

„Physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken“

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Antje Oetting

aus Dresden

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Wulf Schwanhäußer
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Ullrich Martin

Tag der mündlichen Prüfung: 04.11.2005

„Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.“

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	7
1 Einleitung.....	15
2 Einführung in die eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Grundlagen zum Leistungsverhalten	18
2.1 Modellzüge	18
2.2 Zeitliche Belegung einer Eisenbahnstrecke und abschnittsbezogene Kenngrößen.....	19
2.3 Verspätungsbegriffe und Qualitätskenngrößen.....	20
3 Stand der Forschung	25
3.1 Verfahren auf Grundlage einer Experteneinschätzung der Betriebsqualität	25
3.2 Physikalische Verfahren zur Beschreibung des Verkehrsflusses	28
3.3 Verkehrswirtschaftliche Ansätze mit Bewertung der Angebotsqualität.....	39
3.3.1 Ansätze zur monetären Verspätungsbewertung	39
3.3.2 Ansätze zur Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung.....	41
3.4 Arten der Kostenrechnung.....	45
3.5 Zusammenfassung	46
4 Problemstellung.....	48
4.1 Zielstellung	48
4.2 Herangehensweise	49

5	Eignung physikalischer Größen zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken.....	51
5.1	Ziel und Vorgehensweise.....	51
5.2	Physikalische Basisgrößen.....	52
5.3	Abgeleitete physikalische Größen.....	54
6	Herleitung der physikalischen Maßstäbe aus betriebswirtschaftlichen Ansätzen	60
6.1	Kostenfunktion.....	60
6.1.1	Grundlagen	60
6.1.2	Kosten des Fahrwegs	62
6.1.3	Kosten der Eisenbahnverkehrsunternehmen.....	64
6.1.4	Abschätzung der Bedeutung der Einflussgrößen für die Kosten an einem Beispiel	74
6.1.5	Zusammenfassung für die Kosten	89
6.2	Erlösfunktion für den Personenverkehr.....	90
6.2.1	Einleitung	90
6.2.2	Anzahl der Reisenden, Anzahl der Züge und spezifischer Erlös	93
6.2.3	Ansätze zur Berechnung der Nachfragereaktion auf die Fahrplan- und Betriebsqualität	96
6.2.4	Hypothese zur physikalischen Modellierung der Nachfragereaktion.....	121
6.2.5	Zusammenfassung für den Personenverkehr	135
6.3	Erlösfunktion für den Güterverkehr	136
6.3.1	Einleitung	136
6.3.2	Anzahl der Züge und spezifischer Erlös.....	137
6.3.3	Ansätze zur Berechnung der Nachfragereaktion auf die Fahrplan- und Betriebsqualität	140
6.3.4	Abschätzung der Bedeutung der Einflussgrößen auf den Erlös im Güterverkehr an einem Beispiel.....	146
6.3.5	Zusammenfassung für den Güterverkehr	154
6.4	Fazit.....	155

7	Physikalischer Maßstab zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken	157
7.1	Physikalische Größen für die Kosten und die Erlöse.....	157
7.2	Validierung der physikalischen Größen für die Erlöse und die Kosten.....	160
7.2.1	Einleitung	160
7.2.2	Grenzwerte der betriebswirtschaftlichen Größen.....	160
7.2.3	Verifizierung der Grenzwerte für die Summe der gewichteten Beförderungszeiten	161
7.2.4	Verifizierung der Grenzwerte für den Transportimpuls	162
7.2.5	Verlauf der Summe der gewichteten Beförderungszeiten zwischen den Grenzwerten	163
7.2.6	Verlauf des Transportimpulses zwischen den Grenzwerten	164
7.2.7	Berechnung des Gesamterlöses einer Eisenbahnstrecke mit physikalischen Größen	174
7.2.8	Zusammenfassung	175
7.3	Herleitung physikalischer Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken.....	176
7.3.1	Einleitung	176
7.3.2	Grenzwertbetrachtungen für die betriebswirtschaftlichen Kenngrößen.....	178
7.3.3	Physikalische Größen für die Produktivität und den Gewinn	179
7.3.4	Grenzwertbetrachtungen für die Transportkraft	182
7.3.5	Verlauf der Transportkraft zwischen den Grenzwerten.....	184
7.3.6	Berechnung der Gesamttransportkraft mit physikalischen Größen	198
7.3.7	Grenzwertbetrachtungen für die Transportimpulsdifferenz	199
7.3.8	Verlauf der Transportimpulsdifferenz zwischen den Grenzwerten.....	200
7.3.9	Bestimmung der Proportionalitätskonstanten c_E und c_K	215
7.3.10	Berechnung der Gesamttransportimpulsdifferenz mit physikalischen Größen.....	219
7.3.11	Zusammenfassung.....	220
7.4	Fazit.....	220

8	Berechnungsbeispiele	222
8.1	Einleitung.....	222
8.2	Methode und Eingangsgrößen	223
8.3	Eingangsdaten für die Eisenbahnstrecke Düren Hbf – Aachen Hbf.....	224
8.4	Variante 1 „Tagesstunden“	225
8.4.1	Berechnung des Transportimpulses	225
8.4.2	Berechnung des Erlöses und Vergleich mit dem Transportimpuls	229
8.4.3	Berechnung der Transportkraft	232
8.4.4	Berechnung der Produktivität und Vergleich mit der Transportkraft	236
8.4.5	Berechnung der Transportimpulsdifferenz.....	237
8.4.6	Berechnung der optimalen Auslastung bei befriedigender Betriebsquali- tät und Vergleich mit der Transportimpulsdifferenz.....	240
8.4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse für Variante 1	241
8.5	Varianten 2 und 3: Kürzere Betrachtungszeiträume.....	242
8.6	Variante 4: Anhebung der Streckengeschwindigkeit	251
8.7	Betriebsprogramme mit starrem Takt	256
8.8	Fazit.....	257
9	Zusammenfassung und Ausblick	259
10	Abbildungsverzeichnis	262
11	Tabellenverzeichnis	265
12	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkür- zungen	269
13	Literaturverzeichnis	277
	Anhang 1	285
	Anhang 2	287

Physikalische Größen zur Bestimmung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken

- Kurzfassung -

Zur Beurteilung der Auslastung und zur Bestimmung der optimalen Zuganzahl auf einer Eisenbahnstrecke ist ein Maßstab erforderlich, der die Auslastung auf der Grundlage der Fahrplan- und Betriebsqualität bewertet. In älteren Ansätzen erfolgt die Bewertung z. B. auf der Basis subjektiver Einschätzung von Betriebsqualität durch das Betriebsstellenpersonal, während neuere Methoden unter anderem betriebswirtschaftliche Größen verwenden.

Als betriebswirtschaftliche Größen werden beispielsweise die Produktivität oder der Gewinn verwendet. Diese Größen haben den Vorteil, eine unternehmerische Bewertung zu ermöglichen. Sie lassen sich aufgrund der vorhandenen Datenlage bei den Eisenbahnunternehmen jedoch nur schwer und grob ermitteln. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, einen leicht zu bestimmenden, physikalischen Bewertungsmaßstab auf der Basis betriebswirtschaftlicher Kenngrößen zu schaffen.

Die Entwicklung dieses Maßstabs erfolgt parallel auf zwei unterschiedlichen Wegen. Zunächst wird eine Übertragung der betriebswirtschaftlichen in die physikalischen Größen anhand von Analogieschlüssen vorgenommen. Daran schließt sich eine mathematische Überprüfung der gewonnenen Erkenntnisse an.

Der erste Weg umfasst die Prüfung physikalischer Basisgrößen auf ihre prinzipielle Eignung, Eigenschaften von Verkehrsabläufen (z. B. Mengen, Qualität) auf Eisenbahnstrecken zu beschreiben. Durch die geeignete Kombination der Basisgrößen zu abgeleiteten physikalischen Größen ergeben sich Kenngrößen für den gesuchten Maßstab. So lassen sich die *Masse* als mengenbeschreibende Größe und die *Zeit* beziehungsweise die *Geschwindigkeit* als Größen, die die Qualität widerspiegeln, beispielsweise zu einem Impuls oder einer Kraft verknüpfen.

Danach werden Einflüsse auf die verschiedenen Kostenarten und die Erlöse einer Eisenbahnstrecke identifiziert und für die wesentlichen Parameter die funktionalen Zusammenhänge anhand von physikalischen Basisgrößen beschrieben. Die Kosten hängen demnach neben dem Laufweg wesentlich von der Beförderungszeit ab. Daher wurde die *Summe der gewichteten Beförderungszeiten*, die die Kosten in Abhängigkeit von der Auslastung einer Eisenbahnstrecke widerspiegelt, als physikalische Größe gewählt. In diese Größe fließen zusätzlich zur Fahrzeit und zur Masse die Wartezeiten im Fahrplan und die Verspätungen ein. Die Untersuchung der Erlöse

ergab, dass sich die Menge durch die *Masse* und die Reaktion der Nachfrage gegenüber einem Ausgangszustand durch den Reziprokwert der *Beförderungszeit* beschreiben lassen. Die Erlöse als Produkt aus der durchschnittlichen Verkehrsleistung und der Nachfragereaktion auf Qualitätsveränderungen lassen sich somit als multiplikative Verknüpfung dieser beiden physikalischen Basisgrößen durch den *Transportimpuls* beschreiben.

Die Bewertung der Auslastung einer Eisenbahnstrecke ließe sich bei Verwendung von betriebswirtschaftlichen Größen sowohl durch die Produktivität als auch durch den Gewinn beschreiben. Die Produktivität, als Quotient aus Erlösen und Kosten, lässt sich in eine physikalische Größe, die im Weiteren die Bezeichnung *Transportkraft* hat, übertragen. Die physikalische Größe für den Gewinn ergibt sich als Differenz aus den beiden entwickelten physikalischen Größen für die Erlöse und die Kosten und wird als *Transportimpulsdifferenz* bezeichnet.

Des Weiteren konnten die entwickelten Ansätze für die Kosten, Erlöse, Produktivität und den Gewinn theoretisch auf Plausibilität überprüft werden, in dem ihr Funktionsverlauf dem der korrespondierenden betriebswirtschaftlichen Größen sowohl bezüglich der Grenzwerte an den Rändern des Definitionsbereichs als auch hinsichtlich des Verlaufs dazwischen gegenübergestellt wurden.

Der neue Ansatz konnte anhand verschiedener Beispieluntersuchungen bestätigt werden. Dabei erfolgte auch eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich unterschiedlicher Bezugszeiträume und unterschiedlicher Ausbauzustände einer Eisenbahnstrecke. Der Vergleich der mit dem physikalischen Ansatz erzielten Ergebnisse mit Ergebnissen von in der Praxis anerkannten Modellen ergab, dass die beiden physikalischen Größen „Transportkraft“ und „Transportimpulsdifferenz“ geringfügig größere optimale Belegungsgrade ergeben.

Mit dem neuen Ansatz steht ein Bewertungsmaßstab zur Verfügung, der es ermöglicht, sowohl die Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen als auch die Veränderungen der Infrastrukturnutzung beziehungsweise des Betriebsprogramms auf die Leistungsfähigkeit einer Eisenbahnstrecke mit vergleichsweise geringem Aufwand zuverlässig und schnell zu berechnen.

Physical Valuation Functions for the Assessment of the Load of Railway Lines

- Abstract -

The assessment of the load of a railway line and the determination of the optimal number of trains (called “practical capacity”) require a valuation function which limits the load-dependant waiting times of trains. If a line section is considered, waiting times arise before trains enter the section and also along their course through the section, including stations and junctions along the way. Waiting times may be delays (operational) or scheduled. Existing attempts to measure operational quality on railway lines as an effect of the level of waiting times have relied on the subjective assessment of quality by operation professionals; more recently, economic approaches have been tried.

In principle, productivity or profit parameters can be used for the microeconomic assessment. However, results can often be estimated only roughly and with difficulties due to the poor general availability of business data. Therefore, a new approach is taken in this thesis: the development of an easily applicable valuation function using parameters derived from physics (“physical parameters”) that are based on economic ones.

The valuation functions are developed in two independent ways. A common feature of both ways is the transition of economic into physical parameters through conclusion by analogy. The physical parameters are then checked towards their appropriateness for the new valuation functions by investigation of their convergence and their monotony.

The first way of developing the new valuation functions consists of testing the basic physical parameters towards their appropriateness for modelling the operation of railway lines in terms of quality and quantity. Through adequate combination of the appropriate basic parameters the physical parameters for the new valuation functions are derived. For instance, *mass* can be used as a basic parameter for modelling the transport volume, and the *velocity* is suitable for describing the transport quality; the linear combination of these two quantities will be a momentum.

The second way starts with identifying the parameters that influence costs and revenues and assessing their relevance. Physical parameters are then used to describe the functional form of those economic parameters.

The investigation shows that the *costs* mainly depend on the length of the line and the transport time. The transport time includes the scheduled transport time as well as operational waiting times (delays), which depend on the load of the line. In order to take account for the fact that different train types have different relevance for the total cost, the transport time of a train category is weighted by the sum of the masses of all trains of this category per time unit. The derived physical quantity is the *weighted sum of transport times*.

The *revenues* mainly depend on the transport length, the transport volume and the reaction of transport demand relative to a base scenario. The transport volume is modelled by the train mass, and the changes in demand are represented by the reciprocal value of the transport time. The physical parameter for the revenues is therefore the product of mass and velocity, which is a momentum. While the weighting factors for each train category are taken into account, the momentums of all trains are added up. The resulting quantity is called *transport momentum*.

Central parameters of the economic assessment of the load of a railway line are the profit and the productivity. The physical parameter describing the productivity is the quotient of the transport momentum and the weighted sum of transport times, called *transport force*. The physical parameter for modelling the profit is the difference between the physical quantities of revenues and costs and is called *transport momentum difference*.

In order to validate the new approach, the functional form of each physical quantity was compared with the functional form of the corresponding economic quantity. Both the convergence at the limits of the domain and the shape of the curves in between were examined.

Finally, the new approach was applied to several examples. A sensitivity analysis varying the time interval to be investigated and the dimensions of the infrastructure of a railway line was also carried out. The examples show that the new approach leads to values for the practical capacity which are slightly higher than those obtained by existing models, which tend to underestimate optimal train volumes.

The new valuation algorithm is therefore suitable for assessing the impacts that changes in the infrastructure and of scheduled train programmes exert on capacity. The assessment can be conducted swiftly, reliably and with relatively little effort.

Détermination de la capacité pratique des lignes ferroviaires basée sur la valorisation de la qualité de l'offre

- Résumé -

La valorisation du taux d'occupation et le calcul de la capacité pratique nécessitent une fonction de valorisation qui limite la perte de qualité engendrée par la congestion. La congestion s'exprime par les temps d'attente des trains (décalage des trains quant à la construction de l'horaire et retards). Ces temps d'attentes des trains apparaissent avant d'entrer en ligne ou en gare. Les modèles conventionnels négligent p. ex. l'effet de la congestion sur la qualité de l'offre (e. g. méthode de saturation), ils se basent sur l'évaluation subjective du taux d'occupation par le personnel d'exploitation ou ils essaient d'utiliser des grandeurs économiques.

Les grandeurs économiques englobent par exemple la productivité ou le gain. L'utilisation de ces grandeurs permet l'évaluation économique. Malheureusement, seulement peu des données nécessaires pour le calcul ont été relevé par les compagnies ferroviaires avec la précision requise. Cette thèse porte sur le développement d'un modèle facile à appliquer qui utilise des grandeurs physiques et qui est basé sur des approches économiques.

Le développement du modèle est réalisé de deux façons indépendantes. Les deux chemins comprennent la transformation des grandeurs économiques en grandeurs physiques par analogie. Puis, l'aptitude de ces grandeurs physiques pour le nouveau modèle est vérifiée en testant leur monotonie et leur convergence aux limites du domaine de définition.

Le premier chemin pour le développement du nouveau modèle consiste à tester les grandeurs physiques de base en regard de leur aptitude pour la modélisation de l'opération des lignes ferroviaires, en particulier la qualité et la quantité de transport. Par la combinaison des grandeurs physiques de base appropriées en grandeurs physiques dérivées les grandeurs requises pour le nouveau modèle ont été déduites. Par exemple, la masse qui constitue une grandeur de base est utilisée pour modeler le volume de transport et la vitesse décrit la qualité de transport ; leur combinaison linéaire donne la quantité de mouvement.

Le deuxième chemin pour le développement du nouveau modèle commence par l'étude des paramètres des coûts et des recettes et de l'importance des paramètres. Puis, les relations entre les paramètres importants et les coûts et les recettes sont modélisées en utilisant des grandeurs physiques.

L'étude démontre que les *coûts* dépendent d'abord de la distance parcourue sur la ligne étudiée et du temps de parcours sur cette ligne. Le temps de parcours comprend les temps d'attente des trains en fonction du taux d'occupation de la ligne, parce que les coûts augmentent avec la durée du capital engagé. Pour modéliser l'importance des différentes catégories de trains pour les coûts totaux, pour chaque catégorie de trains le temps de parcours est pondéré par la somme des masses de tous des trains de cette catégorie empruntant la ligne pendant un intervalle de temps donné. La grandeur physique pour les coûts est donc *la somme pondérée des temps de parcours*.

Les *recettes* sont déterminées en particulier par la longueur de trajet, le volume de transport et la réaction de la demande relative au scénario de base. Le volume de transport est modelé par la masse des trains et la réaction de la demande est décrite par la valeur réciproque du temps de transport. La grandeur physique pour les recettes est donc le produit de la masse et de la vitesse, donc la quantité de mouvement. La somme pondérée des quantités de mouvement de tous les trains sur la ligne (poids différents pour chaque catégorie de trains) est définie comme la *quantité de mouvement de transport*.

Les grandeurs économiques propre à l'évaluation économique de l'occupation d'une ligne ferroviaire sont la productivité et le gain. La productivité comme quotient des recettes et des coûts peut être modelée selon les dérivations précédentes par le quotient de la quantité de mouvement de transport et de la somme pondérée des temps de parcours et donc par la *force de transport*. La grandeur physique pour modeler le gain correspond à la différence des grandeurs physiques pour les recettes et les coûts. Elle est donc définie comme la *différence de la quantité de mouvement de transport*.

Pour valider la nouvelle approche, les valeurs aux limites du domaine de définition de chaque grandeur physique mentionnée ont été comparées aux valeurs des grandeurs économiques correspondantes. Puis, les courbes des fonctions entre les limites ont été comparées aussi.

Finalement, la nouvelle approche a été appliquée à plusieurs exemples, y compris des analyses de sensibilité relatif au temps de référence de l'étude et de l'infrastructure disponible. Les exemples montrent qu'en général la nouvelle approche donne des capacités pratiques un peu plus élevées que des modèles existants qui donnent des capacités inférieures aux volumes de trains en réalité.

Avec le modèle développé, les impacts des mesures de l'infrastructure et de l'opération sur la capacité pratique des lignes ferroviaires peuvent être calculés facilement de manière fiable, avec un coût relativement faible.

1 Einleitung

Die Mobilitätsbedürfnisse, das Verkehrsangebot auf der Schiene und die Eisenbahninfrastruktur verändern sich kontinuierlich. Eine Kernaufgabe jedes Eisenbahninfrastrukturunternehmens besteht daher in der ständigen Abstimmung der verfügbaren Infrastruktur auf den am Verkehrsmarkt erforderlichen Bedarf für verschiedene Zeithorizonte.

Für diese Abstimmung ist nicht die Infrastruktur an sich sondern die auf ihr sinnvoll realisierbare Verkehrsmenge relevant. Üblicherweise wird diese Verkehrsmenge in der Einheit „Züge pro Zeiteinheit“ beschrieben und als Fahrplan-Nennleistung bezeichnet. Für diese Zuganzahl lässt sich sowohl ein konfliktfreier Fahrplan konstruieren als auch der Betrieb mit zufriedenstellender (befriedigender) Betriebsqualität realisieren [14].

Durch die Gegenüberstellung der Fahrplan-Nennleistung und der vorhandenen oder prognostizierten Verkehrsmenge können Belastungen beurteilt und beispielsweise Engpässe oder schwach ausgelastete Infrastrukturelemente identifiziert werden. Aus diesem Abgleich lässt sich Handlungsbedarf ableiten. Des Weiteren dient die Fahrplan-Nennleistung als wesentliches Kriterium für die Bewertung von Investitionen in die Eisenbahninfrastruktur oder wesentlichen Veränderungen ihrer Nutzung.

Die Basis für die Ermittlung der Fahrplan-Nennleistung bilden eisenbahnbetriebswissenschaftliche Verfahren. Gegenstand solcher Verfahren sind die Abbildung der Infrastruktur von Eisenbahnstrecken und -knoten, die Abstraktion der Infrastrukturnutzung sowie die Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Infrastruktur, ihrer Nutzung und der Qualität im Fahrplan und im Betrieb. Die Qualität wird dabei anhand von Wartezeiten im Fahrplan und Wartezeiten im Betrieb (Folgeverspätungen) beschrieben.

Mit steigender Zuganzahl auf einem Infrastrukturelement sinkt die Qualität. Aus der anhand von eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren ermittelten Qualität als Funktion der Zuganzahl und der erforderlichen oder gewünschten Qualität ergibt sich die Fahrplan-Nennleistung. Der Qualitätsmaßstab wurde traditionell anhand von Erfahrungswerten grob festgelegt.

Als Alternative zur groben Schätzung der Qualität schlägt Schwanhäußer in [47] vor: „Man könnte nun die Leistungsfähigkeit [Anm.: heutige Fahrplan-Nennleistung] der

Bahnanlage dort suchen, wo bei einer hohen Zugzahl die Ausnutzung der Infrastruktur zu niedrigen Gesamtkosten der Infrastruktur führt und andererseits die Abwanderung von Fahrgästen und Gütern infolge der Qualitätseinbußen in einem Rahmen bleibt, bei dem die Differenz zwischen Tarifeinnahmen und Betriebskosten einen möglichst hohen Gewinn ausweisen.“ In jüngster Zeit wurden entsprechende Ansätze zur betriebswirtschaftlichen Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung entwickelt.

Da jedes Verkehrsunternehmen und damit auch ein Eisenbahnunternehmen, wirtschaftlich handeln muss, um auf dem Verkehrsmarkt bestehen zu können, ergibt sich die Notwendigkeit, mit betriebswirtschaftlichen Größen zu arbeiten. Für die Entscheidung über eine Investition in die Eisenbahninfrastruktur oder eine wesentliche Veränderung ihrer Nutzung reicht seit langem nicht mehr nur die betriebliche Notwendigkeit dieser Maßnahme aus. Aufgrund knapper Ressourcen ist es heute selbstverständlich, den wirtschaftlichen Nutzen der Maßnahme in die Entscheidung einzubeziehen.

Betriebswirtschaftliche Verfahren ermitteln die Verkehrsnachfrage als Funktion des Verkehrsangebots, zu dem unter anderem die Beförderungszeit und die mit eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren berechneten Wartezeiten zählen. Aus der Verkehrsnachfrage ergeben sich Erlöse.

Diesen sind, wie von Schwanhäußer dargestellt, zwecks Berechnung des Gewinns die Kosten gegenüberzustellen. Zu den Kosten zählen Aufwendungen für den Betrieb und den Fahrweg.

Die betriebswirtschaftlichen Verfahren haben allerdings das Problem, eine sehr umfangreiche Datengrundlage zu benötigen, die sich mit vertretbarem Aufwand kaum ermitteln lässt.

Da die Fahrplan-Nennleistung für die Infrastrukturplanung und -nutzung eine große Rolle spielt, ihre Ermittlung mit bestehenden Verfahren jedoch Probleme aufwirft, besteht Entwicklungsbedarf für ein sowohl theoretisch fundiertes als auch mit vertretbarem Aufwand anwendbares Verfahren. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung eines geeigneten Modells zur Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung einer Eisenbahnstrecke.

Wegen der Notwendigkeit betriebswirtschaftlicher Bewertungen muss das Modell auf einem betriebswirtschaftliche Methoden nutzenden Maßstab basieren. Um dem Problem der fehlenden Datengrundlage zu begegnen, soll die betriebswirtschaftliche Herangehensweise mit einem physikalischen Ansatz so verknüpft werden, dass als

Eingangsgrößen nur zur Verfügung stehende oder vergleichsweise leicht ermittelbare Daten erforderlich sind. Dazu können zum Beispiel mit bestehenden Verfahren ermittelte Wartezeiten im Fahrplan und im Betrieb zählen.

Nach einer Einführung in die eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Grundlagen zum Leistungsverhalten, erfolgt ein Abriss interessanter, existierender Verfahren zur Ermittlung der optimalen Auslastung einer Eisenbahnstrecke und zur Bewertung von Wartezeiten. Daran schließt sich die Prüfung der physikalischen Basisgrößen auf ihre prinzipielle Eignung sowie die Untersuchung der Einflüsse auf die verschiedenen Kostenarten und auf die Erlöse einer Eisenbahnstrecke an.

Abschließend werden die entwickelten Ansätze für die Kosten, die Erlöse und für die betriebswirtschaftlichen Kenngrößen theoretisch auf Plausibilität überprüft und es erfolgt eine Validierung der Ansätze anhand einer Beispielstrecke.

2 Einführung in die eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Grundlagen zum Leistungsverhalten

Eine Voraussetzung für die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung als eine Größe zur Bestimmung des Leistungsverhaltens einer Eisenbahnstrecke ist die Berechnung von Wartezeiten. In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Ermittlung dieser Wartezeiten mit Hilfe eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Verfahren beschrieben.

Aus den Modellzügen (Kap. 2.1), der Infrastruktur und dem Betriebsprogramm lassen sich die zeitlichen Belegungen (Kap. 2.2) als Grundlage für die Qualitätsberechnung und -bewertung (Kap. 2.3) ermitteln. Dabei werden jeweils die relevanten Begriffe vorgestellt.

2.1 Modellzüge

Für Untersuchungen zur Fahrwegkapazität sind neben Daten über die Infrastruktur auch Angaben zum Betriebsprogramm erforderlich. Dazu gehören technische und verkehrliche Angaben zu den einzelnen Zügen (z. B. Baureihe der Lokomotive, Halte) sowie Angaben zu deren Verspätungsverteilung.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und eines möglichst geringen Bearbeitungsaufwandes ist es oft zweckmäßig, einzelne Züge zu Zugfamilien zusammenzufassen. Diese Zusammenfassung ist gerechtfertigt, wenn die Züge gleiche oder ähnliche Eigenschaften haben. Ein Repräsentant einer solchen Zugfamilie wird auch Modellzug genannt.

Die Notwendigkeit für die Arbeit mit Modellzügen ergibt sich insbesondere dann, wenn für eine Untersuchung künftiger Zustände noch keine exakten Zugdaten zur Verfügung stehen und deshalb entsprechende Annahmen erforderlich sind. Die Verwendung eines Modellzuges, vor allem in den Beispielrechnungen, an Stelle eines Zuges, ändert jedoch nichts an der Allgemeingültigkeit der Aussagen zu einem Modell und ist im Wesentlichen aus Gründen der Vereinfachung gewählt.

2.2 Zeitliche Belegung einer Eisenbahnstrecke und abschnittsbezogene Kenngrößen

Züge verkehren auf den Eisenbahnstrecken der meisten europäischen Bahnen im Blockabstand. Dazu wird eine Eisenbahnstrecke durch Hauptsignale in Abschnitte eingeteilt, die verschieden lang sein können. In jedem dieser Blockabschnitte darf sich aus Gründen der Sicherheit höchstens ein Zug befinden. Erst wenn dieser Zug einen Schutzabschnitt hinter dem Signal des Blockabschnittes verlassen hat, kann ein nachfolgender Zug einfahren.

In Leistungsuntersuchungen wird in der Regel unterstellt, dass ein Stutzen des nachfolgenden Zuges vor Einfahrt in einen Block zu vermeiden ist. Um dies sicherzustellen, muss sich dieser Zug zum Zeitpunkt des Freiwerdens des Blocks noch vor dem Vorsignal befinden.

Die zeitliche Dauer der Belegung eines Blockabschnittes enthält also neben der reinen Fahrzeit zwischen zwei Hauptsignalen noch zusätzliche Komponenten. Zur Bezeichnung und zur Dauer der einzelnen Zeitkomponenten (vgl. [13]).

Die Summe der Komponenten, die die zeitliche Belegung eines Blockabschnitts durch einen Zug ergibt, heißt *Sperrzeit*. Die Aneinanderreihung der Sperrzeiten auf den Fahrwegabschnitten eines Zuges ergibt eine so genannte *Sperrzeitentreppe*, die die Zeit-Weg-Linie des Zuges einhüllt.

Die Sperrzeitentreppe ist sowohl die Voraussetzung für die konfliktfreie Erstellung eines Fahrplans als auch bei der Betriebsdisposition erforderlich. Mit Hilfe der Sperrzeitentreppe lässt sich der minimale zeitliche Abstand von zwei Zügen i und j ermitteln, in dem sich diese beiden Züge behinderungsfrei auf dem gemeinsam befahrenen Abschnitt folgen dürfen. Dieser Abstand wird *Mindestzugfolgezeit* z_{ij} genannt und am Anfang des gemeinsam befahrenen Abschnitts gemessen.

Folgen sich alle Züge auf einer Eisenbahnstrecke im Abstand der Mindestzugfolgezeiten, also in unmittelbarer Abfolge, wird die maximal mögliche Anzahl von Trassen erreicht. Diese Anzahl von Trassen ist als *Leistungsfähigkeit* n_{max} (vormals „theoretische Leistungsfähigkeit“) einer Eisenbahnstrecke definiert [14]:

$$n_{max} = \frac{t_U}{z} \quad (2.2-1)$$

mit

n_{max}	Leistungsfähigkeit einer Eisenbahnstrecke [Züge/h]
$\bar{z}$	mittlere Mindestzugfolgezeit [min]
t_U	Betrachtungszeitraum [h]

Während die Sperrzeiten die Belegung einer Strecke durch einen Zug beschreiben, gibt der *Belegungsgrad* ρ die Belegung über alle Züge wieder: „Der Belegungsgrad ist der zeitliche Anteil, an dem ein Fahrwegabschnitt durch Zugtrassen oder -lagen innerhalb eines Betrachtungszeitraums (Tag, Flutstunden u. ä.) belegt ist. ... Damit entspricht er dem zeitlich genutzten Anteil der Fahrwegkapazität.“ [14]

Da beim Erreichen der Leistungsfähigkeit keine nutzbaren Zeitlücken verbleiben, beträgt der zeitliche Anteil der genutzten Fahrwegkapazität 100 %. Folglich gilt für diesen Zustand $\rho = 1$.

2.3 Verspätungsbegriffe und Qualitätskenngrößen

Sowohl bei der Fahrplankonstruktion als auch im Betriebsablauf entstehen Abweichungen von der Wunschabfahrtszeit bzw. der geplanten Abfahrtszeit oder auch Abweichungen von der Wunschfahrzeit bzw. der geplanten Fahrzeit. Diese Abweichungen werden als planmäßige Wartezeiten t_{WF} bzw. als außerplanmäßige Wartezeiten t_{WB} bezeichnet.

Die Qualität des Betriebs wird in der Eisenbahnbetriebswissenschaft üblicherweise anhand der *außerplanmäßigen Wartezeiten* t_{WB} , insbesondere der Folgeverspätungen, beschrieben. Folgeverspätungen lassen sich u. a. nach dem Ort, für den ihre Angabe erfolgt, oder ihrer Ursache differenzieren.

Auf die Betriebsqualität wirkt sich insbesondere die Anzahl der Züge, die auf einer Eisenbahnstrecke verkehren, aus. Je mehr Züge auf einer Eisenbahnstrecke fahren, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Verspätungen übertragen werden. Des Weiteren hat auch der Zugmix einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebsqualität.

Verspätungen, die ein Zug in einen Untersuchungsraum hineinträgt, werden als *Eintruchsverspätungen* t_{VE} definiert.

Die Verspätung beim Verlassen des Untersuchungsgebiets wird *Ausbruchverspätung* t_{VA} genannt.

Zur quantitativen Beschreibung von Verspätungsverteilungen für Modellzüge dienen üblicherweise zwei Kenngrößen. Das Verspätungsniveau p_V gibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Verspätungen wieder und der Mittelwert $\bar{t}_V$ die mittlere Verspätung der verspäteten Züge.

Störungen im Betriebsablauf, zum Beispiel an Anlagen, von Betriebsmitteln bzw. im Personaleinsatz oder sonstige ungeplante Ereignisse, die zu außerplanmäßigen Fahr- oder Haltezeiten von Zügen führen, fallen unter den Begriff der *Urverspätung* t_{VU} .

Eine Urverspätung kann zu Behinderungen mit anderen Zügen führen. Die dadurch entstehenden Verspätungen werden als *Folgeverspätung* t_{VF} bezeichnet. Somit kann nicht nur ein Zug von einer Urverspätung betroffen sein, sondern es besteht durch die Übertragung dieser Verspätung die Möglichkeit der Entstehung neuer Verspätungen.

Die Größe und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Folgeverspätungen hängen des Weiteren von der Rangordnungsklasse, in die der Zug eingeordnet ist, ab. Diese Rangordnungsklassen legen die Priorisierung der Züge fest. Ein Zug hat gegenüber einem zweiten Zug dann einen Vorrang, wenn seine Rangordnungsziffer im Vergleich zu dem zweiten Zug kleiner ist. Bei Gleichrang verkehrt der zuerst fahrbereite Zug zuerst. Rangordnungen finden sowohl bei der Trassenvergabe als auch im Betriebsablauf Anwendung, wobei unterschiedliche Rangordnungsziffern für einen Zug möglich sind.

Die Summe der Folgeverspätungen $\sum t_{VF}$ die Züge auf einem Streckenabschnitt erleiden, kann als eine Kenngröße zur Beschreibung der Qualität des Betriebs einer Eisenbahnstrecke dienen. Die Qualität des Betriebs lässt sich auch über die dimensionslose Größe „*Länge der Warteschlange* l_{WB} “ angeben, mit:

$$l_{WB} = \frac{\sum t_{VF}}{t_U} \quad (2.3-1)$$

mit

l_{WB}	Länge der Warteschlange [-]
$\sum t_{VF}$	Summe der Folgeverspätungen [min]

t_U Betrachtungszeitraum [h]

Um die Entstehung von Folgeverspätungen zu dämpfen, werden bei der Fahrplan-konstruktion zwischen aufeinander folgenden Zugtrassen so genannte *Pufferzeiten* t_p eingeplant. Diese Pufferzeiten haben zur Folge, dass weniger Trassen in einem Fahrplan fahrbar sind, als sich als Zuganzahl infolge der Leistungsfähigkeit ergeben:

$$n_{max} \geq n'_{max} = \frac{t_U}{t_{perf} + z} \quad (2.3-2)$$

Daher kommt der qualifizierten Bemessung der Pufferzeiten, für die im Weiteren mehrere Verfahren aus der Literatur genannt werden, große Bedeutung zu. Eine ausführliche Beschreibung exemplarischer Ansätze enthält Kapitel 3.

Zur Dämpfung der Verspätungsübertragung dienen neben gezielt eingeplanten Mindestpufferzeiten weitere Zeitlücken. Dabei handelt es sich um Lücken zwischen den Trassen, die nicht für eine komplette weitere Zugtrasse ausreichen. Diese Lücken bilden zusammen mit den Mindestpufferzeiten die Pufferzeiten und stehen im Betriebszustand zur Verspätungsdämpfung zur Verfügung.

Die Anzahl der Zugtrassen je Betrachtungszeitraum, die in einen Fahrplan einlegbar sind und während des Betriebsablaufs voraussichtlich mit einer befriedigenden Betriebsqualität fahrbar sind, wird gemäß DS 405 als *Fahrplan-Nennleistung* n_{opt} (vormals „praktische Leistungsfähigkeit“) definiert. Die befriedigende Betriebsqualität ist für den Bereich der Deutschen Bahn AG gemäß Tabelle 2.3-1 festgelegt.

Verspätungsniveau		Bewertungsstufen
Gesamtsumme der Ausbruchs- und Ankunftsverspätungen endender Züge im Verhältnis zur Summe der Einbruchs- und Urverspätungen im betrachteten Untersuchungsbereich	verringert sich deutlich (Verspätungsabbau)	gut
	bleibt etwa gleich (Verspätung wird etwa beibehalten)	befriedigend
	steigt stark an (Verspätungszuwachs)	mangelhaft

Tab. 2.3-1: Stufen der Betriebsqualität [14]

Der Fahrplan-Nennleistung entspricht die Stelle der optimalen Auslastung einer Eisenbahnstrecke. Sie lässt sich außerdem mit der Leistungsfähigkeit im Nenner eines Quotienten auch als optimaler Belegungsgrad ρ_{opt} beschreiben.

Schwanhäußer schlägt 1974 für die Ermittlung der Fahrplan-Nennleistung in [45] die Begrenzung der Summe der Folgeverspätungen von 200 Minuten pro Tag und Richtung auf der untersuchten Strecke vor. Diesen Wert ermittelt er anhand einer Stichprobe von Daten der Zugüberwachung Karlsruhe für den Streckenabschnitt Offenburg – Lahr der Strecke Mannheim – Basel.

Da die Nachfrage im Personenverkehr empfindlicher auf Verspätungen reagiert als im Güterverkehr wurde dieser konstante, vom Zugmix unabhängige Wert aufgrund weiterer Untersuchungen [46] Anfang der 1980er Jahre verfeinert und in eine zulässige Summe der Folgeverspätungen in Abhängigkeit vom Anteil der Reisezüge umgewandelt.

Aus der gewünschten Betriebsqualität nach Tabelle 2.3-1 ergibt sich für einen bestimmten Zugmix nach [46] eine zulässige Länge der Warteschlange beziehungsweise eine zulässige Summe der Folgeverspätungen. Die Gegenüberstellung dieser gewünschten Qualität und der Qualität als Funktion des betrachteten Zugmixes liefert die mögliche Anzahl der Zugtrassen und die Summe der erforderlichen Pufferzeiten.

Eine andere Möglichkeit zur Beurteilung der Betriebsqualität besteht in der Modellierung der Nachfragereaktion der Endkunden auf Verspätungen und einer darauf aufbauenden anschließenden wirtschaftlichen Bewertung der Qualität (s. dazu Veröffentlichungen von [6], [35] u. a.).

Eine weitere Größe, die die optimale Zuganzahl einer Eisenbahnstrecke beeinflusst, sind die *Wartezeiten im Fahrplan* t_{WF} . Nicht jede Trasse eines Eisenbahnverkehrsunternehmens kann auf dem gewünschten Streckenabschnitt in der gewünschten Zeitlage realisiert werden. Wenn zwei Trassenwünsche für den gleichen Zeitpunkt vorliegen, muss mindestens eine Trasse verschoben werden.

Dem Endkunden sind die Wartezeiten im Fahrplan bereits bei der Planung der Reise bekannt. Daher werden diese Wartezeiten von ihm wie die Fahrzeit bewertet. Auch planmäßige Wartezeiten führen daher zu Einnahmeverlusten. Gleichzeitig steigen analog zu den außerplanmäßigen Wartezeiten die Kosten für das Eisenbahnverkehrsunternehmen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die optimale Zuganzahl auf einer Eisenbahnstrecke bestimmt wird durch den Zugmix, die Mindestzugfolgezeiten zwischen den Zügen und die Größe der Pufferzeiten zwischen den einzelnen Zugtrassen. Die Festlegung der Pufferzeiten hat so zu erfolgen, dass eine marktgerechte Qualität erreicht wird.

Die Bestimmung der Qualitätsmaßstäbe, anhand derer sich die Größe der Pufferzeiten ermitteln lässt, ist Gegenstand verschiedener Forschungsarbeiten. Dabei fließen beispielsweise empirische Erfahrungen, aber auch betriebswirtschaftliche Grundlagen ein. Auf die verschiedenen Ansätze wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

3 Stand der Forschung

Gegenstand dieses Kapitels ist ein Überblick über vorhandene Ansätze aus der Literatur, die für die vorliegende Arbeit Relevanz besitzen. Die Vorstellung der Arbeiten erfolgt nach den verschiedenen Arten der Bestimmung der Qualitätsmaßstäbe gegliedert.

3.1 Verfahren auf Grundlage einer Experteneinschätzung der Betriebsqualität

Traditionell wurde die Nennleistung anhand von Gleichung (2.3-2) und Annahmen für die Pufferzeit und zum Teil auch für die mittlere Mindestzugfolgezeit grob abgeschätzt. Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist der Berechnungsansatz von Dilli [22] von 1952. Er verwendet starre Pufferzeiten von im Allgemeinen 5,5 Minuten bei Mischbetrieb, mit denen sich die Fahrplan-Nennleistung nach Gleichung (2.3-2) berechnet:

$$n_{opt} = \frac{t_U}{5,5 \text{ min} + \bar{z}}$$

mit

n_{opt}	Fahrplan-Nennleistung [Züge/h]
t_U	Betrachtungszeitraum [h]
$\bar{z}$	mittlere Mindestzugfolgezeit [min]

Dieses Verfahren liefert auf einfache Weise grobe Ergebnisse. Dabei fehlen jedoch Aussagen zur Qualität. Es lässt sich daher nicht sicherstellen, dass mit der berechneten Fahrplan-Nennleistung eine marktgerechte Qualität erreicht wird. Möglich ist auch, dass wesentlich mehr Zugfahrten als berechnet mit geeigneter Qualität durchführbar wären. Wegen der großen Bedeutung der Qualität und der möglichen Zuganzahl auf das wirtschaftliche Ergebnis von Eisenbahnunternehmen erscheint der Ansatz nach Dilli nicht weitgehend genug.

Schwanhäußer hat mit seiner Dissertation [45] erstmals einen Zusammenhang zwischen der Fahrplan-Nennleistung und der Betriebsqualität entwickelt. Als Qualitätskenngröße wählt er die zulässige Summe der Folgeverspätungen, die Stauerschei-

nungen auf eine befriedigende Betriebsqualität beschränkt. Die zulässige Summe der Folgeverspätungen steht über den Betrachtungszeitraum im Zusammenhang mit der zulässigen Länge der Warteschlange im Betrieb (s. auch Gl. (2.3-1)).

Ein erster Ansatz zur Begrenzung dieser Stauerscheinungen ist die Festlegung der zulässigen Summe der Folgeverspätungen auf 200 Minuten pro Tag und Richtung auf der untersuchten Strecke. Da in besonderem Maße niederrangige Züge von Unregelmäßigkeiten betroffen sind, wirken sich Behinderungen im Betrieb besonders auf den Güterverkehr aus. Aufgrund dieser Festlegung der zulässigen Summe der Folgeverspätungen als Konstante werden bei unterschiedlichen Betriebsprogrammen die einzelnen Zuggattungen unterschiedlich stark mit Verspätungsminuten belastet. D.h., "eine über alle Streckenabschnitte gleich bleibende Betriebsqualität" [46] ist mit diesem Ansatz nicht gewährleistet.

Aus dieser Erkenntnis heraus haben Schwanhäußer/Schultze [46] einen neuen Maßstab in Abhängigkeit vom Anteil der Reisezüge am Betriebsprogramm entwickelt. Für die zulässige Länge der Warteschlange $l_{WB\ zul}$ bei befriedigender Betriebsqualität gilt:

$$l_{WB\ zul} = 1,0 \cdot 0,2569 \cdot e^{-1,3 \cdot p_{Rz}} \quad (3.1-1)$$

mit

$l_{WB\ zul}$ zulässige Länge der Warteschlange [-]

p_{Rz} Anteil der Reisezüge an allen Zugfahrten [%]

Für die anderen Stufen der Betriebsqualität nach Tabelle 2.3-1 beträgt der Wert für die zulässige Länge der Warteschlange die Hälfte für sehr gute Betriebsqualität und das Anderthalbfache für mangelhafte Betriebsqualität.

Grundlage ist eine empirische Untersuchung [46] bei der die vom Betriebsleitstellendienst der Deutschen Bundesbahn für 184 Streckenabschnitte „festgesetzten Leistungsfähigkeiten“ hinsichtlich der darin enthaltenen Parameter (z. B. die verschiedenen Mindestzugfolgezeiten für gleich- und verschiedenrangige Züge und der Anteil der Reisezüge am Betriebsprogramm) analysiert wurden.

Die Gleichung (3.1-1) bildet die Grundlage für die Berechnung der Fahrplan-Nennleistung mit dem Computerprogramm STRELE der SLS-Familie. Das Programm ermöglicht die Ermittlung der optimalen Anzahl der Züge in Abhängigkeit von der gewählten Betriebsqualität und dem Betrachtungszeitraum.

Dazu werden über Fahr-, Sperr- und Mindestzugfolgezeitberechnungen anhand der Häufigkeit der Zugfolgefälle die mittleren Mindestzugfolgezeiten für gleich- und verschiedenrangige sowie über alle Zugfolgefälle ermittelt. Mit Hilfe der Formel von Schwanhäußer [45] ist es daraufhin möglich, die vorhandene Summe der Folgeverspätungen zu errechnen.

Zusätzlich zur vorhandenen ermittelt STRELE die zulässige Summe der Folgeverspätungen für die einzelnen Qualitätsstufen (zur Definition der Qualitätsstufen s. [14]) sowie die entsprechenden Zuganzahlen bei unveränderten Häufigkeiten der Zugfolgefälle. Dieses analytische Verfahren befindet sich bei der Deutschen Bahn AG kontinuierlich im Einsatz.

Mit dem Ansatz von Schwanhäußer wurde es erstmals möglich, Aussagen über die Auslastung auf einer Eisenbahnstrecke auf der Basis der Qualität zu treffen. Voraussetzung dazu ist die Bewertung der Qualität in Hinblick auf ihre Marktfähigkeit. Die in diesem ersten Ansatz verwendete Abschätzung der Fahrplan-Nennleistung durch den Betriebsleitstellendienst könnte persönlichen Einschätzungen der Gefragten unterworfen sein. So lässt sich zum Beispiel nicht auszuschließen, dass auf einigen Streckenabschnitten zu niedrige Zuganzahlen als marktgerecht betrachtet wurden, obwohl diese Abschnitte auch mit höheren Zuganzahlen hätten befahren werden können.

Des Weiteren ist zu beachten, dass STRELE ausschließlich die Marktfähigkeit auf Basis der Qualität des Betriebs festlegt und die Eisenbahnstrecke ohne die Auswirkung der diese Strecke begrenzenden Knoten modelliert. Diese werden immer als uneingeschränkt aufnahmefähig angenommen.

Zur Gruppe der Verfahren ohne direkten Qualitätsbezug zählt ebenfalls das im UIC Kodex 406 hinterlegte Verfahren zur Ermittlung der Kapazität. Hinter diesem Begriff wird in diesem Fall die "Gesamtzahl von möglichen Zugtrassen in einem definierten zeitlichen Rahmen unter Berücksichtigung der derzeitigen Tassenmischung beziehungsweise bekannter Entwicklungen und der eigenen Hypothese der IB (Anm.: IB = Infrastrukturbetreiber), in Knotenpunkten, auf einzelnen Strecken oder einem Teil des Netzes mit marktorientierter Qualität..." [50] verstanden.

Die Methode basiert auf einer Komprimierung aller Zugtrassen innerhalb eines Zeitfensters auf ihre dichteste Lage und einer Abschätzung der Höhe dieser so genannten Infrastrukturbelegungszeit. Ob der so bestimmte Wert eine akzeptable Höhe annimmt oder nicht, wird anhand von Erfahrungswerten von circa 3000 km europäischem Streckennetz festgelegt.

Diese Methode der Komprimierung von Zugtrassen auf ihre dichteste Lage stellt eine Vereinfachung der Methode von Adler dar, die er in seiner Dissertation von 1967 beschrieben hat.

Somit liegt ein einfaches Verfahren vor, auf dessen Basis europaweit einheitlich Kapazität berechnet werden kann, das einer streckenspezifisch- und marktorientierten Ermittlung der Pufferzeiten jedoch nicht gerecht wird.

3.2 Physikalische Verfahren zur Beschreibung des Verkehrsflusses

Leutzbach befasste sich schon Mitte der 1950er Jahre, im Rahmen der Forschung auf dem Gebiet des Straßenverkehrs, mit physikalischen Größen wie *Verkehrsarbeit* und *Verkehrsleistung* [37]. Er definierte die Verkehrsarbeit als das Produkt aus der Verkehrsmenge M und dem Weg s und die Verkehrsleistung als das Produkt aus der Verkehrsmenge M und der Geschwindigkeit v . Voraussetzung für die Übertragung dieser Größen aus der Physik ist das von ihm vorgenommene Gleichsetzen der physikalischen Größe Kraft mit der Verkehrsmenge.

Im Straßenverkehr wurden bereits sehr früh Forschungen angeregt, um physikalische Kenngrößen für die Qualität des Betriebs zu identifizieren. Die folgende Zustandsgleichung vereint drei dieser Größen:

$$Q = k \cdot v \quad (3.2-1)$$

mit

Q	Verkehrsstärke [Fahrzeuge/h]
k	Verkehrsdichte [Fahrzeuge/km]
v	mittlere momentane Geschwindigkeit [km/h].

Dieser Zusammenhang ist im Fundamentaldiagramm (s. Abb. 3.2-1) für den Straßenverkehr dargestellt.

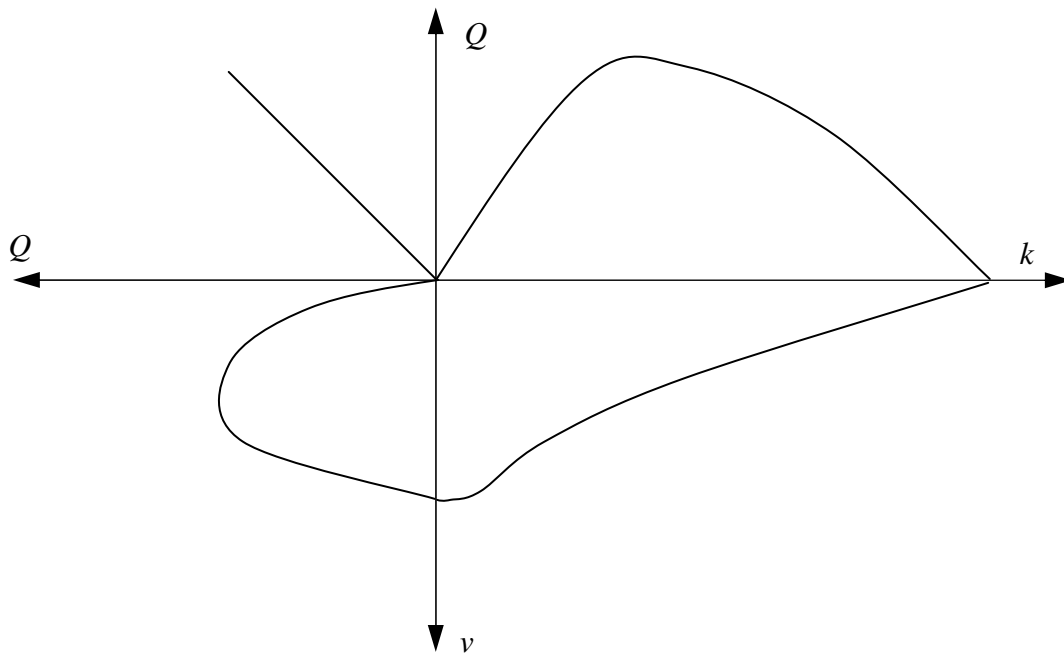


Abb. 3.2-1: Fundamentaldiagramm für den Straßenverkehr [eigene Darstellung]

Leutzbach erweitert Gleichung (3.2-1) zu:

$$Q \cdot v = k \cdot v^2$$

Bedingt durch die formelmäßige Ähnlichkeit mit der kinetischen Energie

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

wurde diese Größe auch als *äußere Verkehrsenergie* W_{kin} [23] bezeichnet. Über die theoretischen Überlegungen geht Leutzbach allerdings nicht hinaus; sowohl ein theoretischer Nachweis für die Richtigkeit des Ansatzes als auch eine Validierung anhand von Anwendungen fehlen.

Verschiedene Autoren der Dresdener Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ haben sich intensiv mit der Übertragung der Gesetzmäßigkeiten der Physik auf den Verkehr, insbesondere den Eisenbahnverkehr, beschäftigt. Dabei liegt der Fokus der Arbeiten auf einer hohen formellen Ähnlichkeit zwischen den Gesetzmäßigkeiten und Größen der Physik und der Beschreibung des Eisenbahnverkehrs. Die Diskussion der verschiedenen Arbeiten erfolgt in der Reihenfolge ihrer Erscheinungsjahre.

