschnitte. Die inhaltliche Ausarbeitung, Analyse und wissenschaftliche Argumentation erfolgten eigenständig. Alle KI-generierten Inhalte wurden kritisch geprüft, ggf. überarbeitet und flossen nur in dieser überarbeiteten Form in die Arbeit ein. Eine direkte Übernahme unbearbeiteter KI-Outputs erfolgte nicht. Die eigenständige wissenschaftliche Leistung der Arbeit bleibt gewahrt; der KI-Einsatz erfolgte im Einklang mit den Richtlinien guter wissenschaftlicher Praxis der Technischen Universität Berlin.

Berlin, 20. Mai 2025


Leo Weyer