Gransalke beschäftigt sich in seinem Artikel [28] mit den Vorgängen in einem Rangierbahnhof. Er vergleicht sie mit dem Durchfluss einer Flüssigkeit durch eine Leitung und wendet darauf das Gesetz nach Bernoulli an.

Gransalke unterstellt, „..., daß die einzelnen Bedienungsphasen durch Verlagern von Bedienungshandlungen auf eine mittlere Anzahl von Bedienungskanälen nivelliert werden“. Die daraus entstehende einheitliche Querschnittsfläche entspricht der mittleren Anzahl der Bedienungskanäle. „Damit wird die Vorstellung verbunden, dass sich die Güterwagen beim Eintritt in das Bedienungssystem Rangierbahnhof gleichmäßig auf die einzelnen Bedienungskanäle verteilen und während der mittleren Wagenaufenthaltszeit mit gleichförmiger Geschwindigkeit den jeweiligen Bedienungskanal bis zum Verlassen des Bedienungssystems durchlaufen.“ Das Gesetz von Bernoulli lautet:

$$p_{\text{stat}} + p_{\text{stau}} = p_{\text{ges}} = \text{const}$$

Mit $p_{\text{Stau}} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ ergibt sich:

$$p_{\text{stat}} + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = p_{\text{ges}} = \text{const}$$

Durch Einsetzen der Größen für einen Rangierbahnhof wird daraus:

$$\frac{\bar{z}_{W_B} \cdot \bar{m}_W \cdot g}{A} + \frac{i_{W_{Ei}} \cdot \bar{m}_W \cdot t_U \cdot l_{Bf}}{V \cdot \bar{t}_{Auf}} = \text{const}$$

mit

$\bar{z}_{W_B}$ mittlere Anzahl der Bestandswagen

$\bar{m}_W$ mittlere Wagenmasse

A Fläche (wird anhand beobachteter Werte ermittelt)

$i_{W_{Ei}}$ Eingangswagenstrom

l_{Bf} Bahnhofslänge

V Volumen (wird anhand beobachteter Werte ermittelt)

$\bar{t}_{Auf}$ mittlere Wagenaufenthaltszeit

Die Gleichung lässt sich schließlich in folgende Form bringen:

$$z_{W_B,m} + C \cdot \frac{i_{W_{Ei}}}{t_{Auf,m}^2} = K \quad (3.2-2)$$

Die beiden Größen K und C sind für einen zu untersuchenden Bahnhof statistisch zu ermitteln und haben für den Betrachtungszeitraum und diesen Bahnhof konstanten Charakter.

Anhand der Gleichung (3.2-2) kann beispielsweise abgelesen werden, welche mittlere Anzahl Bestandswagen eine beabsichtigte oder gegebene Leistung mit den kleinsten mittleren Wagenaufenthaltszeiten ermöglicht.

Den Nachweis, dass das Kontinuitätsgesetz auf die Vorgänge in Rangierbahnhöfen angewendet werden darf, führt Gransalke auf empirische Weise, in dem er 14 Rangierbahnhöfe untersucht.

Potthoff beschäftigt sich in einem Artikel [41] mit dem Zusammenhang zwischen dem Wagenbestand und der Stromstärke und greift dabei auf die Erkenntnisse von Gransalke zurück. Anhand verschiedener Modelle versucht er, die Betriebsverhältnisse am Beispiel eines Direktionsbezirkes zu beschreiben. Da seiner Meinung nach weder Mittelwerte oder Streuungsmaße noch Korrelationen sinnvolle Ergebnisse liefern, wählt Potthoff ein „dynamisches“ Modell aus der Mechanik, und zwar den Satz über die Erhaltung der Energie.

Der in einem System vorhandene Wagenbestand besitzt eine potentielle Energie:

$$E_{\text{pot}} = z \cdot m_{Wg} \cdot g \cdot h$$

mit

E_{pot}	potentielle Energie des Wagenbestands im Direktionsbezirk
z	Wagenbestand
m_{Wg}	Masse eines Wagens
g	Erdbeschleunigung
h	technologische Höhe (wird aus beobachteten Werten ermittelt)

Der Wagenstrom y , der im Betrachtungszeitraum t_U fließt, besitzt folgende kinetische Energie E_{kin} :

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot y \cdot m_{\text{Wg}} \cdot t_U \cdot \left(\frac{l_s}{t_a} \right)^2$$

mit

E_{kin}	kinetische Energie des durchfließenden Wagenstroms
y	Wagenstrom
m_{Wg}	Masse eines Wagens
l_s	Länge des Systems
t_a	Aufenthaltszeit im System

Nach dem Energieerhaltungssatz ist die Summe aus E_{kin} und E_{pot} konstant, so dass Potthoff nach mehreren Umformungen folgenden Zusammenhang erhält:

$$z + y \cdot \frac{C}{t_a^2} = K \quad (3.2-3)$$

mit

C	Parameter der technologischen Größe (wird anhand beobachteter Werte ermittelt)
K	Konstante (Fassungsvermögen des Systems)

Somit bestätigt er die Gültigkeit der durch Gransalke aufgestellten Gleichung (3.2-2). Potthoff stellt die Aufenthaltszeit t_a als Quotient aus dem Wagenbestand z und dem Wagenstrom y dar, so dass sich aus Gleichung (3.2-3) ergibt:

$$z + y^3 \cdot \frac{C}{z^2} = K$$

Der vorhandene Wagenstrom lässt sich somit ermitteln zu:

$$y = \sqrt[3]{\frac{z^2 \cdot (K - z)}{C}}$$

Für das von Potthoff verwendete Beispiel ergibt sich qualitativ das in Abbildung 3.2-2 dargestellte Diagramm.

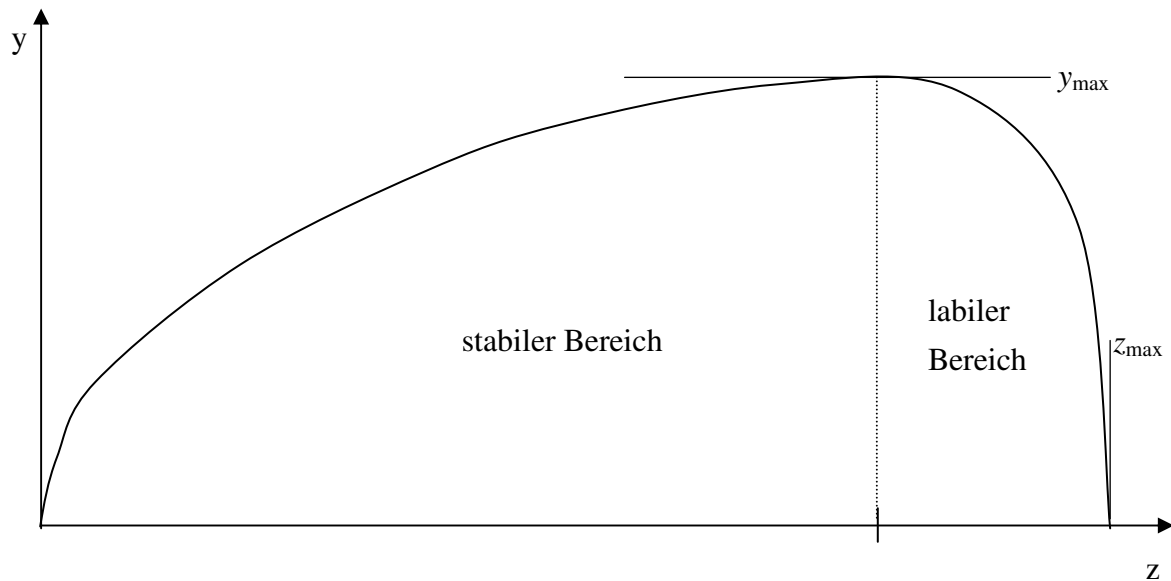


Abb. 3.2-2: Zusammenhang zwischen Wagenbestand und Weiterleitung [41]

Dieses Modell bildet damit auch die beobachtete Tatsache ab, dass mit wachsendem Wagenbestand der Wagenstrom abnimmt. Deshalb arbeitet das untersuchte System im Bereich unterhalb von z_{opt} stabil, während es oberhalb von z_{opt} in einem instabilen Bereich arbeitet, da sich mehr Wagen ansammeln als aus dem System abfließen.

Weiterführende Forschungen für eine Anwendung auf Eisenbahnstrecken als diese Anwendungsbeispiele sind nicht bekannt. Unklar bleibt, wie sich bei Gransalke die Fläche A und das Volumen V eines Rangierbahnhofs bzw. bei Potthoff die technologische Höhe h des Direktionsbezirks allgemeingültig, ohne empirische Werte, bestimmen lassen.

Eine weitere Anwendung der Idee, physikalische Gesetze direkt auf den Eisenbahnverkehr zu übertragen, stellt das von Hofmann entwickelte Makromodell zu Netzbelastung und Transportgeschwindigkeit der Eisenbahn dar [32]. Er geht davon aus, dass für das eindimensionale Kontinuum mit der Wegkoordinate x und der Zeitkoordinate t die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial K}{\partial t} = 0 \quad (3.2-4)$$

mit

- P Belegung oder Stromstärke und
- K Zugstromdichte

gilt.

Es wird von ihm somit unterstellt, dass sich die Gesetzmäßigkeiten der Dynamik von Gasen oder Flüssigkeiten auf Verkehrsströme ohne Anpassungen übertragen lassen. Den Beweis für die Richtigkeit dieser Aussage tritt Hofmann allerdings nicht an.

Die Veröffentlichung enthält in der Ableitung einer Formel einen Fehler, so dass die daraus abgeleiteten Aussagen über das Belegungsmaximum, die dazu gehörige Zugstromdichte und Geschwindigkeit nicht weiter verwertbar sind.

Das Vorgehen von Hofmann wirft weitere Fragen auf. So wird von ihm vorausgesetzt, dass für Vorgänge im Eisenbahnverkehr die Isothermie gilt, also der Zustand einer Strömung nur von den beiden Größen Druck und Volumen abhängt. Eine explizite Erläuterung zur Richtigkeit dieser Annahme gibt Hofmann nicht. Auch bleibt offen, ob alle weiteren Modellvoraussetzungen ohne Einschränkung erfüllt sind. Es stellt sich die Frage, ob es überhaupt erlaubt ist, ein Eisenbahnnetz als Raum zu betrachten, für den die Sätze zu Massenerhalt bzw. Energieerhalt oder die Kontinuitätsgleichung gelten. Diese Frage müsste für die direkte Anwendung von Gesetzmäßigkeiten der Physik auf eisenbahnbetriebliche und -verkehrliche Fragestellungen grundsätzlich geklärt werden.

Hertel [31] greift die Überlegungen von Leutzbach auf und führt die physikalische Herangehensweise der Dresdener Forscher fort. Er beschäftigt sich dabei aber vor allem mit der Frage, ob die Aussagen des Fundamentaldiagramms des Straßenverkehrs ohne Anpassungen auf den Eisenbahnverkehr übertragbar sind.

Hertel stellt fest, dass bei Eisenbahnen im Gegensatz zum Straßenverkehr in der Regel im Raumabstand gefahren wird und somit der Zugabstand nicht vom Bremsweg abhängt. Daraus ergibt sich für ihn folgende Feststellung: "Demzufolge kann auch keine endliche maximale Verkehrsstärke innerhalb einer konvexen Funktion $\lambda = f(k)$ bei endlicher Geschwindigkeit festgestellt werden [Anm.: λ : Verkehrsstärke]" [32]. Daraus schließt Hertel: "Das Fundamentaldiagramm des Straßenverkehrs existiert für im festen Raumabstand fahrende Eisenbahnen nicht" [31] und widerspricht damit den bis dahin getroffenen Aussagen anderer Autoren.

Um dennoch den von der Dichte abhängigen mittleren Abstand der Züge mit der Betriebsqualität zu verbinden, bildet Hertel das Produkt aus Zugdichte EL_b und Beförderungsgeschwindigkeit v_B , das er mittlere *Verkehrsleistung* EQ nennt:

$$EQ = EL_b \cdot \bar{v}_B \quad \text{oder}$$

$$EQ = ET_F \cdot \frac{n}{t_U} \cdot \frac{\text{Einheitsweg}}{ET_V} \quad (3.2-5)$$

mit

EQ	mittlere Verkehrsleistung [Züge·km/Zeiteinheit]
EL_b	mittlere Verkehrsdichte [Züge]
$\bar{v}_B$	mittlere Beförderungsgeschwindigkeit
ET_F	Mittelwert der Fahrzeit
n	Anzahl der im Betrachtungszeitraum t_U fahrenden Züge
Einheitsweg	normierte Weglänge [1 km]
ET_V	mittlere Verweilzeit eines Zuges auf der Strecke

Dieses Produkt zeigt als Kurve über der Auslastung oder der Zugdichte aufgetragen einen konvexen Verlauf (vgl. Abb. 3.2-3). Die Verkehrsleistung stellt für Hertel allerdings nur eine obere Grenze der Auslastung, entsprechend der Verkehrsstärke im Straßenverkehr, dar.

Weiterhin wird von ihm als untere Grenze der Auslastung die so genannte *relative Fahrplanempfindlichkeit* $EMPF$ definiert. Diese Größe gibt an, wie empfindlich ein Fahrplan – Hertel bezeichnet damit unterschiedliche Betriebsprogramme mit gleichem Zugmix – gegenüber Zuganzahländerungen ist.

Die beiden Größen Verkehrsleistung EQ und Fahrplanempfindlichkeit $EMPF$ haben Eingang in eine Vorgängerversion der DS 405 [12] gefunden (dort wird anstelle des Begriffs „Verkehrsleistung“ die Bezeichnung „Beförderungsenergie“ verwendet).

Hertel normiert die Verkehrsleistung EQ zur besseren Vergleichbarkeit von Eisenbahnstrecken untereinander auf einen Einheitsweg von 1 Kilometer. Durch die Aufteilung der mittleren Verweilzeit ET_V in ihre Komponenten mittlere Wartezeit und mittlere Fahrzeit entsteht aus Gleichung (3.2-5):

$$EQ = \frac{n \cdot \frac{ET_F}{t_U}}{ET_F + ET_{WF}}$$

mit

ET_{WF}	Mittelwert der planmäßigen Wartezeiten
-----------	--

Durch eine Normierung auf die Leistungsfähigkeit entsteht die normierte Verkehrsleistung EQN in Abhängigkeit vom Belegungsgrad ρ :

$$EQN = \frac{\rho}{1 + \frac{ET_{WF}}{ET_F}} \quad (3.2-6)$$

mit

EQN normierte Verkehrsleistung [-]

ρ Belegungsgrad [-]

Das Maximum der Kurve ergibt sich für verschiedene von ihm untersuchte Strecken bei Belegungsgraden zwischen 0,5 und 0,7.

Die relative Fahrplanempfindlichkeit $EMPF$ ermittelt Hertel wie folgt:

$$EMPF = \frac{\delta ET_{WF}}{\delta \rho \cdot ET_{WF}} \quad (3.2-7)$$

Der Verlauf dieser Kurve über den Belegungsgrad ist ebenfalls konvex (vgl. Abb. 3.2-3). Mit der Lage des Extremums steht ein zweiter Wert für den Belegungsgrad zur Verfügung. Bei dessen Unterschreiten ergibt sich für einen Zugmix kein bemerkenswerter Qualitätsgewinn mehr, so dass die Betriebsführung bei Belegungsgraden arbeiten sollte, die nicht niedriger liegen als der Belegungsgrad bei minimaler relativer Fahrplanempfindlichkeit.

Ein Beispiel für den Verlauf der beiden Kurven liefert Abbildung 3.2-3. Als Arbeitsbereich für die Betriebsführung schlägt Hertel den Bereich zwischen den Belegungsgraden $\rho_{\inf}$ und $\rho_{\sup}$, die durch die Extrema der Kurven gebildet werden, vor.

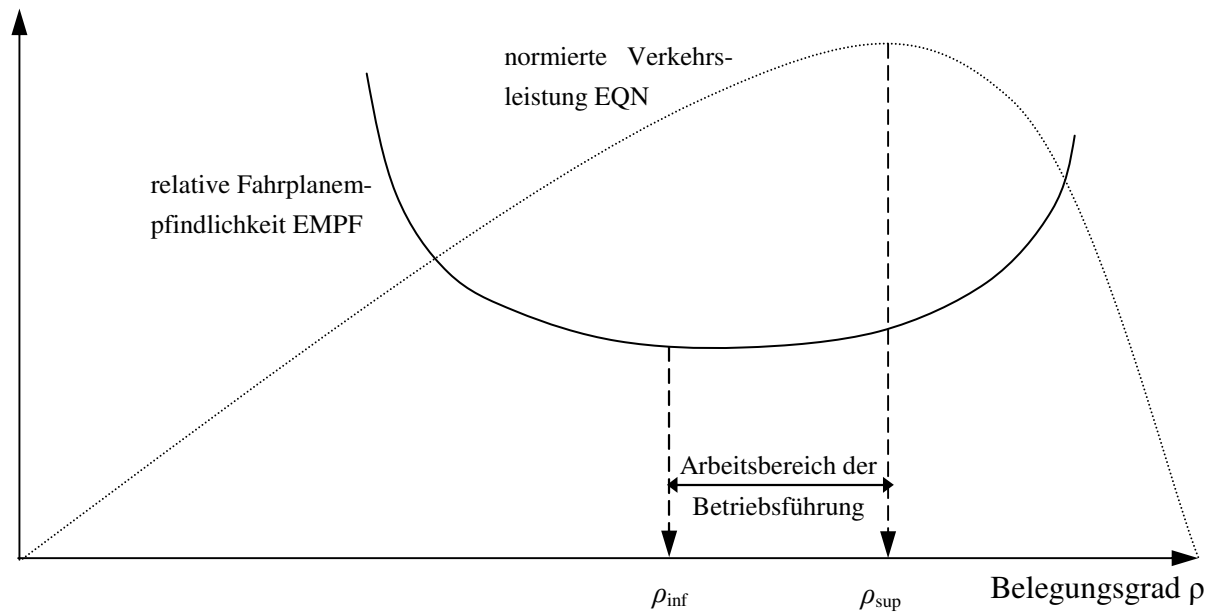


Abb. 3.2-3: Normierte Verkehrsleistung EQN und relative Fahrplanempfindlichkeit $EMPF$ als Funktion des Belegungsgrades ρ [31]

In den älteren Arbeiten der Dresdener Schule ist eine klare Unterscheidung zwischen planmäßigen und außerplanmäßigen Wartezeiten nicht vorgenommen worden. Auch Hertel hat für sein Modell diese Unterscheidung nicht explizit vollzogen, bewertet aber letztendlich nur die Qualität im Fahrplan; der Betriebsablauf wird nicht berücksichtigt. Da Hertel nicht nach Modellzügen differenziert, lassen sich Unterschiede im Kapazitätsverbrauch nicht berücksichtigen.

Im Straßenverkehr existieren ebenfalls Forschungen mit dem Ziel, zur Beurteilung der Qualität des Verkehrsflusses *eine* Größe zu identifizieren. Die Grundlage für die Überlegungen bildet das bereits erwähnte Fundamentaldiagramm. Die maximale Verkehrsstärke Q stellt darin das Maß für die Kapazität einer Straße dar. Sie ist allerdings nur ein reines Häufigkeitsmaß, zu dessen qualitativer Beurteilung weitere Größen, wie beispielsweise die Verkehrsichte k oder die mittlere momentane Geschwindigkeit v , herangezogen werden müssen. Ziel dieser Forschungen ist es daher, die Aussagen über Quantität und Qualität zusammenzufassen.

In dem Artikel [25] beschreibt Franke die Übertragung des in der Physik existierenden Fick'schen Gesetzes für kontinuierliche Transportphänomene auf den diskontinuierlichen Straßenverkehrsfluss.

Zum Fick'schen Gesetz schreibt Franke: „Dieses Gesetz ist in der Physik anerkannt zur einheitlichen Beschreibung von ganz verschiedenen Transporterscheinungen im Elementarteilchen- und im Makrobereich. Es definiert trotz der unterschiedlichen

Vorgänge einheitlich die pro Zeiteinheit transportierte Menge der jeweiligen Transportelemente als proportional zu einer Kraft.“ [25]

Zunächst versucht Franke eine Verkehrsmessgröße als Produkt aus Verkehrsstärke Q und mittlerer Geschwindigkeit v zu bilden. Diese hat aber gemäß der Aussage des Autors „die wenig einleuchtende Dimension einer Beschleunigung“ [25]. Da es laut Franke „jedoch schwer einzusehen ist, warum bei Übergang zu einer mehrdimensionalen Messgröße gerade die Massendimension außer Ansatz bleiben sollte“ [25], multipliziert er dieses Produkt mit der Fahrzeugmasse. Die so entstehende Dimension der Kraft führt ihn auf das oben aufgeführte Gesetz.

Das Produkt aus der Masse der Fahrzeuge und der Momentangeschwindigkeit bezogen auf die Bruttozeitlücken bildet einen so genannten „Transportkraftbeitrag“ pro Fahrzeug. Das Aufteilen in verschiedene „Transportkraftbeiträge“ soll das Problem umgehen, dass das Fick'sche Gesetz für kontinuierliche Phänomene gilt, es sich beim Straßenverkehr aber um diskontinuierliche Vorgänge handelt.

Aufsummiert über alle Fahrzeuge in einem Zeitintervall von 3600 Sekunden ergibt sich die Messgröße Transportkraft, die sich als Größe zur Beurteilung des Straßenverkehrsflusses eignen soll. Über die Größe des „Transportkraftbeitrags“ wird auf den Kapazitätsverzehr des jeweiligen Fahrzeugs geschlossen. Die Einführung der Fahrzeuggewichte als dritte Größe neben der Verkehrsstärke und der mittleren momentanen Geschwindigkeit könnte die unterschiedliche Beanspruchung zum Beispiel der Fahrbahn durch die Fahrzeuge widerspiegeln.

Da gemäß Hertel die Zusammenhänge des Fundamentaldiagramms des Straßenverkehrs mit den drei Größen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit nicht für den Eisenbahnverkehr gültig sind, kann auch dieser Ansatz des Transportkraftbeitrags nicht auf den Eisenbahnverkehr übertragen werden. Des Weiteren wäre ein wissenschaftlich fundierter Beweis der Gültigkeit des Fick'schen Gesetzes für den Straßenverkehr für die Akzeptanz des Verfahrens hilfreich. Zu diesem Thema sind Arbeiten im Gange [3].

Anhand der vorliegenden Literatur stellt sich heraus, dass die physikalischen Verfahren durchaus geeignet sind, den Verkehrsfluss zu beschreiben. Eine Bewertung der Angebotsqualität, wie in Unterkapitel 2.3 beschrieben, ermöglichen diese Verfahren bisher allerdings nicht.

3.3 Verkehrswirtschaftliche Ansätze mit Bewertung der Angebotsqualität

Unterkapitel 3.3 stellt verschiedene verkehrswirtschaftliche Ansätze zur Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung von Eisenbahnstrecken vor. Dabei werden jeweils die Kosten und Erlöse in Abhängigkeit von der Auslastung einer Eisenbahnstrecke ermittelt und in betriebswirtschaftlichen Kenngrößen miteinander verrechnet.

Sowohl in die Kosten- als auch in die Erlösberechnung fließen die Wartezeiten im Fahrplan und im Betrieb ein, die sich auf diese Weise bewerten lassen. Bei den Kosten ist die Bewertung der Wartezeiten im Fahrplan und im Betrieb nahezu gleich, da sie beide zu einer Erhöhung der zeitabhängigen Kosten (z. B. Ressourcenbindung) führen und somit mit den gleichen Kostensätzen bewertet werden.

Die Erlöse hängen, wie in Unterkapitel 2.3 ausgeführt, vom Nachfrageverhalten ab. Üblicherweise wird zumindest für den Personenverkehr in einschlägigen Arbeiten davon ausgegangen, dass der Endkunde Verspätungen negativer bewertet als im Fahrplan enthaltene Wartezeiten. Somit bedarf es für die Ermittlung der Erlöse eines Verkehrsnachfragemodells, das diese unterschiedlichen Bewertungen der Wartezeiten abbildet. Ein solches Modell sollte gleichzeitig auch andere, wesentliche Reisezeitkomponenten und Reisekosten berücksichtigen.

Zunächst wird kurz auf Arbeiten eingegangen, die Vorläufer für die betriebswirtschaftlichen Ansätze zur Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung darstellen. Als wesentliche Beiträge seien Arbeiten von British Rail [6], Mühlhans [39] und Ackermann [2] genannt, die sich mit der Bewertung von Verspätungen im Personenverkehr befassen.

3.3.1 Ansätze zur monetären Verspätungsbewertung

Mühlhans stellt in [39] einen Ansatz zur Verspätungsbewertung vor, der nicht nur die reinen Betriebsmehrkosten umfasst. Mühlhans schlägt vor, zusätzlich entweder die volkswirtschaftlichen Kosten oder die betriebswirtschaftlichen Erlösminderungen infolge einer Reisezeitverlängerung zu berücksichtigen.

Die Höhe der volkswirtschaftlichen Kosten für eine Minute je Reisendem oder Zug bestimmt er zuggattungsspezifisch anhand einfacher linearer Zusammenhänge zwischen bestimmten Besetzungsgraden und den volkswirtschaftlichen Kosten (deren

Herkunft er nicht weiter erläutert) einer Verspätungsminute. Diese Werte sind streckenunabhängig und auch unabhängig von der Höhe der Verspätung.

Die betriebswirtschaftlichen Ertragsminderungen aus der Änderung der Reisenden-zahlen schätzt er mit Hilfe des Verfahrens von British Rail [6] ab. In diesem Verfahren wird ein Gewichtungsfaktor für die Verspätung angegeben. Der Reisende empfindet demnach eine Verspätungsminute 2,5mal stärker als „unangenehm“ als eine Minute geplante Fahrzeitverlängerung. Mit Hilfe dieses Wertes sowie der Nachfrageelastizitäten lassen sich die Auswirkungen der ungeplanten Fahrzeitverlängerungen auf die Nachfrage und damit auf die Erlöse ermitteln. Für die Werte der Elastizitäten wird in [39] nach Zügen innerhalb und außerhalb des Pendelverkehrs unterschieden.

Auf diese Weise lassen sich neben den Betriebsmehrkosten, die Mühlhans nicht explizit berechnet, auch die Auswirkungen von Verspätungen auf die Erlöse und den volkswirtschaftlichen Nutzen prognostizieren. Eine weitergehende Differenzierung der Nachfrageelastizitäten insbesondere nach Zuggattungen wäre hilfreich.

Ackermann [2] greift den Ansatz von Mühlhans auf. Er untersucht die Bewertung der Verspätung

- gegenüber der Beförderungszeit und
- in Abhängigkeit von der Zuggattung.

Als Grundlage führt er „stated preferences“ Befragungen der heutigen Bahnnutzer in verschiedenen Zuggattungen des Schienenpersonenfernverkehrs der DB AG durch. Die Auswertung dieser Befragung bestätigt die Größenordnung der britischen Zahlen: in Abhängigkeit von der Zuggattung wird vom Kunden in Deutschland eine Minute Verspätung 2,8 bis 3,2 mal stärker als eine Minute Fahrzeit bewertet.

Durch Einsetzen von zuggattungsspezifischen oberen und unteren Grenzwerten für die Verspätungsbewertung und Nachfrageelastizitäten von INTRAPLAN in die Formeln von BR [6] ergibt sich die Nachfragereaktion. Daraus ermittelt Ackermann anhand des Ansatzes von Weigand [19] den Erlösverlust je Verspätungsminute und Zuggattung. Wegen der oben aufgeführten Spannbreite für die Bewertungsfaktoren ergeben sich obere und untere Eckwerte für den Erlösverlust. Wie Mühlhans berücksichtigt auch Ackermann für die Verspätungsbewertung die betrieblichen Mehrkosten. Ackermann beschränkt sich dabei jedoch auf die Mehrkosten durch erhöhten Energieverbrauch und erhöhten Personalaufwand.

Die betrieblichen Mehrkosten und die Erlösverluste fasst Ackermann wie Mühlhans zu Kostensätzen je Verspätungsminute zusammen, die mit dem Verspätungszuwachs multipliziert werden müssen. Daraus ergeben sich so genannte Mindestkostensätze je Verspätungsminute.

Im Vergleich zu British Rail liefert die Arbeit von Ackermann für deutsche Verhältnisse Werte für den Faktor zur Bewertung der Verspätung im Vergleich zur Beförderungszeit. Außerdem lässt sich der Einfluss von Verspätungen auf das Wirtschaftsergebnis der Deutschen Bahn AG generell abschätzen. Da Ackermann durchschnittliche Nachfrageeigenschaften (z. B. einen mittleren Erlös je Reisenden-km) unterstellt, lässt sich die Nachfragereaktion je Verspätungsminute und Zuggattung nicht streckenspezifisch ermitteln.

3.3.2 Ansätze zur Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung

Die im Weiteren vorgestellten Ansätze von Jochim und Sauer ermöglichen über die Verspätungsbewertung und die Bestimmung der Erlösminderung hinaus die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung. Die Grundlage bilden die zuggattungsspezifischen Berechnungen der Kosten und einer erlösmindernden Größe, jeweils in Abhängigkeit von der Streckenauslastung.

Jochim stellt in [35] den Kosten die Erlöse, die er jeweils zuggattungsspezifisch und in Abhängigkeit von der Auslastung berechnet, gegenüber.

Als Kosten berücksichtigt er sowohl die Kosten des Eisenbahnverkehrsunternehmens als auch die Instandhaltungskosten des Eisenbahninfrastrukturbetreibers. Die konstanten Fahrweg- und Gemeinkosten fließen nicht in seine Berechnung ein, da sie bei der von Jochim gewählten Methode keinen Einfluss auf die Höhe der Fahrplan-Nennleistung haben.

Die Erlöse berechnet Jochim aus dem Erlös je Personen- oder Tonnenkilometer und der Verkehrsleistung. Er nimmt dabei an, dass Züge nur dann verkehren, wenn eine entsprechende Nachfrage vorhanden ist. Würden die Nachfragereaktionen auf die Fahrplan- und die Betriebsqualität vernachlässigt, stiegen die Verkehrsleistung und damit die Erlöse somit proportional zur Streckenauslastung: „Die Erlöskurve verläuft hingegen degressiv, weil größer werdende Wartezeiten bei den Kunden zur Unzufriedenheit und damit letztlich zur Wahl eines anderen Verkehrsmittels führen.“ [35]

Die Erlöswirkung der Fahrplan- und Betriebsqualität ermittelt Jochim sowohl mit dem oben beschriebenen Ansatz von Ackermann als auch mit dem VIA-Widerstandsmodell, das er zu diesem Zweck entsprechend weiterentwickelt. Beide Wege führen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Wie Abbildung 3.3-1 zeigt, steigen die Erlöse mit wachsender Auslastung zunächst aufgrund der zunehmenden Verkehrsleistung linear an. Bei größeren Zuganzahlen zeigen sich die Auswirkungen der Qualitätseinbußen auf die Verkehrsnachfrage und damit auf die Erlöse, so dass die Kurve mit wachsender Auslastung und steigenden Wartezeiten fällt.

Die Kurve der Kosten verläuft durch den Koordinatenursprung, da die fixen Kosten nicht berücksichtigt sind. Mit zunehmender Auslastung steigt sie infolge der zugfahrt-spezifischen Kosten zunächst proportional zur Zuganzahl. Bei größeren Auslastungen lassen sich die Auswirkungen der Wartezeiten auf die Kosten erkennen.

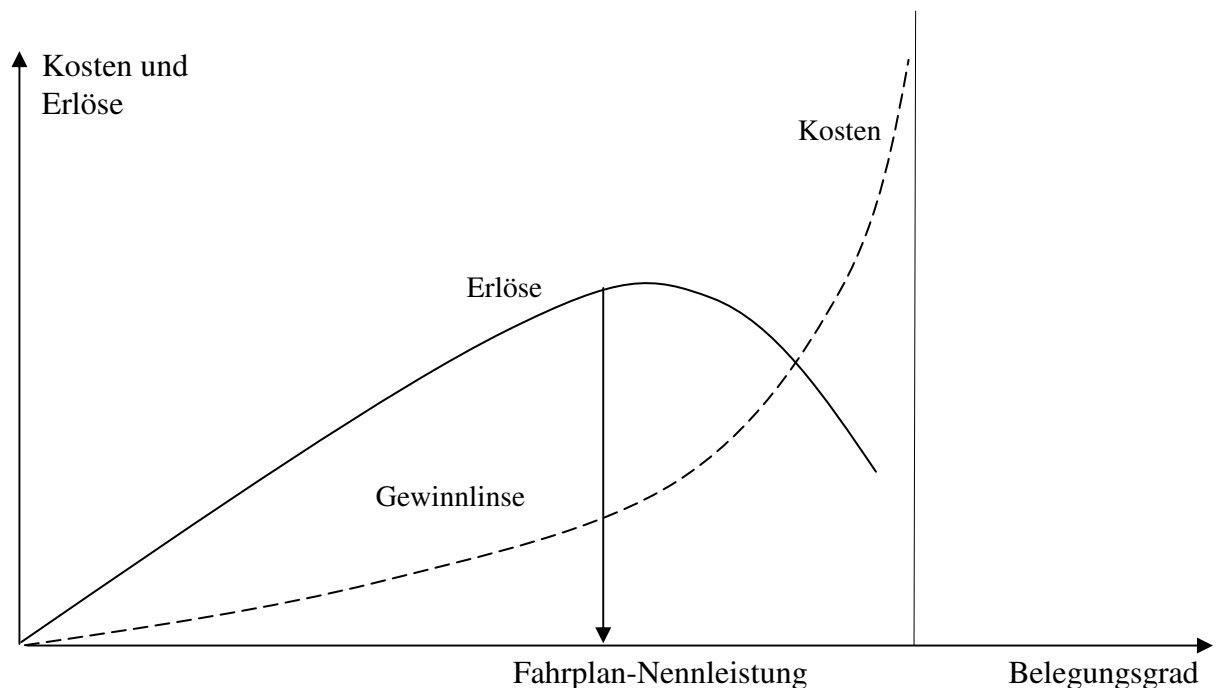


Abb. 3.3-1: Prinzipskizze der Gewinnlinse [35]

Die Differenz der Erlöse und der Kosten ergibt den Gewinn. Der in der Abbildung dargestellte Bereich des positiven Gewinns weist eine linsenartige Form auf. Er gab dem Verfahren den Namen „Gewinnlinse“, das von Schwanhäüßer erstmals 1986 in [47] erwähnt wurde.

Die optimale Auslastung einer Strecke liegt an der Stelle, an der der Gewinn sein Maximum annimmt. Aus betriebswirtschaftlichen Überlegungen schließt Jochim, dass die Zuganzahl an dieser Stelle gleich der Fahrplan-Nennleistung ist.

Das Verfahren der Gewinnlinse ermöglicht die Berechnung der Fahrplan-Nennleistung einer Eisenbahnstrecke nach betriebswirtschaftlichen Maßstäben. Auch ist es Jochim gelungen, die Reaktion der Nachfrage im Personenverkehr insbesondere auf Verspätungen zu modellieren.

Aufgrund der Datenlage hat Jochim auf streckenspezifische Besetzungs- oder Belegungsgrade und die Erlöse je Reisendem- oder Tonnen-Kilometer verzichten müssen. Ein Hinderungsgrund für einen weitreichenden Einsatz in der Praxis liegt im Aufwand zur Beschaffung der notwendigen Eingangsdaten: für eine exakte Bestimmung der optimalen Zuganzahl sind streckenbezogene und zuggattungsspezifische Werte erforderlich.

Die verwendete Methode sowie die dafür von Jochim geschaffenen theoretischen Grundlagen, erscheinen die bisher am besten geeigneten zur Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung zu sein.

Sauer [43] entwickelt in seiner Arbeit zwei Wege zur Abschätzung der optimalen Auslastung von Eisenbahnstrecken. Zum einen ermittelt Sauer den Verlauf der Produktionskosten über die Auslastung, wählt die optimale Auslastung einer Strecke an der Stelle des Kostenminimums und zeigt die Kostenempfindlichkeit des Eisenbahnbetriebs in Bezug auf die Betriebsverhältnisse auf. Zum anderen untersucht er, bei welcher Streckenauslastung die Produktivität maximal wird.

Die Produktivität verwendet Sauer gemäß der Definition von Geschwendtner und Alt: „Unter Produktivität versteht man die Ergiebigkeit der Produktionsfaktoren im Produktionsprozeß. Sie wird gemessen durch die Relation der Erzeugnismenge zu den Einsatzmengen und stellt somit eine Mengenrelation dar.“ [27] Für die Erzeugnismenge verwendet er die Größe „dynamische Betriebsleistung“, in die auch die Beförderungszeit einfließt, und als Einsatzmenge die Kosten der Zugförderung.

Die dynamische Betriebsleistung P_B berechnet er wie folgt:

$$P_B = \text{Betriebsmenge} \cdot \text{Beförderungsgeschwindigkeit} \quad (3.3-1)$$

Als Betriebsmenge verwendet er die beförderte Menge in der Einheit Züge pro Tag.

Die Kosten berechnet Sauer nach der DS 454 [18]. Sie enthalten die Betriebsführungs- und Vorhaltungskosten für die Zugfahrt und den Fahrweg ohne die Zugbildungs- und Abfertigungskosten.

Der Quotient aus der dynamischen Betriebsleistung und den bei der Zugförderung anfallenden Kosten ergibt die Produktivität R :

$$R = \frac{\text{Betriebsmenge} \cdot \text{realisierte Beförderungsgeschwindigkeit}}{\text{Kosten}}$$

Wird die Produktivität über die Zuganzahl aufgetragen, bildet sich ein parabelförmiger Verlauf aus (s. auch Abb. 3.3-2). Die Produktivität steigt bei vorgegebener Zuganzahl mit dem Anteil der Personenzüge (P_z). Weiterhin ist zu beobachten, dass sich die Lage des Optimums (optimaler Belegungsgrad) mit steigendem Güterzuganteil (G_z) leicht nach rechts verschiebt.

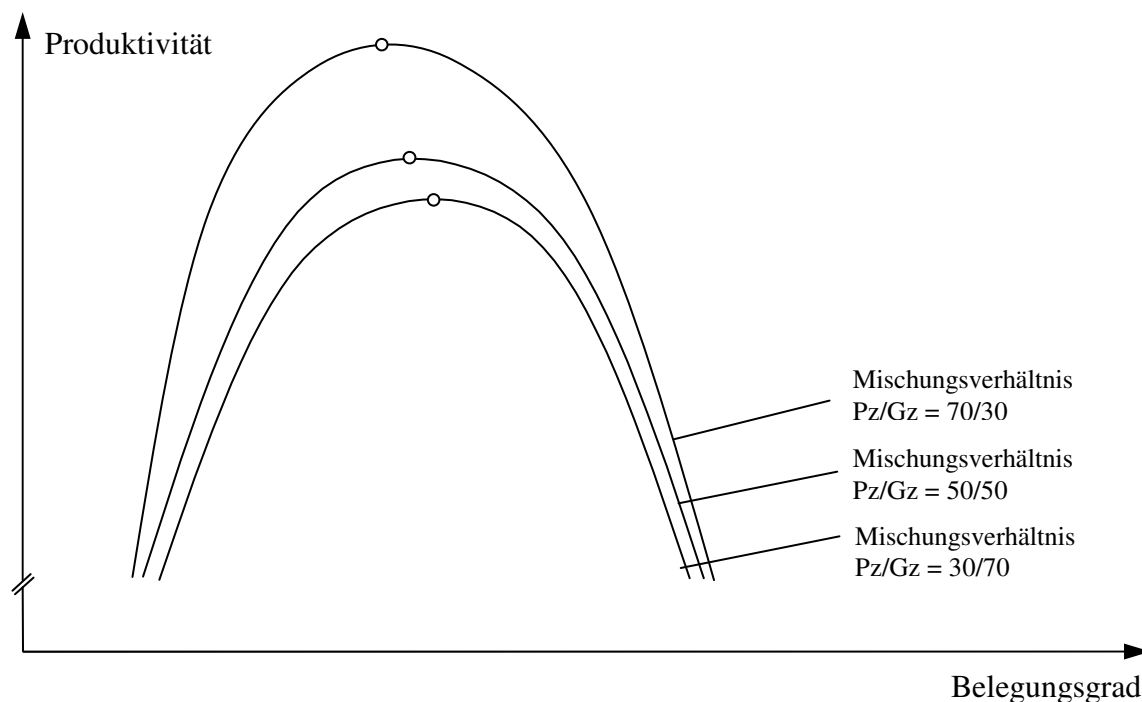


Abb. 3.3-2: Kurve der Produktivität für verschiedene Mischungsverhältnisse [43]

Sauer verwendet letztendlich nur die Produktivität, um die Betriebsqualität einer Eisenbahnstrecke zu beurteilen, da er richtigerweise das Kostenminimum als betriebswirtschaftliche Größe zur Beurteilung der optimalen Auslastung einer Eisenbahnstrecke für nicht geeignet hält.

Vor einer weiteren Verwendung dieses Ansatzes müssten mehrere Punkte diskutiert und geklärt werden: Sauer legt seinem Maßstab für die Qualität, der Produktivität, keine echte Betriebsleistung zugrunde. So verändert sich die von ihm definierte dynamische Betriebsleistung nicht mit zunehmender Laufweglänge, solange die Beförderungsgeschwindigkeit unverändert bleibt. Es fehlen auch Überlegungen, wie der spezifische Beitrag der einzelnen Zuggattungen zum Erlös – zum Beispiel ausgedrückt durch die Zugmasse – Berücksichtigung finden könnte.

Außerdem existiert keine wissenschaftliche Fundierung seines Vorgehens. So begründet Sauer die Eignung seiner dynamischen Betriebsleistung vor allem mit der Ähnlichkeit dieser Größe zu Leutzbachs Verkehrsenergie. Die Eignung der Produktivität als monetäre Größe für die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung wird nur auf empirischen Weg eingeschätzt.

3.4 Arten der Kostenrechnung

Jochim und Sauer haben in ihren Ansätzen unterschiedliche Kostenbestandteile unberücksichtigt gelassen. Als Grundlage für die vorliegende Arbeit wird im Weiteren dargestellt, welche Kostenbestandteile auf welche Weise Eingang in die Berechnung der Kosten finden sollten.

Die Kosten für den Betriebsprozess lassen sich mit einer Vollkosten- oder einer Teilkostenrechnung zusammenstellen.

Bei der Vollkostenrechnung werden alle innerhalb einer Periode anfallenden Kosten auf die jeweiligen Produkte eines Unternehmens umgelegt. Unterschiede zwischen verschiedenen Arten der Vollkostenrechnung liegen in der unterschiedlichen Art der Gemeinkostenaufschlüsselung. Dadurch lassen sich die Ergebnisse der Vollkostenrechnung deutlich beeinflussen.

Üblicherweise wird eine möglichst verursachergerechte Zuschreibung der Gemeinkosten versucht. Dabei ergibt sich jedoch die Schwierigkeit, dass “die Auswahl und Anwendung der Gemeinkostenschlüssel nie sachlich einwandfrei als verursachergerecht eingeschätzt werden kann” [1, S. 268]. Gleiches gilt für die Proportionalisierung der Fixkosten auf die einzelnen Leistungseinheiten, wodurch eine Berechnung auf Basis der Ist- oder Prognosezugzahl erfolgt. Außerdem besteht das prinzipielle Problem, dass Fixkosten auf langfristigen Prognosen basieren. Aberle erklärt dazu: “Wenn auch die geplante Ausbringungsmenge je Leistungseinheit eine wesentliche Determinante für längerfristige Entscheidungen darstellt, so haben die Fixkosten

doch mehrdimensionalen Charakter, mit der Folge, dass diese nicht isoliert auf die einzelnen, gemeinsam wirksamen Kosteneinflussgrößen verursachungsgerecht zu verteilen sind" [1, S. 269].

Eine Alternative dazu stellen die verschiedenen Systeme der Teilkostenrechnungen dar (s. auch [44]). Hier gehen nur die Kosten ein, die für den kostenrechnerischen Zweck auch wirklich relevant sind. Eine Art der Teilkostenrechnung ist die Deckungsbeitragsrechnung. Sie verzichtet auf die Aufteilung der Fixkosten und Gemeinkosten und ermöglicht damit eine korrekte Ermittlung der durch die betrachtete Entscheidung (z. B. Infrastrukturmaßnahmen) direkt ausgelösten Kosten. Die Differenz zwischen den einer Entscheidung anrechenbaren Erlösen und Kosten bildet der Deckungsbeitrag. Die nicht den einzelnen Produkten zurechenbaren Kosten werden in so genannten Deckungsbudgets aufgefangen. Dieser Ansatz der Kostenaufteilung eignet sich noch am Besten für die Bewertung von Maßnahmen. Schierenbeck führt dazu aus: „Überall dort, wo die Aufgabe der Kostenrechnung in der rechnerischen Fundierung von unternehmenspolitischen Entscheidungen gesehen wird, sind also Teilkostenrechnungen einzusetzen.“ [44, S. 638] Vor diesem Hintergrund sei angemerkt, dass sich die Deutsche Bundesbahn (und später auch die Deutsche Bahn AG) vom Prinzip der Vollkostenrechnung hin zum Prinzip der Direktkostenrechnung gewandt hat und seit 1987 eine Deckungsbeitragsrechnung aufbaut.

Für die Berechnung der Kosten einer Zugfahrt stehen sowohl das bei der Deutschen Bundesbahn entwickelte System der Zugkostenrechnung [18], eine Vollkostenrechnung, als auch der Ansatz einer Deckungsbeitragsrechnung von Breimeier [5] zur Verfügung. Auf beide Verfahren wird in Unterkapitel 6.1 ausführlich eingegangen.

3.5 Zusammenfassung

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass verschiedene Verfahren zur Beschreibung des Verkehrsflusses oder seiner Bewertung existieren, jedoch nur wenige die Ermittlung einer Fahrplan-Nennleistung ermöglichen.

Die vorgestellten physikalischen Ansätze bedienen sich im Wesentlichen physikalischer Gleichungen und Sätze der Dynamik und der Strömungslehre zur Beschreibung des Verkehrsablaufs. Diese Ansätze zeichnen sich durch eine hohe formelle Ähnlichkeit mit der Beschreibung des entsprechenden physikalischen Vorgangs aus; Unterschiede zwischen dem Eisenbahnwesen und der Physik werden dabei in der

Regel vernachlässigt. Eine über die näherungsweise Beschreibung des Verkehrsablaufs hinausgehende Bewertung ist nicht möglich.

Hertel entfernt sich mit seinem Ansatz bereits deutlich von diesen strengen Analogieschlüssen. Es gelingt ihm damit eine erste physikalische Bewertung der Qualität. Eine Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung wird dadurch noch nicht möglich.

Traditionell erfolgte die Berechnung der Fahrplan-Nennleistung anhand einer mehr oder weniger genau bestimmten mittleren Mindestzugfolgezeit und einer pauschalen Annahme für die mittlere Pufferzeit. Mit dem Ansatz von Schwanhäußer ließen sich die qualitätsbestimmenden Pufferzeiten und damit die Fahrplan-Nennleistung erstmals anhand der gewünschten oder erforderlichen Qualität festlegen.

Mühlhans und Ackermann bestimmten mit einem einfachen Verkehrsnachfragemodell auf der Basis von Elastizitäten den Nachfragerückgang. Gleichzeitig ermitteln sie die mit einer Minute Verspätung verbundenen Mehrkosten und kommen damit zu einer Bewertung von Verspätungen. Die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung ist mit diesen Modellen nicht möglich, da sich mit der Auslastung nicht nur die Verspätungen sondern zum Beispiel auch die Zuganzahl verändern und damit auch wartezeitunabhängige Komponenten der Kosten und Erlöse.

Jochim und Sauer ermitteln Kosten und Erlöse je Zug. Die Fahrplan-Nennleistung lässt sich jedoch nur mit dem Ansatz von Jochim ermitteln. Als geeignetes Verfahren verbleibt daher nur dieser Ansatz, dessen Anwendung aufgrund der vorhandenen Datenlage sehr aufwändig ist.

4 Problemstellung

4.1 Zielstellung

Wie sich aus der Literaturrecherche ergibt, besteht Forschungsbedarf bezüglich der Modelle zur Ermittlung der Fahrplan-Nennleistung von Eisenbahnstrecken. Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines entsprechenden Modells. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Anwendbarkeit in der Praxis zu legen. Das Modell muss sowohl theoretisch fundiert sein als auch so gewählt werden, dass sich die Eingangsgrößen problemlos aus existierenden Daten ermitteln lassen.

Mit der in den 1990er Jahren eingeleiteten (Re-)Privatisierung der Eisenbahnen in Europa kommt der Eigenwirtschaftlichkeit der Bahnen zunehmend größere Bedeutung zu. Der Maßstab zur Festlegung der Fahrplan-Nennleistung einer Eisenbahnstrecke muss daher auf betriebswirtschaftlichen Kriterien beruhen. Die geeignete betriebswirtschaftliche Kenngröße ist gemäß Schwanhäußer [47] der Gewinn. Für die betriebswirtschaftliche Ermittlung der den Gewinn maximierenden Auslastung fehlen, wie die Arbeit von Jochim [35] zeigt, wesentliche erforderliche Daten.

Physikalische Verfahren verwenden zwar in der Regel leicht zu ermittelnde Eingangsgrößen, lassen jedoch keine Aussagen zur Fahrplan-Nennleistung und zur Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme zu. In der vorliegenden Arbeit ist deshalb ein physikalischer Ansatz, der eine betriebswirtschaftlich interpretierbare Bewertung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken ermöglicht, zu entwickeln.

Die Bewertung hat für das Gesamtsystem Bahn zu erfolgen, da sonst ein die Einzelakteure (Eisenbahnverkehrsunternehmen und Eisenbahninfrastrukturunternehmen) nicht optimal steuerndes Trassenpreissystem zu nicht zielführenden Modellergebnissen führen würde. Vielmehr wäre ein Trassenpreissystem so zu gestalten, dass es zu dem für das Gesamtsystem Bahn sinnvollen Zustand führt, der sich aus dem zu entwickelnden Modell ergeben soll.

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit in der Praxis sind bei der Entwicklung des Modells Vereinfachungen vorzunehmen, soweit sie das Ergebnis nicht wesentlich beeinflussen. Beispielsweise lässt sich ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit anstelle des Gewinns die Kenngröße „Deckungsbeitrag“ verwenden.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt nicht auf einer aufwändigen Datenerhebung sondern auf der Modellbildung. Deshalb sollen keine eigenen Erhebungen durchgeführt werden, sondern bestehende Daten Verwendung finden.

4.2 Herangehensweise

In diesem Unterkapitel werden über die Zielstellung hinausgehende Anforderungen an das Modell entwickelt und die grundlegende Methode für die Problemlösung vorgestellt. Im Einzelnen soll das Modell die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Herleitung des physikalischen Ansatzes

Bisherige physikalische Ansätze haben gezeigt, dass strenge Analogieschlüsse wegen der Unterschiede zwischen dem Eisenbahnwesen und den physikalischen Vorgängen höchstens eine *Beschreibung* der Abläufe bei der Eisenbahn erlauben (vgl. Kap. 3.2). Das in dieser Arbeit zu entwickelnde Modell soll hingegen insbesondere eine *Bewertung* des Verkehrsablaufs ermöglichen sowie betriebswirtschaftlich interpretierbare Ergebnisse liefern.

Für die vorliegende Arbeit kommt somit keine direkte Übertragung einer physikalischen Größe auf das Eisenbahnwesen in Frage. Vielmehr ist ausgehend von der Beschreibung der einzelnen betriebswirtschaftlichen Zusammenhänge jeweils zu prüfen, inwieweit sich diese Zusammenhänge anhand physikalischer Größen beschreiben lassen.

- Modellierung der Angebotsqualität

Zur Beschreibung der Angebotsqualität sollen neben der Regelbeförderungszeit auch Wartezeiten dienen. Wartezeiten beeinflussen die *Kosten*, werden vom Endkunden wahrgenommen und beeinflussen daher die Nachfrage und damit die *Erlöse*. Sie sind somit die geeignete Grundlage für die konsistente Ermittlung von Kosten und Erlösen. Um den Einfluss der Wartezeiten korrekt abzubilden, werden in dieser Arbeit Wartezeiten sowohl für die Strecke als auch für die angrenzenden Knoten verwendet.

Die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung soll aufbauend auf dem aktuellen Stand der eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Modellierung erfolgen. Für die Berechnung der Wartezeiten sind daher entsprechende rechnerunterstützte Verfahren zu verwenden. Die Bewertung der so ermittelten Wartezeiten ist Gegenstand des zu entwickelnden Modells.

- Bewertung der Angebotsqualität

Für die betriebswirtschaftliche Bewertung ist eine Monetarisierung der Angebotsqualität erforderlich. Bei dieser Monetarisierung muss das

Endkunden-Verhalten als Grundlage für die Bestimmung der Erlöse näherungsweise abgebildet werden. Folglich ist die Verkehrsnachfrage-reaktion als Funktion der Angebotsqualität und somit auslastungsabhängig abzuschätzen. Dieses Vorgehen bietet zudem den Vorteil, bei der Bewertung der Wartezeiten weitere Angebotsmerkmale, wie beispielsweise die Beförderungszeit, einbeziehen zu können.

- Untersuchungsraumspezifische Eingangsgrößen

Entsprechend der Zielstellung ist das Modell so zu wählen, dass sich die Eingangsgrößen problemlos aus existierenden Daten ermitteln lassen. Da damit eine bessere Verfügbarkeit von Eingangsgrößen verbunden ist, sollen stärker als bei den bisherigen betriebswirtschaftlichen Modellen (z. B. [35]) streckenspezifische anstelle streckentypischer Merkmale Verwendung finden.

- Physikalische und betriebswirtschaftliche Herleitung der Maßstäbe

Für die physikalische Herleitung wird zunächst untersucht, welche physikalischen Basisgrößen sich grundsätzlich für den gesuchten Ansatz eignen. Anschließend ist zu prüfen, wie sich diese sinnvoll zu abgeleiteten Größen kombinieren lassen (Kap. 5).

Die gesuchten Maßstäbe müssen sich gemäß der Zielstellung betriebswirtschaftlich interpretieren lassen. Parallel zur physikalischen Herleitung erfolgt deshalb die betriebswirtschaftliche Herleitung der gesuchten Ansätze durch eine Analyse der einzelnen Kosten- und Erlösbestandteile im Hinblick auf ihre Abhängigkeit von den physikalischen Basisgrößen. Daraus lässt sich die Relevanz der einzelnen physikalischen Basisgrößen abschätzen und so Hypothesen für die gesuchten abgeleiteten Größen entwickeln (Kap 6).

Aus den auf diesen beiden Wegen ermittelten möglichen abgeleiteten Größen folgt für die als sinnvoll erscheinenden Größen der theoretische Nachweis ihrer Eignung (Kap. 7).

Zusätzlich werden die theoretisch gewonnenen Erkenntnisse auf empirischem Weg bestätigt. Des Weiteren erfolgen Sensitivitätsanalysen für wichtige Einflussgrößen anhand einer Beispielstrecke (Kap. 8).

5 Eignung physikalischer Größen zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken

5.1 Ziel und Vorgehensweise

Ziel dieses Kapitels ist es, mögliche physikalische Größen für die Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken zu identifizieren.

Dazu werden physikalische Größen mit ihren Eingangsgrößen vorgestellt und ihre Eignung diskutiert. Wegen der Vielzahl existierender physikalischer Größen ist zuvor die Menge der zu diskutierenden Größen im Hinblick auf das zu behandelnde Problem sinnvoll einzuschränken.

Eine Einschränkung lässt sich beispielsweise aufgrund der Zielstellung vornehmen, aus der sich ergibt, dass dem zu entwickelnden Modell die Methode der Gewinnmaximierung zugrunde liegen soll. Die zu identifizierenden Größen müssen sich somit zur physikalischen Beschreibung der Erlöse und der Kosten eignen.

Zur Einschränkung der Menge der zu behandelnden Größen werden in einem ersten Schritt (Kap. 5.2) die physikalischen Basisgrößen zusammengestellt und auf ihre Eignung für den zu entwickelnden Ansatz geprüft. Dazu wird zuvor für jede dieser Basisgrößen geprüft, ob sie mit steigenden Kosten oder Erlösen steigen oder fallen (Monotonieeigenschaft). Daraus ist die Teilmenge der grundsätzlich geeigneten Basisgrößen abzuleiten.

Daran schließt sich die Kombination dieser Basisgrößen zu abgeleiteten physikalischen Größen an (Kap. 5.3). Die sich somit ergebenden abgeleiteten physikalischen Größen sind ebenfalls auf ihre grundsätzliche Eignung für den zu entwickelnden Ansatz zu prüfen.

Für die als grundsätzlich geeignet erscheinenden physikalischen Größen erfolgt in den Unterkapiteln 7.1 und 7.2 eine abschließende Bewertung und der Nachweis ihrer Eignung als Grundlage für die physikalischen Maßstäbe zur Ermittlung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken.

5.2 Physikalische Basisgrößen

„In der Physik werden 7 *Basisgrößenarten* (...) verwendet. Es sind dies: Länge, Zeit, Masse, Temperatur, Stromstärke, Stoffmenge, Lichtstärke.“ [7, S. 27] Diese Basisgrößen werden im Folgenden auf ihre Eignung für den zu entwickelnden Ansatz geprüft.

Die anhand physikalischer Größen zu beschreibenden Vorgänge auf Eisenbahnstrecken sind der Dynamik zuzuordnen. In der Dynamik werden die Basisgrößen Länge, Zeit und Masse verwendet.

In Modellen zur Beschreibung des Verkehrsflusses, zum Beispiel im Straßenverkehr, kommt häufiger eine Kenngröße zum Einsatz, die ebenfalls als (Verkehrs-) „Stromstärke“ bezeichnet wird. Als Einheit wird „Verkehrseinheiten je Zeiteinheit“ verwendet, wobei die Verkehrseinheiten zum Beispiel Personen, Tonnen, Fahrzeuge oder Züge sein können. Es handelt sich also um eine abgeleitete Größe u. a. aus der Basisgröße Zeit. Damit hat diese Größe keine Gemeinsamkeit mit der Basisgröße der elektrischen Stromstärke. Daher kommt die elektrische Stromstärke als weitere Basisgröße nicht in Frage. Auch die Größen „Temperatur“, „Stoffmenge“ und „Lichtstärke“ finden im Weiteren ebenfalls keine Berücksichtigung mehr.

Die verbleibenden Basisgrößen werden im Eisenbahnwesen zum Teil als Merkmal für mehrere Objekte genutzt. Die Basisgröße „Länge“ lässt sich sowohl als Zuglänge als auch Streckenlänge verwenden. Die Zeit kann die realisierte Beförderungszeit sowie ihre Komponenten oder den Betrachtungszeitraum beschreiben.

Unter der realisierten Beförderungszeit wird in der weiteren Arbeit die Summe aus der Regelbeförderungszeit und den Wartezeiten (Definition gem. [13]) verstanden. Als realisierte Beförderungszeit gibt die Basisgröße „Zeit“ ein qualitatives Merkmal einer Zugfahrt auf einer Strecke wieder. Die Basisgröße „Masse“ beschreibt mit der transportierten Menge eine quantitative Eigenschaft.

Die Zugmasse und die Zuglänge sind annähernd proportionale Größen, die sich lediglich durch das spezifische Gewicht unterscheiden. Die Verwendung der Zugmasse hat den Vorteil, dass sie mehrere Eigenschaften eines Zuges beschreibt. So ermöglicht die Masse bei zwei gleich langen Zügen beispielsweise Aussagen über die Auslastung der Züge und, bei sonst gleichen Randbedingungen, zu Unterschieden bei der Höhe der Erlöse.

Im Weiteren findet daher die Zugmasse Verwendung und die Zuglänge hingegen nicht. Die Verkehrsstromstärke als Quotient aus Mengen bzw. Massen und der Zeit

wird in Unterkapitel 5.3 diskutiert. Die für die Betrachtungen im Eisenbahnwesen verbleibenden physikalischen Basisgrößen werden im Weiteren als Grundgrößen bezeichnet.

Als Grundgrößen gelten somit

- die Streckenlänge $L_{Strecke}$,
- die realisierte Beförderungszeit t_{Bef} ,
- der Betrachtungszeitraum t_U und
- die Masse m_{Zug} .

Anhand dieser Grundgrößen lassen sich sowohl die transportierte Menge als auch die Qualität des Transports beschreiben. Der zu bestimmende physikalische Maßstab muss beide Eigenschaften enthalten.

Vor der Kombination der Grundgrößen zu abgeleiteten Größen ist für jede Größe zu prüfen, ob sie mit steigenden Kosten oder Erlösen steigt oder fällt. Ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit wird angenommen, dass der *Erlös* mit

- zunehmender Menge,
- zunehmender Transportweite oder
- zunehmender Qualität

wächst, wenn die jeweils anderen Größen unverändert bleiben. Das bedeutet, dass der Erlös mit

- zunehmender Masse,
- zunehmender Streckenlänge und
- sinkender realisierter Beförderungszeit

steigt. Wird der Erlös nicht je Zug sondern für eine Strecke ermittelt, ist er auf einen Betrachtungszeitraum zu beziehen.

Die *Kosten* steigen mit

- zunehmender Menge,
- zunehmender Transportweite und
- zunehmender Transportdauer.

Somit steigen die Kosten mit

- zunehmender Masse,
- zunehmender Streckenlänge und
- zunehmender realisierter Beförderungszeit.

Wie der Erlös lassen sich auch die Kosten bezogen auf einen Betrachtungszeitraum angeben.

Die so qualitativ beschriebenen Zusammenhänge reduzieren die Kombinationsmöglichkeiten der Grundgrößen und somit die Menge geeigneter abgeleiteter physikalischer Größen. Unter einer abgeleiteten Größe wird dabei die Kombination von Grundgrößen verstanden. Beispielsweise ergibt sich aus den oben beschriebenen Zusammenhängen, ob eine Grundgröße im Zähler oder im Nenner einer abgeleiteten physikalischen Größe stehen muss. Mit diesen Zusammenhängen sind die Anforderungen, die der physikalische Maßstab erfüllen muss, festgelegt. Die Gegenüberstellung der Anforderungen und der Eignung der abgeleiteten Größen erfolgt in Unterkapitel 5.3.

5.3 Abgeleitete physikalische Größen

Die abgeleiteten Größen sollen der physikalischen Beschreibung von Kosten, Erlösen oder daraus ermittelten betriebswirtschaftlichen Größen dienen. Sowohl für die Kosten als auch für die Erlöse ist die Abhängigkeit von der Angebotsqualität, insbesondere von den auslastungsabhängigen Wartezeiten, abzubilden (vgl. Kap. 4.2). Eine abgeleitete physikalische Größe kann sich daher nur dann eignen, wenn sie die auslastungsabhängige Qualität modelliert.

Die Vorstellung und Diskussion der abgeleiteten Größen beginnt der Übersichtlichkeit wegen mit Größen, die sich aus nur zwei der vier Grundgrößen zusammensetzen. Masselose Bewegungsvorgänge werden in der Kinematik anhand der Basisgrößen „Länge“ und „Zeit“ beschrieben.

Eine aus den entsprechenden Grundgrößen einfach zu bestimmende Größe ist die Beförderungsgeschwindigkeit v_{Bef} , als Quotient des Weges und der Zeit (erste Ableitung):

$$v_{Bef} = \frac{L_{Strecke}}{t_{Bef}} \quad (5.3-1)$$

Sie stellt eine gebräuchliche Anwendung der Geschwindigkeit in der Verkehrswissenschaft dar. Die Beförderungsgeschwindigkeit gibt als Maßstab für die Qualität eines Zugangebots die realisierte Beförderungszeit nicht absolut sondern bezogen auf den zurückgelegten Weg an. Sie umfasst sowohl den Nutzen einer Reise in Form der überwundenen Distanz als auch die dafür aufzuwendende Zeit. Da die in der Beförderungsgeschwindigkeit enthaltene realisierte Beförderungszeit auch die planmäßigen und außerplanmäßigen Wartezeiten enthält, bildet die Beförderungsgeschwindigkeit die Qualität auch in Abhängigkeit von der Streckenauslastung ab. Die Beförderungsgeschwindigkeit eignet sich somit hervorragend als Größe für einen physikalischen Ansatz.

Durch abermalige Division des Weges nach der Zeit ergibt sich die Beschleunigung a :

$$a = \frac{L_{Strecke}}{t_{Bef}^2} \quad (5.3-2)$$

Die Beschleunigung, dargestellt üblicherweise als der Quotient aus der Beförderungsgeschwindigkeit und der Zeit, stellt keine Größe zur verbesserten Beschreibung der Qualität eines Zugangebotes dar. Zudem bestimmt die Beschleunigung neben anderen Größen indirekt die Beförderungsgeschwindigkeit mit. Zur Ermittlung der Kosten beziehungsweise der Erlöse unter Zugrundelegung physikalischer Größen eignet sich die Beschleunigung daher weniger als die Beförderungsgeschwindigkeit. Auch weitere Ableitungen des Weges nach der Zeit erscheinen aus den gleichen Gründen nicht geeignet.

Weitere abgeleitete Größen ergeben sich durch die Einbeziehung der Masse.

Der Quotient aus Masse und Zeit ließe sich als Verkehrsstromstärke¹ I , zum Beispiel als:

¹ In der Verkehrsstatistik wird die Verkehrsstromstärke für den Bereich des Güterverkehrs auch als Verkehrsaufkommen bezeichnet.

$$I_{\text{Zuggtg}} = \frac{m_{\text{Zuggtg}}}{t_U} \quad (5.3-3)$$

mit der Zeit im Nenner als dem Betrachtungszeitraum, darstellen. Die Stromstärke im verkehrlichen Sinn ist daher eine abgeleitete Größe. Sie ermöglicht mengenbezogene Aussagen und könnte daher beispielsweise zur Beschreibung der Zugauslastung oder der Nachfrage dienen. Wegen des Bezugs der Menge auf eine Zeiteinheit entspricht die Einheit der Stromstärke der Einheit der zu ermittelnden Fahrplan-Nennleistung. Dieser Bezug ist erforderlich, um betriebswirtschaftlich relevante Kenngrößen, zum Beispiel Erlöse/Zeiteinheit, generieren zu können. Die Stromstärke liefert jedoch keine Information über die Qualität, da sie die realisierte Beförderungszeit nicht enthält. Sie eignet sich daher ohne Verknüpfungen mit weiteren Grundgrößen nicht für den zu entwickelnden Ansatz.

Die Kombination mit weiteren Grundgrößen erfolgt bei den im Weiteren diskutierten abgeleiteten Größen. Wegen der beschriebenen Relevanz des Bezugs der Mengen auf eine Zeiteinheit wird für die weiteren Kombinationen unter der Masse die Menge je Zeiteinheit verstanden.

Die lineare Verknüpfung aller drei Grundgrößen liefert den Impuls p :

$$\begin{aligned} p_{\text{Zuggtg}} &= m_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{L_{\text{Strecke}}}{t_{\text{Bef Zuggtg}}} \\ &= m_{\text{Zuggtg}} \cdot v_{\text{Bef Zuggtg}} \end{aligned} \quad (5.3-4)$$

Der Impuls ermöglicht durch die Verknüpfung von Zugmasse und Beförderungsgeschwindigkeit nicht nur eine Aussage zur beförderten Menge sondern auch zur Angebotsqualität. Er stellt damit als erste Größe eine Verbindung zwischen Quantität und Qualität her.

Er könnte sich daher zur Darstellung des Erlöses eignen. Die Beförderungsgeschwindigkeit ließe sich als Quotient aus der Transportweite und der Qualität, dargestellt durch die realisierte Beförderungszeit, interpretieren.

Zur Beschreibung der Kosten müsste der Impuls mit der Beförderungszeit steigen. Da dies nicht der Fall ist, kommt der Impuls nicht zur Beschreibung der Kosten in Frage.

Durch die Ergänzung des Impulses um die Grundgröße „Beförderungszeit“ ergibt sich als weitere Größe die Kraft F , die auch als Ableitung des Impulses nach der Zeit interpretiert werden kann. Sie lässt sich wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned}
F_{\text{Zuggtg}} &= m_{\text{Zuggtg}} \cdot a \\
&= \frac{m_{\text{Zuggtg}} \cdot v_{\text{Bef Zuggtg}}}{t_{\text{Bef Zuggtg}}} \\
&= \frac{P_{\text{Zuggtg}}}{t_{\text{Bef Zuggtg}}}
\end{aligned} \tag{5.3-5}$$

Anhand der Kraft ist ebenfalls eine Aussage über die Quantität sowie die Qualität, mit der die Menge transportiert wird, möglich. Die gegenüber dem Impuls zusätzlich im Nenner enthaltene realisierte Beförderungszeit ließe sich als physikalische Beschreibung der Kosten interpretieren. Demnach wäre die Kraft als Quotient aus Erlösen und Kosten aufzufassen. Sie bildet die erste physikalische Größe, die die beiden betriebswirtschaftlichen Kenngrößen Erlöse und Kosten in einen Zusammenhang stellt. Aus dem Vergleich mit den oben zusammengestellten Einflussgrößen auf die Kosten (vgl. Kap. 5.2) ergibt sich, dass die Kraft die Entfernungs- und Mengenabhängigkeit der Kosten nicht abbildet.

Durch Multiplikation der Kraft mit dem Weg ergeben sich die beiden abgeleiteten Größen Energie E und Arbeit W zum Beispiel wie folgt:

$$\begin{aligned}
W_{\text{Zuggtg}} &= E_{\text{Zuggtg}} \\
&= \frac{m_{\text{Zuggtg}} \cdot L_{\text{Strecke}}^2}{t_{\text{Bef Zuggtg}}^2} \\
&= \frac{m_{\text{Zuggtg}} \cdot v_{\text{Bef Zuggtg}} \cdot L_{\text{Strecke}}}{t_{\text{Bef Zuggtg}}}
\end{aligned} \tag{5.3-6}$$

Ein Körper besitzt umso mehr Energie, je höher seine Masse ist und je schneller diese Masse transportiert wird. Energie und Arbeit nehmen auch dann hohe Werte an, wenn eine große Masse über eine große Distanz mit hoher Geschwindigkeit befördert wird. Der mit einem entsprechenden Zug erzielbare Erlös ist in der Regel ebenfalls groß. Auch die Energie und die Arbeit ermöglichen über die realisierte Beförderungszeit die Beschreibung der Qualität und über die Zugmasse die Einbeziehung der Auslastung beziehungsweise der Nachfrage. Ebenfalls finden die Kosten in Form der realisierten Beförderungszeit in den beiden abgeleiteten Größen ihre Berücksichtigung. Somit würden auch die Energie und die Arbeit eine Beschreibung von Erlösen und Kosten ermöglichen.

Als letzte abgeleitete Größe wird die Leistung P betrachtet. Die Leistung ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Zugtg}} &= \frac{W_{\text{Zugtg}}}{t_{\text{Bef Zugtg}}} \\
 &= \frac{m_{\text{Zugtg}} \cdot L_{\text{Strecke}}^2}{t_{\text{Bef Zugtg}}^3}
 \end{aligned}
 \tag{5.3-7}$$

Eine hohe Leistung entsteht dann, wenn in kurzer Zeit viel Energie umgesetzt beziehungsweise viel Arbeit verrichtet wird. Die Leistung ausgedrückt mit den Grundgrößen erfasst folglich sowohl die Qualität als auch die Menge und den Zeitraum, in dem die Leistung erzeugt wird und spiegelt Kosten und Erlöse wider. Sie wäre ebenfalls für die weiteren Betrachtungen geeignet.

Die genannten abgeleiteten Größen lassen sich zur Beschreibung der Erlöse oder zur gemeinsamen Beschreibung der Erlöse und Kosten nutzen. Keine der vorgestellten Größen eignet sich zur allgemeinen Modellierung der Kosten. Eine physikalische Größe, die die Kosten abbildet, könnte gemäß Unterkapitel 5.2 mit der Zugmasse, der Streckenlänge und der Beförderungszeit steigen. Somit würde sich beispielsweise das folgende Produkt eignen:

$$m_{\text{Zugtg}} \cdot L_{\text{Strecke}} \cdot t_{\text{Bef Zugtg}} \tag{5.3-8}$$

Eine gängige abgeleitete Größe, die sich als dieses Produkt schreiben lässt, existiert nicht.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die aus den jeweiligen Basisgrößen sich ergebenden Grundgrößen „Beförderungszeit“, „Streckenlänge“ und „Zugmasse“ sowie daraus abgeleitete Größen wie der Impuls, die Kraft, die Energie und die Leistung in die weiteren Überlegungen einfließen. Durch die realisierte Beförderungszeit wird hauptsächlich die Qualität der Beförderung wiedergegeben, während die Zugmasse die beförderte Menge und damit verbunden die Auslastung beziehungsweise die Nachfrage beschreibt.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Eignung der einzelnen Größen liefert die nachfolgende Tabelle 5.3-1.

Grundgröße	abgeleitete physikalische Größe	Grundsätzlich geeignet?
Stromstärke		nein
Zuglänge		nein
Streckenlänge		ja
Zugmasse		ja
Beförderungszeit		ja
	Beförderungsgeschwindigkeit	ja
	Beschleunigung, Ruck	nein
	Impuls	ja
	Kraft	ja
	Energie und Arbeit	ja
	Leistung	ja

Tab. 5.3-1: Eignung physikalischer Größen für den physikalischen Maßstab

Der Schwerpunkt der folgenden Kapitel liegt nun auf der Prüfung der Bedeutung der Grundgrößen und der abgeleiteten Größen bei der Beschreibung der Kosten und Erlöse sowie der Eignung dieser Größen zur Entwicklung von physikalischen Maßstäben zur Bestimmung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken.

6 Herleitung der physikalischen Maßstäbe aus betriebswirtschaftlichen Ansätzen

In der vorliegenden Arbeit ist gemäß der Zielstellung ein physikalischer Ansatz zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken zu entwickeln, der sich betriebswirtschaftlich interpretieren lässt. Das Ziel von Kapitel 6 besteht deshalb darin, ausgehend von der Beschreibung der einzelnen betriebswirtschaftlichen Zusammenhänge zu prüfen, inwieweit sich diese Zusammenhänge anhand physikalischer Größen auslastungsabhängig beschreiben und daraus Hypothesen für den Ansatz ableiten lassen. Als physikalische Größen kommen die in Kapitel 5 als geeignet identifizierten Größen zur Beschreibung der Kosten und Erlöse in Frage. Da das Gesamtsystem Bahn zu betrachten ist (vgl. Kap. 4.1), werden den Erlösen der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVUs) die Kosten der Eisenbahnverkehrsunternehmen und des Eisenbahninfrastrukturunternehmens (EIU) gegenübergestellt; Trassenpreise finden daher keine Berücksichtigung.

Als erste betriebswirtschaftliche Größe werden in Unterkapitel 6.1 die Kosten untersucht. In den Unterkapiteln 6.2 beziehungsweise 6.3 erfolgt dann die Herleitung des Ansatzes für die Erlöse im Personenverkehr beziehungsweise im Güterverkehr.

6.1 Kostenfunktion

6.1.1 Grundlagen

Für die detaillierte Untersuchung der Kosten hinsichtlich ihrer auslastungsabhängigen Darstellung durch geeignete physikalische Größen, sind die Kosten in die einzelnen Komponenten aufzuteilen. Für jede Komponente wird ihre Abhängigkeit von der Anzahl der Züge auf einer Eisenbahnstrecke ermittelt. Daraus lässt sich ableiten, inwieweit sich die einzelnen Kostenkomponenten proportional zu den Größen „Zeit“, „Weg“ oder „Masse“ verändern.

Es finden alle Kosten, die während einer Zugfahrt anfallen, Berücksichtigung. Fixe Kosten sind Kostenbestandteile, die unabhängig von der Anzahl der Zugfahrten entstehen. Bei den variablen Kosten sind zuganzahlabhängige Komponenten von Komponenten, die zusätzlich von der Beförderungszeit abhängen, zu unterscheiden.

Zur Kostenermittlung eignen sich:

- das Verfahren zur Berechnung der Kosten einer Zugfahrt nach DS 454 [18] und
- eine Deckungsbeitragsrechnung für die Neubaustrecke Köln-Rhein/Main von Breimeier [5].

Das Verfahren, das in der DS 454, „Dienstvorschrift für die Berechnung der Kosten einer Zugfahrt“ (Zuko) beschrieben ist, war über viele Jahre die Grundlage für die Berechnung der Zugförderungskosten bei der Deutschen Bundesbahn. Darin finden so genannte Plankosten Verwendung. Plankosten bezeichnen nicht die tatsächlich bei einer Kostenstelle anfallenden Kosten sondern Kostensätze, die sich durch Aufschlüsselung der Gesamtkostenrechnung als Durchschnittswerte für die einzelnen Kostenarten ergeben.

Das Verfahren der Zuko verwendet sowohl betriebsleistungsabhängige Kostensätze als auch auslastungsunabhängige Fest- und Einheitswerte. Um die Zugförderungskosten zu ermitteln, werden diese Größen mit zugfahrtspezifischen Verbrauchswerten (z. B. Fahrzeit, Energie, Streckenlänge) multipliziert. Die Zugförderungskosten enthalten bei diesem Verfahren sowohl die spezifischen Zugfahrtskosten als auch die Fahrwegkosten, jedoch nicht die Kosten für die Abfertigung und die Zugbildung. Dieses Verfahren wurde, wie bereits erwähnt, bei der Deutschen Bundesbahn entwickelt und eingesetzt, allerdings ab Mitte der 1980er Jahre nicht mehr aktualisiert.

Das Verfahren der Zuko ermöglicht eine separate Analyse der Kosten für Infrastruktur- und Transportunternehmen, weil die einzelnen Bestandteile getrennt voneinander berechenbar sind. Da für die Zuko-Werte für den Fahrweg niemals eine systematische Eichung erfolgte, wird für die Kosten des Fahrwegs auf eine DB-interne Kostenschätzung zurückgegriffen. Die in der Zuko verwendete Systematik lässt sich aber sehr gut für die Analyse der übrigen Kostenkomponenten nutzen.

Für die Untersuchung der Einflüsse auf die Kosten anhand der Formeln aus der Zuko werden in der vorliegenden Arbeit nur die dafür relevanten Terme (ohne Proportionalitätsfaktoren, Verlustfaktoren o. ä.) wiedergegeben. Außerdem beschränkt sich die Untersuchung auf die wesentlichen Kostenkomponenten. Formeln, die beispielsweise das Heizen des Zuges erfassen, werden aus Gründen der Vereinfachung weggelassen. Aus dem gleichen Grund erfolgt die Analyse der Traktionskosten ausschließlich für elektrischen Betrieb. Die dabei identifizierten Abhängig-

keiten gelten im Wesentlichen auch für die Dieseltraktion. Wegen des gesamten Formelwerks sei auf die DS 454 verwiesen.

Breimeier berücksichtigt in seinem Verfahren ausschließlich Kosten der EVUs. Sein Verfahren findet deshalb nur in dem entsprechenden Unterkapitel 6.1.3 zu den Kosten der EVUs Anwendung und wird dort näher erläutert.

Zur Herleitung des physikalischen Maßstabs für die Kosten, die Gegenstand dieses Kapitels ist, erfolgt im Weiteren zuerst die Analyse der Kosten getrennt nach den Kosten des Fahrwegs (Kap. 6.1.2) und den Kosten der EVUs (Kap. 6.1.3). Aufgrund dessen lässt sich der physikalische Maßstab festlegen. Schließlich werden die als Eingangsgrößen identifizierten Grundgrößen auf ihre Relevanz geprüft und der physikalische Maßstab durch Reduktion auf die wesentlichen Einflussgrößen entsprechend vereinfacht (Kap. 6.1.4).

6.1.2 Kosten des Fahrwegs

Die Kosten, die für den Fahrweg anfallen, lassen sich unterscheiden nach:

- Erneuerungskosten,
- Instandhaltungskosten sowie
- Kosten für die Betriebsführung.

Die *Erneuerungskosten* und die Kosten für die *Instandhaltung* des Fahrwegs lassen sich in einen variablen und einen fixen Bestandteil aufteilen. Der überwiegende Teil dieser beiden Kostenkomponenten ist als fix einzustufen, also als von der Zuganzahl unabhängig. Der variable Teil hängt von der Betriebsleistung, gemessen zum Beispiel in tkm pro Jahr, ab. Im Weiteren ist deshalb von einer Proportionalität der variablen Fahrwegkosten und der Gesamtzuglasten auszugehen. Bei konstantem Mischungsverhältnis, wie bei Untersuchungen zum Leistungsverhalten üblich (vgl. Kap. 3.1), ergibt sich daraus auch eine Proportionalität zwischen den variablen Fahrwegkosten und der Anzahl der Züge.

Die *Kosten für die Betriebsführung* des Fahrwegs werden als fix angenommen.

Alle Kosten des Fahrwegs wachsen in dem für die Betrachtung relevanten Auslastungsbereich linear mit der Länge der untersuchten Strecke.

Für *Investitionen* stellt die öffentliche Hand in der Bundesrepublik Deutschland

- Baukostenzuschüsse und
- zinslose Darlehen

zur Verfügung, die das EIU durch Eigenmittel ergänzt. Baukostenzuschüsse reduzieren den Bedarf an Eigenmitteln für das EIU. Die mit Zuschüssen finanzierten Baukosten sind für das Unternehmen kostenneutral. Zur Tilgung der zinslosen Darlehen muss das EIU Zahlungen tätigen, die der Gesetzgeber an die Höhe der Abschreibung gekoppelt hat. Für die mit zinslosen Darlehen finanzierten Investitionen fallen demnach Kosten in Höhe der Abschreibungen, jedoch nicht für die Verzinsung an. Von den Investitionen in den Fahrweg kommen somit nur die Abschreibungen und die eingesetzten Eigenmittel bei den Gesamtkosten zum Ansatz.

Für eine Abschätzung des Einflusses der Kosten des Fahrwegs auf die Gesamtkosten ist die absolute Höhe der Fahrwegkosten von Bedeutung. Dafür wird auf eine DB-interne Kostenabschätzung für die in der DS 413 [15] definierten Streckenstandards zurückgegriffen. Für die zehn Streckenstandards existieren jeweils die Erneuerungs-, Instandhaltungs- und Betriebsführungskosten als Kostensätze je Streckenkilometer und Jahr. Dabei besteht die Möglichkeit, die Erneuerungs- und Instandhaltungskosten über einen Erfahrungswert in einen variablen Teil und einen fixen Teil aufzuteilen. Diese Kostensätze liegen der Beispielrechnung (Kap. 6.1.4) zugrunde.

Damit sind alle Kostenbestandteile für den Fahrweg hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der Anzahl der Züge und anderer Größen analysiert. Eine Zusammenfassung dieser Abhängigkeiten enthält Tabelle 6.1-1.

fixe Kosten	variable Kosten	
	proportional zur Anzahl der Züge	und zur realisierten Beförderungszeit
Erneuerungskosten		
Instandhaltungskosten		
Kosten für die Betriebsführung		

Tab. 6.1-1: Kostenkomponenten des Fahrwegs nach Einflussgrößen

6.1.3 Kosten der Eisenbahnverkehrsunternehmen

In diesem Unterkapitel werden die Kostenkomponenten, die durch eine Zugfahrt für ein EVU anfallen, auf ihre Bestimmungsgrößen, einschließlich des Einflusses der Auslastung des Fahrwegs, untersucht.

Die Kosten seien in die folgenden Komponenten aufgeteilt:

- Abfertigungskosten,
- Zugbildungskosten,
- Sachkosten einer Zugfahrt,
- Fahrzeugunterhaltungskosten,
- Abschreibung und Verzinsung,
- Personalkosten sowie
- Gemeinkosten.

Die Grundlage der Untersuchung bilden die Zuko sowie das Verfahren nach Breimeier [5] für Komponenten, für die die Zuko keine Formeln zur Verfügung stellt. Das Verfahren der Zuko wurde bereits in Unterkapitel 6.1.1 beschrieben.

Gegenstand der Veröffentlichung von Breimeier ist eine Deckungsbeitragsrechnung für die Neubaustrecke Köln-Rhein/Main. Dieses Verfahren berücksichtigt nur einen Teil der für diese Arbeit relevanten Kostenkomponenten:

- nur die variablen Kosten werden ermittelt;
- sämtliche Fahrwegkosten und
- Kosten für den Personennahverkehr fehlen,

so dass sich das Verfahren nur für den Personenfernverkehr und den Güterverkehr anwenden lässt.

Für die Berechnung des Deckungsbeitrags der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main verwendet Breimeier Durchschnittskostensätze, die er mit den zu erwartenden Veränderungen im Fahrzeug- beziehungsweise Personalbestand, hervorgerufen durch die Veränderungen der gefahrenen Zugkilometer beziehungsweise Zugstunden nach Eröffnung der Strecke, multipliziert. Aus den Kosten- und Erlösveränderungen ermittelt er die Veränderung des Deckungsbeitrags. Im Folgenden werden die einzelnen Kostenkomponenten auf ihre Einflussgrößen hin analysiert.

Die *Kosten für die Abfertigung* eines Zuges umfassen die Vertriebskosten und die Kosten für die betriebliche Abfertigung. Nach Breimeier lassen sich diese Kosten wie folgt berechnen:

- Personenfernverkehr

$$K_{\text{Abfertigung PFV}} = k_{\text{Abfertigung PFV}} \cdot \text{Anzahl der Reisenden}$$

mit

$K_{\text{Abfertigung PFV}}$ Kosten der Abfertigung im Personenfernverkehr

$k_{\text{Abfertigung PFV}}$ Kostensatz für die Abfertigung je Reisendem

- Güterverkehr

$$K_{\text{Abfertigung GV}} = k_{\text{Abfertigung GV}} \cdot \text{Anzahl der Tonnen}$$

mit

$K_{\text{Abfertigung GV}}$ Kosten der Abfertigung im Güterverkehr

$k_{\text{Abfertigung GV}}$ Kostensatz für die Abfertigung je Tonne Gut

Die Abfertigungskosten hängen im Personenfernverkehr im Wesentlichen von der Anzahl der Reisenden ab. Im Güterverkehr ist die Menge beziehungsweise die Sendungszahl die die Abfertigungskosten bestimmende Größe. Auch für den Personenverkehr lässt sich davon ausgehen, dass die Abfertigungskosten mit der Anzahl der Reisenden steigen.

Die Anzahl der Reisenden je Zug wird zunächst als unabhängig von der Streckenauslastung angesetzt, wie in Unterkapitel 6.2 noch weiter ausgeführt. Die Kosten für die Abfertigung wachsen somit linear mit der Anzahl der Züge. Für den Güterverkehr gilt der Sachverhalt entsprechend.

Die *Kosten der Zugbildung* erfassen die Aufwendungen für das Zusammen- und Bereitstellen der Züge. Sie ergeben sich nach Breimeier zu:

- Personenfernverkehr

$$K_{\text{Zugbildung PFV}} = k_{\text{Wagen PFV}} \cdot \text{Anzahl der Reisezugwagen} \cdot \text{Einsatztage/Zeiteinheit}$$

mit

$K_{\text{Zugbildung PFV}}$ Kosten der Zugbildung im Personenfernverkehr

$k_{\text{Wagen PFV}}$ Kostensatz je Reisezugwagen und Einsatztag

- Güterverkehr

$$K_{\text{Zugbildung GV}} = k_{\text{Wagen GV}} \cdot \text{Anzahl der Güterwagenumstellungen}$$

mit

$K_{\text{Zugbildung GV}}$ Kosten der Zugbildung im Güterverkehr

$k_{\text{Wagen GV}}$ Kostensatz je Güterwagenumstellung

Im Personenverkehr steigt die Anzahl der Reisezugwagen mit der Anzahl der Züge. Die Kosten wachsen daher linear mit der Anzahl der zu bildenden Züge.

Im Güterverkehr steigt die Anzahl der Wagenumstellungen üblicherweise mit der Laufweglänge und der Beförderungszeit. Da Wagenumstellungen in der Regel zeitaufwändig sind, dürfte die Unterwegszeit die Anzahl der Umstellungen besser beschreiben als die Laufweglänge. So erscheint die Annahme sinnvoll, dass die anfallenden Kosten proportional zur Anzahl der Züge und zur realisierten Beförderungszeit wachsen.

Zu den *Sachkosten* einer Zugfahrt zählt der Verbrauch von Antriebs- und sonstigen Betriebsstoffen wie elektrischer Energie für den Zugsantrieb. Den weitaus größten Teil der Sachkosten machen die Energiekosten für den Zugsantrieb aus. Alle weiteren Sachkostenkomponenten lassen sich demgegenüber vernachlässigen.

Gemäß der Zuko gilt sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr:

$$K_b \sim k_b \cdot B$$

mit

K_b Kosten für die elektrische Arbeit des Triebfahrzeugs

k_b Kostensatz

B Verbrauch an elektrischer Energie

Die Höhe dieser Kosten verändert sich im Wesentlichen in Abhängigkeit von der Triebfahrzeugarbeit. Die Triebfahrzeugarbeit hängt von der Anzahl der Halte, der Masse des Triebfahrzeugs, des Wagenzugs etc. ab. Daher führt beispielsweise eine Verdoppelung der Masse eines Zuges in etwa zur Verdoppelung der Energiekosten für die Traktion.

Züge des Güterverkehrs zeichnen sich üblicherweise durch hohe Zuggewichte aus; gleichzeitig werden sie häufiger als andere Züge überholt. Dies führt sowohl zu einem erhöhten Energiebedarf als auch zu einer größeren realisierten Beförderungszeit, so dass der Energiebedarf als proportional zur realisierten Beförderungszeit angesetzt wird.

Der Einfluss der Halte im Personennahverkehr ist in der Regel noch höher als im Güterverkehr, so dass auch hier die Energiekosten mit der realisierten Beförderungszeit wachsen.

Aufgrund der selteneren Halte ist im Personenfernverkehr deren Einfluss auf den Energieverbrauch gering. Die Kosten wachsen somit linear mit der Anzahl der Züge und der Laufweglänge.

Als weitere Kosten fallen die *Fahrzeugunterhaltungskosten* an. Die Unterhaltungskosten eines elektrischen *Triebfahrzeugs* erfasst die Zuko über zwei Formeln:

- anstrengungsabhängige Kosten

$$K_{ua} \sim \alpha_L \cdot L + \alpha_A \cdot A$$

mit

K_{ua} anstrengungsabhängige Unterhaltungskosten eines Triebfahrzeugs

α_L, α_A Kostensätze

L Länge des durchfahrenen Abschnitts des Triebfahrzeugs

A induzierte Triebfahrzeugarbeit

- zeitintervallabhängige Kosten

$$K_{uz} \sim \alpha_{uz} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst}$$

mit

K_{uz}	zeitintervallabhängige Unterhaltungskosten eines Triebfahrzeugs
α_{uz}	Kostensatz
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit des Triebfahrzeugs je Zeiteinheit

Beide Formeln gelten sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr.

Die Kosten für die Unterhaltung der *Wagen* werden für den Personen- und Güterverkehr in unterschiedlichen Formeln erfasst:

- Personenverkehr

$$K_{uW,PV} \sim \alpha_{uW,PV} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst} \cdot a$$

mit

$K_{uW,PV}$	Unterhaltungskosten für einen Wagenzug
$\alpha_{uW,PV}$	Kostensatz
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit der Wagen je Zeiteinheit
a	Anzahl der Wagen pro Zug

- Güterverkehr

$$K_{uW,GV} \sim \alpha_{uW,GV} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst} \cdot a + \alpha_{LW,GV} \cdot L \cdot b + \alpha_{GW,GV} \cdot G \cdot L$$

mit

$K_{uW,GV}$	Unterhaltungskosten für einen Wagenzug
$\alpha_{uW,GV}, \alpha_{LW,GV}, \alpha_{GW,GV}$	Kostensätze
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit der Wagen je Zeiteinheit
L	Länge des durchfahrenen Abschnitts des Triebfahrzeugs

G	Wagenzuggewicht
a	Anzahl der Wagen pro Zug
b	Anzahl der Achsen des Wagenzugs

Für DB-interne Kostenbestimmungen (s. Ann. zu [16]) wird angesetzt, dass vor allem im Personenfernverkehr bei den Triebfahrzeugen der laufleistungsabhängige Teil der Unterhaltung bestimmend ist. Im Personennahverkehr und im Güterverkehr liegt für die Triebfahrzeuge der Anteil der zeitabhängigen Kosten etwas höher, wobei der laufleistungsabhängige Teil immer noch dominiert. Dieser Kostenbestandteil hängt somit vom Laufweg ab und verändert sich linear mit Anzahl der Züge.

Die Unterhaltung der Wagen steigt im Personenverkehr nach der oben aufgeführten Formel sowohl proportional zur Anzahl der Züge als auch zur realisierten Beförderungszeit.

Die Unterhaltungskosten der Wagen im Güterverkehr hängen gemäß Zuko von den drei Parametern Beförderungszeit, Laufleistung sowie der Masse ab. Die Beförderungszeit nimmt aufgrund des Einflusses aus den langen Laufwegen eine ebenso große Bedeutung ein wie das Gewicht der Güterwagen. Die Unterhaltungskosten steigen somit linear mit der Anzahl der Züge und mit der realisierten Beförderungszeit. Als weiterer wichtiger Einflussfaktor stellt sich zusätzlich die Masse heraus.

Abschreibung und Verzinsung der Triebfahrzeuge im Personen- und Güterverkehr erfasst die Zuko über die beiden folgenden Formeln:

- Abschreibung

$$K_{el} \sim \alpha_{el} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst}$$

mit

K_{el}	Kosten für die Abschreibung eines Triebfahrzeugs
α_{el}	kalkulatorische Abschreibungsrate
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit des Triebfahrzeugs je Zeiteinheit

- Verzinsung

$$K_{zl} \sim \alpha_{zl} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst} \cdot z$$

mit

K_{zl}	Zinskosten für ein Triebfahrzeug
α_{zl}	Abschreibungswert
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit des Triebfahrzeugs je Zeiteinheit
z	Zinssatz

Zur Berechnung der Abschreibung und Verzinsung von *Wagen* gelten bei Personen- und Güterverkehr die gleichen Formeln.

- Abschreibung

$$K_{eW} \sim \alpha_{eW} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst} \cdot a$$

mit

K_{eW}	Kosten für die Abschreibung eines Wagenzugs
α_{eW}	kalkulatorische Abschreibungsrate
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit der Wagen je Zeiteinheit
a	Anzahl der Wagen pro Zug

- Verzinsung

$$K_{zW} \sim \alpha_{zW} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst} \cdot z \cdot a$$

mit

K_{zW}	Zinskosten für einen Wagenzug
α_{zW}	Abschreibungswert

t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit der Wagen je Zeiteinheit
z	Zinssatz
a	Anzahl der Wagen pro Zug

Die Kosten aus Abschreibung und Verzinsung je Fahrzeug sind in der Zuko über die Lebensdauer konstant angesetzt. Da auch hier die Annahme unterstellt wird, dass sich eine Fahrzeitveränderung direkt auf den Triebfahrzeug- beziehungsweise Wagenbedarf auswirkt und somit zur Veränderung der Kosten jeder einzelnen Zugfahrt führt, wird eine Proportionalität zur Anzahl der Züge und der realisierten Beförderungszeit angenommen.

Die gleichen Überlegungen wie für die Unterhaltungskosten gelten für die *Personalkosten*. Nach der Zuko gilt:

$$K_p \sim \alpha_p \cdot t_{Bef}$$

mit

K_p	Personalkosten für Triebfahrzeugführer etc.
α_p	Kostensatz
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit

Auch hier wirkt sich eine Fahrzeitverlängerung direkt in einer Erhöhung der Kosten aus, da sich für das Personal die Arbeitszeit verlängert. Dabei wird angenommen, dass sich eine Fahrzeitveränderung auf die Umläufe direkt auswirkt, so dass sie eine proportionale Kostenveränderung bewirkt. Der Kostensatz α_p ermöglicht eine Unterscheidung nach verschiedenen „Angestellten“ eines EVUs. Weitere Einflussgrößen auf die Personalkosten als die realisierte Beförderungszeit ergeben sich aus den Kostenformeln der Zuko nicht.

Zu den *Gemeinkosten für die Unterhaltung der Triebfahrzeuge* zählen beispielsweise feste Kosten der Werkstätten. Diese Kosten werden in der Zuko proportional zur realisierten Beförderungszeit auf die einzelne Zugfahrt wie folgt umgelegt:

$$K_{ufe} \sim \alpha_{ufe} \cdot \frac{t_{Bef}}{Dst}$$

mit

K_{ufe}	Gemeinkosten für die Unterhaltung eines Triebfahrzeugs
α_{ufe}	Kostensatz
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
Dst	Einsatzzeit des Triebfahrzeugs je Zeiteinheit

Damit sind alle Kostenbestandteile für den Personen- und den Güterverkehr hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der Anzahl der Züge und anderer Größen analysiert. Daraus ergibt sich, ob sie linear, wegen zunehmender Wartezeiten oder mit der Anzahl der Züge auf einer Strecke wachsen und welche wesentlichen Größen die einzelnen Kostenkomponenten außerdem beeinflussen. Zu diesen weiteren Größen zählen

- die Zugmasse und
- die Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke.

Die Zugmasse beschreibt bei konstantem Auslastungsgrad der Züge auch die Zuglänge und damit die Anzahl der Wagen. Sie beeinflusst daher direkt die Abfertigungs-, Zugbildungs-, Sach-, Fahrzeugvorhaltungskosten, Abschreibung sowie Verzinsung für die Wagen sowie die Personalkosten im Personenverkehr. Die Zugmasse hat daher einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten.

Die Streckenlänge wirkt sich zusätzlich auf die Sachkosten im Personenfernverkehr und die Fahrzeugvorhaltungskosten aus. Der Einfluss der Streckenlänge ist gegenüber dem der Zugmasse jedoch weniger bedeutsam.

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Einflüsse auf die Kosten des Personenverkehrs enthält Tabelle 6.1-2. Für den Güterverkehr gibt Tabelle 6.1-3 die wesentlichen Einflüsse wieder.

fixe Kosten	variable Kosten	
	proportional zur Anzahl der Züge	und zur realisierten Beförderungszeit
	Abfertigung	Sachkosten im PNV
	Zugbildung	Unterhaltung der Wagen
	Sachkosten im PFV	Abschreibung
	Unterhaltung der Triebfahrzeuge	Verzinsung
		Personal
		Gemeinkosten

Tab. 6.1-2: Kostenkomponenten im Personenverkehr nach Einflussgrößen

fixe Kosten	variable Kosten	
	proportional zur Anzahl der Züge	und zur realisierten Beförderungszeit
	Abfertigung	Zugbildung
	Sachkosten	Unterhaltung der Fahrzeuge
		Abschreibung
		Verzinsung
		Personal
		Gemeinkosten

Tab. 6.1-3: Kostenkomponenten im Güterverkehr nach Einflussgrößen

Zusammenfassend lässt sich mit den Erkenntnissen aus Unterkapitel 6.1.2 feststellen, dass ein Teil der Kostenkomponenten fix ist, ein anderer linear mit der Anzahl der Züge, der Großteil der Kostenkomponenten aber zusätzlich auch proportional zur realisierten Beförderungszeit wächst. Zudem steigt der weitaus überwiegende Teil der Kostenkomponenten linear mit der Masse.

Als physikalischer Maßstab für die Kosten ergibt sich somit:

$$Kosten_{Gesamt} \sim c_0 \cdot L_{Strecke} + c_1 \cdot \sum_{Zug} m_{Zug} + c_2 \cdot \sum_{Zug} (m_{Zug} \cdot t_{Bef Zug}) \quad (6.1-1)$$

mit

$Kosten_{Gesamt}$	Gesamtkosten einer Strecke [€]
c_0, c_1, c_2	Konstanten
$L_{Strecke}$	Länge der Strecke [km]
m_{Zug}	Masse eines Zuges [t]
$t_{Bef Zug}$	realisierte Beförderungszeit [min]

Aufgrund der Vielzahl der von der realisierten Beförderungszeit und der Zugmasse abhängigen Kostenkomponenten kommt diesen beiden Grundgrößen bei der weiteren Analyse des Maßstabs besondere Bedeutung zu.

6.1.4 Abschätzung der Bedeutung der Einflussgrößen für die Kosten an einem Beispiel

Das Ziel dieses Unterkapitels besteht darin, anhand eines Beispiels das Gewicht der Einflussgrößen bei der Entstehung der Kosten abzuschätzen.

Dabei sind sowohl die in Gleichung (6.1-1) verwendeten Variablen als auch die nicht eingeflossene zugbezogene Größe „Länge des durchfahrenen Abschnitts“ zu untersuchen. Aufgrund der Ergebnisse des Unterkapitels muss der physikalische Maßstab gegebenenfalls um die letztgenannte Größe erweitert oder kann um wenig relevante Terme vereinfacht werden.

Um die Ergebnisse zur Bedeutung der Einflussgrößen zusätzlich abzusichern, werden die Kosten der EVUs zusätzlich mit dem Verfahren nach Breimeier ermittelt. Das Verfahren nach Breimeier [5] ermöglicht die Bestimmung der Kosten für den Personenfernverkehr und den Güterverkehr, die zusammen im Beispiel den größten Teil der variablen Kosten ausmachen. Für den Personennahverkehr kommen Werte aus einem DB-internen Tool zur wirtschaftlichen Bewertung [16] sowie anhand von Analogieschlüssen festgelegte Werte nach [5] zur Anwendung. Die Fahrwegkosten lassen sich gemäß Unterkapitel 6.1.2 über den Ansatz für die Streckenstandards berechnen.

Für den Personenfernverkehr und den Güterverkehr unterscheidet Breimeier in seinem Verfahren die folgenden fünf Kostenkomponenten:

- Abfertigungskosten,
- Zugbildungskosten,
- Sachkosten,
- Fahrzeugvorhaltungskosten sowie
- Personalkosten.

Für die Beispielrechnung werden diese Kostenkomponenten mit Hilfe der Kostensätze in Abhängigkeit von der Zuganzahl auf einer Eisenbahnstrecke in Simulationsstufen berechnet. Dabei sind die Erkenntnisse über die Einflussgrößen auf die Kosten im Personen- und Güterverkehr aus Unterkapitel 6.1.3 (s. Tab. 6.1-2 und 6.1-3) heranzuziehen, um aus den von Breimeier verwendeten Durchschnittskostensätzen pro Jahr von der Auslastung abhängige Kostensätze zu bilden.

Für die Kosten des Fahrwegs kommen aufgrund der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und des Betriebsprogramms die Kostensätze für den Streckenstandard M160, der zudem bezogen auf die Netzlänge der DB AG und die Verkehrsmengen eine große Bedeutung hat, zum Ansatz.

Für den Personennahverkehr wird mit den im Weiteren zusammengestellten Annahmen gerechnet. Die Kostensätze für die Abfertigungs- und Sachkosten stammen aus [16]. Für die Zugbildungs-, Personal- und Vorhaltungskosten im Personennahverkehr kommen die Kostensätze für IR-Wagen von Breimeier zur Anwendung, um so annähernd eine Vergleichbarkeit der Kostenkomponenten untereinander herzustellen.

Für die Gemeinkosten der EVUs liegen aus dem Ansatz von Breimeier keine Werte vor. Die Standardisierte Bewertung, Anhang 1 [33], verwendet im Rahmen der Berechnung der Folgekosten einer Maßnahme einen pauschalen Wert von 15 % auf alle Kosten außer Stations- und Trassenkosten. Dieser Pauschalwert wird für die Beispielrechnung auf die Kosten einer Streckenauslastung bei optimaler Auslastung bezogen und gemäß dem Ansatz aus der Zuko (Kap. 6.1.3) in Abhängigkeit von der realisierten Beförderungszeit je Simulationsstufe ausgerechnet und dann als variable Kosten je Simulationsstufe aufaddiert.

Als Beispielstrecke dient eine circa 35 Kilometer lange zweigleisige Strecke aus [49] mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Ihre Länge entspricht laut [49] recht gut der mittleren Länge der Streckenabschnitte im Netz der DB AG. Das

Betriebsprogramm besteht aus den drei Modellzügen InterCity (IC), StadtExpress (SE) und Durchgangsgüterzug (Dg), die alle drei den gleichen Anteil an der Gesamtzuganzahl haben. Für die Berechnung der Kosten sind weiterhin die Zugmassen als Bruttomasse des Wagenzugs sowie die Regelfahrzeit der Züge erforderlich (s. Tab. 6.1-4).

Modellzug	Rang im Fahrplan und im Betrieb	t_{FZ} [min]	t_{Ve} [min]	p_{Ve} [%]	m_{Zug} [t]
IC	2	16,5	4,3	26	500
SE	12	20,8	4,0	20	200
Dg	16	22,5	20,0	40	1600
t_{Ve} mittlere Einbruchsverspätung eines Zuges					
p_{Ve} Wahrscheinlichkeit der Einbruchsverspätung					

Tab. 6.1-4: Eingangswerte für die Beispielrechnung [49]

Aufgrund der zuvor (Kap. 6.1.2 und 6.1.3) identifizierten großen Bedeutung der Zuganzahl und der realisierten Beförderungszeit für die Höhe der Kosten wird zunächst untersucht, inwieweit sich die Kosten durch diese beiden Grundgrößen beschreiben lassen. Daran schließt sich die Untersuchung der Bedeutung der beiden weiteren wesentlichen Eingangsgrößen, der Fixkosten, der Zugmasse und der Streckenlänge, an.

Zur Ermittlung der Kosten sind zunächst die Wartezeiten zu berechnen. Diese Berechnung soll anhand von Tools, die den Stand der Technik entsprechen, erfolgen (vgl. Kap. 4.2) Da die Leistungsfähigkeit einer Eisenbahnstrecke auch durch die angrenzenden Knoten bestimmt wird, sind Wartezeiten sowohl für die Strecke als auch für diese Knoten zu bestimmen. Während Jochim in [35] noch auf eine komplizierte Verrechnung der Wartezeiten im Knoten und auf der Strecke zurückgreift, wurden in der vorliegenden Arbeit aufgrund dieser Anforderungen die beiden Tools „Bahnbetriebssimulation“ [29] und „Asynchrone Disposition“ [34] verwendet. Diese beiden am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entwickelten Simulationstools bieten die Möglichkeit, die Wartezeiten bei der Trassenvergabe und bei der Betriebsdisposition sowohl für einen Streckenabschnitt als auch dessen anschließenden Knoten zusammen zu berechnen. Dieser Vorteil unterscheidet sie nicht nur von den bereits vorhandenen Simulationsverfahren der SLS-Familie sondern auch von den analytischen Verfahren.

Das Tool BABSI ist eine Weiterentwicklung der asynchronen Simulationsverfahren der SLS-Familie zur Fahrplanerstellung und Betriebsabwicklung. Es bietet die Mög-

lichkeit einer verfeinerten Konfliktlösung insbesondere auf eingleisigen Strecken und in kleineren Netzen. Das Tool ASDIS liefert erstmals einen asynchronen Ansatz zur automatischen Disposition bei der Betriebsabwicklung auf Basis einer spurplanfeinen Infrastruktur. Durch die exakte Fahrzeitrechnung lässt sich eine genaue Prognose für die weiteren Fahrtverläufe und die Belegungszeiten aufstellen, die die Grundlage für die Identifikation und Lösung der Konflikte liefert.

Für die Beispielstrecke wurden die Wartezeiten im Fahrplan mit BABSI und die Wartezeiten im Betrieb mit ASDIS berechnet. Die Simulationen erfolgten für fünf Hochrechnungsstufen, wobei das Mischungsverhältnis bewusst konstant blieb. Die Hochrechnungsstufen und die entsprechende Gesamtanzahl der Züge enthält Tabelle 6.1-5. Tabelle 6.1.6 gibt die Wartezeiten bei der Trassenvergabe und im Betrieb wieder.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
Gesamtzuganzahl	0	51	96	102	153	204

Tab. 6.1-5: Gesamtanzahl der Züge je Simulationsstufe für die Beispielstrecke

Modell- zug		Belegungsgrad der Strecke [-]					
		0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
	Wartezeiten je Zug [min] im Zustand der						
IC	Trassen- vergabe	0	0,7	1,1	1,2	1,3	3,5
SE		0	0,1	0,2	0,4	5,2	10,0
Dg		0	3,2	9,4	8,8	38,9	244,5
IC	Betriebs- disposition	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
SE		0	0,2	0,6	0,6	1,2	3,5
Dg		0	1,1	6,3	11,4	66,2	89,7

Tab. 6.1-6: Wartezeiten je Zug und je Simulationsstufe für die Beispielstrecke

Die Leistungsfähigkeit der Strecke ergibt sich nach STRELE für das unterstellte Betriebsprogramm zu 12,2 Zügen pro Stunde und Richtung. Für den Betrachtungs-

zeitraum von 17 Stunden beträgt die Fahrplan-Nennleistung 96 Züge pro Richtung, entsprechend einem Belegungsgrad von $\rho = 0,46$.

Mit Hilfe der Werte aus den Tabellen 6.1-4 bis 6.1-6 lassen sich die Kosten auf die oben beschriebene Weise berechnen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse enthalten die beiden Tabellen 6.1-7 und 6.1-8, wobei der Personenfern- und Personen-nahverkehr aufgrund der gleichen Gewichtung zusammen dargestellt sind. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Zeilen zu erreichen, werden die prozentualen Anteile der Kostenkomponenten an den Gesamtkosten bezogen auf die Gesamtkosten bei Erreichen der Fahrplan-Nennleistung dargestellt.

Kostenkomponente	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
Abfertigungskosten in [%]	0	0,8	1,6	1,7	2,5	3,3
Sachkosten in [%]	0	24,0	45,2	48,1	72,1	96,1
Zugbildungskosten in [%]	0	1,7	3,2	3,4	5,0	6,7
Vorhaltungskosten in [%]	0	23,3	44,9	47,9	77,2	120,9
Personalkosten in [%]	0	2,7	5,2	5,6	9,5	15,4

Tab. 6.1-7: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Personenverkehr für die Beispielstrecke

Kostenkomponente	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
Abfertigungskosten in [%]	0	0,2	0,4	0,4	0,7	0,9
Sachkosten in [%]	0	6,2	11,6	12,3	18,5	24,7
Zugbildungskosten in [%]	0	15,2	40,8	48,5	217,3	810,7
Vorhaltungskosten in [%]	0	14,2	38,0	45,2	202,4	754,9
Personalkosten in [%]	0	3,4	9,2	10,9	48,9	182,5

Tab. 6.1-8: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Güterverkehr für die Beispielstrecke

In den Abbildungen 6.1-1 und 6.1-2 ist der Verlauf der einzelnen Kostenkomponenten über die fünf Simulationsstufen getrennt nach Personen- und Güterverkehr dargestellt.

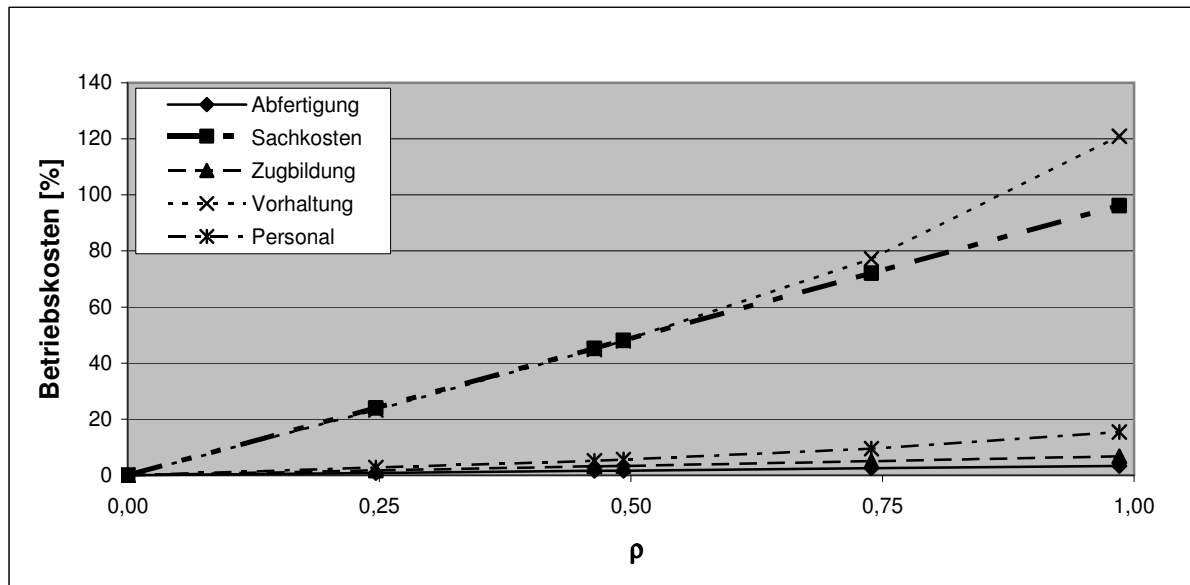


Abb. 6.1-1: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Personenverkehr für die Beispielstrecke

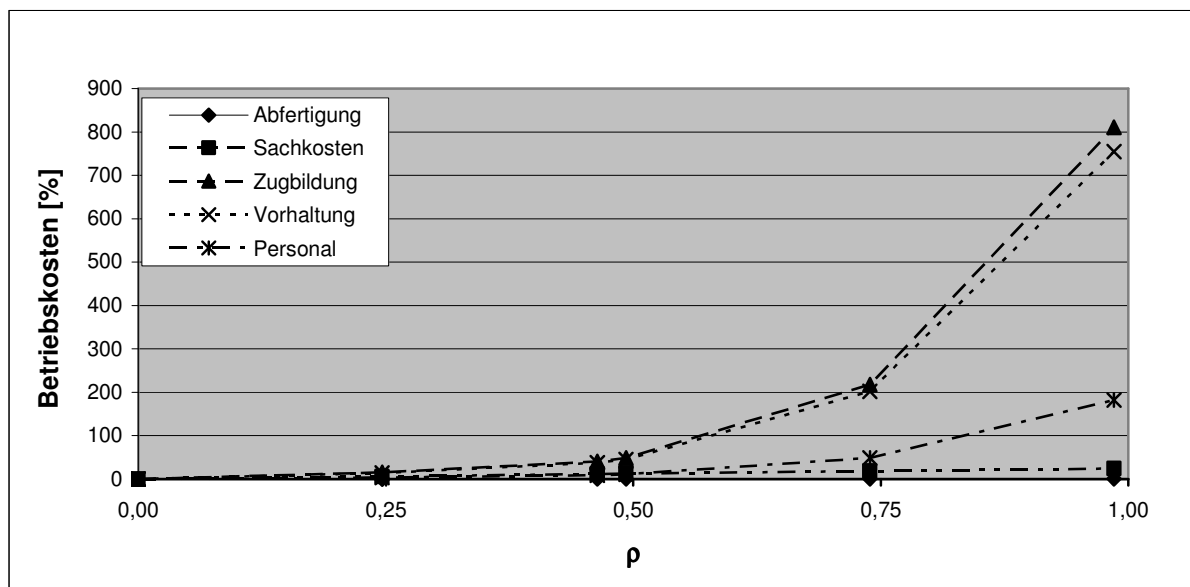


Abb. 6.1-2: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Güterverkehr für die Beispielstrecke

Aus den beiden Abbildungen und den Tabellen 6.1-7 und 6.1-8 lässt sich erkennen, dass einzelne Kostenkomponenten, wie die Vorhaltungs- und Personalkosten, einen

sehr hohen Anteil an den Gesamtkosten besitzen und ihre Bedeutung für den Verlauf der Gesamtkostenkurve über alle Simulationsstufen gleichmäßig hoch ist.

Beim Güterverkehr verändert sich die Bedeutung der verschiedenen Kostenkomponenten über die einzelnen Simulationsstufen aufgrund der starken Veränderung der Wartezeiten. Die Wartezeiten führen zu einer deutlichen Änderung der zeitabhängigen Kosten. Da diese Kostenkomponenten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen, verändern sich die Gesamtkosten ebenfalls deutlich (vgl. Abb. 6.1-4).

Im Hinblick auf das Ziel, die Kosten durch eine physikalische Größe zu beschreiben, werden sie im Weiteren verschiedenen physikalischen Größen gegenübergestellt. Als wesentliche Einflussgrößen auf die Kosten ergeben sich nach Unterkapitel 6.1.3 die Anzahl der Züge und die realisierte Beförderungszeit. Eine physikalische Größe, die beide Einflussgrößen entsprechend ihrer Proportionalität zu den Kosten erfasst, ist die Summe der Beförderungszeiten:

$$\text{Betriebskosten} \sim \sum_{\text{Zug}} \hat{t}_{\text{Bef Zug}} = \sum_{\text{Zugtg}} (n_{\text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef Zugtg}})$$

Abbildung 6.1-3 enthält die Gegenüberstellung der Betriebskosten und der Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Personenverkehr, während Abbildung 6.1-4 die entsprechenden Werte für den Güterverkehr darstellt.

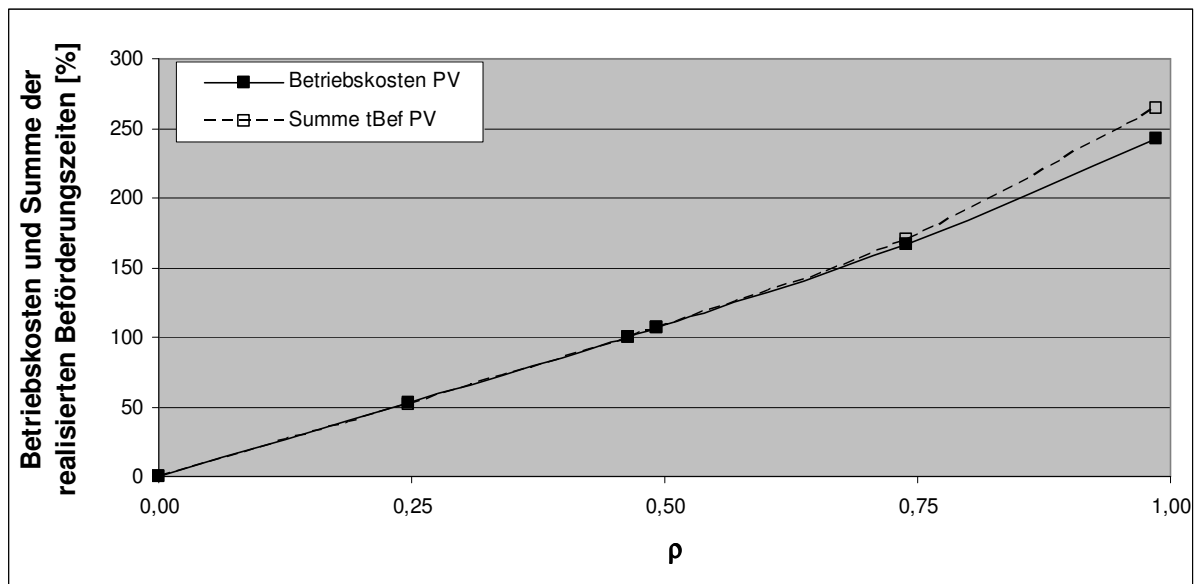


Abb. 6.1-3: Betriebskosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Personenverkehr für die Beispielstrecke

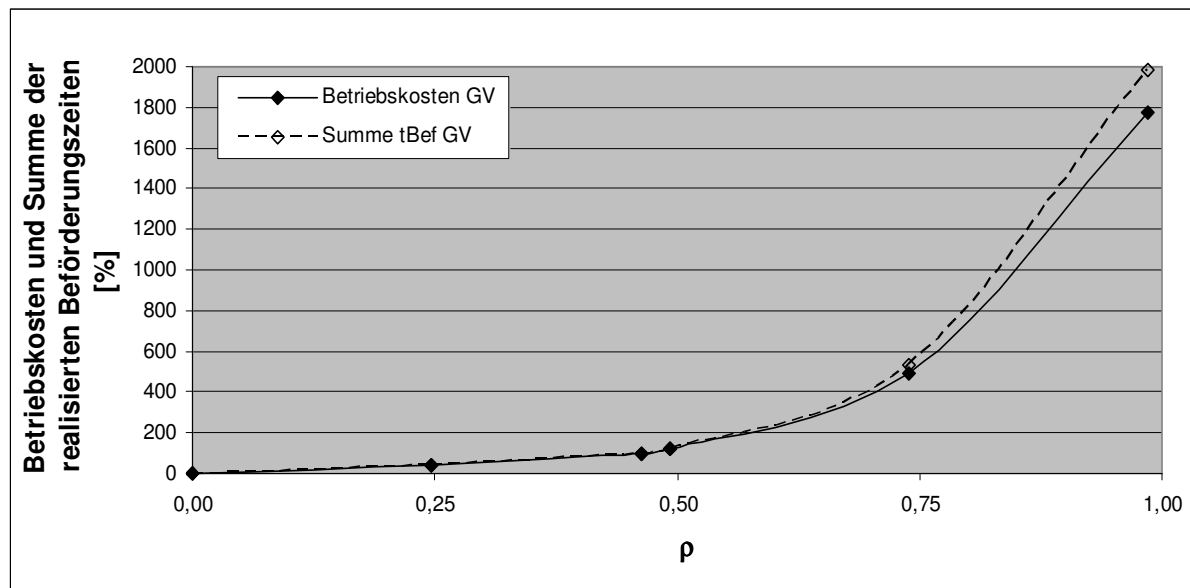


Abb. 6.1-4: Betriebskosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Güterverkehr für die Beispielstrecke

Die beiden Abbildungen zeigen, dass die realisierte Beförderungszeit die Kosten gut widerspiegelt. Die Abweichungen im Bereich hoher Belegungsgrade sind im Wesentlichen dadurch bedingt, dass die linear mit der Masse steigenden Kostenkomponenten bei diesem Ansatz nicht in den Maßstab einfließen. Zusammen mit der Normierung beider Kurven auf 100 % bei $\rho = 0,46$ führt dies zu höheren Werten für die normierte Summe der realisierten Beförderungszeiten.

Die Werte für die Kostenkomponenten für den Personen- und den Güterverkehr zusammen sowie für die Gemeinkosten und den Fahrweg sind in Tabelle 6.1-9 hinterlegt. Die Abbildung 6.1.5 enthält die Gegenüberstellung von Gesamtkosten und realisierter Beförderungszeit.

Kostenkomponente	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
Abfertigungskosten in [%]	0	0,4	0,8	0,9	1,3	1,8
Sachkosten in [%]	0	12,8	24,1	25,6	38,4	51,1
Zugbildungskosten in [%]	0	5,9	15,3	18,0	76,1	278,4
Vorhaltungskosten in [%]	0	15,2	32,9	36,6	103,1	310,2
Personalkosten in [%]	0	2,4	5,4	6,2	20,8	68,8
Gemeinkosten in [%]	0	3,2	6,4	6,9	15,0	35,6
Fahrwegkosten in [%]	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2

Tab. 6.1-9: Gesamtkosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Gesamtverkehr für die Beispielstrecke

Die beiden Abbildungen zu den Betriebskosten (Abb. 6.1-3 und 6.1-4) zeigen eine bessere Übereinstimmung der Summe der realisierten Beförderungszeiten und der Kosten als Abbildung 6.1-5 zu den Gesamtkosten.

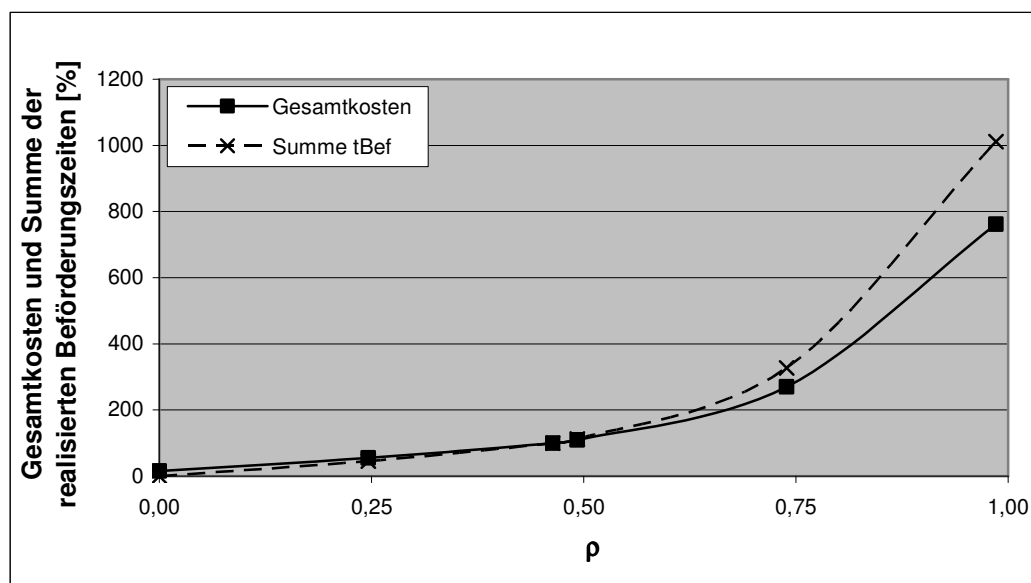


Abb. 6.1-5: Gesamtkosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Gesamtverkehr für die Beispielstrecke

Daraus lässt sich ableiten, dass die Summe der realisierten Beförderungszeiten als Einzelgröße nicht ausreicht, um die Gesamtkosten des Personen- und Güterverkehrs geeignet wiederzugeben.

Der Vergleich der beiden Abbildungen 6.1-3 und 6.1-4 zeigt, dass die Kosten im Güterverkehr in Abhängigkeit von der Anzahl der Züge stärker ansteigen als im Personenverkehr. Gleichzeitig zeigt ein Vergleich der absoluten Höhe der Kosten, dass die spezifischen Kosten im Güterverkehr höher liegen als im Personenverkehr. Bei einer Verrechnung der Kosten des Personen- und des Güterverkehrs mit physikalischen Größen ist dieser Unterschied ebenfalls zu berücksichtigen. Es reicht also nicht aus, die Kosten nur in Abhängigkeit von der Anzahl der Züge abzubilden. Eine weitere physikalische Größe, wie beispielsweise die Zugmasse als eine der weiteren wesentlichen Einflusskomponenten auf die Kosten, müsste in die Berechnung der Kosten einfließen.

Aus der Abbildung 6.1-5 lässt sich außerdem die Bedeutung der fixen Kosten des Fahrwegs bei der Bestimmung der Gesamtkostenkurve erkennen. Aufgrund dessen ist auch diese Kostenkomponente im physikalischen Maßstab zu berücksichtigen. Die Gesamtkosten ergeben sich deshalb zu:

$$Kosten_{Gesamt} \sim \frac{m_0 \cdot L_{Strecke}}{v_0} + \sum_{Zugtg} (m_{Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg}) \quad (6.1-2)$$

mit

$\frac{m_0}{v_0}$ Äquivalent für die fixen Kosten des Fahrwegs [$10^3 \cdot \text{min/km}$]

$L_{Strecke}$ Länge der Strecke

$\sum_{Zugtg} (m_{Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg})$ Summe realisierten Beförderungszeiten [$10^3 \cdot \text{min}$]

Die realisierte Beförderungszeit geht auch in die Erlösberechnung ein. Dort setzt sie sich jedoch aus anderen Zeitkomponenten zusammen, so dass von nun an eine Unterscheidung im Index vorgenommen wird.

Die Summe wird im Weiteren wegen der Bedeutung der Zeit für die Höhe der Kosten als Summe der realisierten Beförderungszeiten bezeichnet.

Gleichzeitig gilt:

$$\frac{K_{fix}}{K_{variabel}} = \frac{\frac{m_0 \cdot L_{Strecke}}{v_0}}{\sum_{Zuggtg} (m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg})} \quad (6.1-3)$$

Die Umformung nach $\frac{m_0}{v_0}$ liefert:

$$\frac{m_0}{v_0} = \frac{K_{fix}}{L_{Strecke}} \cdot \frac{\sum_{Zuggtg} (m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg})}{K_{variabel}} \quad (6.1-4)$$

Anhand dieser Gleichung lässt sich das Äquivalent für die fixen Kosten für jeden Streckenstandard pro Kilometer bestimmen. Die fixen Kosten je Kilometer können unmittelbar aus den verwendeten Daten zu den Streckenstandards übernommen werden. Die variablen Kosten lassen sich aus den Kosten je Zug und einer angenommenen mittleren Zuganzahl pro Tag je Streckenstandard aus [15] und [38] abschätzen. Den variablen Kosten steht die Summe der Produkte aus den Massen für diese Zuganzahl und der realisierten Beförderungszeit je Zug gegenüber. Die realisierte Beförderungszeit je Zug kann anhand einer geschätzten mittleren Geschwindigkeit je Zuggattung bestimmt werden. Für die Berücksichtigung des unterschiedlichen Einflusses der spezifischen Kosten auf die Kosten im Personen- und im Güterverkehr wurde eine Abschätzung anhand von Daten zum Umsatz und der Verkehrsleistung aus diversen Geschäftsberichten [9], [10] und [11] vorgenommen.

Über den Umsatz der einzelnen Bereiche, einer Annahme über eine durchschnittliche Besetzung je Zug und eines Zuggewichts wurden die Verkehrsleistungen für den Personennah- und -fernverkehr in Bruttotonnenkilometer umgerechnet. Daraus lässt sich die Erlösstärke einer Nettotonne im Personen- und Güterverkehr ermitteln. Unter der Voraussetzung, dass der Gewinn der DB AG gering ausfällt, können die Kosten den Erlösen gleichgesetzt werden. Somit ist die Aussage über die Erlösstärke des Personen- gegenüber dem Güterverkehr auf die Verhältnisse der Kosten übertragbar.

Mit den so ermittelten Größen lässt sich anhand von Gleichung (6.1-3) das gesuchte Äquivalent m_0/v_0 für die fixen Kosten je Streckenstandard berechnen. Die Ergebnisse enthält Tabelle 6.1-10.

Streckenstandard	m_0/v_0 [$10^3 \cdot \text{min/km}$]	Streckenstandard	m_0/v_0 [$10^3 \cdot \text{min/km}$]
P300	7785	M160	6799
P230	6398	G120	5972
M230	6409	R120	4283
P160I	6280	R80	3501
P160II	5103	G50	2919

Tab. 6.1-10: Äquivalent m_0/v_0 je Streckenstandard

In Abbildung 6.1-6 sind diese Ergebnisse den Fixkosten des Fahrwegs je Streckenstandard gegenübergestellt. Dabei wurde für die Darstellung eine Normierung auf die Werte des Streckenstandards M160 vorgenommen.

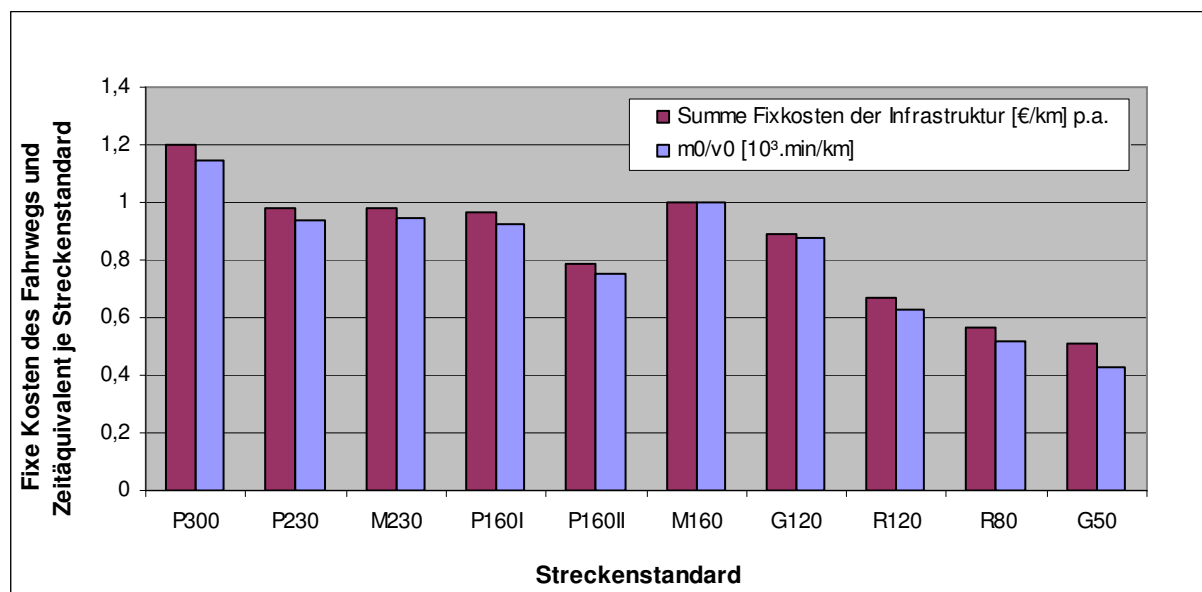


Abb. 6.1-6: Fixe Kosten des Fahrwegs und Größe m_0/v_0 je Streckenstandard

Mit dem Wert für das Äquivalent m_0/v_0 für den Streckenstandard M160 lässt sich die Summe der Beförderungszeiten nach Gleichung (6.1-2) neu ermitteln und den Gesamtkosten erneut gegenüberstellen (vgl. Abb. 6.1-7)

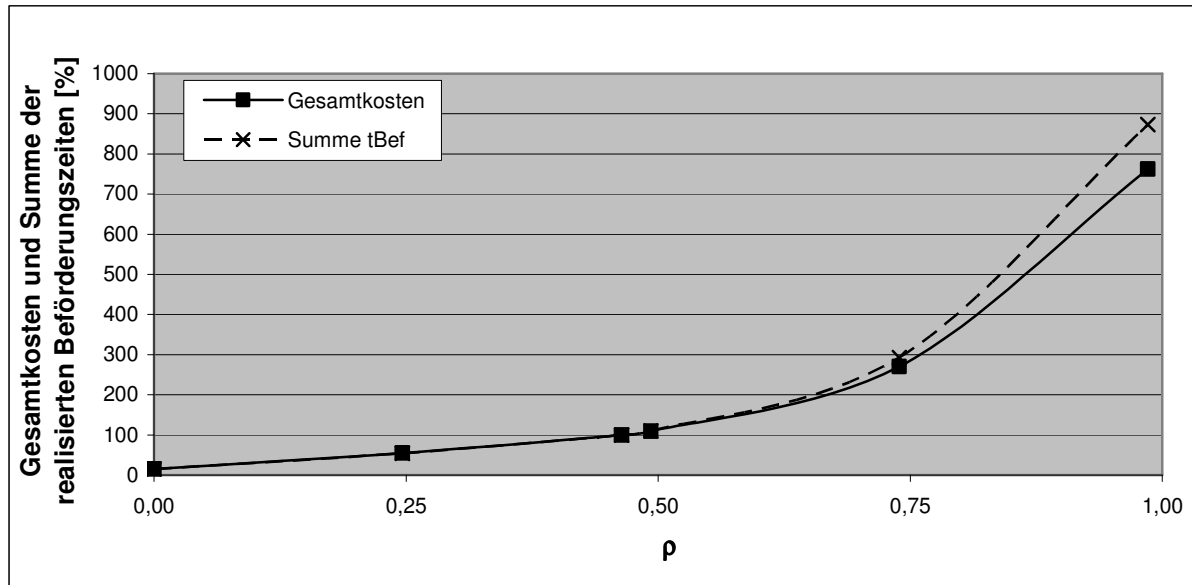


Abb. 6.1-7: Gesamtkosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Gesamtverkehr unter Verwendung des Äquivalents m_0/v_0 für die Beispielstrecke

Die Kosten umfassen neben den fixen und den zeitabhängigen Kosten auch Komponenten, die linear mit der transportierten Menge ansteigen. Die letztgenannten Komponenten sind in dem Maßstab nach Gleichung (6.1-2) nicht enthalten, da sie gemäß der Tabellen 6.1-7 und 6.1-8 in den für die Betrachtung relevanten Bereichen mit circa 2 % für den Personenverkehr und weniger als 20 % für den Güterverkehr nur einen geringen Teil der Kosten ausmachen. Im Hinblick auf die geforderte einfache Anwendbarkeit des Ansatzes (vgl. Kap. 4.1) sind die ausschließlich mengenabhängigen Kosten nicht explizit modelliert.

Daraus ergeben sich die geringfügigen Abweichungen zwischen den Kosten und der Summe der realisierten Beförderungszeiten. Bei einer Auslastung von $\rho = 0,75$ beträgt der Unterschied zwischen den beiden Kurven circa 9 % und bei Erreichen der Leistungsfähigkeit ($\rho \approx 0,99$) weniger als 15 %. Bei mangelhafter Betriebsqualität ergibt sich eine Differenz von circa 14 %, bei sehr guter Betriebsqualität circa -2 %. Im Bereich realistischer Auslastungen liefert die verwendete physikalische Größe somit eine gute Approximation.

Die so ermittelte Summe der realisierten Beförderungszeiten erscheint daher eine geeignete physikalische Größe zur Beschreibung der variablen Kosten zu sein. Sie bildet insbesondere die wartezeitabhängigen Kostenkomponenten, die einen großen Teil der Kosten ausmachen, zuverlässig ab. Über das Äquivalent m_0/v_0 lassen sich die Fixkosten berücksichtigen. Damit sind alle Summanden aus Gleichung (6.1-1) auf ihre Relevanz untersucht.

Abschließend erfolgt die Sensitivitätsanalyse für die letzte wesentliche Eingangsgröße. Die Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke hatte sich aus der Analyse der Einflussgrößen für die Kosten in den Unterkapiteln 5.2 und 6.1.3 zusätzlich zur Zeit als ebenfalls zu untersuchen ergeben.

Für die Untersuchung wird die Streckenlänge halbiert, die anderen Eingangsgrößen bleiben jedoch unverändert. Die so entstandenen Betriebskosten sind auf die Betriebskosten bei $\rho = 0,46$ und einfacher Streckenlänge normiert, so dass sich die Werte unmittelbar mit den Angaben in den Tabellen 6.1-7 und 6.1-8 vergleichen lassen.

Kostenkomponente	Belegungsgrad der Strecke					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
Abfertigungskosten in [%]	0	0,8	1,6	1,7	2,5	3,3
Sachkosten in [%]	0	12,0	22,6	24,0	36,0	48,1
Zugbildungskosten in [%]	0	0,8	1,6	1,7	2,5	3,4
Vorhaltungskosten in [%]	0	45,7	87,0	92,7	144,4	210,5
Personalkosten in [%]	0	5,3	10,1	10,8	17,4	25,8

Tab. 6.1-11: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Personenverkehr bei Verdoppelung der Streckenlänge für die Beispielstrecke

Kostenkomponente	Belegungsgrad der Strecke					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
Abfertigungskosten in [%]	0	0,22	0,42	0,45	0,67	0,9
Sachkosten in [%]	0	3,09	5,81	6,17	9,26	12,3
Zugbildungskosten in [%]	0	28,03	64,85	74,05	255,69	861,8
Vorhaltungskosten in [%]	0	26,10	60,39	68,96	238,10	802,5
Personalkosten in [%]	0	6,31	14,60	16,67	57,55	193,98

Tab. 6.1-12: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Güterverkehr bei Verdoppelung der Streckenlänge für die Beispielstrecke

Wie den beiden Tabellen 6.1-11 und 6.1-12 zu entnehmen ist, verändern sich alle Kostenkomponenten in ihrer Höhe, da sich die Verdoppelung der Streckenlänge sowohl auf die variablen Kosten über die Veränderung der Fahr- und Wartezeiten als auch auf die fixen Kosten auswirkt.

Eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Kostenkomponenten zeigt, dass sich die Bedeutung der einzelnen Kostenkomponenten zueinander nicht verändert. Auch eine Veränderung der Sensitivität der Kosten gegenüber der Beförderungszeit ist nicht zu erkennen.

Die Gegenüberstellung der Gesamtkostenkurve und der Summe der realisierten Beförderungszeit enthält Abbildung 6.1-8. Demnach stellt die gewählte physikalische Größe hier ebenfalls eine gute Näherung für die Kosten dar. Die Abweichungen zwischen den Kosten und der Summe der realisierten Beförderungszeiten liegen für die Vergleichspunkte ähnlich hoch wie im Beispiel mit der einfachen Streckenlänge.

Bei sehr guter Betriebsqualität beträgt der Unterschied zwischen den beiden Kurven circa 0,5 %, bei einer Auslastung von $\rho = 0,75$ circa -3,3 %. Bei mangelhafter Betriebsqualität ergibt sich eine Differenz von ebenfalls circa -5 % und bei Erreichen der Leistungsfähigkeit ($\rho \approx 0,99$) von weniger als -6 %.

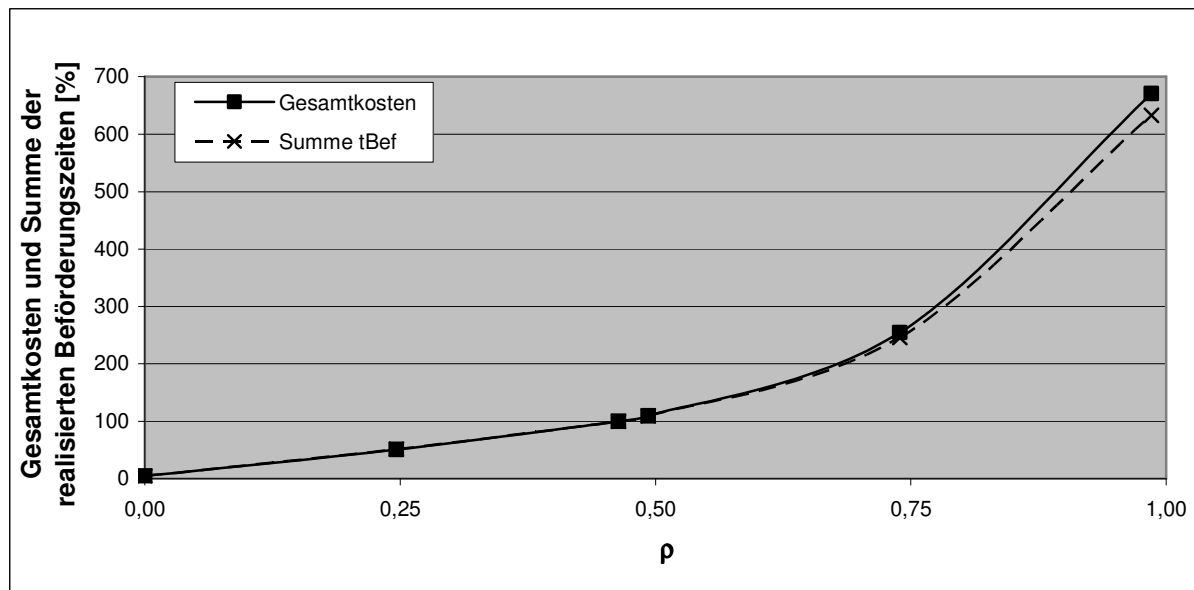


Abb. 6.1-8: Gesamtkostenkurve und Summe der realisierten Beförderungszeiten bei Verdoppelung der Streckenlänge für die Beispielstrecke

6.1.5 Zusammenfassung für die Kosten

Bei den Kosten lassen sich belastungsunabhängige, ausschließlich mit der Belastung linear wachsende und zusätzlich proportional zur realisierten Beförderungszeit veränderliche Kostenkomponenten unterscheiden. Eine quantitative Abschätzung ergab, dass die fixen Kosten einen Großteil der Gesamtkosten bilden. Von den variablen Kosten verhält sich der weit überwiegende Anteil sowohl proportional zur Belastung als auch proportional zur realisierten Beförderungszeit je Zug.

Daher wurde zur physikalischen Beschreibung der Gesamtkosten jeweils ein Summand für die fixen und für die zeitabhängigen Kosten gewählt. Ein lastunabhängiges Äquivalent bildet die fixen Kosten ab, das Produkt aus der Masse und der lastabhängigen Summe der realisierten Beförderungszeiten über alle Züge modelliert die variablen Kosten.

Somit ist die Identifikation der relevanten betriebswirtschaftlichen Einflussgrößen sowie ihre Transformation in physikalischen Größen gelungen. Alle verwendeten physikalischen Größen lassen sich problemlos aus den für Leistungsuntersuchungen ohnehin erforderlichen Datensätzen sowie der Tabelle 6.1-10 entnehmen.

Der Maßstab für die Kosten konnte sowohl direkt aus den betriebswirtschaftlichen Formeln für die einzelnen Kostenkomponenten hergeleitet als auch durch Beispiele belegt und einer Sensitivitätsanalysen unterzogen werden. Damit ist die Entwicklung

dieses Maßstabs abgeschlossen. Er gilt gleichermaßen und unverändert für den Personen- und den Güterverkehr und sichert dadurch die Konsistenz der Modellergebnisse.

6.2 Erlösfunktion für den Personenverkehr

6.2.1 Einleitung

Ziel dieses und des folgenden Unterkapitels 6.3 ist – entsprechend dem Vorgehen in Unterkapitel 6.1 für die Kostenfunktion – die theoretische Herleitung des physikalischen Ansatzes zur Beschreibung der Erlösfunktion in Abhängigkeit vom Belegungsgrad einer Eisenbahnstrecke. Anhand der Analyse bestehender betriebswirtschaftlicher Verfahren zur Berechnung der Erlöse werden geeignete physikalische Größen zur Abbildung der Einflussgrößen auf den Erlös identifiziert. Die Untersuchungen erfolgen getrennt für den Personen- und für den Güterverkehr in den Unterkapiteln 6.2 und 6.3.

Im Personenverkehr hängt die Höhe des Erlöses eines Zuges im Wesentlichen ab

von der Länge $L_{\text{Abschnitt}}$ des von einem Zug durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke,

von der Anzahl F der Reisenden in diesem Zug und

vom spezifischen Erlös $E_{\text{spez},PV}$ je Reisendem und Kilometer.

Das Produkt dieser drei Größen ergibt den Erlös *einer* Zugfahrt auf einem Streckenabschnitt zwischen zwei planmäßigen Halten. Der auf einem Streckenabschnitt insgesamt im Personenverkehr erzielte Erlös ist die Summe der Erlöse der einzelnen Reisezüge, die die untersuchte Strecke durchfahren. Im Folgenden wird geprüft, in wie weit sich die genannten drei Größen sowie die Zuganzahl durch physikalische Größen beschreiben lassen.

Die *Länge des von einem Zug durchfahrenen Abschnitts* der untersuchten Strecke ist eine betriebsprogrammspezifische Größe und wird direkt als Grundgröße in die physikalische Erlösberechnung übernommen.

Die *Anzahl F der Reisenden* je Zug hängt vom Nachfrageverhalten ab und lässt sich anhand von entsprechenden Modellen berechnen.

Das Nachfrageverhalten ist unter anderem eine Funktion des Verkehrsangebots, das beispielsweise durch die Betriebsqualität und somit durch die Streckenauslastung bestimmt wird. Den Gegenstand der weiteren Überlegungen bildet daher die Ermittlung des Einflusses einer Änderung des Verkehrsangebots der Bahn auf die Anzahl der Reisenden je Zug.

Eine Ausweitung des Angebots würde beispielsweise eine Anhebung der Anzahl der Züge je Zeiteinheit bedeuten. Eine Ausweitung erfolgt in der Regel aber nur dann, wenn sich ein entsprechendes Nachfragepotential wirtschaftlich rentabel erschließen lässt. Eine solche Ausweitung kann sich dann sowohl auf bestehende als auch auf neue Produkte und Relationen beziehen. Dieser Einfluss ist abzubilden und fließt über die Variable F als Anzahl der Reisenden je Zug in den Erlös ein (vgl. Kap. 6.2.2).

Mit steigender Zugzahl nehmen die Behinderungen der Züge untereinander überproportional zu. Diese Behinderungen führen dazu, dass die Angebotsqualität und folglich die Attraktivität des Eisenbahnverkehrs abnehmen. Dadurch verringern sich die Anzahl der Reisenden und die Erlöse pro Zug. Bei sehr hohen Belegungsgraden sinkt mit zunehmender Zuganzahl auch die Summe der Erlöse über alle Züge, also der Gesamterlös der Strecke, da die Auslastung der Züge durch ein geändertes Nachfrageverhalten überproportional abnimmt. Das heißt, dass die Züge gegebenenfalls insgesamt weniger Personen befördern. Der Faktor, der im Weiteren die Nachfragereaktion auf die auslastungsabhängigen Qualitätseigenschaften abbildet (vgl. Kap. 6.2.3), wird als Faktor $f_{N,PV}$ bezeichnet.

Bei der Ermittlung des Erlöses eines Zuges unter Berücksichtigung der Nachfrage besteht allerdings das Problem, dass sich die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung und die Nachfrage auf unterschiedliche räumliche Größen beziehen. Abbildung 6.2-1 verdeutlicht diesen Sachverhalt graphisch.

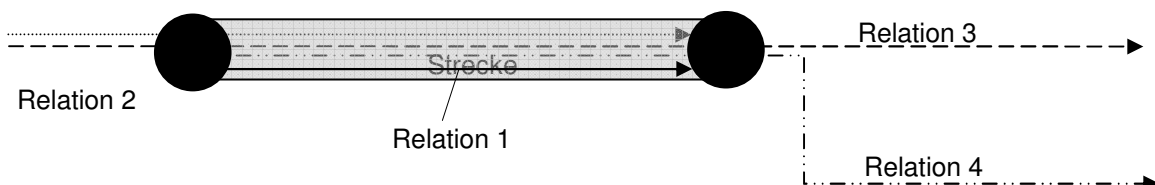


Abb. 6.2-1: Beispielhafte Darstellung einer Eisenbahnstrecke und mit ihr bediente Relationen

Die Verkehrsnachfrage wird in der Regel mit Verkehrsnachfragemodellen je Quell-Ziel-Relation berechnet (in Abb. 6.2-1: 4 Relationen), während die Fahrplan-Nennleistung bezogen auf eine Eisenbahnstrecke zu ermitteln ist. Ein kleiner Teil der Quell-Ziel-Relationen beginnt am Anfang der zu untersuchenden Strecke und endet am Ende dieser Strecke (in Abb. 6.2-1: Relation 1). In der Regel sind die Quell-Ziel-Relationen jedoch nicht deckungsgleich mit einzelnen Eisenbahnstrecken. Folglich müssen die über eine Strecke führenden Relationen ermittelt werden.

Die Verkehrsmenge auf einer Strecke ergibt sich als Summe über die Verkehrsmengen auf den der Eisenbahnstrecke zugeordneten Nachfragerelationen. Im Folgenden wird die Bestimmung der Nachfrage für eine Strecke beschrieben.

Zunächst ist das Aufkommen für die betroffenen Relationen zu bestimmen. Über entsprechende Verkehrsnachfragemodelle können der Anteil der einzelnen Verkehrsmittel, so auch der der Bahn, und das Verkehrsaufkommen ermittelt werden. Für eine exakte Berechnung muss zudem die Anzahl der Reisenden in Abhängigkeit der Streckenauslastung Berücksichtigung finden. Daraus ist ersichtlich, dass dieses Verfahren sehr viel Aufwand erfordert, da Berechnungen für jede Relation, die für die betrachtete Strecke relevant sind, erforderlich werden.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, mit zuggattungsspezifischen, aber mittleren Reiseweiten (Haus-Haus-Entfernung) zu rechnen. Dazu ist für jede Zuggattung die mittlere Reiseweite zu bestimmen und für diese unter Annahme typischer Angebotsmerkmale die Reaktion der Nachfrage des Verkehrsmittels Bahn als Funktion der Streckenauslastung zu ermitteln.

Eine Nachfrageberechnung für alle für eine Eisenbahnstrecke relevanten Relationen wäre wegen der vielen für die Berechnung notwendigen Annahmen, der Vielzahl der erforderlichen Daten (auch zu Konkurrenzverkehrsmitteln) und der erforderlichen Berechnungen nur mit sehr hohem Aufwand und großen Ungenauigkeiten realisierbar. Da auch der Nahverkehr mit einem in der Regel im Vergleich zum Fernverkehr hohen Aufkommen in die Berechnung eingeht, muss die Ermittlung des Aufkommens in der Nähe der untersuchten Eisenbahnstrecke sehr genau sein, andererseits müssen für den Fernverkehr auch sehr weit entfernte Relationen Berücksichtigung finden. Diese Genauigkeit ist mindestens in dem zu entwickelnden Ansatz, der sich gemäß der Zielstellung durch eine einfache Handhabbarkeit auszeichnen soll, nicht abbildbar.

Aus diesen Gründen eignet sich nur der Ansatz auf der Basis einer zuggattungsspezifischen mittleren Reiseweite.

Als vierte Größe beeinflusst der *spezifische Erlös* den Erlös je Zug. Er wird durch zahlreiche Faktoren wie die Reiseweite und den Fahrausweismix bestimmt.

Der Erlös eines Zuges im Personenverkehr auf einer Strecke ergibt sich folglich zu:

$$Erlös_{Zug,PV} = L_{Abschnitt} \cdot F \cdot E_{spez,PV} \cdot f_{N,PV}$$

Der mit einer Zugattung erzielte Erlös beträgt somit:

$$Erlös_{Zuggtg,PV} = L_{Abschnitt} \cdot n_{Zuggtg,PV} \cdot F \cdot E_{spez,PV} \cdot f_{N,PV} \quad (6.2-1)$$

woraus sich der im Personenverkehr auf einer Strecke erzielte Gesamterlös berechnet zu:

$$Gesamterlös_{Strecke,PV} = \sum_{Zuggtg} Erlös_{Zuggtg,PV}$$

In den Folgenden beiden Unterkapiteln werden die Ermittlung der Faktoren aus Gleichung (6.2-1) dargestellt und die Möglichkeiten zur Überführung in physikalische Größen untersucht.

6.2.2 Anzahl der Reisenden, Anzahl der Züge und spezifischer Erlös

Dieses Unterkapitel behandelt die Faktoren $n_{Zuggtg,PV}$, F und $E_{spez,PV}$ aus Gleichung (6.2-1).

Wie in Unterkapitel 6.2.1 ausgeführt steigt die Anzahl der Reisenden auf einer Strecke mit der Anzahl der Reisenden je Zug F und der Zuganzahl. Aufgrund der Überlegungen in Unterkapitel 6.2.1 und von Jochim (vgl. Kap. 3.3.2) ist die Anzahl F eine zugspezifische Konstante, so dass sich die Anzahl der Reisenden auf einer Strecke und die Zuganzahl zueinander proportional verhalten. Die Nachfragereaktion auf die Fahrplan- oder Betriebsqualität (durch den Faktor $f_{N,PV}$ abgebildet) ist nicht Gegenstand dieses Unterkapitels.

Die *Anzahl der Reisenden* je Zug F lässt sich entweder aus Zählungen ermitteln oder näherungsweise über einen mittleren Besetzungsgrad und die Anzahl der Sitzplätze beschreiben.

Der zu entwickelnde Ansatz soll sich zur Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung eignen. Die Fahrplan-Nennleistung dient insbesondere als Planungsparameter. Sie ist insofern keinen täglichen Schwankungen unterworfen und muss auch für geplante Zustände (Prognoseszenarien) ermittelbar sein. Um mit ihr eine über einen längeren Zeitraum gültige Aussage zu ermöglichen, werden für ihre Eingangsgrößen Werte für einen längeren Zeitraum benötigt. Im Falle der Ableitung der Anzahl der Reisenden aus Zählungen sind folglich Daten für einen längeren Zeitraum und eine entsprechende Mittelwertbildung erforderlich. Zählungen lassen sich zudem nur für den Ist-Zustand durchführen. Für geplante Zustände ist in jedem Fall eine Berechnung der Anzahl der Reisenden erforderlich.

Die Verwendung zuggattungs- oder streckenspezifischer Mittelwerte für den Besetzungsgrad könnte mit einer gewissen Ungenauigkeit verbunden sein. Eine Linie im Personenverkehr ist nur dann wirtschaftlich vertretbar, wenn eine gewisse Mindestauslastung erreicht wird. Gleichwohl darf auch keine regelmäßige „Überfüllung“ von Zügen auftreten, so dass eine Obergrenze für die Auslastung existiert. Eventuell vorhandene Unterschiede in der Auslastung zwischen verschiedenen Zügen auf einer Strecke werden zudem durch die linienbezogene Anpassung des Sitzplatzangebots verringert.

Größere abschnittsspezifische Unterschiede in der Auslastung einer Zuggattung lassen sich bei Vorhandensein entsprechender Daten ebenfalls berücksichtigen, indem die geschätzte anstelle der mittleren Auslastung für die Zuggattung multipliziert wird.

Wegen der oben aufgeführten Probleme von Zählungen und im Hinblick auf die angestrebte leichte Anwendbarkeit des Verfahrens erscheint die Verwendung eines mittleren Besetzungsgrades in Verbindung mit dem Sitzplatzangebot geeigneter.

Ein weiterer Faktor in Gleichung (6.2-1) ist der *spezifische Erlös pro Personenkilometer*. Diese Größe wird durch diverse Einflüsse, wie den Besitz einer BahnCard, die Reiseweite oder die benutzte Zuggattung (Zuschläge) bestimmt, die wiederum nur durch eine Zählung exakt zu erfassen wären. Aus den gleichen Gründen wie für die Anzahl F der Reisenden erfolgt auch für den spezifischen Erlös eine Differenzierung nach Zuggattungen. Die Übertragung in eine physikalische Größe geschieht gemeinsam mit der Eingangsgröße „Anzahl der Reisenden“, da es sich bei ihr ebenfalls um eine zuggattungsspezifische Größe handelt.

Das Produkt aus dem Sitzplatzangebot je Zug, dem Besetzungsgrad und dem spezifischen Erlös liefert den Erlös je Zugkilometer. Die Summe dieser Erlöse über alle

Züge des Personenverkehrs auf einer Strecke ergibt den Gesamterlös je Streckenkilometer im Personenverkehr.

Die physikalische Größe, die den Gesamterlös je Streckenkilometer beschreibt, muss die Anforderungen erfüllen, von der Zuggattung und der Strecke abzuhängen, streckenspezifische Eigenschaften der Zuggattungen (insbesondere das Sitzplatzangebot) zu berücksichtigen und linear mit der Anzahl der Züge auf einer Strecke zu wachsen. Dafür bietet sich das Produkt aus der Zuganzahl und

der Länge eines Zuges L_{Zug} oder

dem Gewicht eines Zuges m_{Zug}

an. Beide Größen sind leicht bestimmbar. Je nach Strecke und Zuggattung können sie unterschiedliche Werte annehmen und bieten dadurch die Möglichkeit, die unterschiedliche Erlösstärke der Zuggattungen infolge der unterschiedlichen Anzahl angebotener Sitzplätze oder des unterschiedlichen vorhandenen Komforts abzubilden. Die Anzahl der Züge allein würde deshalb als beschreibende Größe für den spezifischen Erlös je Kilometer Streckenlänge nicht ausreichen.

Zur Berücksichtigung der Erlösstärke je Bruttotonnenkilometer lässt sich die Abschätzung eventueller Unterschiede zwischen den Zuggattungen aus Unterkapitel 6.1.4 nutzen. Daraus ergaben sich Werte für den Erlösfaktor c_E im Personennah- und im -fernverkehr. Der Erlösfaktor ist auf die Erlösstärke des Personennahverkehrs als Verkehrsart, mit der die Eisenbahn insgesamt die höchsten Erlöse erzielt, normiert und beträgt circa eins.

Durch Verwendung der Masse als physikalische Größe für die Anzahl F der Reisenden und den spezifischen Erlös lässt sich mit

$$F \cdot E_{\text{spez},PV} = c_{\varepsilon,Zuggtg} \cdot m_{\text{Zug},PV}$$

Gleichung (6.2-1) umschreiben zu:

$$Erlös_{\text{Zuggtg},PV} = c_{\varepsilon,Zuggtg} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot m_{\text{Zuggtg},PV} \cdot f_{N,PV} \quad (6.2-2)$$

mit

$m_{\text{Zuggtg},PV} = m_{\text{Zug},PV} \cdot n_{\text{Zuggtg},PV} \cdot c_{E,\text{Zuggtg}}$ Produkt aus Masse eines Zuges, Anzahl der Züge der Zuggattung und dem Erlösfaktor [t]

$c_{E,\text{Zuggtg}}$ Proportionalitätskonstante

Der Gesamterlös ergibt sich unter Verwendung von Gleichung (6.2-2) dann wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Gesamterlös}_{\text{Strecke},PV} &= \sum_{\text{Zuggtg}} \text{Erlös}_{\text{Zuggtg},PV} \\ &= \sum_{\text{Zuggtg}} \left(c_{E,\text{Zuggtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot m_{\text{Zuggtg},PV} \cdot f_{N,PV} \right) \quad (6.2-3) \end{aligned}$$

Die Summe der Massen je Zuggattung hängt unter anderem von der Masse je Zug ab. Über diese Größe lassen sich streckenspezifische und tageszeitabhängige Einflüsse abbilden. Auch Unterschiede zwischen Zügen einer Modellzugklasse können damit erfasst werden.

Die Zugmasse ist in der Regel eine leicht prognostizierbare Größe. Sie erfüllt damit die Anforderung einer leichten Anwendbarkeit des Ansatzes in der Praxis (vgl. Kap. 4.1). Gleichzeitig ermöglicht die Zugmasse, wie in Unterkapitel 4.2 gefordert, streckenspezifische anstelle streckentypischer Merkmale zu verwenden.

Gleichung (6.2-2) enthält dadurch mit dem Faktor $f_{N,PV}$ nur noch eine Größe, die physikalisch zu beschreiben ist.

6.2.3 Ansätze zur Berechnung der Nachfragereaktion auf die Fahrplan- und Betriebsqualität

6.2.3.1 Grundlagen

Das Ziel von Unterkapitel 6.2.3 besteht darin, den Faktor $f_{N,PV}$, der die Nachfrage als Funktion der Fahrplan- und Betriebsqualität beschreibt, in eine physikalische Größe zu überführen.

Die mit zunehmender Streckenauslastung wachsenden Behinderungen im Fahrplan und im Betrieb führen zu geplanten und ungeplanten Reisezeitverlängerungen und dadurch zu Nachfrageänderungen für das Verkehrsmittel Bahn. Allerdings besteht ein Unterschied zwischen der Wirkung einer geplanten und einer ungeplanten Reisezeitveränderung gleicher Höhe auf die Nachfrage, die zudem vom Reisezweck abhängt.

Beispielsweise reagiert einerseits ein Urlaubsreisender weniger sensibel auf eine Verspätung seines Zuges als ein Geschäftsreisender. Andererseits ist - unabhängig vom Reisezweck - eine ungeplante Reisezeitverlängerung unangenehmer als eine, bereits in den Fahrplan eingearbeitete Reisezeitverlängerung gleicher Höhe. Als weiteres Angebotsmerkmal beeinflusst die Gesamtreisezeit die Verkehrsmittelwahlentscheidung.

Bisher ist es in den existierenden Modellen zur Bewertung der Betriebsqualität (s. auch Kap. 3.1 und 3.2) üblich, dass nur die Folgeverspätungen die Nachfrage beeinflussen. Die Wartezeiten im Fahrplan, die zu einer Verschiebung der gewünschten Trassenlage oder zu einer planmäßigen Verlängerung der Reisezeit führen, wirken sich aber auch auf die Nachfrage aus. Somit ist es erforderlich auch deren Einfluss in dem physikalischen Maßstab zu erfassen.

Die Quantifizierung dieser Zusammenhänge und ihrer Wirkung auf die Verkehrsnachfrage haben Arbeiten von British Rail [6], Jochim [35] und Ackermann [2] zum Gegenstand.

Die Untersuchung von British Rail kommt zu dem Ergebnis, dass Verspätungen gegenüber der Reisezeit circa 2,5mal negativer bewertet werden.

Die beiden Arbeiten von Jochim und Ackermann beschäftigten sich mit der Übertragung dieser Erkenntnisse auf die Verhältnisse in Deutschland und ermitteln Bewertungsfaktoren für die Fahr- und Wartezeiten, die sich nach Reisezweck und Reiseweite unterscheiden.

Jochim setzt den Bewertungsfaktor für die Fahrzeit und die Wartezeiten im Fahrplan für den Personennahverkehr in Anlehnung an [52] auf den Wert eins. Darauf aufbauend ermittelt Jochim reisezweckspezifische Zeitbewertungsfunktionen. Daraus bestimmt er über die Anteile der Reisezwecke je Zuggattung mittlere Zeitbewertungsfunktionen je Zuggattung:

$$ZB_{Zuggtg}(t_W) = \sum_{RZ} (A_{Zuggtg,RZ} \cdot ZB_{RZ}(t_W))$$

mit

ZB Zeitbewertungsfunktion [-]

$A_{Zuggtg,RZ}$ Anteil des Reisezwecks RZ bei der Zuggattung [%]

Die Untersuchung von Jochim ergibt für die gemeinsame Bewertung von Fahrzeiten und Wartezeiten im Fahrplan konstante Zeitbewertungsfunktionen. Der mittlere Zeitbewertungsfaktor je Zuggattung lässt sich somit unabhängig von der Höhe der zu bewertenden Zeit mit obiger Gleichung berechnen. Die Ergebnisse enthält Tabelle 6.2-1.

Zuggattung	Fahrzeitbewertungsfaktor
ICE	1,021
IC	0,943
EC	0,972
IR	1,032
D	1,018

Tab. 6.2-1: Zuggattungsspezifische Fahrzeitbewertungsfaktoren [35]

Die Verspätungsbewertungen für die Wartezeiten im Betrieb liegen differenziert nach Reisezweck und Reiseweite sowohl als

konstante Werte als auch als

Exponentialfunktionen

vor, wobei eine zweiparametrische Exponentialfunktion die empirisch ermittelten Werte etwas besser trifft. Die konstanten Werte für die Verspätungsbewertung liegen je nach Reisezweck zwischen 2 und 3,8. Die Funktionen für den exponentiellen Ansatz der Verspätungsbewertung haben die folgende Form:

$$ZB_{RZ\ B}(t_{WB}) = A \cdot e^{B \cdot t_{WB}}$$

mit

A, B Parameter gemäß Tabelle 6.2-2

Da die Zeitbewertungsfunktionen nicht konstant sind, lassen sich keine festen zuggattungsspezifischen Mittelwerte angeben. Die zur Berechnung dieser Mittelwerte in Unterkapitel 6.2.4 erforderlichen Anteile der Reisezwecke enthält ebenfalls Tabelle 6.2-2.

Reisezweck	Parameter $ZB_{RZ\ B}$		Anteile der Reisezwecke je Zuggattung				
	A	B	ICE	IC	EC	IR	D
dienst nah	1,238	0,0633	0,183	0,093	0,105	0,064	0,054
dienst weit	1,548	0,0506	0,175	0,089	0,100	0,061	0,052
Pendler nah	1,118	0,0517	0,075	0,119	0,147	0,254	0,271
Privat nah	1,3728	0,0527	0,269	0,264	0,261	0,315	0,293
Privat weit	1,76	0,0413	0,114	0,112	0,110	0,133	0,124
Urlaub nah	1,773	0,0556	0,039	0,069	0,055	0,036	0,044
Urlaub weit	2,19	0,0425	0,118	0,209	0,168	0,111	0,135
Pendler weit	1,48	0,0377	0,027	0,043	0,054	0,026	0,027

Tab. 6.2-2: Werte für die Parameter der $ZB_{RZ\ B}$ und Anteile der Reisezwecke (Auszüge aus [35])

Die mit Hilfe der Zeitbewertungsfunktionen bewertete Beförderungszeit errechnet sich wie folgt

$$t_{bew\ Bef} = (t_{Fz} + t_{WF}) \cdot ZB_{WF} + t_{WB} \cdot ZB_{WB} \quad (6.2-4)$$

und soll in die betriebswirtschaftlichen Ansätze zur Berechnung der Nachfrage und ebenfalls in den physikalischen Ansatz für den Faktor $f_{N,PV}$ einfließen. Mit diesem Ansatz besteht auch die Möglichkeit, die verschiedenen Anteile der Reisezwecke in den einzelnen Zuggattungen bei der Bewertung der Angebotsqualität zu berücksichtigen. Der Übersichtlichkeit halber wurde in diesem Unterkapitel auf einen Index für den Reisezweck verzichtet.

Der Faktor $f_{N,PV}$ bildet den Rückgang der Nachfrage pro Zug gegenüber der Nachfrage, die einem Belegungsgrad bei einer mit nur einem Zug belasteten Strecke entspricht ab. Somit gilt:

$$f_{N,PV} = \frac{F_1}{F_0} \quad (6.2-5)$$

mit

F_1 Anzahl der Reisenden je Zug bei Ansatz von Wartezeiten

F_0 Anzahl der Reisenden je Zug ohne Ansatz von Wartezeiten

Daraus ergibt sich notwendigerweise, dass der Faktor $f_{N,PV}$ nur Werte kleiner oder gleich eins annehmen kann. Der Faktor $f_{N,PV}$ fällt kontinuierlich mit steigendem Belegungsgrad.

Zur Bestimmung der Anzahl der Reisenden F als Funktion des Verkehrsangebots liegen verschiedene Modelle vor, die in den weiteren Unterkapiteln dargestellt und diskutiert werden. Als Grundlage für die Bewertung der verschiedenen Modelle sind hier zunächst Eigenschaften des Funktionsverlaufs des Faktors $f_{N,PV}$ zusammengestellt. Da sich ein Modell nur eignet, wenn der mit ihm berechnete Faktor $f_{N,PV}$ ebenfalls diese Eigenschaften aufweist, sind sie gleichzeitig Bedingungen für die Tauglichkeit des Modells.

Für den Faktor $f_{N,PV}$ ergeben sich die folgenden zwei Bedingungen:

Bedingung 1: Da bei einem Belegungsgrad nahe Null nahezu keine Wartezeiten auftreten, gilt dann $F_1 = F_0$ und folglich:

$$f_{N,PV}(0) = 1$$

Bedingung 2: Für die Zuggattungen im Betriebsprogramm mit den niedrigsten Rängen gehen die Wartezeiten für hohe Belegungsgrade gegen unendlich, so dass die Nachfrage gegen Null konvergiert:

$$f_{N,PV}(1) = 0$$

Zur Verdeutlichung des Verlaufs des Faktors $f_{N,PV}$ in Abhängigkeit vom Belegungsgrad ρ für die Zuggattung mit dem niedrigsten Rang dient Abbildung 6.2-2.

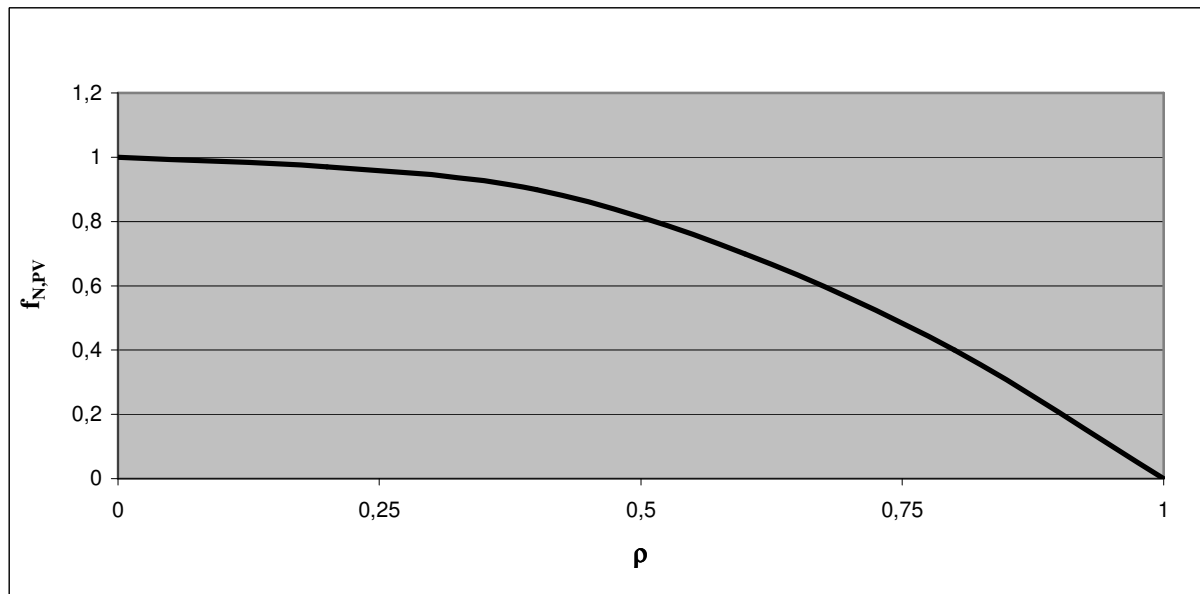


Abb. 6.2-2: Schematischer Verlauf der Kurve des Faktors $f_{N,PV}$ in Abhängigkeit vom Belegungsgrad ρ

Mit steigender Streckenauslastung sinken folglich die Auslastung der Züge und damit der Erlös pro Zug. Für die Berechnung des Faktors $f_{N,PV}$ werden im Folgenden mehrere Möglichkeiten vorgestellt. Die Auswahl der untersuchten Ansätze erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr werden allgemein bekannte und speziell für die Berechnung der Nachfrage im Eisenbahnverkehr entwickelte Modelle beschrieben.

6.2.3.2 Ansatz nach British Rail

British Rail [6] hat in den 1980er Jahren in einem Prognosehandbuch einen Ansatz zur wirtschaftlichen Bedeutung der Pünktlichkeit veröffentlicht, der Verspätungen über die entsprechende Nachfrageänderung als Erlösminderung beschreibt. Die so genannte „Cranfieldformel“ ist ein direct demand Modell, bei dem jeweils nur das untersuchte Verkehrsmittel betrachtet wird. Für das Verhältnis des Verkehrsaufkommens der Bahn gilt:

$$f_{N,PV} = \frac{F_1}{F_0} = \left(\frac{W_{t1}}{W_{t0}} \right)^{\varepsilon_t} \cdot \left(\frac{W_{p1}}{W_{p0}} \right)^{\varepsilon_p} \quad (6.2-6)$$

mit

F_0, F_1 Anzahl der Reisenden je Zug bei (Index 1) bzw. ohne (Index 0) Ansatz von Wartezeiten

W_{t0}, W_{t1} Verkehrswiderstände aus Zeiten

W_{P0}, W_{P1} Verkehrswiderstände aus Preisen

ε_t Gesamtzeitelastizität ($\varepsilon_t < 0$)

ε_P Preiselastizität

Um Verwechslungen zwischen Variablen zu vermeiden, entsprechen die in der Gleichung verwendeten Formelzeichen und Variablenbezeichnungen der in dieser Arbeit genutzten Nomenklatur.

Unter der Voraussetzung, dass die Auswirkungen aus einer Veränderung der Auslastung auf einer Eisenbahnstrecke untersucht werden und somit nur die zeitlichen Komponenten der Nachfrage variieren, entfällt der Term $\left(\frac{W_{P1}}{W_{P0}}\right)^{\varepsilon_P}$ für die weiteren Betrachtungen. Für den Verkehrswiderstand W_t gilt dann:

$$W_t = t_{Fz} + n_{Um} \cdot (2,5 \cdot \bar{t}_{Um} + 0,1 \cdot t_{Fz}) + 0,4 \cdot \bar{t}_{Takt} + 2,5 \cdot t_{WB} + 2,0 \cdot t_{Zu} \quad (6.2-7)$$

mit

t_{Fz} Regelfahrzeit

n_{Um} Anzahl der Umsteigevorgänge je Beförderungsfall

$\bar{t}_{Um}$ mittlere Umsteigezeit je Umsteigevorgang

$\bar{t}_{Takt}$ mittlere Taktzeit

t_{WB} durchschnittliche Verspätung

t_{Zu} Zugangs- und Abgangszeit

Wie die Formel zeigt, ergibt sich aus den Untersuchungen von BR für englische Verhältnisse ein Verspätungsbewertungsfaktor im Vergleich zur Fahrzeit von 2,5. Die Größenordnung des Bewertungsfaktors entspricht dem später von Ackermann für Deutschland ermittelten Faktor (vgl. Kap. 6.2.3.1).

Gleichung (6.2-6) lässt sich umschreiben zu:

$$f_{N,PV} = \frac{F_1}{F_0} = \left(1 + \frac{W_{t1} - W_{t0}}{W_{t0}}\right)^{\varepsilon_t}$$

Durch Einsetzen von Gleichung (6.2-7) ergibt sich:

$$f_{N,PV} = \frac{F_1}{F_0} = \left(1 + \frac{2,5 \cdot t_{WB}}{W_{t0}} \right)^{\varepsilon_t} \quad (6.2-8)$$

Die Tauglichkeit des so ermittelten Faktors $f_{N,PV}$ lässt sich durch Einsetzen der Gleichung (6.2-8) in die zwei in Unterkapitel 6.2.3.1 genannten Randbedingungen prüfen:

Bedingung 1:

$$f_{N,PV}(0) = \left(1 + \frac{2,5 \cdot 0}{W_{t0}} \right)^{\varepsilon_t} = 1$$

Bedingung 2: Für die Zugattungen im Betriebsprogramm mit dem niedrigsten Rang gelten:

$$f_{N,PV}(1) = \left(1 + \frac{2,5}{W_{t0}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} t_{WB}(\rho) \right)^{\varepsilon_t} = 0$$

mit

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} t_{WB}(\rho) = \infty \text{ und } \varepsilon_t < 0$$

Damit erfüllt der Ansatz vor British Rail beide Bedingungen und lässt sich daher als grundsätzlich geeignet einstufen.

Durch Einsetzen von Gleichung (6.2-8) in Gleichung (6.2-2) ergibt sich:

$$Erlös_{Zuggtg,PV} = c_{\varepsilon,Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg,PV} \cdot \left(1 + \frac{2,5 \cdot t_{WB}}{W_{t0}} \right)^{\varepsilon_t} \quad (6.2-9)$$

Mit Gleichung (6.2-8) wird für den Gesamterlös einer Strecke nach Gleichung (6.2-3) daraus:

$$Gesamterlös_{Strecke,PV} = \sum_{Zuggtg} \left[c_{\varepsilon,Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg,PV} \cdot \left(1 + \frac{2,5 \cdot t_{WB}}{W_{t0}} \right)^{\varepsilon_t} \right]$$

Die Übertragung des Faktors $f_{N,PV}$ in eine physikalische Größe erfolgt anhand einer Beispielrechnung in Unterkapitel 6.2.4.

6.2.3.3 VISEM

Ein gebräuchliches Modell zur Nachfrageberechnung ist das Wegekettenmodell, das der Software VISEM [42] zugrunde liegt. VISEM enthält Algorithmen für die drei Stufen Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung des 4-Stufen-Algorithmus.

Mit Hilfe dieses Modells, das eine Aufteilung des Raums in Zellen verwendet, kann die Verkehrsnachfrage für die Relationen zwischen den verschiedenen Zellen berechnet werden. Jedoch besteht in diesem Modell nur bei der Verkehrsaufteilung die Möglichkeit, von der Streckenauslastung abhängige Veränderungen der Angebotsqualität zu berücksichtigen.

Anhand von Aktivitätenketten berechnet das Programm VISEM das Quellaufkommen Q_i je Zelle i und verteilt es anschließend auf die verschiedenen Zielzellen j anhand der Zielattraktivitäten. Das Quellaufkommen Q_i ist das Produkt aus

einer Strukturgröße,

der Wahrscheinlichkeit, dass eine Aktivitätenkette durchlaufen wird und

der Anzahl der Wege innerhalb der Aktivitätenkette.

Die Wahrscheinlichkeit für die Wahl eines Zieles j für die Quellzelle i hängt von dem Widerstand zwischen den Zellen i und j , dem vorhandenen Zielpotential und der Widerstandsempfindlichkeit ab. Die Anzahl der Wege zwischen zwei Zellen ergibt sich zu:

$$F_{ij} = P_{ij} \cdot Q_i \quad (6.2-10)$$

mit

F_{ij}	Anzahl der Wege von Zelle i nach Zelle j
P_{ij}	Wahrscheinlichkeit für die Wahl des Zieles j für die Quellzelle i
Q_i	Quellaufkommen der Zelle i .

Die Wahrscheinlichkeit für die Wahl des Zieles j errechnet sich zu:

$$P_{ij} = \frac{Z_j \cdot f(w_{ij})}{\sum_k (Z_k \cdot f(w_{ik}))} \quad (6.2-11)$$

mit

Z_j Zielpotential in der Zelle j

w_{ij} Widerstand für einen Weg von Zelle i nach Zelle j

$f(w_{ij})$ Widerstandsfunktion folgender Form mit den Parametern α und β :

$$f(w_{ij}) = e^{-\alpha \cdot w_{ij}} \cdot w_{ij}^{\beta}$$

Im Wesentlichen bestimmen die Distanz oder die Fahrzeit, zum Beispiel des Verkehrsmittels MIV, den Widerstand. Üblicherweise wird der Parameter β zu Null gesetzt ($\beta = 0$), so dass die Verkehrsverteilung nach einem Logit-Ansatz erfolgt. Da nur die Distanz oder die Fahrzeit in diese Stufe einfließen, ist dieser Schritt der Nachfrageberechnung unabhängig von auslastungsabhängigen Wartezeiten.

Die so bestimmten Quell-Ziel-Verkehre werden in der dritten Stufe des Modells auf die verschiedenen Verkehrsmittel aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt getrennt

für verschiedene Bevölkerungsgruppen (z. B. mit und ohne Pkw-Verfügbarkeit),
anhand der Attribute, die die Verkehrsmittel beschreiben und
durch die Einschränkung der Wahlfreiheit innerhalb der Wegeketten.

Dem Modell, das die Verkehrsmittelwahl abbildet, liegt wiederum ein Logit-Ansatz zugrunde. Als Eingangsgröße dient der Nutzen je Verkehrsmittel, der aus den verschiedenen Attributen je Verkehrsmittel ermittelt wird. Die Wahrscheinlichkeit der Wahl des Verkehrsmittels m auf der Relation von i nach j beträgt für die Bevölkerungsgruppe g :

$$P_{gij}(m) = \frac{e^{U_{gij}(m)}}{\sum_k e^{U_{gij}(k)}} \quad (6.2-12)$$

mit

$P_{gij}(m)$ Wahrscheinlichkeit für die Bevölkerungsgruppe g , von i nach j das Verkehrsmittel m zu wählen

$U_{gij}(m)$ Summe der Nutzen der Bevölkerungsgruppe g bei der Wahl des Verkehrsmittels m von i nach j

Der Nutzen $U_{gij}(m)$ je Verkehrsmittel berechnet sich als die Summe über die Produkte aus dem Verkehrsmittelattribut und einem konstantem Grenznutzen je Attribut. Als Attribute gehen in die Berechnung ein:

die Fahrzeit von i nach j mit dem Verkehrsmittel m ,

die Summe aus der Zugangszeit in i und der Abgangszeit in j für das Verkehrsmittel m ,

die Kosten der Fahrt mit dem Verkehrsmittel m ,

die Entfernung von i nach j sowie

zusätzliche Angebotsmerkmale wie zum Beispiel das Parkplatzangebot.

Da das Attribut Fahrzeit bei derzeitigen Anwendungen üblicherweise keine auslastungsabhängigen Wartezeiten enthält, ließe sich das beschriebene Modell nicht für die vorliegende Arbeit nutzen. Wegen der intensiven Verwendung des Modells in der Verkehrsplanung erscheint die Einbeziehung in die Arbeit jedoch wünschenswert. Um dies zu ermöglichen, wird anstelle der Fahrzeit die bewertete Beförderungszeit angesetzt. Dies entspricht dem in der Verkehrsnachfragemodellierung gängigen Vorgehen, ähnliche Angebotsmerkmale (z. B. Zeiten), gegebenenfalls gewichtet, zusammenzufassen und erst dann in die Verkehrsnachfragefunktion einzusetzen. Mit dem so erweiterten Modell lässt sich für verschiedene Belegungsgrade jeweils der Anteil der Bahn am Gesamtaufkommen für eine Bevölkerungsgruppe bestimmen. Das so ermittelte Verkehrsaufkommen der Bahn ist daran anschließend für alle Bevölkerungsgruppen zu addieren. Aus dem Quotienten der Anteile mit und ohne Verspätung ergibt sich die relative Veränderung des Anteils des Verkehrsmittels Bahn; dieser Quotient entspricht dem Faktor $f_{N,PV}$.

In der Regel wird sich der Anteil der Bahn aus dem Angebot einer Zuggattung im Personennah- und -fernverkehr ermitteln lassen. Verkehren auf einer Strecke mehrere Zuggattungen ist die Reaktion der Nachfrage in Abhängigkeit von der Auslastung je Zuggattung getrennt zu ermitteln und anschließend die Ergebnisse gewichtet über

die Anteile der jeweiligen Zuggattung am Betriebsprogramm zusammenzufassen. Somit ist auf jeden Fall eine zuggattungsspezifisch Ermittlung des Verkehrsaufkommens mit den Algorithmen aus VISEM erforderlich. Ohne Einschränkung lässt sich daher der Index Bahn dem Index Zuggattung gleichsetzen.

Im Weiteren ist dazu der funktionale Zusammenhang zwischen der Beförderungszeit und der Nachfrage in dem Modell VISEM zu ermitteln.

Die Verkehrserzeugung und die Verkehrsverteilung hängen bei diesem in VISEM verwendeten Ansatz wie oben beschrieben nicht von der Qualität des Angebots ab. Das Quellverkehrsaufkommen auf einer Relation ändert sich somit nicht in Abhängigkeit von der Fahrplan- und Betriebsqualität.

Die anschließende Aufteilung der Wege auf die verschiedenen Verkehrsmittel erfolgt aufgrund der Nutzen der einzelnen Verkehrsmittel. Der Nutzen der Bahn lässt sich unter der Annahme, dass sich nur die Beförderungszeit der Bahn mit der Streckenauslastung verändert, auch als Summe aus einem variablen und einem konstanten Summanden darstellen:

$$e^{U_{Bahn}} = e^{U_{const\ Bahn} + U_t\ Bahn} = c_1 \cdot e^{U_t\ Bahn} \quad (6.2-13)$$

mit

$U_{t\ Bahn}$	Beförderungszeitnutzen der Bahn
$U_{const\ Bahn}$	Summe aller Nutzenattribute einschließlich Gewichtung für das Verkehrsmittel Bahn mit Ausnahme des Attributes „Beförderungszeit“
$c_1 = e^{U_{const\ Bahn}}$	

Die Anzahl der Fahrten von einer Zelle i zu einer Zelle j mit der Bahn ergeben sich mit den Gleichungen (6.2-11) und (6.2-13) zu:

$$F_{ij, Bahn} = F_{ij} \cdot \frac{c_1 \cdot e^{U_t\ Bahn}}{c_1 \cdot e^{U_t\ Bahn} + \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}$$

Anhand dieser Gleichung lässt sich der Faktor $f_{N, PV}$ als Verhältnis aus der Nachfrage mit beziehungsweise ohne Ansatz von Wartezeiten ermitteln. Die Nachfrage mit Ansatz von Wartezeiten für das Verkehrsmittel Bahn ergibt sich zu:

$$F_{ij \text{ Bahn } 1} = F_{ij} \cdot \frac{c_1 \cdot e^{U_{Bef \text{ Bahn}}}}{c_1 \cdot e^{U_{Bef \text{ Bahn}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}}}$$

und ohne Ansatz der Wartezeiten

$$F_{ij \text{ Bahn } 0} = F_{ij} \cdot \frac{c_1 \cdot e^{U_{Fz \text{ Bahn}}}}{c_1 \cdot e^{U_{Fz \text{ Bahn}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}}}$$

Für den Faktor $f_{N,PV}$ nach Gleichung (6.2-5) gilt somit:

$$f_{N,PV} = \frac{F_{ij \text{ Bahn } 1}}{F_{ij \text{ Bahn } 0}} = \frac{F_{ij} \cdot \frac{c_1 \cdot e^{U_{Bef \text{ Bahn}}}}{c_1 \cdot e^{U_{Bef \text{ Bahn}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}}}}{F_{ij} \cdot \frac{c_1 \cdot e^{U_{Fz \text{ Bahn}}}}{c_1 \cdot e^{U_{Fz \text{ Bahn}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}}}}$$

Nach Kürzen mit F_{ij} ergibt sich:

$$f_{N,PV} = \frac{\frac{c_1 \cdot e^{U_{Bef \text{ Bahn}}}}{c_1 \cdot e^{U_{Bef \text{ Bahn}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}}}}{\frac{c_1 \cdot e^{U_{Fz \text{ Bahn}}}}{c_1 \cdot e^{U_{Fz \text{ Bahn}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}}}}$$

Das Auflösen des Doppelbruchs liefert:

$$f_{N,PV} = \frac{\left(c_1 \cdot e^{U_{Fz \text{ Zuggtg}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}} \right) \cdot e^{U_{Bef \text{ Zuggtg}}}}{\left(c_1 \cdot e^{U_{Bef \text{ Zuggtg}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}} \right) \cdot e^{U_{Fz \text{ Zuggtg}}}}$$

Daraus wird durch Einsetzen des Fahrzeitnutzens:

$$f_{N,PV} = \frac{\left(\frac{c_1}{e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}} \right) \cdot e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}}}{\left(\frac{c_1}{e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}}} + \sum_{VM \neq \text{Bahn}} e^{U_{VM}} \right) \cdot e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}}}$$

$$= \frac{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}} \quad (6.2-14)$$

$$= \frac{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}{c_1 + e^{c_i \cdot (t_{bew\ Fz\ Zugtg} + t_{bew\ W\ Zugtg})} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}} \quad (6.2-15)$$

mit

$$c_i > 0$$

Dieser Ansatz muss, um sich zur Abbildung des Erlöses zu eignen, die zwei in Unterkapitel 6.2.3.1 genannten Randbedingungen erfüllen. Sie lauten mit Gleichung (6.2-15) wie folgt:

Bedingung 1:

$$f_{N,PV}(0) = \frac{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}{c_1 + e^{c_i \cdot (t_{bew\ Fz\ Zugtg} + 0)} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}} = 1$$

Bedingung 2:

$$\begin{aligned} f_{N,PV}(1) &= \frac{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} e^{c_i \cdot t_{bew\ W\ Zugtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}} \\ &= 0 \end{aligned}$$

mit

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} e^{c_i \cdot t_{bew\ W\ Zugtg}} = \infty$$

Damit ist nachgewiesen, dass die beiden Randbedingungen erfüllt werden.

Durch Einsetzen von Gleichung (6.2-14) in Gleichung (6.2-2) entsteht:

$$Erlös_{Zugtg,PV} = c_{\varepsilon,Zugtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zugtg,PV} \cdot \frac{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot c_2}{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \cdot c_2} \quad (6.2-16)$$

mit

$$c_1 = e^{U_{const\ Zugtg}}$$

$$c_2 = \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}$$

Der Gesamterlös nach Gleichung (6.2-3) lässt sich dann mit dem Ansatz nach VISEM wie folgt berechnen:

$$Gesamterlös_{Strecke,PV} = \sum_{Zugtg} \left(c_{\varepsilon, Zugtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zugtg, PV} \cdot \frac{c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot c_2}{c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \cdot c_2} \right)$$

Das im Programm VISEM hinterlegte Wegekettenmodell erlaubt die Berechnung der Nachfrageänderung. Bei Verwendung der bewerteten Beförderungszeit anstelle der Fahrzeit stellt dieser Ansatz eine Möglichkeit dar, den Faktor $f_{N,PV}$ wartezeitabhängig zu ermitteln und somit die Reaktion des Personenverkehrsmarktes auf den Belegungsgrad einer Eisenbahnstrecke zu erfassen. Da das Modell ursprünglich nicht für die spezifische Situation des Eisenbahnverkehrs entwickelt worden ist, wäre es anstrebenswert, die vorgenommenen Übertragungen, wie beispielsweise die Annahme einer bewerteten Beförderungszeit an Stelle der Fahrzeit im Verkehrsmittelwahlmodell, in weiteren Studien zu verifizieren.

Die Übertragung des Faktors $f_{N,PV}$ in eine physikalische Größe geschieht anhand einer Beispielrechnung in Unterkapitel 6.2.4.

6.2.3.4 VIA-Widerstandsmodell

6.2.3.4.1 Modal-Split-Ansatz nach Jochim

Jochim berücksichtigt in seiner bereits vorgestellten Arbeit [35] (vgl. Kap. 3.3.2) die Erlösminderung ebenfalls nur als Folge der Modal-Split-Änderung. Aufbauend auf dem VIA-Widerstandsmodell von Walther [45] verwendet er den von ihm als „Wartezeitfaktor“ bezeichneten Quotienten A_1/A_0 . Der Wartezeitfaktor ergibt sich als Verhältnis der Verkehrsanteile der Bahn am Gesamtverkehr mit (A_1) und ohne (A_0) Berücksichtigung von Wartezeiten. Über diesen Faktor bildet Jochim sowohl die Auswirkungen von Verspätungen als auch von Wartezeiten im Fahrplan ab.

Nach Gleichung (6.2-5) gilt für den Faktor $f_{N,PV}$:

$$\begin{aligned} f_{N,PV} &= \frac{F_1}{F_0} \\ &= \frac{F_{ijZugtg\ 1}}{F_{ijZugtg\ 0}} \end{aligned}$$

Mit $F_{ijm} = F_{ij} \cdot A_m$ lässt sich der Faktor $f_{N,PV}$ schreiben als:

$$f_{N,PV} = \frac{F_{ij1} \cdot A_{Zuggtg1}}{F_{ij0} \cdot A_{Zuggtg0}}$$

Da Jochim angebotsabhängige Veränderungen von Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung vernachlässigt, ist:

$$F_{ij1} = F_{ij0}$$

Damit folgt für den Faktor $f_{N,PV}$:

$$\begin{aligned} f_{N,PV} &= \frac{F_{ij1}}{F_{ij0}} \cdot \frac{A_{Zuggtg1}}{A_{Zuggtg0}} \\ &= \frac{A_{Zuggtg1}}{A_{Zuggtg0}} \end{aligned} \quad (6.2-17)$$

Es gilt nach [52]:

$$A_{Zuggtg1} = \frac{1}{\sum_m \frac{1}{w_{m1}}} \quad \text{und} \quad A_{Zuggtg0} = \frac{1}{\sum_m \frac{1}{w_{m0}}} \quad (6.2-18)$$

mit

$$w_{Zuggtg0} = w_{Info} + w_{Zugang} + w_{Bef0} + w_{Kosten} + w_{Umsteigen} + w_{Abgang} \quad \text{ohne Ansatz von Wartezeiten}$$

$$w_{Zuggtg1} = w_{Info} + w_{Zugang} + w_{Bef1} + w_{Kosten} + w_{Umsteigen} + w_{Abgang} \quad \text{bei Ansatz von Wartezeiten}$$

Zur Reduzierung der Komplexität berücksichtigt Jochim beim Modal Split nur die beiden Verkehrsmittel MIV und Bahn. Somit ergibt sich:

$$A_{Zuggtg1} = \frac{1}{\frac{1}{w_{Zuggtg1}} + \frac{1}{w_{MIV}}} \quad \text{und} \quad A_{Zuggtg0} = \frac{1}{\frac{1}{w_{Zuggtg0}} + \frac{1}{w_{MIV}}}$$

Ein Erweitern mit w_{Zuggtg} liefert:

$$A_{\text{Zuggtg } 1} = \frac{1}{1 + \frac{w_{\text{Zuggtg } 1}}{w_{\text{MIV}}}} \quad \text{und} \quad A_{\text{Zuggtg } 0} = \frac{1}{1 + \frac{w_{\text{Zuggtg } 0}}{w_{\text{MIV}}}} \quad (6.2-19)$$

Da das VIA-Widerstandsmodell für den Personennahverkehr entwickelt worden ist, haben Schwanhäußer/Jochim [48] zur Abbildung der Komplexität einer Fernverkehrsreise Anpassungen vornehmen müssen. Als wesentliche Ergänzungen für den Fernverkehr ergeben sich:

die Differenzierung nach Reisezwecken.

Es werden fünf Reisezwecke unterschieden, von denen gemäß den Ausführungen in Unterkapitel 6.2.3.1 die Bewertung der Beförderungszeit abhängt.

zusätzliche Widerstandskomponenten für den Gepäcktransport und die Informationseinholung vor der Reise.

zusätzliche Widerstandskomponenten für den Wechsel des Verkehrssystems.

In Anlehnung an Walther [53] berücksichtigen sie einen erhöhten Umsteigewiderstand für den Wechsel vom Nahverkehr auf den Fernverkehr.

Der Belegungsgrad einer Eisenbahnstrecke beeinflusst den Gesamtwiderstand einer Bahnreise über die Widerstandskomponente für die bewertete Beförderungszeit. Die Widerstandskomponenten infolge Zu- und Abgang, Umsteigen, Kosten, Gepäcktransport, Informationseinholung und Systemwechsel sind dagegen nicht vom Belegungsgrad einer Eisenbahnstrecke abhängig. Der Wartewiderstand bleibt ebenfalls konstant, da dessen Einfluss auf die Nachfrage über die Zunahme der Besetzung proportional zur Anzahl der Züge abgedeckt wird. Der Widerstand einer Bahnreise setzt sich folglich aus einem auslastungsabhängigen $w_{\text{Zuggtg}}(\rho)$ und einem auslastungsunabhängigen Summanden $w_{\text{Zuggtg}, k}$ zusammen:

$$w_{\text{Zuggtg}} = w_{\text{Zuggtg}}(\rho) + w_{\text{Zuggtg}, k} \quad (6.2-20)$$

Der variable Widerstand $w_{\text{Zuggtg } 1}(\rho)$ lässt sich als Summe der auslastungsabhängigen Widerstandskomponenten und der Fahrzeit schreiben als:

$$\begin{aligned} w_{\text{Zuggtg } 1}(\rho) &= (t_{Fz \text{ Zuggtg}} + t_{WF \text{ Zuggtg}}) \cdot ZB_{WF} + t_{WB \text{ Zuggtg}} \cdot ZB_{WB} \\ &= t_{\text{bew Bef Zuggtg } 1} \end{aligned}$$

Dieser Widerstand entspricht der bewerteten Beförderungszeit (vgl. Kap. 6.2.3.1).

Das Einsetzen der Gleichung (6.2-20) in Gleichung (6.2-19) liefert für den Modal-Split-Anteil der Bahn:

$$A_{Zugtg} = \frac{1}{1 + \frac{w_{Zugtg}(\rho) + w_{Zugtg,k}}{w_{MIV}}}$$

Für den Faktor $f_{N,PV}$ ergibt sich durch Einsetzen in Gleichung (6.2-17):

$$f_{N,PV} = \frac{A_{Zugtg,1}}{A_{Zugtg,0}} = \frac{\frac{1}{1 + \frac{w_{Zugtg,1}(\rho) + w_{Zugtg,k}}{w_{MIV}}}}{\frac{1}{1 + \frac{w_{Zugtg,0}}{w_{MIV}}}}$$

Durch Ersetzen konstanter Terme wird daraus:

$$f_{N,PV} = \frac{\frac{1}{1 + c_1 \cdot (w_{Zugtg,1}(\rho) + w_{Zugtg,k})}}{\frac{1}{1 + c_1 \cdot c_2}}$$

mit

$$c_1 = \frac{1}{w_{MIV}}$$

$$c_2 = w_{Zugtg,0} = t_{bew Fz Zugtg} \cdot ZB_{WF} + w_{Zugtg,k}$$

Das Auflösen des Doppelbruchs liefert:

$$f_{N,PV} = \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (w_{Zugtg,1}(\rho) + w_{Zugtg,k})} \quad (6.2-21)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (6.2-4) ergibt sich:

$$f_{N,PV} = \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg,1} + w_{Zugtg,k})} \quad (6.2-22)$$

Auch für diesen Ansatz sind die Grenzwerte für den Faktor $f_{N,PV}$ nach Unterkapitel 6.2.3.1 einzuhalten. Es gilt:

Bedingung 1:

$$f_{N,PV}(0) = \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Fz\ Zugtg} \cdot ZB_{WF} + w_{Zugtg,k})} = \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot c_2} = 1$$

Bedingung 2:

$$f_{N,PV}(1) = \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Fz\ Zugtg} \cdot ZB_{WF} + \lim_{\rho \rightarrow 1} t_{bew\ W\ Zugtg}(\rho) + w_{Zugtg,k})} = 0$$

mit

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} t_{bew\ W\ Zugtg}(\rho) = \infty$$

Damit sind die beiden Bedingungen erfüllt.

Durch Einsetzen von Gleichung (6.2-22) in Gleichung (6.2-2) entsteht:

$$Erlös_{Zugtg,PV} = c_{\varepsilon,Zugtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zugtg,PV} \cdot \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Bef\ Zugtg\ 1} + w_{Zugtg,k})} \quad (6.2-23)$$

mit

$$c_1 = \frac{1}{w_{MIV}}$$

$$c_2 = w_{Zugtg\ 0} = t_{Fz\ Zugtg} \cdot ZB_{WF} + w_{Zugtg,k}$$

Mit dem Faktor $f_{N,PV}$ nach Jochim ergibt sich der Gesamterlös nach Gleichung (6.2-3) zu:

$$Gesamterlös_{Strecke,PV} = \sum_{Zugtg} \left(c_{\varepsilon,Zugtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zugtg,PV} \cdot \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Bef\ Zugtg\ 1} + w_{Zugtg,k})} \right)$$

Die Übertragung des Faktors $f_{N,PV}$ in eine physikalische Größe erfolgt in Unterkapitel 6.2.4.

6.2.3.4.2 Nachfrageansatz nach Oetting

Ein Nachfragemodell, das für den Nahverkehr nicht nur den Einfluss des Verkehrsangebots auf den Modal Split abbildet, ist das Widerstandsmodell des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen (VIA). Mit diesem Ansatz lässt sich für alle Stufen des 4-Stufen-Algorithmus die Nachfrage Angebotsabhängig ermitteln [40].

Die Grundlage des Modells bilden allgemeingültige Aussagen zum Verkehrsverhalten wie beispielsweise:

$$\frac{\partial TM_m}{\partial w_n} > 0$$

mit

TM_m Teilmobilitätsrate für das Verkehrsmittel m [Wege/Person/Tag/VM]

w_n Widerstand des Verkehrsmittels n

Die Aussage besagt, dass bei sinkender Qualität des Verkehrsmittels n die Anzahl der Wege mit jedem anderen Verkehrsmittel m steigt.

Aus diesen Aussagen leitet Oetting die Entscheidungsalgorithmen für die Mobilitätsrate der Mobilen und die Verkehrsbeteiligungsquote ab.

Die Anzahl F_{ijm} der Wege auf einer Relation ij mit einem Verkehrsmittel m ergibt sich zu:

$$F_{ijm} = M_M(w_{ij}) \cdot VB(w_{ij}) \cdot EW_i \cdot ZA_j \cdot A_{ijm}$$

mit

$M_M(w_{ij})$ Mobilitätsrate der Mobilen [Wege/mobiler Person/Tag]

$VB(w_{ij})$ Verkehrsbeteiligungsquote [%]

w_{ij} Widerstand für die Relation ij , wobei $w_{ij} = \sum_m (A_{ijm} \cdot w_{ijm})$

ZA_j Zielattraktivität einer Zelle j

EW_i Anzahl der Einwohner einer Zelle i

A_{ijm} Modal-Split-Anteil des Verkehrsmittels m auf der Relation ij

Für die Bestimmung des Faktors $f_{N,PV}$ anhand des VIA-Widerstandsmodells ist die Anzahl der Wege mit und ohne Berücksichtigung der Wartezeiten zu ermitteln.

Für die Mobilitätsrate der Mobilen M_M und die Verkehrsbeteiligungsquote VB gilt:

$$M_M(w_{ij}) = 1 + \frac{B}{w_{ij} + w_0}$$

$$VB(w_{ij}) = \frac{C}{w_{ij}^{\alpha(w_{ij})} + D}$$

mit

$\alpha(w_{ij})$ Parameter als Funktion des Gesamtsystem-Widerstands

w_0 Basiswiderstand

B, C, D Konstanten

Die verwendete Abbildung des Verkehrsangebots (aus [52]) umfasst circa 15 Merkmale und deren subjektive Bewertung durch den Menschen.

Die Konstanten w_0 , B , C und D sowie der Koeffizient α wurden auf Basis einer umfangreichen Datengrundlage für 20 deutsche Städte bestimmt und sind uneingeschränkt auf Fragestellungen des Personennahverkehrs bei Relationsuntersuchungen bis circa 15 km anwendbar. Für eine Nutzung des Modells für den Personenfernverkehr müsste eine ebenso gründliche Validierung der Parameter vorgenommen werden, für die jedoch zurzeit die Datengrundlage nicht ausreicht.

6.2.3.5 Standardisierte Bewertung

Abschließend wird das Verfahren zur Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) [33] vorgestellt.

Das Verfahren ermöglicht „die Beurteilung von örtlich, technisch und verkehrswirtschaftlich unterschiedlichen Vorhaben nach gleichen Maßstäben“. [33] Die Standardisierte Bewertung verwendet Modelle zur Verkehrsnachfrageermittlung und zu Nutzen-Kosten-Untersuchungen, die sowohl eine gesamtwirtschaftliche Bewertung als auch eine betriebswirtschaftliche Folgekostenrechnung ermöglichen. Für den zu entwickelnden Ansatz ist das Verfahren zur Berechnung der Verkehrsnachfrage von Interesse.

In der Berechnung der Verkehrsnachfragereaktion werden die Nachfragesegmente „Erwachsene“ und „Schüler“ unterschieden, wobei die Schülerverkehrsnachfrage als konstant unterstellt wird. Die Verkehrsmittel „Fahrrad“ und „zu Fuß“ bleiben unberücksichtigt. Die Reaktion der Verkehrsnachfrage auf eine Maßnahme ergibt sich sowohl durch Verkehrsverlagerungen als auch durch induzierten Verkehr. Es gilt:

$$F_{ij,\ddot{O}PNV\,1} = F_{ij,\ddot{O}PNV\,0} + F_{ij,verl} + F_{ij,\ddot{O}PNV,ind} \quad (6.2-24)$$

mit

$F_{ij,\ddot{O}PNV\,1}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im ÖPNV im Mitfall auf einer Relation ij
$F_{ij,\ddot{O}PNV\,0}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im ÖPNV im Ohnefall auf einer Relation ij
$F_{ij,verl}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im ÖPNV auf einer Relation ij , die im Mitfall gegenüber dem Ohnefall vom MIV auf den ÖPNV verlagert werden
$F_{ij,\ddot{O}PNV,ind}$	Anzahl aller im ÖPNV induzierten Fahrten pro Werktag auf einer Relation ij

Somit lässt sich der gesuchte Faktor $f_{N,PV}$ nach Gleichung (6.2-5) schreiben als:

$$\begin{aligned} f_{N,PV\,StandBew} &= \frac{F_1}{F_0} \\ &= \frac{F_{ij,\ddot{O}PNV\,0} + F_{ij,verl} + F_{ij,\ddot{O}PNV,ind}}{F_{ij,\ddot{O}PNV\,0}} \end{aligned} \quad (6.2-25)$$

Die Berechnungsweise des induzierten und des verlagerten Verkehrs wird im Weiteren erläutert. Der induzierte Verkehr ist eine Funktion des verlagerten Verkehrs und lässt sich wie folgt abschätzen:

$$F_{ij,\ddot{O}PNV,ind} = \left(F_{ij,\ddot{O}PNV\,0,E} + \frac{F_{ij,verl}}{2} \right) \cdot \left(\frac{W_{ij,\ddot{O}PNV\,0}}{W_{ij,\ddot{O}PNV\,1}} - 1 \right) \cdot 0,3 \quad (6.2-26)$$

mit

$F_{ij,\ddot{O}PNV\,0,E}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im Nachfragesegment „Erwachsene“ im ÖPNV auf einer Relation ij im Ohnefall
$W_{ij,\ddot{O}PNV\,0}, W_{ij,\ddot{O}PNV\,1}$	ÖPNV-Gesamtwiderstand im Ohne- und Mitfall

Der verlagerte Verkehr ergibt sich zu:

$$F_{ij,verl} = F_{ij,Gesamt\,0,E} \cdot \Delta a_{ij,\ddot{O}PNV} \quad (6.2-27)$$

mit

$F_{ij,Gesamt\ 0,E}$ Anzahl aller Fahrten pro Werktag im Nachfragesegment „Erwachsene“ auf einer Relation ij im Ohnefall

$\Delta a_{ij,\ddot{O}PNV}$ Änderung des ÖPNV-Anteils zwischen Mit- und Ohnefall

Für den Anteil des ÖPNV gilt:

$$a_{ij,\ddot{O}PNV} = \frac{1}{1,1 + e^{\left(g_1 + g_2 \frac{W_{ij,MIV}}{W_{ij,\ddot{O}PNV}} \right)}} - a_0 \quad (6.2-28)$$

mit

$a_{ij,\ddot{O}PNV}$ ÖPNV-Anteil an der Summe der motorisierten Fahrten auf einer Relation ij

$W_{ij,MIV}, W_{ij,\ddot{O}PNV}$ MIV- und ÖPNV-Gesamtwiderstand

g_1, g_2, a_0 Koeffizienten der Modal-Split-Funktion, $g_1=3,5$, $g_2=-4,2$, $a_0= 0,03$

Der ÖPNV-Gesamtwiderstand $W_{ij,\ddot{O}PNV}$ ergibt sich als Summe aus dem gewichteten Mittel der ÖPNV-Routenwiderstände $R_{ij,\ddot{O}PNV}$ der für die jeweilige Relation maßgebenden Routen n und dem so genannten Reisezeitäquivalenzwert für die Systemverfügbarkeit $R_{ij,SV}$:

$$W_{ij,\ddot{O}PNV} = R_{ij,SV} + \sum_n (R_{ij,\ddot{O}PNV} \cdot p_n) \quad (6.2-29)$$

mit

p_n Nutzungswahrscheinlichkeit für die Route n

Der ÖPNV-Routenwiderstand ist die Summe der Widerstände für die Reisezeitkomponenten. Dazu zählen die Widerstände aus Zu- und Abgang, für das Warten an der Haltestelle, aus Komfort an der Haltestelle und Widerstände für Unannehmlichkeiten beim Umsteigen und für das Umsteigen selbst sowie die Fahrzeiten einschließlich Bewertung, die in den einzelnen ÖPNV-Verkehrsmitteln zurückgelegt werden.

Bei Anwendung der gleichen Annahmen bezüglich der Konstanz von Reisezeitkomponenten wie in Unterkapitel 6.2.3.4 und der Annahme, dass nur eine Route der

Berechnung zugrunde liegt, lässt sich der im Weiteren als Bahn-Gesamtwiderstand bezeichnete ÖPNV-Widerstand $W_{ij,Zuggtg}$ auch darstellen als:

$$W_{ij,Zuggtg} = W_{Zuggtg,k} + R_{in\ Zuggtg} \quad (6.2-30)$$

mit

$W_{Zuggtg,k}$ Summe der auslastungsunabhängigen, gewichteten Routenwiderstände

$R_{in\ Zuggtg}$ Widerstand aus der Beförderungszeit

Dabei gilt für $R_{in\ Zuggtg}$:

$$R_{in\ Zuggtg} = r_{abs} + (1 + r_{rel}) \cdot t_{Bef\ Zuggtg} \quad (6.2-31)$$

mit

r_{abs} absoluter Zeitaufschlag

r_{rel} relativer Zeitaufschlag

$t_{Bef\ Zuggtg}$ realisierte Beförderungszeit im Fahrzeug

und für die Summe der auslastungsunabhängigen, gewichteten Routenwiderstände:

$$W_{Zuggtg,k} = R_{Fußweg,Anmarsch} + R_{Station,Einsteigen} + \sum_{U_{ij}} (R_{Fußweg,Umsteigen} + R_{Warten} + R_{Umsteigen} + R_{Station,Umsteigen}) + R_{Fußweg,Abmarsch} + R_{Station,Aussteigen}$$

Die beiden Zeitaufschläge für die Beförderungszeit sind abhängig von der Systemqualität des Verkehrsmittels und spiegeln den Komfort und das Image wider. Für das Verkehrsmittel Bahn ergibt sich folgende bewertete Fahrzeit $R_{in\ Zuggtg}$ für die Fahrt im Fahrzeug:

$$R_{in\ Zuggtg} = 0,6 + 1,06 \cdot t_{Bef\ Zuggtg}$$

Somit gilt für den Bahn-Gesamtwiderstand nach Gleichung (6.2-30):

$$W_{ij,Zuggtg} = W_{Zuggtg,k} + 0,6 + 1,06 \cdot t_{Bef\ Zuggtg}$$

Da der MIV-Widerstand bei Veränderungen der Angebotsqualität für die Bahn als konstant angenommen wird, lässt sich Gleichung (6.2-28) unter Verwendung von Gleichung (6.2-29) und mit $c_1 = W_{ij,MIV}$ umschreiben zu:

$$a_{ij,\dot{O}PNV} = \frac{1}{1,1 + \frac{e^{3,5}}{4,2 \cdot c_1}} - a_0 \quad (6.2-32)$$

Mit $a_{ij,\dot{O}PNV} = a_{ij,Zuggtg} - a_0 = c_2 - a_0$ führt das Einsetzen von Gleichung (6.2-32) in Gleichung (6.2-27) zu:

$$F_{ij,verl} = F_{ij,Gesamt\ 0,E} \cdot \left[\frac{1}{1,1 + \frac{e^{3,5}}{4,2 \cdot c_1}} - c_2 \right] \quad \text{oder}$$

$$F_{ij,verl} = c_3 \cdot \left[\frac{1}{1,1 + \frac{e^{3,5}}{4,2 \cdot c_1}} - c_2 \right] \quad (6.2-33)$$

mit

$$c_2 = a_{ij,Zuggtg\ 0}$$

$$c_3 = F_{ij,Gesamt\ 0,E}$$

Diese bereits sehr aufwändige Gleichung wäre in Gleichung (6.2-26) zur Bestimmung des induzierten Verkehrs und in Gleichung (6.2-25) zur Ermittlung des gesuchten Faktors $f_{N,PV}$ einzusetzen. Eine Überführung des Ansatzes in physikalische Größen gestaltet sich somit schwierig. Da das Verfahren der Standardisierten Bewertung zudem ausschließlich für den Nahverkehr Gültigkeit besitzt, wird aus diesen Gründen vor einer aufwändigen Übertragung in einen physikalischen Maßstab anhand des Beispiels geprüft, ob sich aus einer Übertragung andere Erkenntnisse für die gesuchte physikalische Größe ergeben als mit anderen Verfahren zu erwarten ist.

6.2.3.6 Schlussfolgerung

Das Ziel von Unterkapitel 6.2.3 besteht in der Bestimmung des Faktors $f_{N,PV}$, der die Nachfragereaktion je Zug infolge einer auslastungsabhängigen Veränderung der Angebotsqualität angibt. Dazu stehen mit den vorgestellten Verfahren aus den Unterkapiteln 6.2.3.2 bis 6.2.3.5 vier Ansätze aus Verkehrsnachfragemodellen zur Verfügung. Sie erlauben die Berechnung der Nachfragereaktion für jede Zuggattung des Personenverkehrs unter der Annahme (vgl. [35]), dass Veränderungen der Wartezeiten nicht zu Verlagerungen zwischen den Zuggattungen führen.

Die vier Ansätze unterscheiden sich durch die jeweils für den Faktor $f_{N,PV}$ ermittelte Funktionsform. Aufgrund dieser Unterschiede lässt sich aus den Funktionen nicht unmittelbar ein physikalischer Ansatz ableiten. Deshalb wird anhand eines Beispiels eine Hypothese für die physikalische Beschreibung des Faktors $f_{N,PV}$ entwickelt und anschließend theoretisch validiert.

In dem Unterkapitel 6.2.3.4 zu dem VIA-Widerstandsmodell wurden zwei Wege zur Nachfrageberechnung dargestellt. Da die Entscheidungsalgorithmen aus dem Verkehrsnachfragemodell [40] bisher nur für Entfernungen bis circa 15 km vorliegen, lässt sich keine Beispielrechnung durchführen. Für eine theoretische Herleitung eignen sich die Algorithmen aufgrund ihrer Komplexität ebenfalls nicht. Daher kommt im Weiteren der Ansatz von Jochim zum Einsatz.

Für das Beispiel stehen somit die Ansätze von British Rail, aus VISEM, von Jochim und für den Personennahverkehr die Standardisierte Bewertung zur Verfügung. Das Beispiel enthält das Unterkapitel 6.2.4, die theoretische Überführung erfolgt in Kapitel 7.

6.2.4 Hypothese zur physikalischen Modellierung der Nachfrage- reaktion

Ziel dieses Unterkapitels ist es, anhand der nutzbaren Ansätze eine Hypothese zur physikalischen Beschreibung des Faktors $f_{N,PV}$ zu entwickeln. Dazu dient analog dem Beispiel zu den Kosten die Beispielstrecke aus [49] (zur Beschreibung dieser Strecke s. Kap. 6.1.4).

Für diese Strecke wird der Faktor $f_{N,PV}$ auslastungsabhängig gleichzeitig mit den im Unterkapitel 6.2.3.6 aufgeführten vier Ansätzen berechnet. Den sich so ergebenden

Funktionsverläufen lassen sich die Verläufe des Faktors $f_{N,PV}$ für verschiedene physikalische Ansätze gegenüberstellen. Aus dieser Gegenüberstellung soll die Hypothese für einen physikalischen Ansatz abgeleitet werden.

Als wesentliche Eingangsgröße ist die bewertete Beförderungszeit erforderlich. Sie lässt sich gemäß Gleichung (6.2-4) ermitteln, wobei für die bewerteten Wartezeiten gilt:

$$t_{bewW} = t_{WF} \cdot ZB_{WF} + t_{WB} \cdot ZB_{WB}$$

Die Zuwachsverspätungen und deren Zeitbewertungsfaktoren enthält Tabelle 6.2-3.

Modellzüge	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
	Zeitbewertungsfaktoren ZB_w [-]					
IC	1,59	1,55	1,58	1,60	1,61	1,61
SE	1,12	1,11	1,12	1,14	1,15	1,15
	Zuwachsverspätungen je Zug [min]					
IC	0	-0,59	-0,12	0,20	0,30	0,33
SE	0	-0,13	0	0,39	0,53	0,59

Tab. 6.2-3: Zeitbewertungsfaktoren und Zuwachsverspätungen für die Beispielstrecke

Wie in Unterkapitel 6.2.1 beschrieben erfolgt die Modellierung getrennt für den Fern- und Nahverkehr. Die entsprechenden mittleren Reiseweiten lassen sich aus [11] berechnen und sind in der Tabelle 6.2-4 angegeben. Unter Verwendung einer mittleren Beförderungsgeschwindigkeit von 120 km/h im Fernverkehr und 70 km/h im Nahverkehr für die Bahn sowie 100 km/h und 60 km/h für den MIV ergeben sich die ebenfalls in Tabelle 6.2-4 angegebenen Werte für die bewertete Fahrzeit.

	mittlere Beförderungsweite [km]	bewertete Fahrzeit [min]
MIV fern	269	161,7
IC		127,1
MIV nah	24	24,2
SE		20,8

Tab. 6.2-4: Mittlere Beförderungsweiten und bewertete Fahrzeiten für die Beispielstrecke

Die Rechnung für die Beispielstrecke wird mit dem Ansatz nach British Rail begonnen, gefolgt von dem aus VISEM, dem Modal-Split-Ansatz nach Jochim sowie dem Verfahren aus der Standardisierten Bewertung.

6.2.4.1 Beispielrechnung mit dem Ansatz nach British Rail

Für den Faktor $f_{N,PV}$ gilt für diesen Ansatz gemäß Gleichung (6.2-8):

$$f_{N,PV BR} = \left(1 + \frac{2,5 \cdot t_{WB}}{W_{t0}} \right)^{\varepsilon_t}$$

mit

$$\varepsilon_t < 0$$

Für den Widerstand ohne Ansatz von Wartezeiten ergibt sich in Anlehnung an die in [35] ermittelten Widerstände und die entsprechenden Werte für die Angebotsmerkmale mit Gleichung (6.2-7) für den Fernverkehr:

$$\begin{aligned} W_{t0 IC} &= t_{Fz} + n_{Um} \cdot (2,5 \cdot t_{Um} + 0,1 \cdot t_{Fz}) + 0,4 \cdot t_{Takt} + 2,0 \cdot t_{Zu} \\ &= 127,1 + 1,5 \cdot (2,5 \cdot 5 + 0,1 \cdot 127,1) + 0,4 \cdot 60 + 2,0 \cdot 35 \\ &= 259 \end{aligned}$$

Analog lässt sich für den Nahverkehr ermitteln:

$$\begin{aligned} W_{t0 SE} &= 20,8 + 0,75 \cdot (2,5 \cdot 2 + 0,1 \cdot 20,8) + 0,4 \cdot 20 + 2,0 \cdot 10 \\ &= 54 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten kann der Faktor für beide Zuggattungen und jeden Belegungsgrad bestimmt werden. Beispielsweise gilt für den InterCity bei $\rho = 0,49$:

$$\begin{aligned} f_{N,IC BR} &= \left(1 + \frac{2,5 \cdot t_{WB IC}(\rho = 0,49)}{W_{t0 IC}} \right)^{\varepsilon_t} \\ &= \left(1 + \frac{2,5 \cdot 0,2}{259} \right)^{-0,8} \\ &= 0,998 \end{aligned}$$

Die Berechnungsergebnisse für andere Belegungsgrade und für den StadtExpress enthält Tabelle 6.2-5.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$f_{N,IC\ BR}$	1	1,005	1,000	0,998	0,998	0,997
$f_{N,SE\ BR}$	1	1,005	1,000	0,986	0,981	0,979

Tab. 6.2-5: Faktor $f_{N,PV}$ nach British Rail

6.2.4.2 Beispielrechnung mit dem Ansatz aus VISEM

Die entsprechende Berechnung ist nun mit dem Ansatz aus VISEM auf das Beispiel anzuwenden. Für den Faktor $f_{N,PV}$ gilt gemäß Gleichung (6.2-14):

$$f_{N,PV\ VISEM} = \frac{c_1 + e^{c_t \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}} \cdot c_2}{c_1 + e^{c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \cdot c_2}$$

mit

$$c_t > 0$$

Für die konstanten Terme ergeben sich in Anlehnung an die in [35] ermittelten Widerstände die im Folgenden verwendeten Angebotsmerkmale:

$$\begin{aligned} c_{1\ IC} &= e^{U_{const\ IC}} = e^{(-p_2 \cdot z + p_3 \cdot \ln(D/p_4) - p_5 \cdot C + p_6)} \\ &= e^{(-0,11 \cdot 35 + 0,6 \cdot \ln(269,5 \cdot 10^3 / 500) - 0,5 \cdot 21,56 + 1,4)} \\ &= 7,82 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

mit

z	Summe aus Zugangs- und Abgangszeit für das Verkehrsmittel Bahn [min]
D	Entfernung [km]
C	Kosten der Fahrt im Verkehrsmittel Bahn [€]

Analog lässt sich für den Nahverkehr ermitteln:

$$\begin{aligned} c_{1\ SE} &= e^{U_{const\ SE}} \\ &= e^{(-p_2 \cdot z + p_3 \cdot \ln(D/p_4) - p_5 \cdot C + p_6)} \\ &= e^{(-0,11 \cdot 10 + 0,6 \cdot \ln(24,2 \cdot 10^3 / 500) - 0,5 \cdot 1,9 + 1,4)} \\ &= 5,25 \end{aligned}$$

Für das Beispiel gelte entsprechend Unterkapitel 6.2.3.4.1 näherungsweise:

$$c_2 = \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}} = e^{U_{MIV}}$$

Für den MIV im Fernverkehr ergibt sich nach [40]:

$$\begin{aligned} e^{U_{MIV \text{ Fern}}} &= e^{(-p_1 \cdot t_{Fz} - p_2 \cdot z + p_3 \cdot \ln(D/p_4) - p_5 \cdot C + p_6)} \\ &= e^{(-0,06 \cdot 161,7 - 0,11 \cdot 2 + 0,5 \cdot \ln(269,5 \cdot 10^3 / 500) - 0,5 \cdot 27,0 + 1,9)} \\ &= 1,07 \cdot 10^{-8} \end{aligned}$$

Für den Nahverkehr gilt:

$$\begin{aligned} e^{U_{MIV \text{ Nah}}} &= e^{(-p_1 \cdot t_{Fz} - p_2 \cdot z + p_3 \cdot \ln(D/p_4) - p_5 \cdot C + p_6)} \\ &= e^{(-0,06 \cdot 24,2 - 0,11 \cdot 2 + 0,5 \cdot \ln(24,2 \cdot 10^3 / 500) - 0,5 \cdot 2,4 + 1,9)} \\ &= 2,60 \end{aligned}$$

Für den InterCity ergibt sich im Beispiel:

$$\begin{aligned} e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Fz IC}}} &= e^{(0,06 \cdot 127,1)} \\ &= 2050,3 \end{aligned}$$

Analog lässt sich ermitteln:

$$\begin{aligned} e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Fz SE}}} &= e^{(0,06 \cdot 20,8)} \\ &= 3,48 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten kann der Faktor $f_{N,PV \text{ VISEM}}$ für beide Zugkategorien und jeden Belegungsgrad bestimmt werden. Beispielsweise gilt für den InterCity bei $\rho = 0,49$:

$$\begin{aligned} f_{N,IC \text{ VISEM}} &= \frac{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Fz IC}}} \cdot e^{U_{MIV \text{ Fern}}}}{c_1 + e^{c_i \cdot t_{bew \text{ Bef IC}}} (\rho = 0,49) \cdot e^{U_{MIV \text{ Fern}}}} \\ &= \frac{7,82 \cdot 10^{-5} + 2050,3 \cdot 1,07 \cdot 10^{-8}}{7,82 \cdot 10^{-5} + 2228,6 \cdot 1,07 \cdot 10^{-8}} \\ &= 0,981 \end{aligned}$$

Die Berechnungsergebnisse für andere Belegungsgrade und für den StadtExpress enthält Tabelle 6.2-6.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$e^{c_1 \cdot t_{bew Bef Zugtg IC}}$	2047,0	2019,3	2158,2	2228,6	2265,9	2580,3
$e^{c_1 \cdot t_{bew Bef SE}}$	3,48	3,48	3,51	3,67	4,91	6,58
$f_{N,IC VISEM}$	1	1,003	0,988	0,981	0,977	0,946
$f_{N,SE VISEM}$	1	1,000	0,994	0,967	0,793	0,639

Tab. 6.2-6: $e^{c_1 \cdot t_{bew Bef Zugtg}}$ und Faktor $f_{N,PV}$ nach VISEM

6.2.4.3 Beispielrechnung mit dem Modal-Split-Ansatz von Jochim

Als drittes Modell wird der Ansatz von Jochim auf die Beispielstrecke angewendet. Es gilt nach Gleichung (6.2-22):

$$f_{N,PV VIA} = \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg 1} + w_{Zugtg,k})}$$

mit

$$c_1 = \frac{1}{w_{MIV}}$$

$$c_2 = w_{Zugtg,0} = t_{Fz Zugtg} \cdot ZB_{WF} + w_{Zugtg,k}$$

Die Widerstandswerte haben die Einheit „Widerstandseinheiten“. Für die konstanten Terme ergibt sich aus [35] und [52] für den Fernverkehr:

$$\begin{aligned}
 c_{1 Fern} &= \frac{1}{w_{MIV Fern}} \\
 &= \frac{1}{w_{Fan} + w_{Bef} + w_{PS} + w_{Fab} + w_{Kosten}} \\
 &= \frac{1}{2 + 161,7 + 4 + 2 + 134} \\
 &= 0,0033 \frac{1}{WE}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{IC,k} &= w_{Info} + w_{Fan} + w_U + w_{Fab} + w_{Kosten} \\
 &= 60 + 123 + 55 + 167 + 206 \\
 &= 611 WE
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{2\text{ Fern}} &= w_{IC\ 0} \\
 &= t_{Fz\ IC} \cdot ZB_{WF} + w_{Bef\ IC\ 0} \\
 &= 611 + 127,1 \\
 &= 738\ WE
 \end{aligned}$$

Analog lässt sich für den Nahverkehr ermitteln:

$$\begin{aligned}
 c_{1\text{ Nah}} &= \frac{1}{w_{MIV\ Nah}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{w_{Fan} + w_{Bef} + w_{PS} + w_{Fab} + w_{Kosten}}} \\
 &= \frac{1}{2 + 24,2 + 4 + 2 + 18} \\
 &= 0,0197\ \frac{1}{WE}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{SE,k} &= w_{Fan} + w_U + w_{Fab} + w_{Kosten} \\
 &= 15 + 25 + 15 + 33 \\
 &= 88\ WE
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{2\text{ Nah}} &= w_{SE\ 0} \\
 &= w_{Bef\ SE\ 0} + w_{SE,k} \\
 &= 20,8 + 88 \\
 &= 109\ WE
 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten ergibt sich beispielsweise der Faktor $f_{N,IC\ VIA}$ für den InterCity bei einem Belegungsgrad von $\rho = 0,49$ zu:

$$\begin{aligned}
 f_{N,IC\ VIA} &= \frac{1 + c_{1\text{ Fern}} \cdot c_{2\text{ Fern}}}{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Bef\ IC}(\rho = 0,49) + w_{IC,k})} \\
 &= \frac{1 + 0,0033 \cdot 738}{1 + 0,0033 \cdot (128,5 + 611)} \\
 &= 0,999
 \end{aligned}$$

Die Tabelle 6.2-7 enthält die Werte für den Faktor $f_{N,PV\ VIA}$ unter Berücksichtigung der bewerteten Beförderungszeiten.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$f_{N,IC\ VIA}$	1	1,000	0,999	0,999	0,998	0,996
$f_{N,SE\ VIA}$	1	1,000	0,999	0,995	0,965	0,937

Tab. 6.2-7: Faktor $f_{N,PV}$ nach dem VIA-Widerstandsmodell

6.2.4.4 Beispielrechnung mit dem Ansatz aus der Standardisierten Bewertung

Als weitere Methode zur Berechnung des Faktors $f_{N,PV}$ für den StadtExpress im Nahverkehr wird im Folgenden die Standardisierte Bewertung angewendet. Es gilt gemäß Gleichung (6.2-25) mit den Gleichungen (6.2-33) und (6.2-26):

$$f_{N,\ddot{O}PNV \text{ StandBew}} = \frac{F_{ij,\ddot{O}PNV,0} + F_{ij,verl} + F_{ij,\ddot{O}PNV,ind}}{F_{ij,\ddot{O}PNV,0}}$$

mit

$$F_{ij,verl} = c_3 \cdot \left[\frac{1}{1,1 + \frac{e^{3,5}}{4,2 \cdot c_1}} - c_2 \right]$$

$$c_1 = W_{ij,MIV}$$

$$c_2 = a_{ij,Zugtg,0}$$

$$c_3 = F_{ij,Gesamt,0,E}$$

$$F_{ij,\ddot{O}PNV,ind} = \left(F_{ij,\ddot{O}PNV,0,E} + \frac{F_{ij,verl}}{2} \right) \cdot \left(\frac{W_{ij,\ddot{O}PNV,0}}{W_{ij,\ddot{O}PNV,1}} - 1 \right) \cdot 0,3$$

Die konstanten Terme c_1 , $W_{ij,Zugtg,k}$, $W_{ij,\ddot{O}PNV,0}$ und $a_{ij,\ddot{O}PNV,0}$ lassen sich für den StadtExpress wie folgt berechnen (s. auch Kap. 6.2.3.5):

$$\begin{aligned} c_1 &= W_{MIV} \\ &= t_{Fz, MIV} \\ &= 24,2 \end{aligned}$$

$$W_{SE,k} = 68,1$$

$$\begin{aligned} W_{ij,SE,0} &= W_{ij,SE,k} + W_{Fz,SE,0} \\ &= 68,1 + 0,6 + 1,06 \cdot 20,8 \\ &= 90,7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{ij,SE,0} &= \frac{1}{1,1 + \frac{e^{3,5}}{4,2 \cdot 24,2}} - 0,03 \\ &= 0,054 \end{aligned}$$

Wie bei den bereits vorgestellten Verfahren wird auch für die Standardisierte Bewertung die Berechnung des Faktors $f_{N,PV}$ beispielhaft für einen Belegungsgrad von $\rho = 0,49$ dargestellt. Dazu ist zunächst der Widerstand des StadtExpress für diesen Belegungsgrad zu ermitteln.

$$\begin{aligned} W_{ij,SE1}(\rho = 0,49) &= W_{ij,SE,k} + W_{Fz,SE}(\rho = 0,49) \\ &= 68,1 + 0,6 + 1,06 \cdot (20,8 + 0,4 + 0,39) \\ &= 91,6 \end{aligned}$$

Die Berechnung des Faktors $f_{N,PV}$ erfordert bei der Standardisierten Bewertung absolute Werte für die Fahrtenanzahl. Da aufgrund der Division bei der Berechnung des Faktors $f_{N,PV}$ die Bezugsgröße für die Fahrtenanzahl keine Relevanz für das Berechnungsergebnis hat, wird für die Berechnung der Fahrtenanzahl ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit die Anzahl der Fahrten mit dem ÖPNV im Ohnefall zu $F_{ij,\text{ÖPNV } 0} = 100$ gesetzt. Bei einem Anteil des Schülerverkehrs von circa 20 % lässt sich daraus die Fahrtenanzahl der Erwachsenen im ÖPNV berechnen zu:

$$\begin{aligned} F_{ij,\text{ÖPNV},E} &= 100 \cdot (100\% - 20\%) \\ &= 80 \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} c_3 &= \frac{F_{ij,\text{Gesamt } 0,E}}{100 \cdot (100\% - 20\%)} \\ &= \frac{a_{ij,SE0}}{80} \\ &= \frac{80}{0,054} \approx 1500 \end{aligned}$$

Damit und mit den bereits berechneten Werten ergeben sich die beiden Terme $F_{ij,\text{ÖPNV},ind}$ und $F_{ij,verl}$ für den StadtExpress bei einem Belegungsgrad von $\rho = 0,49$ zu:

$$\begin{aligned}
 F_{ij,verl} &= c_3 \cdot \left[\frac{1}{1,1 + \frac{e^{3,5}}{4,2 \cdot c_1}} - c_2 \right] \\
 &= 1500 \cdot \left[\frac{1}{1,1 + \frac{e^{3,5}}{4,2 \cdot 24,2}} - 0,054 \right] \\
 &= -1,3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{ij,SE,ind} &= \left(F_{ij,\ddot{O}PNV,0E} + \frac{F_{ij,verl}}{2} \right) \cdot \left(\frac{W_{ij,SE0}}{W_{ij,SE1}} - 1 \right) \cdot 0,3 \\
 &= \left(80 - \frac{1,3}{2} \right) \cdot \left(\frac{90,7}{91,6} - 1 \right) \cdot 0,3 \\
 &= -0,2
 \end{aligned}$$

Der Faktor $f_{N,PV StandBew}$ lässt sich mit Hilfe dieser Werte für den StadtExpress für einen Belegungsgrad von $\rho = 0,49$ ermitteln zu:

$$\begin{aligned}
 f_{N,SE StandBew} &= \frac{F_{ij,SE,0} + F_{ij,verl} + F_{ij,SE,ind}}{F_{ij,SE,0}} \\
 &= \frac{100 - 1,3 - 0,2}{100} \\
 &= 0,985
 \end{aligned}$$

Die Tabelle 6.2-8 enthält die Werte für den Faktor $f_{N,SE StandBew}$ unter Berücksichtigung der Wartezeiten im Fahrplan und der Zuwachsverspätungen.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$f_{N,SE StandBew}$	1	0,999	0,997	0,985	0,907	0,841

Tab. 6.2-8: Faktor $f_{N,PV}$ nach der Standardisierten Bewertung

6.2.4.5 Beispielrechnung mit physikalischen Ansätzen

Den anhand von Verkehrsnachfragemodellen ermittelten Werten für den Faktor $f_{N,PV}$ sind im Weiteren anhand von physikalischen Ansätzen bestimmte Werte gegenüberzustellen. Die physikalische Bestimmung des Faktors $f_{N,PV}$ wird zunächst für den Ansatz, dass sich $f_{N,PV}$ reziprok zur bewerteten Beförderungszeit verhält, dargestellt.

Daran schließt sich die analoge Berechnung von Werten für andere physikalische Ansätze an.

Gemäß Unterkapitel 6.2.3.1, Bedingung 1, muss für $\rho = 0$ unabhängig vom gewählten Ansatz gelten:

$$f_{N,PV}(\rho = 0) = 1$$

Für den Ansatz

$$f_{N,PV} \sim \frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$$

ergibt sich mit dieser Bedingung für alle anderen Belegungsgrade:

$$f_{N,PV}(\rho) = \frac{\frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}(\rho)}}{\frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}(0)}} = \frac{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}(0)}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}(\rho)} = \frac{t_{bew\ Fz\ Zuggtg}(0)}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}(\rho)} \quad (6.2-34)$$

Beispielsweise ist

$$f_{N,IC}(\rho = 0,49) = \frac{134,8}{134,8 + 1,39} = 0,990$$

Tabelle 6.2-9 enthält die entsprechend ermittelten Werte für andere Belegungsgrade für den InterCity und den StadtExpress.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$f_{N,IC} \frac{1}{t_{bew\ Bef}}$	1	1,002	0,993	0,989	0,987	0,971
$f_{N,SE} \frac{1}{t_{bew\ Bef}}$	1	1,000	0,992	0,959	0,783	0,662

Tab. 6.2-9: Faktor $f_{N,PV}$ als Reziprokwert der bewerteten Beförderungszeit

Analog lässt sich der Faktor $f_{N,PV}$ auch für andere physikalische Ansätze zur Beschreibung der Nachfragerreaktion bestimmen. Als weitere Ansätze kommen beispielsweise in Frage:

$$f_{N,PV} \sim \frac{1}{\left(t_{bew\ Bef\ Zuggtg}\right)^n} \text{ mit } n \in \mathbb{N}^{\geq 1}$$

$$f_{N,PV} \sim \frac{1}{e^{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}} \quad \text{oder}$$

$$f_{N,PV} \sim \frac{1}{\ln t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$$

Auch diese Ansätze müssen die zwei Bedingungen für den Faktor $f_{N,PV}$ nach Unterkapitel 6.2.3.1 erfüllen. Die Prüfung in Anhang 1 zeigt, dass dies für alle Ansätze der Fall ist.

Tabelle 6.2-10 gibt die Werte des Faktors $f_{N,PV}$ für drei entsprechende Ansätze wieder.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$f_{N,PV} \sim \frac{1}{\left(t_{bew\ Bef\ Zuggtg}\right)^2}$						
$f_{N,IC}$	1	1,004	0,986	0,978	0,974	0,942
$f_{N,SE}$	1	1,000	0,984	0,920	0,613	0,438
$f_{N,PV} \sim \frac{1}{e^{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}}$						
$f_{N,IC}$	1	1,262	0,414	0,243	0,184	0,021
$f_{N,SE}$	1	1,002	0,843	0,415	0,003	$2,4 \cdot 10^{-05}$
$f_{N,PV} \sim \frac{1}{\ln t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$						
$f_{N,IC}$	1	1,000	0,999	0,998	0,997	0,994
$f_{N,SE}$	1	1,000	0,997	0,987	0,925	0,880

Tab. 6.2-10: Faktor $f_{N,PV}$ für verschiedene physikalische Ansätze

Um festzustellen, welcher physikalische Ansatz die mit den Verkehrsnachfragemodellen berechnete Nachfragereaktion am besten beschreibt, erfolgt in den folgenden beiden Abbildungen die Gegenüberstellung aller für den Faktor $f_{N,PV}$ berechneten Werte getrennt für den Fernverkehr (Abb. 6.2-3) und den Nahverkehr (Abb. 6.2-4).

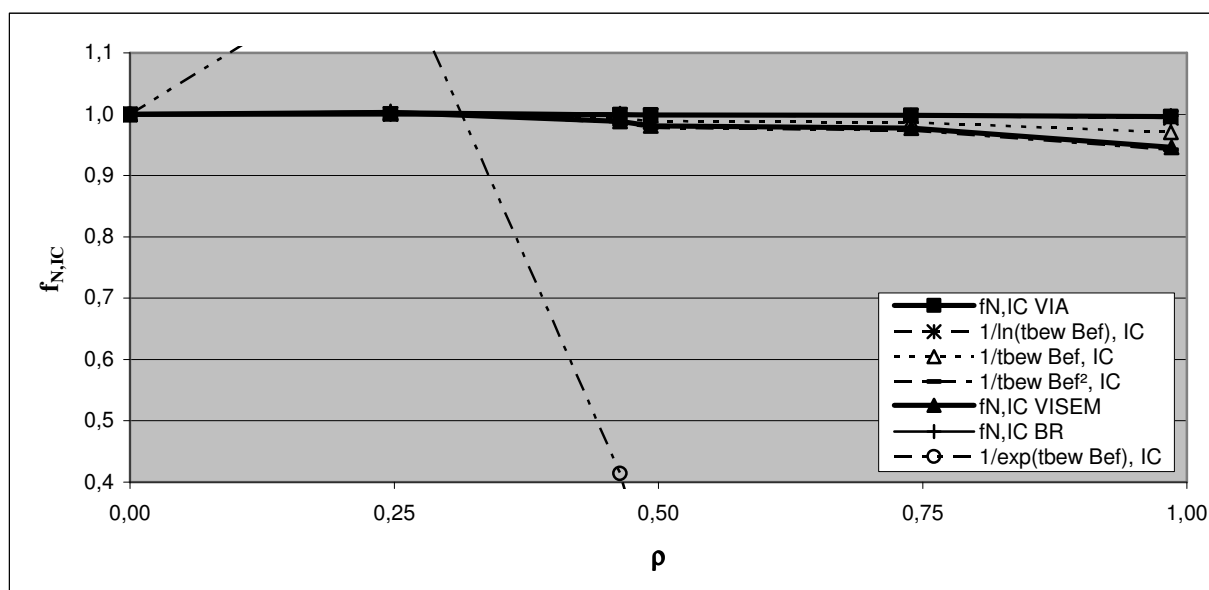


Abb. 6.2-3: Faktor $f_{N,IC}$ nach British Rail, VISEM, VIA-Widerstandsmodell und für verschiedene physikalische Ansätze

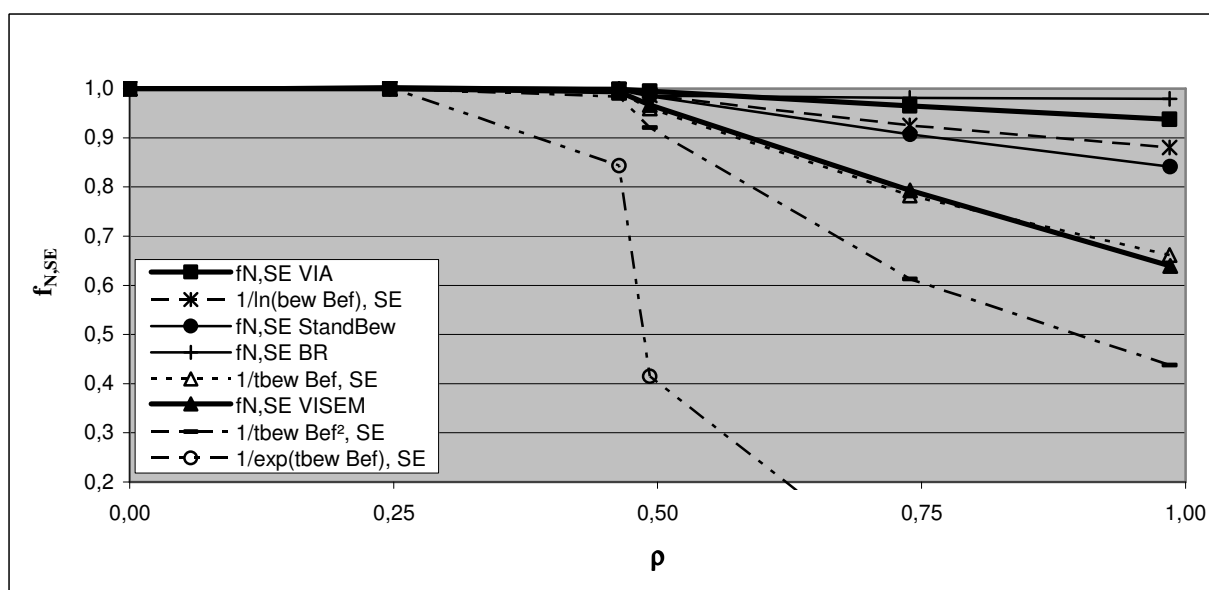


Abb. 6.2-4: Faktor $f_{N,SE}$ nach British Rail, VISEM, VIA-Widerstandsmodell, Standardisierter Bewertung und für verschiedene physikalische Ansätze

Die Gegenüberstellung der verschiedenen Berechnungsmethoden zeigt, dass sich der Reziprokwert der bewerteten Beförderungszeit und der Reziprokwert der mit dem natürlichen Logarithmus multiplizierten bewerteten Beförderungszeit am besten zur Beschreibung der Nachfragerreaktion eignen. Die Kurven dieser beiden Größen liegen für beide Züge des Personenverkehrs zwischen denen durch die Nachfrage-

modelle ermittelten Kurven. Die Funktionswerte der beiden anderen physikalischen Ansätze weisen mindestens für den Personenfern- oder Personennahverkehr große Abweichungen zu den mit den Nachfragemodellen berechneten Werten auf, so dass sie für die weitere Betrachtung ausfallen.

Der Reziprokwert des natürlichen Logarithmus reagiert insbesondere im Personenfernverkehr relativ schwach auf Veränderungen der Angebotsqualität. Er liegt damit am Rande des durch die Faktoren, die mit dem Ansatz von British Rail und dem VIA-Widerstandsmodell berechnet wurden, aufgespannten Bereichs und entspricht in etwa den Ergebnissen des VIA-Widerstandsmodells. Das hier verwendete VIA-Widerstandsmodell arbeitet noch ohne die derzeit in der Entwicklung befindliche nicht-lineare Bewertung der bewerteten Fahrzeit. Dadurch fällt die hier ermittelte Reagibilität des Modells zu gering aus. Bei einer höheren Reagibilität des VIA-Widerstandsmodells läge der über den natürlichen Logarithmus ermittelte Faktor $f_{N,PV}$ für den Personenfernverkehr jedoch außerhalb des durch die Verkehrsnachfragemodelle aufgespannten Bereichs. Als Hypothese für den physikalischen Maßstab kommt daher nur der Reziprokwert der bewerteten Beförderungszeit zur Beschreibung der auslastungsabhängigen Nachfragereaktion in Frage:

$$f_{N,PV} = \frac{t_{bew\ Fz\ Zugtg}}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}}$$

Die Gegenüberstellung der physikalischen Ansätze und der Ergebnisse der Verkehrsnachfragemodelle macht auch deutlich, dass die Wahl des Verkehrsnachfragemodells die Ergebnisse wesentlich beeinflusst. Dem gegenüber wäre der Einfluss kleinerer Veränderungen des physikalischen Ansatzes, zum Beispiel durch eine Veränderung des Exponenten, gering.

Die Abbildung 6.2-3 zeigt, dass die Nachfrage nach dem Ansatz nach British Rail beim Personenfernverkehr wesentlich stärker reagiert als die anderen beiden Nachfragemodelle. Eine stärkere Reagibilität als bei dem gängigen VISEM-Modell erscheint nicht realistisch. Im Personennahverkehr verläuft die Kurve nach dem Ansatz von British Rail ähnlich dem Ansatz nach VISEM. Durch diesen Ansatz sind somit keine neuen Erkenntnisse für eine Überführung in eine physikalische Größe zu gewinnen, so dass er im Weiteren nicht mehr verwendet wird.

Die Werte, die sich mit dem Ansatz nach der Standardisierten Bewertung ergeben, liegen zentral in dem durch die anderen Verkehrsnachfragemodelle aufgespannten Bereich. Auch diese Berechnungsmethode liefert keine neuen Erkenntnisse zur Überführung in eine physikalische Größe und wird nicht weiter betrachtet.

Diese anhand der Beispielstrecke entwickelte Hypothese ist in Kapitel 7 auf ihre Allgemeingültigkeit zu prüfen.

6.2.5 Zusammenfassung für den Personenverkehr

Der Gesamterlös einer Strecke ergibt sich als die Summe der zuggattungsspezifischen Produkte aus der Anzahl der Reisenden, dem spezifischen Erlös je Reisendem und Kilometer und der Länge des durchfahrenen Abschnitts. In Unterkapitel 6.2 galt es, diese Größen in physikalische Größen zu überführen.

Die Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke lässt sich als physikalische Größe direkt in den zu entwickelnden Maßstab übernehmen. Das Produkt aus Anzahl der Reisenden und spezifischem Erlös kann anhand der Summe der Massen beschrieben werden. Die auslastungsabhängige Nachfragerreaktion lässt sich durch den Kehrwert der bewerteten Beförderungszeit abbilden. Als physikalischer Maßstab für die Erlöse ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} \text{Gesamterlös}_{\text{Strecke},PV} &= \sum_{\text{Zuggtg}} \text{Erlös}_{\text{Zuggtg},PV} \\ &= \sum_{\text{Zuggtg}} \left(c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot m_{\text{Zuggtg},PV} \cdot \frac{t_{\text{bew } F_z \text{ Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef } \text{Zuggtg}}} \right) \end{aligned}$$

Folglich ist es gelungen, eine physikalische Beschreibung aller betriebswirtschaftlichen Einflussgrößen und damit des Erlöses insgesamt für den Personenverkehr zu entwickeln. Dieser Maßstab eignet sich sowohl für den Personennah- als auch für den -fernverkehr und sichert dadurch die Konsistenz der Modellergebnisse für diese Verkehrsarten. Alle verwendeten physikalischen Größen lassen sich problemlos aus den für Leistungsuntersuchungen ohnehin erforderlichen Datensätzen bestimmen.

Der physikalische Maßstab liefert somit die in der Zielstellung geforderte betriebswirtschaftlich interpretierbare Bewertung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken. Gleichzeitig erfüllt er die Anforderung aus Unterkapitel 4.2, das Endkunden-Verhalten bei der Erlösbeschreibung zu berücksichtigen. Aufgrund der gewählten physikalischen Größen lassen sich für mehr Eingangsgrößen orts- oder zugsspezifische Werte verwenden als dies bei betriebswirtschaftlichen Ansätzen möglich ist.

Endkunden-Verhalten bei der Erlösbeschreibung zu berücksichtigen. Aufgrund der gewählten physikalischen Größen lassen sich für mehr Eingangsgrößen orts- oder

zugspezifische Werte verwenden als dies bei betriebswirtschaftlichen Ansätzen möglich ist.

6.3 Erlösfunktion für den Güterverkehr

6.3.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird analog zum Personenverkehr der physikalische Ansatz zur Beschreibung der Erlösfunktion für den Güterverkehr hergeleitet. Dazu ist auch hier zunächst ein geeigneter betriebswirtschaftlicher Ansatz zur Berechnung des Erlöses je Güterzug in Abhängigkeit von der Zuganzahl auf einer Eisenbahnstrecke zu bestimmen. Die in dem Ansatz verwendeten Größen werden anschließend in physikalische Größen überführt, wobei die Kompatibilität zum Personenverkehr sicherzustellen ist.

Der Erlös eines Zuges im Güterverkehr hängt ab

- von der Länge $L_{\text{Abschnitt}}$ des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke,
- vom spezifischen Erlös $E_{\text{spez,GV}}$ je Zugkilometer und
- von der Nachfrageänderung $f_{N,GV}$ je Zug als Funktion der auslastungsabhängigen Angebotsqualität.

Die Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke ergibt sich wie im Personenverkehr aus den Stationierungen.

Der spezifische Erlös je Zugkilometer ist im Güterverkehr beispielsweise abhängig von der Gutart und der Transportweite.

Auch im Güterverkehr wirkt sich die Reaktion der Nachfrage aufgrund von Behinderungen auf einer Strecke auf den Erlös aus. Der Faktor $f_{N,GV}$ berücksichtigt die Veränderung der Nachfrage je Zug.

Somit lässt sich der Erlös je Güterzug berechnen zu:

$$\text{Erlös}_{\text{Zug GV}} = L_{\text{Abschnitt}} \cdot E_{\text{spez,GV}} \cdot f_{N,GV}$$

mit

$L_{\text{Abschnitt}}$ Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke [km]

$E_{spez,GV}$ spezifischer Erlös je Zugkilometer [€/Zkm]

$f_{N,GV}$ Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung aufgrund von Wartezeiten [-]

Der Erlös, der sich mit einer Zuggattung erzielen lässt, beträgt:

$$Erlös_{Zuggtg\ GV} = L_{Abschnitt} \cdot n_{Zuggtg\ ,GV} \cdot E_{spez,GV} \cdot f_{N,GV} \quad (6.3-1)$$

Der Gesamterlös auf einer Strecke ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} Gesamterlös_{Strecke,GV} &= \sum_{Zuggtg} Erlös_{Zuggtg\ GV} \\ &= \sum_{Zuggtg} (L_{Abschnitt} \cdot n_{Zuggtg\ ,GV} \cdot E_{spez,GV} \cdot f_{N,GV}) \end{aligned} \quad (6.3-2)$$

Für jeden Faktor der Gleichung (6.3-2) wird im Weiteren vorgestellt, wie er sich betriebswirtschaftlich ermitteln lässt und diskutiert, welche physikalischen Größen sich zu seiner Beschreibung eignen. Die Darstellung folgt der in Gleichung (6.3-2) gewählten Reihenfolge.

Die Länge $L_{Abschnitt}$ des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke lässt sich als Grundgröße unverändert in die physikalische Modellierung des Erlöses übernehmen.

Die Überführung der Anzahl $n_{Zuggtg\ ,GV}$ der Züge und des spezifischen Erlös $E_{spez,GV}$ erfolgt in Unterkapitel 6.3.2. Unterkapitel 6.6.3 enthält Ansätze zur Bestimmung des Nachfragefaktors $f_{N,GV}$.

6.3.2 Anzahl der Züge und spezifischer Erlös

Für die Berechnung des Erlöses je Zug wäre ein strecken- und zugspezifischer Erlös je Zugkilometer erforderlich, da die Verteilung der Güterarten je Zug und insbesondere die transportierte Menge streckenspezifisch sehr unterschiedlich ausfallen können. Dieser spezifische Wert ließe sich anhand einer umfangreichen Erhebung für den Ist-Zustand näherungsweise ermitteln. Für Prognosen eignet sich dieses Vorgehen nicht. Zudem ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemäß Zielstellung aufgrund des hohen Aufwands auf Erhebungen zu verzichten. Für die Erlösberechnung eignen sich somit vorwiegend streckentypische- oder zuggattungsspezifische Werte.

Die Verwendung strecken- oder zugspezifischer Werte kommt nur soweit in Frage, wie diese Werte ohnehin für die Berechnung des Leistungsverhaltens vorliegen.

Jochim verwendet in [35] einen zuggattungsspezifischen Erlös, der für ein mittleres, zuggattungsspezifisches Transportgewicht gilt. Diesen ermittelt er als Produkt aus einem zuggattungsunabhängigen Erlös und einem zuggattungsspezifischen Faktor. Für die Berechnung der zuggattungsspezifischen Faktoren zieht Jochim die Planungsqualität heran, die Bestandteil des Trassenpreissystems 1998 [17] der DB Netz AG war. Diese Größe ist die obere Grenze des Verhältnisses aus der im Fahrplan realisierten und der vom Kunden geforderten Beförderungsgeschwindigkeit und ermöglicht dadurch eine grobe Abschätzung des Marktwertes eines Zuges.

Der von Jochim gewählte Ansatz lässt eine Berücksichtigung von strecken- oder zugspezifischen Mengen nicht zu. Zudem weist die Planungsqualität als Kriterium für den Wert eines Zuges verschiedene Probleme auf.

Beispielsweise werden die Wartezeiten im Fahrplan mehrfach berücksichtigt. Zum einen sind sie in der Planungsqualität als Qualitätsparameter enthalten, zum anderen fließen sie nochmals über das Nachfragemodell in die Erlösberechnung ein. Weiter ist davon auszugehen, dass neben der Summe der zulässigen Wartezeiten im Fahrplan weitere Größen wie die Wunschabfahrtszeit oder Kriterien des Betriebs in die Marktfähigkeit eines Zuges einfließen. Auch wäre bei Verwendung der Planungsqualität zu klären, ob diese die Zahlungsbereitschaft des EVUs voll abschöpft, da sie sich nur dann zur Beschreibung der Erlöse eignen würde.

Eine andere Möglichkeit zur Ermittlung des Erlöses besteht in der Verwendung gütergruppenspezifischer Erlöse und ihrer Multiplikation mit zuggattungs- oder streckentypischen Anteilen der Gütergruppen je Zug. So lässt sich zuggattungsspezifisch der Erlös je Tonnenkilometer ermitteln. Bei der Bestimmung des Erlöses je Zugkilometer auf diesem Wege kann die transportierte Menge zugspezifisch einfließen.

Die Verwendung eines solchen Ansatzes hat den Vorteil, dass sich über das Zuggewicht nach Tageszeit oder untersuchter Strecke differenzieren lässt. So gelingt es – im Gegensatz zu Jochim, der feste Werte je Zuggattung verwendet – mit einem zugspezifischen Erlös zu arbeiten. Zudem erlaubt dieses Vorgehen, den starken Einfluss der transportierten Menge auf die Erlöse zugspezifisch abzubilden. Gleichzeitig entspricht die Verwendung der Masse dem Ansatz im Personenverkehr, bei dem ebenfalls ein zugspezifisches Gewicht in den Maßstab einfließt. Der quantitative Vergleich der beiden Verfahren erfolgt anhand einer Beispielrechnung in Unterkapitel 6.3.4.

In der vorliegenden Arbeit wird der spezifische Erlös je Zugkilometer daher anhand eines zuggattungsspezifischen Erlöses je Tonnenkilometer und des Nettogewichts des Zuges ermittelt. Für die Anwendung des Verfahrens sind lediglich Erlöse je Zuggattung und nicht je Gütergruppe erforderlich. Da gütergruppenspezifische Erlöse und die Anteile der Gütergruppen je Zuggattung nicht zur Verfügung stehen, erfolgt die Bestimmung der Erlöse je Zuggattung und Tonnenkilometer anhand produktionssystemspezifischer Erlöse. Zu den verschiedenen Produktionssystemen des Güterverkehrs zählen der Ganzzugverkehr, der Einzelwagenverkehr und der Kombinierte Ladungsverkehr (KLV), die sich sowohl hinsichtlich der transportierten Gütergruppen als auch bezüglich der Erlössätze deutlich unterscheiden. Für die Ermittlung der gesuchten Erlöse sind die Zuggattungen den Produktionssystemen zuzuordnen. Die unterschiedliche Erlösstärke der einzelnen Zuggattungen untereinander geht über einen Verhältnisfaktor in die Berechnung ein, wobei eine Normierung auf die Erlösstärke des Einzelwagenladungsverkehrs vorgenommen wurde.

Da in Betriebsprogrammen üblicherweise das Bruttogewicht Verwendung findet, wird im Weiteren im Hinblick auf die gemäß Zielstellung anzustrebende Nutzung verfügbarer Daten unter der Annahme eines im Mittel konstanten Verhältnisses anstelle des Nettogewichts mit dem Bruttogewicht gearbeitet. Der erforderliche Erlössatz je Tonnenkilometer und Produktionssystem kann beispielsweise [24] entnommen werden.

Zur Verrechnung der Erlöse im Personen- und im Güterverkehr auf der Basis physikalischer Größen muss, entsprechend zu den Ausführungen in Unterkapitel 6.1.4 zu den Kosten, die unterschiedliche Höhe des Erlöses je Bruttotonnenkilometer Berücksichtigung finden. Der Erlösfaktor nimmt für den Güterverkehr, normiert auf den Erlös für den Personennahverkehr, den Wert Viersiebtel an.

Damit ergibt sich der spezifische Erlös je Zugkilometer $E_{spez, GV}$ als das Produkt aus

- einem produktionsspezifischen Erlössatz je Tonnenkilometer
- einem zugspezifischen Gewicht und
- dem Erlösfaktor je Bruttotonnenkilometer zur Berücksichtigung der geringeren Erlösstärke im Güterverkehr gegenüber dem Personennahverkehr.

Der Erlös, der sich mit einer Zuggattung je Zugkilometer ohne Berücksichtigung von Wartezeiten erzielen lässt, steigt folglich proportional mit der Summe der Massen dieser Zuggattung. Damit ergibt sich Formel (6.3-1) zu:

$$Erlös_{Zuggtg\ GV} = c_{E,Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg, GV} \cdot f_{N, GV} \quad (6.3-3)$$

mit

$m_{Zuggtg, GV} = m_{Zug} \cdot n_{Zuggtg, GV}$ Produkt aus Masse eines Zuges und Anzahl der Züge je Zuggattung [t]

$c_{E,Zuggtg}$ Erlösfaktor

6.3.3 Ansätze zur Berechnung der Nachfragereaktion auf die Fahrplan- und Betriebsqualität

Der letzte Faktor $f_{N, GV}$ der Gleichung (6.3-1) bildet die Erlösänderung infolge von Nachfragereaktionen auf Veränderungen der Angebotsqualität ab. Die Angebotsqualität wird unter anderem durch die von der Auslastung der Infrastruktur abhängigen Behinderungen im Fahrplan und im Betrieb bestimmt, die zu geplanten beziehungsweise ungeplanten Transportzeitverlängerungen führen.

Zur Berechnung der Nachfragereaktionen stehen ein graphisches Verkehrsnachfragemodell [4] sowie das Güterfernverkehrsmodell für die Bundesverkehrswegeplanung 2015 [8] zur Verfügung.

Das graphisch dokumentierte Modell beschreibt die Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl von der Qualität des Verkehrsangebots. Für die Transportmittelwahl werden

- die zwölf durch das DIW [21] definierten Güterbereiche zu vier Gütergruppen zusammengefasst,
- bis zu drei Partiegrößen unterschieden und
- zum Teil zwei Entfernungsklassen abgebildet.

Dabei bleiben die (Massen-)Güterbereiche „Kohle“, „Mineralölprodukte“, „Rohes Erdöl“ und „Eisenerze“ unberücksichtigt. Die für die Arbeit interessante Transportzeitsensibilität beträgt gemäß [4] für das Massengut „Kohle“ und „Mineralölprodukte“ quasi Null. Da nahezu der gesamte Transport von Rohöl über Rohrfernleitungen geschieht, ließ sich dafür kein Modellansatz ableiten. Für den Erzverkehr ist nach [4] ebenfalls keine Modellschätzung möglich, da die Transportmittelwahlentscheidungen der Versender hauptsächlich das Ergebnis von Einzelverhandlungen sind.

Für jede Kombination der vier Gütergruppen, der drei Partiegrößen und der zwei Entfernungsklassen enthält [4] Diagramme, die die Veränderung des Modal Split als Funktion der Veränderung der Transportdauer der Bahn darstellen. Die Kurven stellen die Modal-Split-Anteile für zwei oder mehrere Verkehrsmittel, zum Beispiel die Verkehrsmittel Bahn und die Straßengüterverkehr oder die Verkehrsmittel Bahn und Binnenschiff in Abhängigkeit von der Änderung der Transportdauer der Bahn dar. Da die Nachfrage für das Binnenschiff relativ unelastisch auf die Transportdauer reagiert, genügt im Weiteren die Berücksichtigung der Konkurrenz zwischen dem Straßengüterverkehr und der Bahn.

Die Abbildung 6.3-1 enthält das Diagramm für den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“, die Partiegröße „5 – 15 t“ und die Transportweite „größer 300 km“.

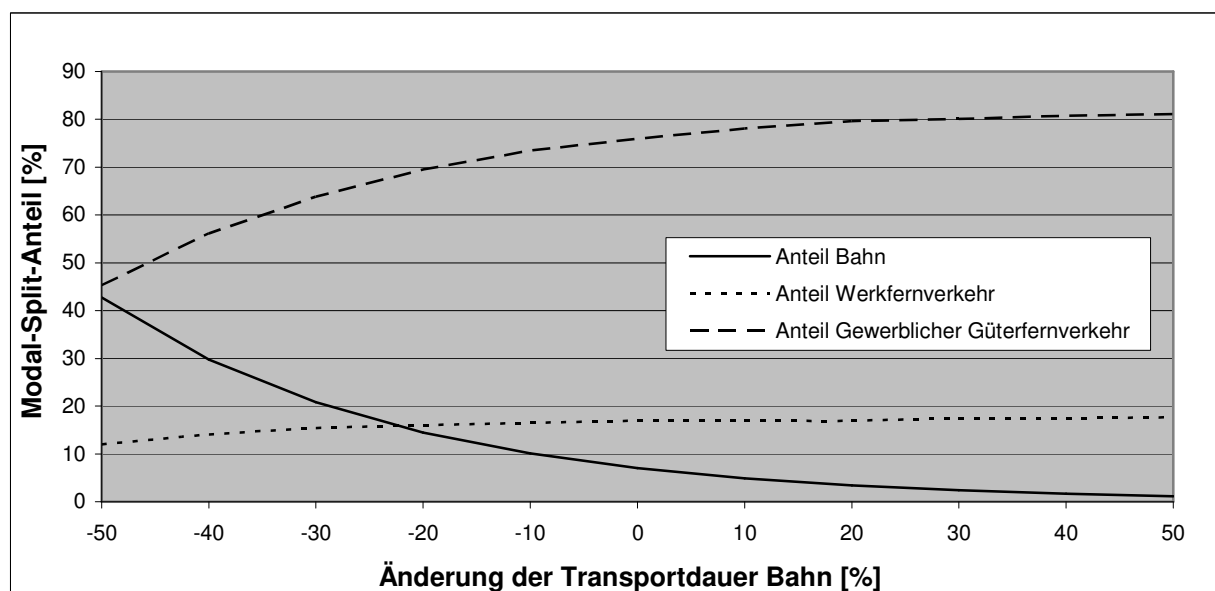


Abb. 6.3-1: Modal-Split-Reaktion für den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“, 5 - 15 t und > 300 km [4]

Als Eingangsgröße für das vorgestellte Modell ist die relative Änderung der Transportdauer $\frac{\Delta t_{Bef}}{t_{Fz}}$ zu berechnen. Die dazu erforderliche absolute Veränderung Δt_{Bef}

der bewerteten Beförderungszeit lässt sich aus der Veränderung der auslastungsabhängigen Wartezeiten bestimmen.

Anders als für den Personenverkehr ergab eine Literaturanalyse [51], dass die Bewertung der planmäßigen und der außerplanmäßigen Wartezeiten sowie der Fahr-

zeit im Güterverkehr in etwa gleich ausfällt. Die Gleichung (6.2-4) lässt sich also für den Güterverkehr mit

$$ZB_{WF} = ZB_{WB} = 1$$

umschreiben zu:

$$\begin{aligned} t_{bew\,Bef} &= (t_{Fz} + t_{WF}) \cdot 1 + t_{WB} \cdot 1 \\ &= t_{Fz} + t_{WF} + t_{WB} \\ &= t_{Bef} \end{aligned} \quad (6.3-4)$$

Mit der so bestimmten bewerteten Beförderungszeit und ihrer Änderung lässt sich aus den Modal-Split-Kurven der Anteil des Verkehrsmittels Bahn am Gesamtverkehrsaufkommen unmittelbar ablesen.

Das Modell für die Bundesverkehrswegeplanung ist als sequentielles Modell – ähnlich dem 4-Stufen-Algorithmus im Personenverkehr – aufgebaut.

Als erster Schritt, der Verkehrserzeugung, wird das Transportaufkommen für jede Region je Güterbereich unabhängig vom Verkehrsangebot bestimmt.

Im Verkehrsverteilungsmodell ist das Transportaufkommen zwischen allen Verkehrszellen über verallgemeinerte Nutzen auf die einzelnen Relationen von i nach j zu verteilen. Es gilt [8]:

$$T_{ijg} = \alpha_{ig} \cdot \beta_{jg} \cdot \gamma_{ijg} \cdot \frac{T_{ig} \cdot T_{jg}}{\sum_u T_{ug}} \cdot e^{U_{ijg}} \quad (6.3-5)$$

mit

T	Transportaufkommen
U	verallgemeinerter Nutzen
i	Index für die Quellregion
j	Index für die Zielregion
g	Index für den Güterbereich
α, β, γ	Parameter

Darin ergibt sich der verallgemeinerte Nutzen als der mit den Anteilen $P(m)$ der Verkehrsmittel m im Bezugsfall gewogene Mittelwert der Nutzen der Verkehrsmittel:

$$U_{ijg} = \sum_m (P_{ijg}(m) \cdot U_{ijg}(m)) \quad (6.3-6)$$

Das Verkehrsmittelwahlmodell bildet den Zusammenhang zwischen Veränderungen der verallgemeinerten Nutzen und der Änderung des Modal Splits ab. Es umfasst auch den wesentlichen Einfluss der Transportdauer auf die Transportmittelwahl der Versender.

Dem Verkehrsmittelwahlmodell liegt ein Logit-Ansatz zugrunde, der die Entscheidung der Versender aufgrund des mit dem Verkehrsmittel verbundenen Nutzens abbildet. Die Auswahlwahrscheinlichkeit $P(m)$ für ein Verkehrsmittel m für die Gütergruppe g lässt sich wie folgt darstellen:

$$P_{ijg}(m) = \frac{e^{U_{ijg}(m)}}{\sum_k e^{U_{ijg}(k)}} \quad (6.3-7)$$

mit

- $P_{ijg}(m)$ Wahrscheinlichkeit der Wahl des Verkehrsmittels m für die Gütergruppe g von i nach j
- $U_{ijg}(m)$ Nutzen bei der Wahl des Verkehrsmittels m für die Gütergruppe g von i nach j

Die verkehrsmittelspezifischen verallgemeinerten Nutzen ergeben sich als die Summe gewichteter und zum Teil box-cox-transformierter Angebotsmerkmale wie Transportzeiten, Pünktlichkeit, Transportkosten und Qualitätseigenschaften, die zum Beispiel die Schadenshäufigkeit erfassen. Es gilt:

$$\begin{aligned} U_{ijg}(m) &= \sum_k U_{ijg,k}(m) \\ &= c_t \cdot \frac{t_{Bef\ ij}^\lambda(m) - 1}{\lambda} + U_{ijg,const}(m) \end{aligned} \quad (6.3-8)$$

mit

- c_t, λ Parameter $c_t \approx -0,03 \dots -0,10$, $\lambda \approx 0,3 \dots 0,4$

- $U_{ijg,const}(m)$ Summe aller transportzeitunabhängigen Nutzenkomponenten

Von besonderem Interesse für diese Arbeit ist die Reaktion der Nachfrage auf Veränderungen der Pünktlichkeit. Die Pünktlichkeit als Netzpünktlichkeit in %-Punkten wird über einen Summanden der Nutzenfunktion aufgrund von Erfahrungswerten gesetzt. Die verallgemeinerten Nutzen hängen daher nicht von der tatsächlichen Auslastung des Netzes oder einzelner Netzelemente ab und verändern sich auch nicht mit deren Auslastungen. Um dennoch eine Möglichkeit zur Bestimmung des Einflusses der Pünktlichkeit zu haben, wird wie beim Personenverkehr die Reagibilität des Modells gegenüber der Fahrzeit durch Verwendung der bewerteten Beförderungszeit anstelle der Fahrzeit genutzt.

Die mit einem Verkehrsmittel transportierten Mengen lassen sich anhand der Gesamtmenge (s. Gl. (6.3-5)) und dem Modal-Split-Anteil ermitteln:

$$T_{ijg}(m) = \alpha_{ig} \cdot \beta_{jg} \cdot \gamma_{ijg} \cdot \frac{T_{ig} \cdot T_{jg}}{\sum_u T_{ug}} \cdot e^{U_{ijg}} \cdot P_{ijg}(m)$$

Für den Faktor $f_{N,GV}$ nach Gleichung (6.2-5) ergibt sich:

$$\begin{aligned} f_{N,GV,g} &= \frac{T_{ijg,Zuggtg\ 1}}{T_{ijg,Zuggtg\ 0}} \\ &= \frac{\alpha_{ig} \cdot \beta_{jg} \cdot \gamma_{ijg} \cdot \frac{T_{ig} \cdot T_{jg}}{\sum_u T_{ug}} \cdot e^{U_{ijg\ 1}} \cdot P_{ijg\ Bahn\ 1}}{\alpha_{ig} \cdot \beta_{jg} \cdot \gamma_{ijg} \cdot \frac{T_{ig} \cdot T_{jg}}{\sum_u T_{ug}} \cdot e^{U_{ijg\ 0}} \cdot P_{ijg\ Bahn\ 0}} \end{aligned}$$

Durch das Kürzen mit den konstanten Termen lässt sich die Gleichung wesentlich vereinfachen:

$$f_{N,GV,g} = \frac{e^{U_{ijg\ 1}} \cdot P_{ijg\ Bahn\ 1}}{e^{U_{ijg\ 0}} \cdot P_{ijg\ Bahn\ 0}}$$

Unter der Annahme, dass Veränderungen der Wartezeiten nicht zur Verlagerung von Gütern zwischen den Zuggattungen führen, liefert das Einsetzen der Gleichung (6.3-7):

$$f_{N,GV,g} = \frac{e^{U_{ijg\ 1}} \cdot e^{U_{ijg,Zuggtg\ 1}} \cdot \sum_m e^{U_{ijg\ 0}(m)}}{e^{U_{ijg\ 0}} \cdot e^{U_{ijg,Zuggtg\ 0}} \cdot \sum_m e^{U_{ijg\ 1}(m)}}$$

Das Einsetzen von Gleichung (6.3-6) ergibt:

$$f_{N,GV,g} = \frac{e^{\sum_m (P_{ijg}(m) U_{ijg1}(m))} \cdot e^{U_{ijg,Zuggtg1}} \cdot \sum_m e^{U_{ijg0}(m)}}{\sum_m e^{U_{ijg0}(m)} \cdot e^{U_{ijg,Zuggtg0}} \cdot \sum_m e^{U_{ijg1}(m)}} \quad (6.3-9)$$

Die Aufteilung der Summen in konstante und variable Summanden führt zu:

$$f_{N,GV,g} = \frac{e^{U_{ijg,Zuggtg1} \cdot c_1}}{c_2 + e^{U_{ijg,Zuggtg1}}} \cdot c_3 \quad (6.3-10)$$

mit

$$c_1 = 1 + P_{ijg,Zuggtg}$$

$$c_2 = \sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U_{ijg}(m)}$$

$$c_3 = \frac{e^{\sum_{m \neq \text{Bahn}} (P_{ijg}(m) U_{ijg}(m))} \cdot \sum_m e^{U_{ijg0}(m)}}{e^{U_{ijg0}} \cdot e^{U_{ijg,Zuggtg0}}}$$

wobei nach Gleichung (6.3-8) gilt:

$$U_{ijg,Zuggtg1} = c_t \cdot \frac{t_{Bef,ij,Zuggtg1}^\lambda - 1}{\lambda} = c_4 \cdot (t_{Bef,ij,Zuggtg1}^\lambda - 1)$$

$$c_4 = \frac{c_t}{\lambda}$$

Der Erlös als die gesuchte Größe lässt sich anhand des Modells durch Einsetzen von Gleichung (6.3-10) in Gleichung (6.3-1) ermitteln zu:

$$Erlös_{Zuggtg\,GV,g} = c_{E,Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot n_{Zuggtg,GV} \cdot E_{spez,GV,g} \cdot \frac{e^{U_{ijg,Zuggtg1} \cdot c_1}}{c_2 + e^{U_{ijg,Zuggtg1}}} \cdot c_3 \quad (6.3-11)$$

Aufgrund der bereits vorgenommenen Überlegungen zur Beschreibung des Erlöses (vgl. Kap. 6.3.1 und 6.3.2) anhand von physikalischen Größen lässt sich Gleichung (6.3-11) umschreiben zu:

$$Erlös_{Zuggtg\,GV,g} = c_{E,Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg,GV} \cdot \frac{e^{U_{ijg,Zuggtg1} \cdot c_1}}{c_2 + e^{U_{ijg,Zuggtg1}}} \cdot c_3 \quad (6.3-12)$$

mit

$$c_1 = 1 + P_{ijg, Zuggtg}$$

$$c_2 = \sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U_{ijg}(m)}$$

$$c_3 = \frac{e^{\sum_{m \neq \text{Bahn}} (P_{ijg}(m) \cdot U_{ijg}(m))} \cdot \sum_m e^{U_{ijg 0}(m)}}{e^{U_{ijg 0}(m)} \cdot e^{U_{ijg, Zuggtg 0}}}$$

Diese Rechnung ist je Gütergruppe g durchzuführen. Der Erlös je Zug oder Zuggattung ergibt sich als Summe über alle Gütergruppen. Der Gesamterlös auf einer Strecke berechnet sich gemäß Gleichung (6.3-2).

Die beschriebenen Ansätze bilden die Grundlage für die im Weiteren erforderliche Übertragung des Faktors $f_{N,GV}$ in eine physikalische Größe.

6.3.4 Abschätzung der Bedeutung der Einflussgrößen auf den Erlös im Güterverkehr an einem Beispiel

In diesem Unterkapitel wird zunächst die Eignung des in Unterkapitel 6.3.2 vorgestellten Verfahrens zur Berechnung des spezifischen Erlöses anhand von aus der Literatur verfügbaren Ansätzen geprüft. Daran schließt sich die Überführung des Faktors $f_{N,GV}$ in eine physikalische Größe an.

Zur Prüfung der Eignung des Verfahrens zur Berechnung des spezifischen Erlöses stehen als Maßstäbe der bereits beschriebene Ansatz von Jochim und Werte für den spezifischen Erlös aus [30] zur Verfügung. Der Vergleich für die einzelnen Zuggattungen geschieht anhand des Erlöses für eine Zugfahrt.

Mit dem vorgeschlagenen Ansatz nach Unterkapitel 6.3.2 ergibt sich der Erlös als Produkt aus einem produktionsspezifischen Erlössatz je Tonnenkilometer, einem zuggattungsspezifischen Gewicht, dem Erlösfaktor und dem Verhältnissfaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Erlösstärke je Zuggattung.

Jochim ermittelt den Erlös als das Produkt aus dem mittleren Erlös je Zugfahrt (1611 €/Transport) und der zuggattungsspezifischen Planungsqualität (s. [35]).

Aus [30] stammt eine Zusecheidung der Leistung und des Erlöses auf die verschiedenen Produktionssysteme. Mit Hilfe der Werte für den Außenumsatz und der Trans-

portleistung aus [11] ist eine Berechnung des spezifischen Erlöses je Produktionssystem möglich. Um mit diesen Werten den Vergleich nach Zuggattungen durchführen zu können, werden die verschiedenen Zuggattungen den Produktionssystemen, wie in Tabelle 6.3-1 dargestellt, zugeordnet.

Produktionssysteme	spezifischer Erlös [1/tkm]	Zuggattungen
Kombinierter Ladungsverkehr	0,5	Sg
Einzelwagenladungsverkehr	1	Dg, Ne, Ng, Gag
Güterverkehr gesamt	0,7	Üg

Tab. 6.3-1: Spezifischer Erlös und Zuggattungen nach Produktionssystemen ([30], eigene Einschätzung)

Die Gegenüberstellung der einzelnen Berechnungsmethoden enthält die nachfolgende Tabelle 6.3-2. Im Hinblick auf eine bessere graphische Darstellbarkeit und wegen der unterschiedlichen Bezugsjahre, für die die Werte der einzelnen Methoden ermittelt wurden, erfolgt eine Normierung der Erlöse.

Berechnungsgrundlage	Erlös nach Zuggattung				
	Ne, Dg	Sg	Üg	Gag	Ng
vorgeschlagener Ansatz (vgl. Kap. 6.3.2)	1,00	0,69	0,02	0,70	0,10
spezifischer Erlös nach Produktionssystemen [30]	1,00	0,68	0,03	1,00	0,14
Jochim [35]	1,00	1,15	0,88	1,00	1,00

Tab. 6.3-2: Erlös je Zuggattung für unterschiedliche Berechnungsmethoden

Mit dem Erlös des Dg als Bezugsgröße ergeben sich die in der Abbildung 6.3-2 dargestellten Werte.

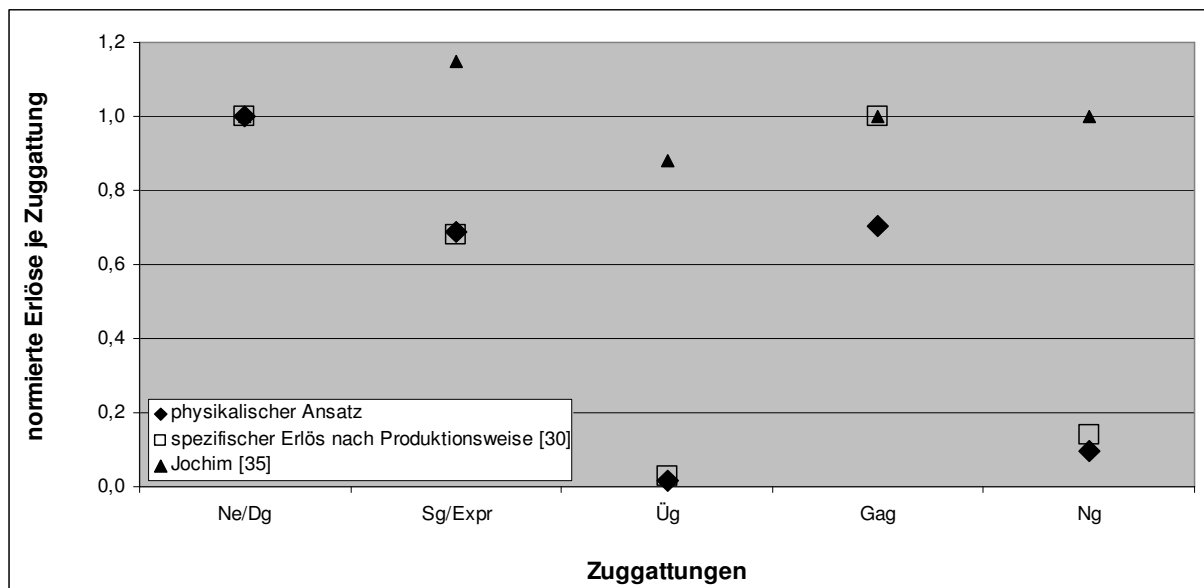


Abb. 6.3-2: Erlös je Zugattung für unterschiedliche Berechnungsmethoden (normiert) (nach [30], [35])

Aus dieser Abbildung lässt sich erkennen, dass sich die gewichtsabhängige Bestimmung des spezifischen Erlöses wesentlich besser als die Verwendung der Planungsqualität eignet. Der bereits vorgeschlagene Ansatz wird daher weiterverwendet, der zudem aufgrund seiner Abhängigkeit vom Gewicht weitere Vorteile aufweist (vgl. Kap. 6.3.2).

Neben der Prüfung des Verfahrens zur Beschreibung des spezifischen Erlöses ist in diesem Kapitel eine Hypothese zur physikalischen Darstellung des Faktors $f_{N,GV}$ zu entwickeln. Dies erfolgt anhand der gleichen Strecke wie für die vorigen Berechnungen (Kap. 6.1.4 und 6.2.4). Dazu werden zunächst Werte für den Faktor $f_{N,GV}$ für verschiedene Belegungsgrade mit den Verkehrsnachfragemodellen ermittelt. Aus der Gegenüberstellung dieser Werte und Werten, die sich mit möglichen physikalischen Ansätzen ergeben, lässt sich die gesuchte Hypothese entwickeln.

Die wesentlichen Eingangsgrößen sind in der Tabelle 6.3-3 zusammengestellt.

Modell-züge	Gewicht [t]	Belegungsgrad der Strecke [-]					
		0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
		Zuwachsverspätungen je Zug [min]					
Dg	1600	0,00	-2,85	-1,44	-0,39	0,68	0,81

Tab. 6.3-3: Physikalische Eigenschaften der Zugattung je Simulationsstufe im Güterverkehr für die Beispielstrecke

Anhand der Wartezeiten und unter Annahme einer mittleren Transportweite von 265 km [8] lassen sich die bewerteten Beförderungszeiten mit Gleichung (6.3-4) berechnen. Die Ergebnisse enthält Tabelle 6.3-4.

Modellzüge	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
	bewertete Beförderungszeit t_{Bef} je Zug [min]					
Dg	265,0	265,3	272,9	273,4	304,5	510,3

Tab. 6.3-4: Bewertete Beförderungszeit je Simulationsstufe im Güterverkehr

Zur Bestimmung der Nachfragereaktion auf der Basis der auslastungsabhängigen Wartezeiten stehen das Modell für die Bundesverkehrswegeplanung und das graphisch dokumentierte Modell, wie sie im vorigen Unterkapitel (Kap. 6.3.3) vorgestellt wurden, zur Verfügung.

Für die Anwendung des Modells für die Bundesverkehrswegeplanung in diesem Beispiel wird die Modellebene für die Bestimmung des Modal Split zwischen den konkurrierenden Verkehrsmitteln verwendet.

Für den Faktor $f_{N,GV}$ gilt gemäß Gleichung (6.3-10):

$$f_{N,GV,g} = \frac{e^{U_{ijg,Zugtg-1} \cdot c_1}}{c_2 + e^{U_{ijg,Zugtg-1}}} \cdot c_3$$

mit

$$c_1 = 1 + P_{ijg,Zugtg}$$

$$c_2 = \sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U_{ijg}(m)}$$

$$c_3 = \frac{\sum_{m \neq \text{Bahn}} (P_{ijg}(m) \cdot U_{ijg}(m)) \cdot \sum_m e^{U_{ijg,0}(m)}}{e^{U_{ijg,0}(m)} \cdot e^{U_{ijg,Zugtg,0}}}$$

Der Faktor ist getrennt für alle Gütergruppen g zu berechnen. Die sich anschließende Darstellung der Berechnung erfolgt für das Beispiel des aufkommensstärksten Segments der Partiegrößen über 100 t (ohne Massengüter). Da die Werte für die

Parameter des Modells nicht veröffentlicht sind, erfolgt die Angabe der Eingangsgrößen in Tabelle 6.3-5 in weitgehend aggregierter Form.

$P \text{ (Bahn)}$	20,6 %
$U_0 \text{ (Bahn)}$	-1,809
$\sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)}$	0,628
$\sum_{m \neq \text{Bahn}} (P(m) \cdot U(m))$	-0,766

Tab. 6.3-5: Eingangsgrößen für das Modell für die Bundesverkehrswegeplanung (Partiegrößen > 100t, ohne Massengüter)

Mit den Werten aus Tabelle 6.3-5 lassen sich die Konstanten bestimmen zu:

$$c_1 = 1 + 20,6\% = 1,206$$

$$c_2 = 0,628$$

$$c_3 = \frac{\sum_{m \neq \text{Bahn}} (P_{ijg}(m) \cdot U_{ijg}(m)) \cdot \sum_m e^{U_{ijg 0}(m)}}{e^{U_{ijg 0}(m)} \cdot e^{U_{ijg, \text{Zugstg } 0}}}$$

Mit den Gleichungen (6.3-6) und (6.3-7) ergibt sich für c_3 :

$$\begin{aligned} c_3 &= \frac{\sum_{m \neq \text{Bahn}} (P_{ijg}(m) \cdot U_{ijg}(m))}{P_{ijg}(m) \cdot e^m \cdot e^{-0,766}} \\ &= \frac{e^{-0,766+0,206(-1,809)} \cdot 0,206}{e^{-0,766+0,206(-1,809)} \cdot 0,206} \\ &= 7,04 \end{aligned}$$

Mit diesen Werten und dem Nutzen nach Tabelle 6.3-6 für das Verkehrsmittel Bahn bei Ansatz von Wartezeiten lässt sich der Faktor für jeden Belegungsgrad ermitteln. Beispielsweise gilt bei $\rho = 0,49$:

$$\begin{aligned} f_{N, GV > 100t} &= \frac{e^{-1,809 \cdot 1,206}}{0,0628 + e^{-1,809}} \cdot 7,04 \\ &= 0,988 \end{aligned}$$

Die Berechnungsergebnisse für andere Belegungsgrade und den mittleren Nachfragefaktor $f_{N, GV, BVWP}$ über alle Segmente enthält ebenfalls Tabelle 6.3-6.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
U_I (Bahn)	-1,809	-1,810	-1,814	-1,814	-0,1833	-0,195
$f_{N,GV > 100t}$	1	1,000	0,998	0,998	0,979	0,871
$f_{N,GV BVWP}$	1	1,000	0,994	0,994	0,972	0,847

Tab. 6.3-6: Nutzen der Bahn und Faktor $f_{N,GV}$ nach dem Modell der Bundesverkehrswegeplanung

Die Anwendung des graphisch dokumentierten Modells erfolgt für den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“, der nach den Angaben des DIW für das Jahr 2001 circa 29% des Gesamtverkehrsaufkommens der Bahn ausmacht [21] und damit der bedeutendste Güterbereich ist. Zudem liegen die Transportzeitelastizitäten im Mittelfeld der Elastizitäten aller Gütergruppen.

Die BVU unterteilt diesen Güterbereich bezüglich der Nachfragereaktion in drei Klassen mit verschiedenen Partiegrößen und Transportweiten (im Beispiel als metall a bis c bezeichnet) auf. Tabelle 6.3-7 weist die Anteile der je Klasse mit der Bahn transportierten Mengen am gesamten Transportaufkommen des Güterbereichs sowie die auslastungsabhängigen Veränderungen und die entsprechenden Faktoren $f_{N,GV gr}$ aus.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
Anteil metall a [%]	0,500	0,499	0,478	0,477	0,400	0,125
$f_{N,GV gr}$ metall a	1	0,998	0,956	0,953	0,800	0,249
Anteil metall b [%]	7,060	7,027	6,338	6,296	4,127	0,252
$f_{N,GV gr}$ metall b	1	0,995	0,898	0,892	0,584	0,036
Anteil metall c [%]	27,650	27,632	27,239	27,213	25,663	17,405
$f_{N,GV gr}$ metall c	1	0,999	0,985	0,984	0,928	0,629

Tab. 6.3-7: Faktor $f_{N,GV}$ den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“ für die Beispielstrecke

Die Nachfragefaktoren für die drei Klassen werden für jeden Belegungsgrad zu einem gütergruppenbereichspezifischen Faktor $f_{N,Dg}$ zusammengefasst (s. Tab. 6.3-9), wobei als Gewichtungsfaktoren ein Produkt aus mittlerer Transportweite und Partie-

größe je Entfernungsklasse bezogen auf die Summe der Produkte der gesamten Gütergruppe dient (vgl. Tab. 6.3-8).

Name der Klasse	Partiegröße und Transportweite	Gewichtungsfaktor
metall a	5-15t und < 300km	11,19 %
metall b	5-15t und > 300km	29,85 %
metall c	15-100t und alle Entfernungen	58,96 %

Tab. 6.3-8: Gewichtungsfaktoren der drei Klassen für die Ermittlung des güterbereichsspezifischen Faktors $f_{N,Dg\ gr}$

Berechnungsgröße	Belegungsgrad der Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$f_{N, Dg\ gr}$	1	0,998	0,963	0,961	0,836	0,422

Tab. 6.3-9: Faktor $f_{N,Dg}$ nach dem graphischen Verfahren

Den anhand des graphischen Modells der BVU und der Bundesverkehrswegeplanung ermittelten Werten für den Faktor $f_{N,GV}$ sind die Werte möglicher physikalischer Ansätze gegenüberzustellen. Die physikalische Bestimmung des Faktors $f_{N,GV}$ wird analog zum Personenverkehr für die gleichen vier gewählten Ansätze durchgeführt. Tabelle 6.3-10 gibt die Werte in Abhängigkeit von der Auslastung für die Beispielstrecke wieder.

Berechnungsgröße	Belegungsgrad je Strecke [-]					
	0	0,25	0,46	0,49	0,74	0,99
$f_{N,Dg} \sim \frac{1}{t_{Bef\ Dg}}$						
f_{N,Dg}	1	0,999	0,971	0,969	0,870	0,519
$f_{N,Dg} \sim \frac{1}{(t_{Bef\ Dg})^2}$						
f_{N,Dg}	1	0,997	0,943	0,939	0,757	0,270
$f_{N,Dg} \sim \frac{1}{e^{t_{Bef\ Dg}}}$						
f_{N,Dg}	1	0,711	$356 \cdot 10^{-6}$	$217 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-18}$	$29 \cdot 10^{-108}$
$f_{N,Dg} \sim \frac{1}{\ln t_{Bef\ Dg}}$						
f_{N,Dg}	1	1,000	0,995	0,994	0,976	0,895

Tab. 6.3-10: Faktor $f_{N,GV}$ für verschiedene physikalische Ansätze

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf des Faktors $f_{N,GV}$ berechnet mit den beiden Nachfragemodellen und den vier physikalischen Ansätze in Abhängigkeit von der Auslastung für die Beispielstrecke.

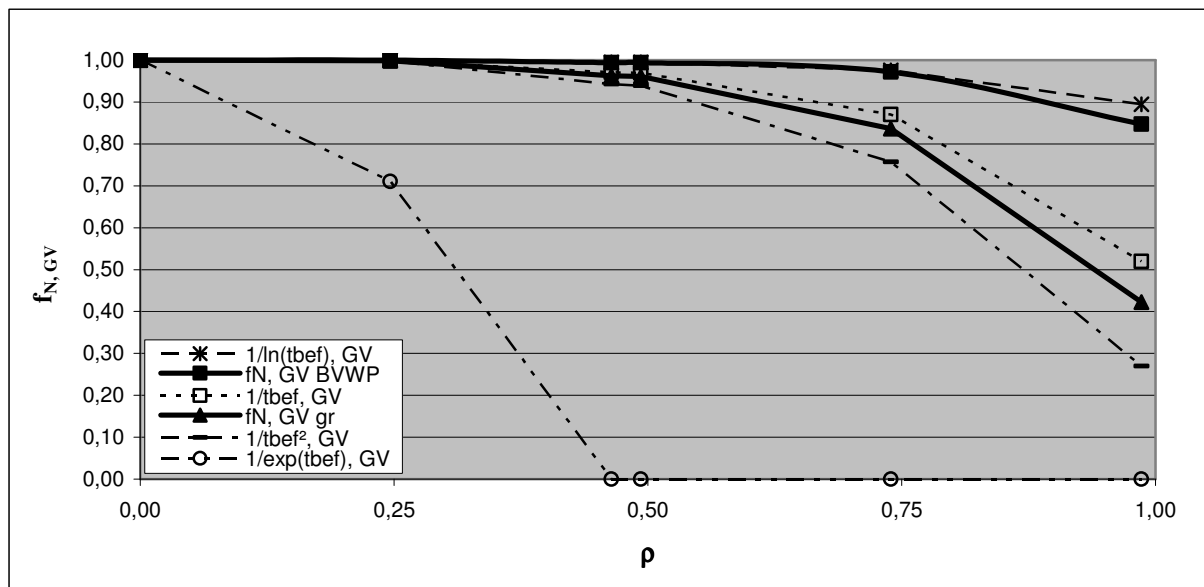


Abb. 6.3-3: Faktor $f_{N, GV}$ nach BVU und für verschiedene physikalische Ansätze

Die Gegenüberstellung zeigt, dass sich der Reziprokwert der bewerteten Beförderungszeit am besten zur Beschreibung der Nachfragereaktion eignet.

Die Reziprokwerte der drei anderen physikalischen Ansätze fallen für die weitere Betrachtung aus, da sie außerhalb des durch die Kurven der beiden Nachfragemodelle begrenzten Bereichs liegen.

6.3.5 Zusammenfassung für den Güterverkehr

In Unterkapitel 6.3 war die betriebswirtschaftliche Methode zur Berechnung des Gesamterlöses infolge des Güterverkehrs auf einer Strecke in einen physikalischen Maßstab zu überführen.

Dieser Maßstab enthält die drei Größen „Länge“, „Masse“ und „Beförderungszeit“, die multiplikativ verknüpft sind. Die Länge beschreibt die Länge des von einem Zug durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke, die Masse je Zuggattung gibt den Erlös je Streckenkilometer im Betrachtungszeitraum wieder und die Beförderungszeit bildet die Nachfragereaktion infolge auslastungsabhängiger Wartezeiten ab. Der mit einer Bruttotonne im Güterverkehr erzielte Erlös je Tonnenkilometer liegt bei circa 60% des Wertes für den Personennahverkehr.

Der Maßstab ist deckungsgleich mit dem in Unterkapitel 6.2 entwickelten Maßstab und sichert so die Konsistenz zum Personenverkehr.

6.4 Fazit

Es hat sich gezeigt, dass sich alle wesentlichen Bestimmungsgrößen der Kosten und der Erlöse in physikalische Größen überführen lassen.

Die Kosten können als Summe aus einem streckentypischen Zeitäquivalent sowie der Produkte der Masse und der kostenrelevanten Beförderungszeiten aller Züge auf der betrachteten Eisenbahnstrecke modelliert werden.

Zur Abbildung der Erlöse kommen ebenfalls mehrere physikalische Größen zum Einsatz. Die Masse beschreibt die je Zug transportierte Gütermenge oder Personenanzahl ohne Berücksichtigung der streckenauslastungsabhängigen Wartezeiten, sowie den spezifischen Erlös und die Anzahl der Züge. Die Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke berücksichtigt die Entfernungsabhängigkeit des Erlöses. Schließlich ist die erlösmindernde Wirkung von planmäßigen und außerplanmäßigen Wartezeiten abzubilden, die die Nachfrage reduzieren.

Der Schwerpunkt der Unterkapitel 6.2 und 6.3 lag auf der Übertragung der Reaktion der Nachfrage in eine einfache physikalische Größe. Anhand mehrerer Modelle, die die Nachfrage oder einen Teil davon erfassen, stellte sich der Kehrwert der bewerteten Beförderungszeit als geeignete Größe heraus. Für den Personenverkehr fließen darin die unterschiedlichen Bewertungen für die verschiedenen Wartezeiten ein. Anders als bei der Berechnung der auf die Strecke entfallenden Kosten bezieht sich die für die Berechnung der Nachfragerreaktion verwendete bewertete Beförderungszeit auf die gesamte Nachfragerelation.

Somit ist es gelungen, auch aus wirtschaftlichen Ansätzen zur Berechnung der Kosten und Erlöse physikalische Ansätze für diese Größen herzuleiten. Diese Ansätze eignen sich für den Personenfernverkehr, den Personennahverkehr und den Güterverkehr gleichermaßen, so dass die für einen einheitlichen Maßstab erforderliche Konsistenz der Ansätze erreicht werden konnte. Alle für die Maßstäbe benötigten physikalischen Größen lassen sich aus den für die eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen ohnehin erforderlichen Datensätzen entnehmen.

Die physikalischen Maßstäbe schaffen also die Voraussetzung für die gemäß Zielstellung geforderte betriebswirtschaftlich interpretierbare Bewertung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken. Die dafür gemäß Unterkapitel 4.2 erforderliche Abbildung des Endkunden-Verhaltens bei der Erlösberechnung ist ebenfalls gelungen. Gleichzeitig lassen sich aufgrund der gewählten physikalischen Größen stärker

als in betriebswirtschaftlichen Ansätzen orts- oder streckenspezifische Werte verwenden.

Mit der in Kapitel 6 vorgenommenen Analyse der einzelnen Kosten- und Erlösbestandteile im Hinblick auf ihre Abhängigkeit von den physikalischen Größen ist der zweite Weg zur theoretischen Herleitung der gesuchten Maßstäbe abgeschlossen.

7 Physikalischer Maßstab zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken

Im Hinblick auf das Ziel der Arbeit, einen betriebswirtschaftlich interpretierbaren physikalischen Maßstab zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken zu entwickeln, war in den Kapiteln 5 und 6 zu prüfen, ob und gegebenenfalls wie sich Erlöse und Kosten durch physikalische Größen beschreiben lassen. Die Zusammenführung der Ergebnisse dieser Kapitel bildet die Grundlage für die endgültige Festlegung dieser physikalischen Größen (Kap. 7.1). Daran schließt sich die Validierung dieser Größen (Kap. 7.2) und ihre Zusammenfassung zu dem zu entwickelnden Maßstab an (Kap. 7.3).

7.1 Physikalische Größen für die Kosten und die Erlöse

Um eine möglichst weitgehende Absicherung des zu entwickelnden Maßstabs zu erreichen, wurden zwei parallele Wege zur Herleitung der physikalischen Größen beschritten. Die physikalische Herleitung (Kap. 5) umfasst die Untersuchung der physikalischen Basisgrößen hinsichtlich ihrer Eignung für die gestellte Aufgabe sowie die Kombination der geeigneten Grundgrößen zu sinnvollen abgeleiteten Größen. Da der gesuchte Maßstab betriebswirtschaftlich interpretierbar sein soll, erfolgte zudem parallel die Analyse der einzelnen Erlös- und Kostenbestandteile (Kap. 6) im Hinblick auf ihre Abhängigkeit von den Grundgrößen.

Im Weiteren werden die Ergebnisse der beiden Herleitungen zusammenfassend dargestellt und auf ihre Übereinstimmung und Unterschiede geprüft. Darauf aufbauend sind dann die physikalischen Größen für die Beschreibung der Kosten und der Erlöse festzulegen.

Als Grundlage für die physikalische Herleitung werden in Kapitel 5 zunächst die sieben physikalischen Basisgrößen vorgestellt, aus denen sich jede andere physikalische Größe ableiten lässt. Für die Beschreibung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken ergeben sich als relevante Grundgrößen die Länge des von einem Zug auf der untersuchten Strecke durchfahrenen Abschnitts, die Masse je Zug sowie die Beförderungszeit.

Die Masse dient dabei zur Modellierung der transportierten Mengen. Diese Mengen sind, entsprechend der Einheit der Fahrplan-Nennleistung, auf einen Bezugszeitraum zu beziehen.

Der *Erlös* hängt nicht nur von der transportierten Menge sondern auch von der Qualität ab. Daher muss die qualitätsbeschreibende Beförderungszeit in die abgeleitete physikalische Größe für den Erlös einfließen. Durch sinnvolle Kombination der drei Grundgrößen ergibt sich der Impuls, der als abgeleitete physikalische Größe als Äquivalent für den Erlös verwendet werden kann. Höhere Potenzen für den Weg oder die Zeit führen zu den abgeleiteten Größen „Kraft“, „Arbeit“ oder „Energie“ sowie „Leistung“.

Die *Kosten* wachsen gemäß Kapitel 5 sowohl mit der Masse als auch mit dem Weg und der Zeit. Der Weg und die Zeit sind über die Geschwindigkeit linear voneinander abhängig.

Die Analyse der Parameter des *Erlöses* sowie ihrer Abbildbarkeit durch physikalische Größen in Kapitel 6 ergab, dass die Erlöse linear mit der Masse, dem Weg und einem Nachfragefaktor steigen. Die Masse ist dabei für einen Bezugszeitraum anzugeben, der Nachfragefaktor berücksichtigt die Veränderung der Beförderungszeit. Aus Kapitel 6 ergeben sich somit die gleichen Grundgrößen zur Beschreibung der Erlöse wie aus Kapitel 5.

Die Beispielrechnungen in den Unterkapiteln 6.2 und 6.3 führen zu der Hypothese, dass sich der Nachfragefaktor f_N reziprok zur Beförderungszeit verändert. Mit dieser Hypothese gilt:

$$\begin{aligned} \text{Erlös}_{\text{Zugtg}} &\sim m_{\text{Zugtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot f_N \\ &\sim m_{\text{Zugtg}} \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}}}{t_{\text{Bef Zugtg}}} \end{aligned}$$

Als physikalisches Äquivalent für den Erlös ergibt sich somit der Impuls. Gemäß Gleichung (6.2-34) gilt im physikalischen Ansatz für den Nachfragefaktor, der im Weiteren die Bezeichnung $f_{N,p}$ erhält:

$$f_{N,p} = \frac{t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{t_{\text{bew Bef Zugtg}}} \quad (7.1-1)$$

Die vollständige abgeleitete physikalische Größe zur Beschreibung der Erlöse lässt sich somit schreiben als:

$$Erlös_{Zuggtg} = c_{E,Zuggtg} \cdot m_{Zuggtg} \cdot \frac{L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}{t_{bew Bef Zuggtg}}$$

Sie unterscheidet sich vom Impuls nur durch den konstanten Faktor $t_{bew Fz Zuggtg}$ und wird im Weiteren als Transportimpuls p_{Zuggtg} bezeichnet:

$$p_{Zuggtg} := c_{E,Zuggtg} \cdot m_{Zuggtg} \cdot \frac{L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}{t_{bew Bef Zuggtg}} \quad (7.1-2)$$

mit

$m_{Zuggtg} = m_{Zug} \cdot n_{Zuggtg}$	Produkt aus Masse eines Zuges und Anzahl der Züge der Zuggattung [t]
$c_{E,Zuggtg}$	Erlösfaktor
$L_{Abschnitt}$	Länge des von einer Zuggattung durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke [km]
$t_{bew Fz Zuggtg}$	bewertete Fahrzeit der Zuggattung [min]
$t_{bew Bef Zuggtg}$	bewertete Beförderungszeit der Zuggattung [min]

Die Validierung dieser Hypothese erfolgt in Unterkapitel 7.2.

Die Analyse der Komponenten der *Kosten* in Unterkapitel 6.1 führt zu der Erkenntnis, dass die Gesamtkosten im Wesentlichen durch die fixen Kosten des Fahrwegs und die zeitabhängigen Kosten der EVUs bestimmt werden. Die Bedeutung des Weges ist für die Kosten der EVUs im Vergleich zur Beförderungszeit gering. Die Kosten des Fahrwegs hingegen werden durch die Menge der vorzuhaltenden Infrastruktur bestimmt und wachsen daher linear mit der Streckenlänge. Aus Kapitel 6 ergeben sich somit die gleichen physikalischen Größen und Abhängigkeiten zur Beschreibung der Kosten wie aus Kapitel 5.

Die physikalische Größe zur Darstellung der Kosten lautet also (gem. Gl. (6.1-2)):

$$Kosten_{Gesamt} \sim \frac{m_0 \cdot L_{Strecke}}{v_0} + \sum_{Zuggtg} (m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg}) \quad (7.1-3)$$

7.2 Validierung der physikalischen Größen für die Erlöse und die Kosten

7.2.1 Einleitung

Aus Unterkapitel 7.1 liegen die abgeleiteten physikalischen Größen zur Beschreibung der Kosten und Erlöse vor. Da die physikalische Funktion für den Nachfragefaktor anhand von Beispielen bestimmt wurde, handelt es sich bei der physikalischen Größe zur Beschreibung der Erlösfunktion, dem Transportimpuls, – im Gegensatz zur Summe der gewichteten Beförderungszeiten – um eine Hypothese. Das Ziel von Unterkapitel 7.2 besteht darin, diese Hypothese möglichst allgemeingültig zu verifizieren oder zu falsifizieren. Die entsprechenden Prüfungen erfolgen soweit möglich auch für die abgeleitete physikalische Größe für die Kosten, so dass sich für diese Größe eine zusätzliche Absicherung ergibt.

Dazu werden zunächst die Grenzwerte für die Kosten und die Erlöse an den Rändern des Definitionsbereichs aufgestellt (Kap. 7.2.2). Notwendige Voraussetzung für die Eignung der physikalischen Größen ist die Erfüllung dieser Grenzwerte (Kap. 7.2.3 und 7.2.4). Sofern die Größen auch nach dieser Prüfung noch als geeignet erscheinen, wird des Weiteren ihr Verlauf zwischen den Grenzen des Definitionsbereichs geprüft (Kap. 7.2.5 und 7.2.6). An diese für die Erlöse auf die Zuggattung bezogenen Nachweise schließt sich die Aggregation der Erlöse je Zuggattung zum Gesamterlös an (Kap. 7.2.7).

7.2.2 Grenzwerte der betriebswirtschaftlichen Größen

Der Definitionsbereich der Kosten- und der Erlösfunktion umfasst $0 \leq \rho < 1$. Im Weiteren werden die Grenzwerte für die Kosten- und die Erlösfunktion an den Grenzen dieses Definitionsbereichs ermittelt, woraus sich Anforderungen an die physikalischen Größen ergeben.

Für die Kostenfunktion $Kosten(\rho)$ ergeben sich die folgenden beiden Grenzwerte:

- Bedingung K1: Wenn kein Zug fährt, entstehen keine variablen Kosten.

$$Kosten(0) = K_{fix}$$

- Bedingung K2: Bei nahezu vollständig ausgelasteten Eisenbahnstrecken entstehen für die Züge der *niedrigsten* Rangordnungsklassen aufgrund der hohen Wartezeiten sowie dem damit verbundenen hohen Einsatz von

Produktionsmitteln hohe Kosten, die mit steigendem Belegungsgrad divergieren.

$$Kosten_{nied Zugtg}(\rho) \rightarrow \infty \text{ für } \rho \rightarrow 1$$

Für die Erlösfunktion $Erlös(\rho)$ gilt:

- Bedingung E1: Wenn kein Zug fährt, können keine Erlöse erzielt werden.

$$Erlös(0) = 0$$

- Bedingung E2: Wenn eine Eisenbahnstrecke nahezu vollständig ausgelastet ist, entstehen für die Züge der *niedrigsten* Rangordnungsklassen im Betriebsprogramm so hohe Wartezeiten, dass die Nachfrage und somit auch die Erlöse für diese Zugattung gegen Null konvergieren.

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} Erlös_{nied Zugtg}(\rho) = 0$$

Die Erfüllung der Bedingungen durch die physikalischen Größen ist im Folgenden zu prüfen.

7.2.3 Verifizierung der Grenzwerte für die Summe der gewichteten Beförderungszeiten

Als geeignetes physikalisches Äquivalent für die Darstellung der Kosten $Kosten(\rho)$ ergibt sich die Summe der gewichteten Beförderungszeiten (Gl. (7.1-3)). Durch Einsetzen dieser Gleichung in die zwei Bedingungen aus Unterkapitel 7.2.2 folgt:

- Bedingung K1:

$$\begin{aligned} \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + \sum_{Zugtg} (m_{Zugtg}(\rho) \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg}(\rho)) \\ = \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + \sum_{Zugtg} (n_{Zugtg}(\rho) \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg}(\rho)) \\ = \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + \sum_{Zugtg} (0 \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg}(0)) \\ = \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} \end{aligned}$$

Da $\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke}$ gemäß Unterkapitel 6.1.4 dem fixen Teil der Kosten K_{fix} entspricht und $t_{Bef (Kosten) Zugtg}(\rho)$ für $\rho \rightarrow 0$ konvergiert, ist die Bedingung K1 erfüllt.

- Bedingung K2 für die Züge der niedrigsten Rangordnungsklassen im Betriebsprogramm:

$$\begin{aligned} \lim_{\rho \rightarrow 1} \sum_{Zugtg} (m_{nied Zugtg}(\rho) \cdot t_{Bef (Kosten) nied Zugtg}(\rho)) \\ = m_{nied Zugtg}(1) \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} t_{Bef (Kosten) nied Zugtg}(\rho) \\ = \infty \end{aligned}$$

Da die Beförderungszeit divergiert, divergiert auch die Summe der gewichteten Beförderungszeiten, so dass auch Bedingung K2 zutrifft.

Somit erfüllt Gleichung (7.1-3) die beiden Bedingungen für die Kosten. Diese Betrachtungen bestätigen die gewählte physikalische Größe für die beiden Grenzwerte.

7.2.4 Verifizierung der Grenzwerte für den Transportimpuls

Als Hypothese für die physikalische Größe für die Erlöse $Erlös(\rho)$ ergibt sich der Transportimpuls. Für den Transportimpuls ist im Folgenden festzustellen, ob er die in Unterkapitel 7.2.2 formulierten Anforderungen an die Grenzwerte an den Rändern des Definitionsbereichs erfüllt. Das Einsetzen des Transportimpulses $p_{Zugtg}(\rho)$ nach Gleichung (7.1-1) in die beiden Bedingungen für den Erlös liefert:

- Bedingung E1:

$$\begin{aligned} p_{Zugtg}(0) &= c_{E, Zugtg} \cdot m_{Zugtg}(0) \cdot \frac{L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zugtg}}{t_{bew Bef Zugtg}(0)} \\ &= n_{Zugtg}(0) \cdot c_{E, Zugtg} \cdot m_{Zug} \cdot \frac{L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zugtg}}{t_{bew Fz Zugtg}} \\ &= 0 \cdot m_{Zug} \cdot L_{Abschnitt} \\ &= 0 \end{aligned}$$

- Bedingung E2 für die Züge der niedrigsten Rangordnungsklassen im Betriebsprogramm:

$$\begin{aligned}
 \lim_{\rho \rightarrow 1} p_{\text{nied Zugtg}} &= \lim_{\rho \rightarrow 1} \left(c_{E, \text{Zugtg}} \cdot m_{\text{nied Zugtg}}(\rho) \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz nied Zugtg}}}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} \right) \\
 &= n_{\text{nied Zugtg}}(1) \cdot c_{E, \text{Zugtg}} \cdot m_{\text{Zug nied Zugtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz nied Zugtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} \left(\frac{1}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} \right) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

mit

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \frac{1}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} = 0 \text{ und } n_{\text{nied Zugtg}}(1) = n_{\text{max nied Zugtg}}$$

Somit erfüllt der Transportimpuls die beiden Bedingungen nach Unterkapitel 7.2.2. Er könnte sich folglich zur Beschreibung der Erlösfunktion eignen. Eine weitergehende Untersuchung auch des Bereichs zwischen den Grenzwerten enthält Unterkapitel 7.2.6.

7.2.5 Verlauf der Summe der gewichteten Beförderungszeiten zwischen den Grenzwerten

Zusätzlich zur Prüfung des Konvergenzverhaltens muss auch der Funktionsverlauf zwischen den Grenzwerten untersucht werden.

Weder aus dem Verlauf der Kostenfunktion in Abhängigkeit von der Auslastung noch aus den Eingangsgrößen für die Kostenberechnung ergeben sich Hinweise auf gegenüber Unterkapitel 7.2.3 zusätzliche ausgezeichnete Punkte auf der Kostenkurve, anhand derer sich die physikalische Größe abermals bestätigen ließe. Auch Veröffentlichungen (s. [35], [43]) liefern hierzu keine Aussagen. Da es sich bei der physikalischen Größe für die Kosten nicht – wie bei der Größe für die Erlöse – um eine Hypothese handelt, hat dies keinerlei Auswirkungen auf die Validität des physikalischen Ansatzes.

7.2.6 Verlauf des Transportimpulses zwischen den Grenzwerten

Zur Verifizierung der Hypothese zur physikalischen Abbildung des Erlöses ist nach den Grenzwertbetrachtungen auch der Verlauf der Funktionen der physikalischen Größe zwischen den Grenzwerten zu überprüfen.

Für den Personenverkehr stehen nach Unterkapitel 6.2.4 mit dem Nachfragemodell aus VISEM und dem VIA-Widerstandsmodell zwei Ansätze zur Berechnung der Nachfragereaktion zur Verfügung.

Für den Güterverkehr lässt sich die Erlösänderung mit dem Modell für die Bundesverkehrswegeplanung und dem nur graphisch dokumentierten Verfahren (vgl. Kap. 6.3.3) ermitteln.

Im Folgenden sind nun die Erlösfunktionen mit physikalischen Größen $Erlös_p$ und den Ansätzen der Nachfragemodelle – $Erlös_{VIA}$ bzw. $Erlös_{VISEM}$ – einerseits und die Funktion des Transportimpulses andererseits zu vergleichen. Der Vergleich von Erlös und Impuls erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Ansätze zur Erfassung der Nachfrage für den Personen- und den Güterverkehr.

Es gilt unter der Voraussetzung für den Erlösfaktor $c_{E,Zuggtg}$ wie sie in Kapitel 6.2.2 beschrieben ist:

$$\frac{Erlös_p(\rho)}{Erlös(\rho)} = \frac{c_{E,Zuggtg} \cdot m_{Zuggtg} \cdot \frac{L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}{t_{bew Bef Zuggtg}}}{c_{E,Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg} \cdot f_N}$$

Durch Kürzen mit der Abschnittslänge, der Masse und dem Erlösfaktor $c_{E,Zuggtg}$ ergibt sich:

$$\frac{Erlös_p(\rho)}{Erlös(\rho)} = \frac{t_{bew Fz Zuggtg}}{t_{bew Bef Zuggtg} \cdot f_N}$$

Unter Verwendung der Definition des Faktors $f_{N,p}$ für den Transportimpuls (s. Gl. (7.1-1)) wird daraus:

$$\frac{Erlös_p(\rho)}{Erlös(\rho)} = \frac{f_{N,p}}{f_N} \quad (7.2-1)$$

Der Vergleich von Erlös und Transportimpuls erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Ansätze zur Erfassung der Nachfragereaktion getrennt für den Personen- und den Güterverkehr.

Im *Personenverkehr* ist nach dem Nachfragemodell aus VISEM und dem VIA-Widerstandsmodell zu differenzieren, die in dieser Reihenfolge behandelt werden.

7.2.6.1 Nachfragemodell aus VISEM

VISEM verwendet zur Nachfrageberechnung Exponentialfunktionen der Beförderungszeit. Für den nachfolgenden Vergleich wird daher zunächst postuliert, dass der Faktor $f_{N,PV \text{ VISEM}}$ stärker auf Angebotsveränderungen reagiert als der Faktor $f_{N,p}$. Mit dieser Hypothese, die im Weiteren zu verifizieren ist, gälte für alle Wartezeiten $t_W > 0$:

$$f_{N,PV \text{ VISEM}} < f_{N,p}$$

Bei Verwendung der Gleichung (6.2-14) und Einsetzen von Gleichung (7.1-1) ergibt sich:

$$\frac{c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}} \cdot c_2}{c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}} \cdot c_2} < \frac{t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}}{t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}}$$

Mit $c_2 = c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}} \cdot c_3$ und nach Kürzen der linken Seite der Ungleichung mit c_3 wird daraus:

$$\frac{\frac{c_1}{c_2} + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}}}{\frac{c_1}{c_2} + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}}} < \frac{t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}}{t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}}$$

Die Ungleichung lässt sich umschreiben zu:

$$\left(\frac{c_1}{c_2} + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}} \right) \cdot \frac{t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}}{t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}} < \frac{c_1}{c_2} + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}}$$

Durch Aufteilung der bewerteten Beförderungszeit in die zwei Komponenten, die bewertete Fahrzeit und die Summe der bewerteten Wartezeiten $t_{bew \text{ W Zuggtg}}$, wird daraus:

$$\left(\frac{c_1}{c_2} + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{t_{bew \text{ W Zuggtg}}}{t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}} \right) < \frac{c_1}{c_2} + e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ Fz Zuggtg}}} \cdot e^{c_1 \cdot t_{bew \text{ W Zuggtg}}}$$

Das Auflösen der Klammern der linken Seite liefert:

$$\frac{c_1}{c_2} + \frac{c_1}{c_2} \cdot \frac{t_{bew W Zugtg}}{t_{bew Fz Zugtg}} + e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zugtg}} + e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zugtg}} \cdot \frac{t_{bew W Zugtg}}{t_{bew Fz Zugtg}} < \frac{c_1}{c_2} + e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zugtg}} \cdot e^{c_1 \cdot t_{bew W Zugtg}}$$

Durch Subtraktion von $\frac{c_1}{c_2}$ und anschließende Division der Ungleichung durch

$e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zugtg}}$ ergibt sich:

$$1 + \frac{c_1}{c_2 \cdot e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zugtg}}} \cdot \frac{t_{bew W Zugtg}}{t_{bew Fz Zugtg}} + \frac{t_{bew W Zugtg}}{t_{bew Fz Zugtg}} < e^{c_1 \cdot t_{bew W Zugtg}}$$

Die Faktoren des zweiten Summanden der linken Seite sind bis auf die bewertete Wartezeit konstant. Das führt durch Zusammenfassen des zweiten und dritten Summanden zu:

$$1 + t_{bew W Zugtg} \cdot c_4 < e^{c_1 \cdot t_{bew W Zugtg}} \quad (7.2-2)$$

mit

$$c_4 = \frac{1}{t_{bew Fz Zugtg}} \cdot \left(\frac{c_1}{c_2 \cdot e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zugtg}}} + 1 \right)$$

Die Konstante c_4 lässt sich mit $c_1 = e^{U_{const Zugtg}}$ nach Gleichung (6.2-13) und $e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zugtg}} = e^{-U_{Fz Zugtg}}$ umschreiben zu:

$$c_4 = \frac{1}{t_{bew Fz Zugtg}} \cdot \left(\frac{e^{U_{Fz Zugtg}} \cdot e^{U_{const Zugtg}}}{c_2} + 1 \right)$$

Die Ungleichung (7.2-2) wird insbesondere für kleine Werte für c_4 erfüllt. Beispielsweise ist die Ungleichung (7.2-2) bei $e^{U_{MIV}} = e^{U_{Bahn}}$ (mit $e^{U_{Bahn}} = e^{U_{Fz Zugtg}} \cdot e^{U_{const Zugtg}}$) für beliebige Wartezeiten und $t_{bew Fz Zugtg} \geq 35$ min, das heißt für den Personenfernverkehr, erfüllt. Bei gutem Bahnangebot im Personennahverkehr ($e^{U_{Bahn}} / e^{U_{MIV}} \approx 0,6$) gilt die Ungleichung für $t_{bew Fz Zugtg} \geq 26$ min, bei schlechtem Bahnangebot bereits für kleinere Fahrzeiten der Bahn (12 min oder mehr).

Somit gilt bei schlechtem Bahnangebot und in jedem Falle für größere Fahrzeiten der Bahn:

$$f_{N,PV VISEM} < f_{N,p} \quad (7.2-3)$$

7.2.6.2 VIA-Widerstandsmodell mit Modal-Split-Ansatz nach Jochim

Beim VIA-Widerstandsmodell fließt die bewertete Beförderungszeit linear in die Nachfrageänderung ein. Dadurch und wegen konstanter Summanden im Widerstand für die Bahn fällt die Reagibilität vergleichsweise niedrig aus. Daher und aufgrund der Ergebnisse für das Beispiel (vgl. Abb. 6.2-3 und 6.2-4 in Kap. 6.2.4) wird für den Vergleich von Transportimpuls und Erlös für Wartezeiten $t_W > 0$ gezeigt:

$$f_{N,p} < f_{N,PV \text{ VIA}}$$

Das Einsetzen der Gleichungen (7.1-1) und (6.2-22) liefert:

$$\frac{t_{bew \text{ Fz Zugtg}}}{t_{bew \text{ Bef Zugtg}}} < \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew \text{ Bef Zugtg}} + w_{\text{Zugtg},k})}$$

Durch die Multiplikation mit den Nennern ergibt sich:

$$t_{bew \text{ Fz Zugtg}} \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew \text{ Bef Zugtg}} + w_{\text{Zugtg},k})] < t_{bew \text{ Bef Zugtg}} \cdot (1 + c_1 \cdot c_2)$$

Durch Zusammenfassung aller von der bewerteten Beförderungszeit abhängigen Summanden auf der rechten Seite sowie mit $c_2 = w_{\text{Zugtg},0} = t_{\text{Fz Zugtg}} \cdot ZB_{WF} + w_{\text{Zugtg},k}$ (vgl. Gl. (6.2-22)) wird daraus:

$$t_{bew \text{ Fz Zugtg}} \cdot (1 + c_1 \cdot w_{\text{Zugtg},k}) < t_{bew \text{ Bef Zugtg}} \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{\text{Fz Zugtg}} \cdot ZB_{WF} + w_{\text{Zugtg},k}) - c_1 \cdot t_{bew \text{ Fz Zugtg}}]$$

Das Auflösen der runden Klammer auf der rechten Seite liefert mit $t_{\text{Fz Zugtg}} \cdot ZB_{WF} = t_{bew \text{ Fz Zugtg}}$:

$$t_{bew \text{ Fz Zugtg}} \cdot (1 + c_1 \cdot w_{\text{Zugtg},k}) < t_{bew \text{ Bef Zugtg}} \cdot (1 + c_1 \cdot w_{\text{Zugtg},k})$$

Die Division der Ungleichung durch die Klammerausdrücke ergibt wegen $c_1 > 0$:

$$t_{bew \text{ Fz Zugtg}} < t_{bew \text{ Bef Zugtg}}$$

Diese Ungleichung ist für alle Wartezeiten $t_W > 0$ erfüllt. Folglich gilt für alle $\rho > 0$:

$$f_{N,p} < f_{N,PV \text{ VIA}} \quad (7.2-4)$$

7.2.6.3 Zusammenfassung zum Verlauf des Transportimpulses zwischen den Grenzwerten für den Personenverkehr

Unter Verwendung der Ungleichungen (7.2-3) und (7.2-4) ergibt sich somit (wobei die Ungleichung (7.2-3) insbesondere für übliche Eingangswerte erfüllt ist):

$$f_{N,PV \text{ VISEM}} < f_{N,p} < f_{N,PV \text{ VIA}}$$

Es gilt also in der Regel (mit Gl. (7.2-1)):

$$\text{Erlös}_{PV \text{ VISEM}}(\rho) < \text{Erlös}_p(\rho) < \text{Erlös}_{PV \text{ VIA}}(\rho) \quad (7.2-5)$$

Das bedeutet, dass die Erlösberechnung mit Hilfe des Transportimpulses Ergebnisse zwischen den Ergebnissen der beiden betriebswirtschaftlichen Berechnungsmethoden liefert. Somit lässt sich für den Personenverkehr feststellen, dass die Funktion des Transportimpulses auch zwischen den Grenzwerten an den Rändern des Definitionsbereichs plausible Ergebnisse liefert.

Schließlich ist für den *Güterverkehr* zu prüfen, ob sich der Transportimpuls zur Beschreibung des Erlöses eignet.

7.2.6.4 Modell für die Bundesverkehrswegeplanung

Das Modell für die Bundesverkehrswegeplanung verwendet wie VISEM Exponentialfunktionen der Beförderungszeit, so dass hier ebenfalls die Annahme getroffen wird, dass der Faktor $f_{N,GV \text{ BVWP}}$ stärker auf Angebotsveränderungen reagiert als der Faktor $f_{N,p}$. Somit gälte für alle Wartezeiten $t_w > 0$:

$$f_{N,GV \text{ BVWP}} < f_{N,p}$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (6.3-9) und (7.2-1) und mit $t_{bew \text{ Bef}} = t_{Bef}$ gemäß Gleichung (6.3-4) für den Güterverkehr ergibt sich:

$$\frac{\sum_m (P_{ijg}(m) U_{ijg1}(m)) \cdot e^{U_{ijg,Bahn1}}}{e^{U_{ijg0}} \cdot e^{U_{ijg,Bahn0}}} \cdot \frac{\sum_m e^{U_{ijg0}(m)}}{\sum_m e^{U_{ijg1}(m)}} < \frac{t_{Fz \text{ Zuggtg}}}{t_{Bef \text{ Zuggtg}}}$$

Der Übersichtlichkeit halber werden im Weiteren die Indices i, j und g weggelassen. Durch Umsortieren der Faktoren lässt sich die rechte Seite der Ungleichung umschreiben zu:

$$\frac{e^{\sum_{m \neq Bahn} (P(m) U(m))} \cdot e^{P(Bahn) U_1(Bahn)}}{e^{\sum_{m \neq Bahn} (P(m) U(m))} \cdot e^{P(Bahn) U_0(Bahn)}} \cdot \frac{\sum_{m \neq Bahn} e^{U(m)} + e^{U_0(Bahn)}}{\sum_{m \neq Bahn} e^{U(m)} + e^{U_1(Bahn)}} \cdot \frac{e^{U_1(Bahn)}}{e^{U_0(Bahn)}} < \frac{t_{Fz \text{ Zuggtg}}}{t_{Bef \text{ Zuggtg}}} \quad (7.2-6)$$

Die Zusammenfassung von Zähler und Nenner für jeden der Brüche einschließlich Kürzen führt zu:

$$e^{P(Bahn) \cdot \Delta U} \cdot \frac{1 + e^{U_0(Bahn)}}{1 + e^{U_1(Bahn)}} \cdot \frac{\sum_{m \neq Bahn} e^{U(m)}}{\sum_{m \neq Bahn} e^{U(m)}} \cdot e^{\Delta U} < \frac{t_{Fz\ Zuggtg}}{t_{Bef\ Zuggtg}}$$

mit

$$\Delta U = U_1(Bahn) - U_0(Bahn)$$

Durch Zusammenfassen der von ΔU abhängigen Terme und mit Gleichung (6.3-7)

$$\frac{P(Bahn)}{\sum_{m \neq Bahn} P(m)} = \frac{e^{U(Bahn)}}{\sum_{m \neq Bahn} e^{U(m)}}$$

lässt sich die rechte Seite der Ungleichung vereinfachen zu:

$$e^{\Delta U \cdot (1 + P(Bahn))} \cdot \frac{1 + P_0(Bahn)}{1 + P_1(Bahn)} \cdot \frac{\sum_{m \neq Bahn} P(m)}{\sum_{m \neq Bahn} P(m)} < \frac{t_{Fz\ Zuggtg}}{t_{Bef\ Zuggtg}} \quad (7.2-7)$$

Nach Gleichung (6.3-8) fließt die Zeit nicht-linear in den zeitabhängigen Nutzenbestandteil U_t ein:

$$U_t(m) = \frac{c_t}{\lambda} \cdot (t_{Bef\ ij}^\lambda(m) - 1)$$

Durch diese, verbunden mit der Exponentialfunktion sehr komplizierte Funktionsform ist eine Verrechnung der Terme der linken und der rechten Seite der Ungleichung nicht möglich. Es wird daher eine Abschätzung der Werte für die beiden Seiten der Ungleichung für beliebige Belegungsgrade vorgenommen.

Die Ungleichung (7.2-6) muss auch dann noch erfüllt sein, wenn das Modell für die Bundesverkehrswegeplanung eine geringe Reagibilität aufweist. Bezogen auf die Eingangsgrößen von Ungleichung (7.2-7) tritt eine geringe Reagibilität bei geringem Anteil der Bahn und, wegen der box-cox-Transformation der Beförderungszeit, bei hohen Beförderungszeiten auf.

Für eine Beispielrechnung betrage der Anteil $P_0(\text{Bahn})$ der Bahn im Ausgangszustand 5 % und die Transportdauer 3 Tage. Bei einer solchen Konstellation wird die Ungleichung (7.2-7) erst für Wartezeiten t_w je Zug von mehr als 200 000 min erfüllt. Solche Wartezeiten treten erst bei hohen Belegungsgraden einer Eisenbahnstrecke auf, die außerhalb des hier relevanten Bereichs liegen.

Die am Beispiel erkennbare geringe Reagibilität des Modells resultiert sowohl aus der Verwendung einer box-cox-Transformation der Beförderungszeit als auch aus den Werten der Parameter. Aufgrund dessen könnte sich die geringe Reagibilität auch für andere Eingangswerte ergeben, so dass gälte:

$$f_{N,p} < f_{N,GV\ BVWP} \quad (7.2-8)$$

Diese Ungleichung muss auch bei einer hohen Reagibilität des Modells für die Bundesverkehrswegeplanung erfüllt sein. Eine hohe Reagibilität ergibt sich bei einem hohen Modal-Split-Anteil der Bahn und einer niedrigen Beförderungszeit. Unter der Annahme eines mit 60 % sehr hohem Anteils der Bahn im bedeutungsvollsten und bei sehr hohen Wartezeiten angebotssensibelsten Nachfragesegment der Partiegrößen über 100 t (ohne Massengüter) und einer Beförderungszeit ohne Wartezeiten von nur zwei Stunden ist Ungleichung (7.2-8) für alle Wartezeiten $< 8\,500$ min je Zug erfüllt. Da nur dieser Bereich für die vorliegende Arbeit Relevanz besitzt, wird im Weiteren die Ungleichung (7.2-8) verwendet.

7.2.6.5 Graphisches Verfahren

Als weiteres Modell steht das in Unterkapitel 6.3.3 beschriebene graphische Verfahren zur Verfügung. Auch mit den Funktionen dieses Verfahrens wird im Folgenden die Eignung des Transportimpulses anhand der Funktionswerte zwischen den Grenzen des Definitionsbereichs geprüft.

Als Eingangsgröße dieses Verfahrens dient die relative Änderung Δt_{Bef} der Transportdauer

$$\Delta t_{Bef} = \frac{t_w}{t_{Fz}} \quad (7.2-9)$$

Die Veränderung der Transportdauer ergibt sich bei Anwendung des Verfahrens in dieser Arbeit ausschließlich infolge der Wartezeiten:

$$\Delta t_{Bef} = \frac{t_{Bef} - t_{Fz}}{t_{Fz}} = \frac{t_{Bef}}{t_{Fz}} - 1$$

Unter Verwendung der Definition für den Faktor $f_{N,p}$ nach Gleichung (7.1-1) lässt sich dieser Faktor in die Gleichung einführen:

$$\Delta t_{Bef} = \frac{1}{f_{N,p}} - 1$$

Die Umformung nach $f_{N,p}$ führt zu:

$$f_{N,p} = \frac{1}{\Delta t_{Bef} + 1}$$

Somit lässt sich der Faktor $f_{N,p}$ in die Diagramme, die in dem Verfahren die Modal-Split-Reaktion darstellen, einzeichnen. Da in den Diagrammen nicht der Faktor $f_{N,p}$ sondern der Modal-Split-Anteil über der Änderung der Transportdauer aufgetragen ist, muss der Faktor für das Einzeichnen entsprechend normiert werden:

$$A_{Bahn} \cdot f_{N,p} = \frac{A_{Bahn}}{\Delta t_{Bef} + 1}$$

mit

$$A_{Bahn} \quad \text{Modal-Split-Anteil der Bahn bei } \Delta t_{Bef} = 0$$

Im Folgenden sind beispielhaft zwei Diagramme dargestellt, in denen der Modal-Split-Anteil in Abhängigkeit von der Änderung der Transportdauer und der normierte Faktor abgebildet sind. Ausgewählt wurden der aufgrund der Verkehrsleistung wichtigste Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“ und der Güterbereich mit einer durchschnittlichen Reagibilität „Landwirtschaftliche Erzeugnisse, Nahrungs- und Futtermittel“.

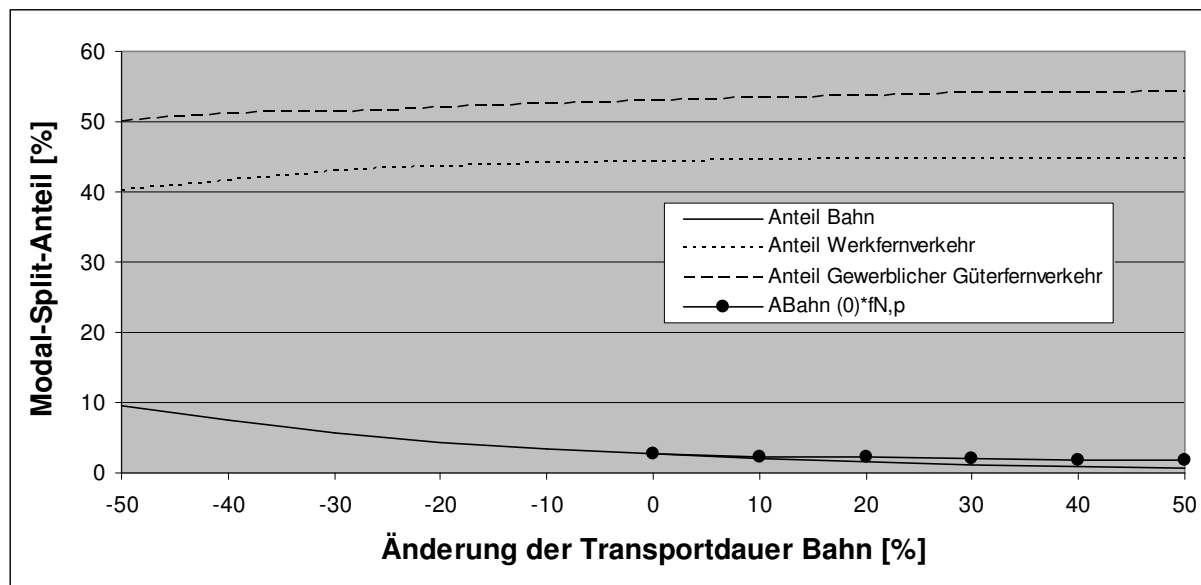


Abb. 7.2-1: Modal-Split-Reaktion für den Güterbereich „Landwirtschaftliche Erzeugnisse, Nahrungs- und Futtermittel“, 5 - 15 t und > 300 km und Faktor $f_{N,p}$ [4]

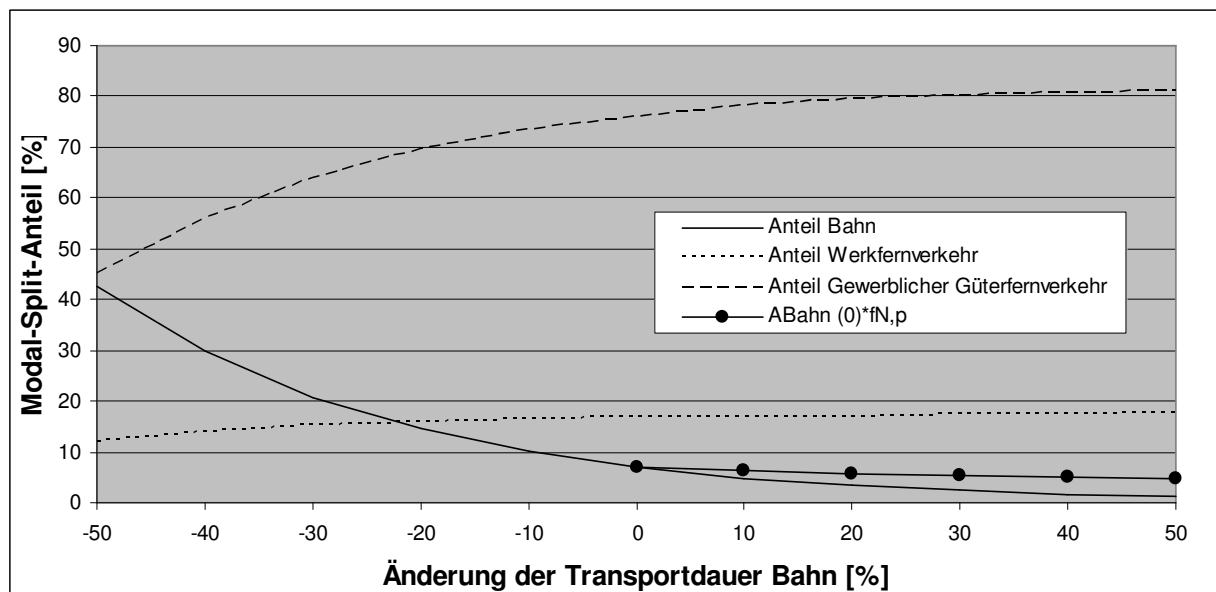


Abb. 7.2-2: Modal-Split-Reaktion für den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“, 5 - 15 t und > 300 km und Faktor $f_{N,p}$ [4]

Eine Überprüfung für alle Güterbereiche ergab lediglich für den Güterbereich „Steine und Erden, Chemische Erzeugnisse und Düngemittel, 15 - 100t und < 300 km“ eine stärkere Reaktion des Faktors $f_{N,p}$ als des Faktor $f_{N,GV\,gr}$. Der gesamte Bereich „Steine und Erden, Chemische Erzeugnisse und Düngemittel“, zu dem dieser Teil zugerechnet wird, macht für das Jahr 2001 gemäß [21] jedoch nur einen Anteil von

circa 22% am Gesamtgüterverkehrsaufkommen aus. Im Allgemeinen lässt sich hiermit die Aussage treffen, dass die physikalische Größe zur Erfassung der Nachfragereaktion den Faktor unter Verwendung des nur graphisch dokumentierten Verfahrens ebenfalls widerspiegelt.

Folglich gilt für $\rho > 0$:

$$f_{N,GV\ gr} < f_{N,p} \quad (7.2-10)$$

7.2.6.6 Zusammenfassung zum Verlauf des Transportimpulses zwischen den Grenzwerten für den Güterverkehr

Unter Verwendung der Ungleichungen (7.2-8) und (7.2-10) ergibt sich somit:

$$f_{N,GV\ gr} < f_{N,p} < f_{N,GV\ BVWP}$$

Es gilt also für den Güterverkehr mit Gleichung (7.2-1):

$$Erlös_{gr}(\rho) < Erlös_p(\rho) < Erlös_{BVWP}(\rho) \quad (7.2-11)$$

Sowohl diese Ungleichung als auch die entsprechende Ungleichung (7.2-5) für den Personenverkehr zeigen, dass kein einheitlicher betriebswirtschaftlicher Vergleichsmaßstab für die physikalische Größe existiert. Beispielsweise lässt sich für beliebige Belegungsgrade ρ zeigen (vgl. Anhang 2), dass gilt:

$$Erlös_{VISEM}(\rho) < Erlös_{VIA}(\rho)$$

Aufgrund der Diskussion dieser beiden Modelle (vgl. Kap. 6.2.3.3 und 6.2.3.4) und der allgemein mit der Modellierung menschlichen Verhaltens verbundenen Schwierigkeiten lässt sich auch nicht eines der Modelle als einziger geeigneter Vergleichsmaßstab definieren. Die theoretischen Herleitungen in diesem Unterkapitel zeigen, dass der Transportimpuls Ergebnisse in dem von den Vergleichsmaßstäben aufgespannten Bereich liefert.

Im Hinblick auf die in der Zielstellung geforderte leichte Anwendbarkeit und die Verwendung eines physikalischen Maßstabs wird in dem neuen Ansatz bewusst kein Verkehrsnachfragemodell verwendet. Dennoch zeigen die Herleitungen die Übereinstimmung von physikalischen und betriebswirtschaftlichen Ansätzen. Da die Herleitungen allgemeingültig erfolgten, konnte der Nachweis für beliebige Relationen und Entfernungen und für nahezu jegliche Angebotskonstellationen auch der Konkurrenzverkehrsmittel geführt werden. Es ist somit gelungen, die Eignung des

Transportimpulses als physikalische Größe zur Beschreibung des Erlöses für beliebige Belegungsgrade nachzuweisen.

7.2.7 Berechnung des Gesamterlöses einer Eisenbahnstrecke mit physikalischen Größen

Abschließend ist die Methode zur Berechnung des Gesamterlöses einer Eisenbahnstrecke mit physikalischen Größen aus dem bisher behandelten Transportimpuls je Zuggattung festzulegen. Im Folgenden werden zwei Methoden vorgestellt und diskutiert.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung des Gesamttransportimpulses p_{Gesamt} besteht in der Addition der einzelnen Transportimpulse, so dass jede Zuggattung einen Beitrag in Höhe ihres Transportimpulses leistet:

$$p_{\text{Gesamt}} = \sum_{\text{Zuggtg}} p_{\text{Zuggtg}} = \sum_{\text{Zuggtg}} \left(c_{E, \text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \right) \quad (7.2-12)$$

Alternativ lassen sich die Bestimmungsgrößen unabhängig voneinander zusammenfassen und dann zum Gesamttransportimpuls verknüpfen. Dann ergibt sich der Gesamttransportimpuls beispielsweise bei einer Differenzierung nach Masse, Fahrzeit und Geschwindigkeit als Produkt aus einer Masse, in der die Massen der einzelnen Zuggattungen zusammengefasst sind, sowie einer Geschwindigkeit und einer Fahrzeit, die die Geschwindigkeiten und Fahrzeiten der einzelnen Zuggattungen erfassen. So könnten zum Beispiel alle Massen addiert und mit einer mittleren Geschwindigkeit und einer mittleren Fahrzeit über alle Züge multipliziert werden:

$$p_{\text{Gesamt}} = \bar{v}_{\text{Bef}} \cdot \bar{t}_{\text{bew Fz Zuggtg}} \cdot \sum_{\text{Zuggtg}} m_{\text{Zuggtg}} \quad (7.2-13)$$

mit

$\bar{v}_{\text{Bef}}$ mittlere Beförderungsgeschwindigkeit über alle Zuggattungen [km/min]

$\bar{t}_{\text{bew Fz Zuggtg}}$ mittlere Fahrzeit über alle Zuggattungen [min]

Bei Verwendung dieser Gleichung wäre die Berechnung der mittleren Beförderungsgeschwindigkeit und der mittleren Fahrzeit zu klären.

Die Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsmethoden werden anhand des Beispiels einer Mischverkehrsstrecke erläutert, auf der etwa gleich viele hochwertige Reisezüge und niedrigrangige Güterzüge verkehren mögen. Aufgrund der Rangunterschiede und der hohen Zuganzahl im Personenverkehr ergeben sich für die Güterzüge bereits bei der Fahrplanerstellung große Verschiebungen aus der gewünschten Lage (planmäßige Wartezeiten). Bei Verwendung einer mittleren Geschwindigkeit über alle Züge würde unterstellt, dass alle Züge einen Teil der hohen planmäßigen Wartezeiten der Güterzüge erhalten. Dadurch ergäbe sich eine deutliche Reduzierung der Beförderungsgeschwindigkeit, die gemäß Unterkapitel 5.3 die Angebotsqualität beschreibt. Der Rückgang der Angebotsqualität führt zu einer Erlösminderung für die hochrangigen Reisezüge, die von der Anzahl der Güterzüge abhängt und unrealistisch hoch ausfällt. Diese Argumentation gilt analog für den Zustand der Betriebsführung.

Unabhängig davon, auf welche Weise die Zusammenfassung der Bestimmungsgrößen des Gesamttransportimpulses für Gleichung (7.2-13) erfolgt, ergeben sich immer Einflüsse der Eigenschaften einer Zuggattung auf andere Zuggattungen. Solche Abhängigkeiten bestehen bei der betriebswirtschaftlichen Ermittlung des Gesamterlöses höchstens bei der Wartezeitberechnung. Da die Wartezeitberechnung für den betriebswirtschaftlichen und den physikalischen Maßstab gleich ist und unabhängig von der Bewertung erfolgt, darf die physikalische Bewertung keine der oben aufgeführten Abhängigkeiten enthalten. Daher kommt nur die Summation der Einzeltransportimpulse der Zuggattungen zur Berechnung des Gesamtimpulses in Frage. Im Weiteren wird somit nur noch Gleichung (7.2-12) verwendet.

7.2.8 Zusammenfassung

Ziel des Unterkapitels 7.2 war die Validierung der Hypothese für die physikalische Größe zur Beschreibung der Erlöse. Gleichzeitig erfolgte eine weitere Absicherung der Summe der gewichteten Beförderungszeiten zur physikalischen Modellierung der Kosten.

Es konnte gezeigt werden, dass Transportimpuls und Erlöse einerseits sowie die Summe der gewichteten Beförderungszeiten und die Kosten andererseits das gleiche Konvergenzverhalten an den Rändern des Definitionsbereichs aufweisen.

Der Transportimpuls ließ sich sowohl für den Personenverkehr als auch den Güterverkehr verifizieren. Er eignet sich somit bei beliebigen Betriebsprogrammen und Belegungsgraden zur Modellierung der Erlöse.

Somit ist es gelungen, allgemeingültig den Transportimpuls für die Modellierung des Erlöses und die Summe der gewichteten Beförderungszeiten für die Beschreibung der Kosten zu validieren.

7.3 Herleitung physikalischer Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken

7.3.1 Einleitung

Nach der Validierung der physikalischen Größen für die Kosten und die Erlöse sind diese Größen in diesem Kapitel zu dem zu entwickelnden Maßstab zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken zusammenzufassen.

Die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung einer Eisenbahnstrecke sollte gemäß Zielstellung anhand der betriebswirtschaftlichen Kenngröße „Gewinn“, erfolgen. Eine weitere betriebswirtschaftliche Kenngröße, die Kosten und Erlöse verknüpft, ist die Produktivität, die Sauer [43] zur Beurteilung der Betriebsqualität einer Eisenbahnstrecke verwendet.

Der Gewinn ergibt sich als die Differenz aus Erlösen und Kosten. Die Stelle, an der der maximale Gewinn liegt, entspricht der optimalen Auslastung. Somit ist eine Zuganzahl garantiert, bei der ein Betrieb der Infrastruktur zu niedrigen Gesamtkosten die Abwanderung von Fahrgästen und Gütern infolge Qualitätseinbußen ausgleicht.

Die Lage des Maximums hängt nicht von den fixen Kosten ab. Daher lässt sich an Stelle des Gewinns auch die Kenngröße „Deckungsbeitrag“ verwenden (s. Kap. 4.1). Die fixen Kosten beeinflussen jedoch die absolute Höhe des Gewinns und können sein Vorzeichen verändern.

Die Produktivität ergibt sich als das Verhältnis von Erfolg und Aufwand oder als Quotient aus Erzeugnis- und Einsatzmenge. Damit lässt sich in gewisser Weise auch die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Fahrzeugen, Personal oder des Fahrwegs abbilden. Die Produktivität ermöglicht jedoch keine direkte Aussage über die Wirtschaftlichkeit des Betriebs einer Eisenbahnstrecke. Da aber jede Erhöhung der Produktivität bei sonst unveränderten Randbedingungen (z. B. unverändertes Kalkulationsverfahren) eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit nach sich zieht, besteht zwischen

beiden Größen eine Abhängigkeit. Mit der Produktivität ist somit eine vergleichende Bewertung von verschiedenen Betriebsprogrammen oder Ausbauzuständen der Infrastruktur unter Berücksichtigung der Angebotsqualität möglich. Sie spiegelt somit die Rentabilität des eingesetzten Kapitals wider.

Als Aufwand oder Einsatzmenge werden häufig die Kosten herangezogen (s. auch [43]). Als Alternative dazu schreibt Gienke in [26]: „Aufwand kann aber auch in anderen Einheiten aufgezeigt werden, z. B. Zeiten oder Vorgänge, hinter denen unterschiedliche Zeiten stehen.“ Demnach eignen sich auch bei einer betriebswirtschaftlichen Analyse physikalische Größen, wie Zeiten oder Vorgänge, zur Beschreibung der Produktivität.

Unabhängig von der Entscheidung für physikalische oder betriebswirtschaftliche Größen zur Quantifizierung des Aufwands ist die Umlegung von fixen Kosten auf die Einsatzmenge aufgrund der damit verbundenen und in Unterkapitel 3.4 beschriebenen Probleme nicht anstrebenswert. Die fixen Kosten müssen vielmehr separat in den Aufwand einfließen.

Für den Erfolg oder die Erzeugnismenge lassen sich sowohl betriebliche und verkehrliche Kenngrößen (z. B. Betriebs- und Verkehrsleistung) als auch wirtschaftliche Kenngrößen (z. B. Erlös) verwenden.

Sowohl für den Gewinn als auch für die Produktivität müssen geeignete physikalische Größen festgelegt werden (Kap. 7.3.3). Anschließend ist ihre Eignung für die Beschreibung der beiden betriebswirtschaftlichen Kenngrößen zu prüfen. Diese Prüfungen erfolgen getrennt für die Produktivität und den Gewinn.

Die entsprechenden Nachweise werden analog zu Unterkapitel 7.2 durchgeführt, indem zunächst für die betriebswirtschaftlichen Größen Grenzwerte an den Rändern des Definitionsbereichs ermittelt werden (Kap. 7.3.2). Anschließend sind die physikalischen Größen nach Unterkapitel 7.3.3 darauf zu prüfen, ob sie diese Grenzwerte erfüllen (Kap. 7.3.4 u. 7.3.7). Für die demnach geeigneten physikalischen Größen wird die Übereinstimmung ihres Verlaufs zwischen den Grenzwerten mit dem der betriebswirtschaftlichen Größen untersucht (Kap. 7.3.5 u. 7.3.8). Daran schließt sich jeweils die Darstellung der bis dahin noch nicht erläuterten Details zu den Maßstäben an (Kap. 7.3.6, 7.3.9 u. 7.3.10)

7.3.2 Grenzwertbetrachtungen für die betriebswirtschaftlichen Kenngrößen

Bei einer betriebswirtschaftlichen Bestimmung der Produktivität $R(\rho)$ gilt:

$$R(\rho) = \frac{\text{Erlös}(\rho)}{\text{Kosten}(\rho)}$$

Für die Produktivität einer Eisenbahnstrecke gelten die folgenden beiden Grenzwerte:

- Bedingung R1: Wenn kein Zug fährt, ist die Produktivität gleich Null.

$$R(0) = \frac{\text{Erlös}(0)}{\text{Kosten}(0)} = \frac{0}{K_{\text{fix}}} = 0$$

- Bedingung R2: Bei nahezu vollständig ausgelasteten Eisenbahnstrecken entstehen für die Zuggattungen in den niedrigsten Rangordnungsklassen im Betriebsprogramm aufgrund der hohen Wartezeiten und der geringen Nachfrage geringe Erlöse während durch den hohen Einsatz von Produktionsmitteln die Kosten divergieren, so dass die Produktivität mit steigendem Belegungsgrad gegen Null konvergiert.

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} R_{\text{nied Zugtg}}(\rho) = \lim_{\rho \rightarrow 1} \left(\frac{\text{Erlös}_{\text{nied Zugtg}}(\rho)}{\text{Kosten}_{\text{nied Zugtg}}(\rho)} \right) = \frac{\lim_{\rho \rightarrow 1} \text{Erlös}_{\text{nied Zugtg}}(\rho)}{\lim_{\rho \rightarrow 1} \text{Kosten}_{\text{nied Zugtg}}(\rho)} = 0$$

mit

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \text{Erlös}_{\text{nied Zugtg}}(\rho)$$

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \left(\frac{1}{\text{Kosten}_{\text{nied Zugtg}}(\rho)} \right) = 0$$

Analog lassen sich auch für den Gewinn Grenzwerte an den Rändern des Definitionsbereichs bestimmen. Mit

$$\text{Gewinn}(\rho) = \text{Erlös}(\rho) - \text{Kosten}(\rho)$$

gilt:

- Bedingung G1: Wenn kein Zug fährt, können keine Erlöse erzielt werden. Dennoch fallen fixe Kosten K_{fix} an.

$$Gewinn(0) = Erlös(0) - Kosten(0) = -K_{fix}$$

- Bedingung G2: Bei nahezu vollständig ausgelasteten Eisenbahnstrecken entstehen für die Zuggattungen in den niedrigsten Rangordnungsklassen aufgrund der hohen Wartezeiten und der geringen Nachfrage und dem damit verbundenen hohen Einsatz von Produktionsmitteln hohe Kosten bei gleichzeitig geringen Erlösen. Der Gewinn divergiert für hohe Belegungsgrade:

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} Gewinn_{nied\ Zugtg}(\rho) = \lim_{\rho \rightarrow 1} Erlös_{nied\ Zugtg}(\rho) - \lim_{\rho \rightarrow 1} Kosten_{nied\ Zugtg}(\rho) = -\infty$$

mit

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} Erlös_{nied\ Zugtg}(\rho) = 0$$

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} Kosten_{nied\ Zugtg} \rightarrow \infty$$

Eine physikalische Größe muss, um die Produktivität oder den Gewinn darstellen zu können, diese Grenzwerte erfüllen.

7.3.3 Physikalische Größen für die Produktivität und den Gewinn

Im Folgenden sind die physikalischen Größen zur Beschreibung der Produktivität und des Gewinns festzulegen. Beide Größen hängen sowohl von der transportierten Menge als auch von der Transportqualität ab.

Als physikalische Größen, die sowohl die Quantität als auch die Qualität erfassen, ergeben sich aus Kapitel 5 die drei physikalischen Größen „Kraft“, „Energie“ und „Leistung“. Diese drei Größen könnten sich somit eignen, den Gewinn oder die Produktivität darzustellen.

Aus Unterkapitel 6.1 ergibt sich, dass sich die Kosten anhand der Summe der gewichteten Beförderungszeiten physikalisch beschreiben lassen. Ergebnis der Untersuchungen in Unterkapitel 7.2.6 ist, dass der Erlös durch die physikalische Größe „Transportimpuls“ geeignet dargestellt werden kann.

Für die Produktivität ergibt sich unter Verwendung dieser Erkenntnisse:

$$R = \frac{Erlös}{Kosten} \sim \frac{p}{t}$$

Durch Einführung der Proportionalitätskonstanten $c_{\kappa, \text{Zuggtg}}$ für die Berücksichtigung der unterschiedlichen Kostenstärke im Personen- und im Güterverkehr ergibt sich:

$$\text{Erlös}_{\text{Zuggtg}} = c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}} \cdot p_{\text{Zuggtg}} \quad \text{und} \quad \text{Kosten}_{\text{Zuggtg}} = c_{\kappa, \text{Zuggtg}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}} \quad (7.3-1)$$

Somit ergibt sich der Quotient aus Impuls und Zeit, als die Kraft:

$$R_{\text{Zuggtg}} \sim F_{\text{Zuggtg}} = \frac{c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}} \cdot p_{\text{Zuggtg}}}{c_{\kappa, \text{Zuggtg}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}} \quad (7.3-2)$$

mit

F_{Zuggtg} Transportkraft [MNs]

p_{Zuggtg} Transportimpuls [MNs²]

$\hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}$ Summe der gewichteten Beförderungszeiten [10³·s]

Als Hypothese für die physikalische Größe für die Produktivität ergibt sich somit die Transportkraft F_{Zuggtg} .

Die Transportenergie W_{Zuggtg} und die Transportleistung P_{Zuggtg} lassen sich ebenfalls anhand des Transportimpulses und der Zeit darstellen. Es gilt:

$$W_{\text{Zuggtg}} = \frac{p_{\text{Zuggtg}}}{\hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}^2} \quad (7.3-3)$$

und

$$P_{\text{Zuggtg}} = \frac{p_{\text{Zuggtg}}}{\hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}^3} \quad (7.3-4)$$

Die Eignung der einzelnen Größen ist in den folgenden Unterkapiteln zu prüfen.

Die Transportkraft einer Zuggattung ergibt sich durch Einsetzen der Gleichung (7.1-2) für den Transportimpuls und der Gleichung (6.1-2) für die Summe der gewichteten Beförderungszeiten in Gleichung (7.3-2):

$$F_{\text{Zuggtg}} = \frac{c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{c_{\kappa, \text{Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)} \quad (7.3-5)$$

Zur Bestimmung der physikalischen Größe zur Abbildung des Gewinns sind ebenfalls die physikalischen Größen für die Erlöse und die Kosten (s. Gl. (7.3-1)) heranzuziehen. Damit lässt sich der Gewinn schreiben als:

$$\begin{aligned} \text{Gewinn}_{\text{Zuggtg}} &= \text{Erlös}_{\text{Zuggtg}} - \text{Kosten}_{\text{Zuggtg}} \\ &= c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}} \cdot p_{\text{Zuggtg}} - c_{\kappa, \text{Zuggtg}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}} \end{aligned}$$

Das Ausklammern von $c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}}$ führt zu:

$$\text{Gewinn}_{\text{Zuggtg}} = c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}} \cdot \left(p_{\text{Zuggtg}} - \frac{c_{\kappa, \text{Zuggtg}}}{c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}} \right)$$

Durch Weglassen von $c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}}$ wird daraus die Proportion:

$$\text{Gewinn}_{\text{Zuggtg}} \sim p_{\text{Zuggtg}} - c_{\kappa, \text{Zuggtg}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}} \quad (7.3-6)$$

mit

$$c_{\kappa, \text{Zuggtg}} := \frac{c_{\kappa, \text{Zuggtg}}}{c_{\varepsilon, \text{Zuggtg}}}$$

Die rechte Seite dieser Proportion lässt sich nicht in eine der drei oben genannten oder eine andere physikalische Größe überführen. Folglich steht keine einzelne abgeleitete physikalische Größe zur Beschreibung des Gewinns zur Verfügung. Im Hinblick auf die Einheit der rechten Seite der Gleichung (7.3-6) wird diese Differenz im Weiteren als Transportimpulsdifferenz Δp_{Zuggtg} bezeichnet:

$$\text{Gewinn}_{\text{Zuggtg}} \sim \Delta p_{\text{Zuggtg}} = p_{\text{Zuggtg}} - c_{\kappa, \text{Zuggtg}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}} \quad (7.3-7)$$

Die Ermittlung der Proportionalitätskonstanten $c_{\kappa, \text{Zuggtg}}$ ist Gegenstand von Unterkapitel 7.3.9.

Die physikalischen Größen in der Proportion (7.3-7) lassen sich mit den Gleichungen für den Transportimpuls (Gl. (7.1-2)) und die Summe der gewichteten Beförderungszeiten (Gl. (6.1-2)) umschreiben. Somit ergibt sich für die Transportimpulsdifferenz:

$$\Delta p_{\text{Zuggtg}} = m_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} - c_{\kappa, \text{Zuggtg}} \cdot \left[\frac{m_0 \cdot L_{\text{Strecke}}}{v_0} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right]$$

Durch Ausklammern der Masse wird daraus:

$$\Delta p_{\text{Zugtg}} = m_{\text{Zugtg}} \cdot \left[\frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{t_{\text{bew Bef Zugtg}}} - c_{K, \text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}} \right] - c_K \cdot \frac{m_0 \cdot L_{\text{Strecke}}}{v_0} \quad (7.3-8)$$

Es existieren keine physikalischen Größen, in der sich die Größen dieser Gleichung weiter zusammenfassen ließen. Gleichung (7.3-8) bildet somit die Hypothese zur physikalischen Beschreibung des Gewinns.

In den weiteren Unterkapiteln werden die Hypothesen für die physikalischen Größen getrennt nach Produktivität und Gewinn geprüft.

7.3.4 Grenzwertbetrachtungen für die Transportkraft

Für die Transportkraft ist im Weiteren festzustellen, ob sie die in Unterkapitel 7.3.2 formulierten Anforderungen aus dem Konvergenzverhalten der Produktivität an den Grenzen des Definitionsbereichs erfüllt. Durch Einsetzen der Gleichung (7.3-5) für die Transportkraft in die Bedingungen R1 und R2 und unter Verwendung der Proportion aus Gleichung (7.3-6) ergibt sich:

- Bedingung R1:

$$\begin{aligned} F_{\text{Zugtg}}(0) &= \frac{m_{\text{Zugtg}}(0) \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}}}{t_{\text{bew Bef Zugtg}}(0)} \cdot t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zugtg}}(0) \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}}(0) \right)} \\ &= \frac{0 \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}}}{t_{\text{bew Fz Zugtg}}} \cdot t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + 0 \cdot t_{\text{Fz (Kosten) Zugtg}} \right)} \\ &= 0 \end{aligned}$$

- Bedingung R2:

$$\begin{aligned}
 \lim_{\rho \rightarrow 1} F_{\text{nied Zugtg}}(\rho) &= \frac{\lim_{\rho \rightarrow 1} \left(m_{\text{nied Zugtg}}(\rho) \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}}}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} \cdot t_{\text{bew Fz nied Zugtg}} \right)}{c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + \lim_{\rho \rightarrow 1} (m_{\text{nied Zugtg}}(\rho) \cdot t_{\text{Bef (Kosten) nied Zugtg}}(\rho)) \right)} \\
 &= \frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot n_{\text{nied Zugtg}}(1) \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{bew Fz nied Zugtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} \left(\frac{1}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} \right)}{c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{nied Zugtg}}(1) \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} (t_{\text{Bef (Kosten) nied Zugtg}}(\rho)) \right)} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned}
 \lim_{\rho \rightarrow 1} \left(\frac{1}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} \right) &= 0 \\
 \lim_{\rho \rightarrow 1} (t_{\text{Bef (Kosten) nied Zugtg}}(\rho)) &= \infty \text{ und} \\
 n_{\text{nied Zugtg}}(1) &= n_{\text{max nied Zugtg}}
 \end{aligned}$$

Die Transportkraft erfüllt folglich beide Bedingungen. Sie könnte sich aufgrund ihres Konvergenzverhaltens daher zur Abbildung der Produktivität eignen.

Die beiden weiteren physikalischen Größen, die Transportenergie und die Transportleistung, unterscheiden sich von der Transportkraft durch die höhere Potenz der Beförderungszeit im Nenner. Die Potenz der Beförderungszeit verändert das Konvergenzverhalten nicht, so dass die beiden Bedingungen R1 und R2 sowohl von der Transportenergie als auch von der Transportleistung erfüllt werden.

Zusätzlich zum Konvergenzverhalten an den Rändern des Definitionsbereichs werden die physikalischen Größen auf ihren Verlauf zwischen den Rändern geprüft. Für die Produktivität kommen nach den Prüfungen in diesem Unterkapitel weiterhin die drei Größen Transportkraft, Transportenergie und Transportleistung in Frage. Da sich die Transportkraft als Verhältnis von Transportimpuls und Beförderungszeit schreiben und somit als Verhältnis von Erlösen und Kosten interpretieren lässt (vgl. Kap. 7.3.3), erscheint sie am besten geeignet. Die weiteren Prüfungen (Kap. 7.3.5) erfolgen daher zunächst für die Transportkraft. Sollte sich diese als nicht geeignet herausstellen, sind Transportenergie und Transportleistung zu untersuchen.

7.3.5 Verlauf der Transportkraft zwischen den Grenzwerten

Die Prüfung des Verlaufs der Größen als Funktion der Auslastung geschieht anhand ihrer Funktionswerte (Kap. 7.3.5.1). Da die Festlegung der wirtschaftlichsten Auslastung aufgrund des Maximums der Größe erfolgt, wird als zusätzliche Prüfung des Verlaufs die Lage des Maximums untersucht (Kap. 7.3.5.2 u. 7.3.5.3).

7.3.5.1 Funktionswerte der Transportkraft

In diesem Unterkapitel sind analog zu dem Vorgehen für den Transportimpuls (vgl. Kap. 7.2.6) die Funktionswerte der betriebswirtschaftlichen und der physikalischen Größe, hier der Produktivität und der Transportkraft, für beliebige Belegungsgrade innerhalb des Definitionsbereichs zu vergleichen.

Die Produktivität lässt sich durch Verwendung der Gleichungen (6.1-2) und (6.2-2) für die Kosten und die Erlöse schreiben als:

$$R = \frac{m_{\text{Zugtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot f_N}{c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}} \right)}$$

Damit und mit Gleichung (7.3-4) gilt:

$$\frac{F}{R} = \frac{\frac{m_{\text{Zugtg}} \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}}}{t_{\text{bew Bef Zugtg}}} \cdot t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}} \right)}}{\frac{m_{\text{Zugtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot f_N}{c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}} \right)}} \quad (7.3-9)$$

Durch Kürzen mit der von der Auslastung unabhängigen Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke, der Masse und den Proportionalitätskonstanten sowie Erweitern mit den beiden Nennern ergibt sich:

$$\frac{F}{R} = \frac{t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{t_{\text{bew Bef Zugtg}}} \cdot f_N \quad (7.3-10)$$

In Unterkapitel 7.2.6 konnte gezeigt werden, dass der Quotient $f_{N,p} = \frac{t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{t_{\text{bew Bef Zugtg}}}$ den Faktor f_N für beliebige Belegungsgrade in geeigneter Weise beschreibt. Aufbauend

darauf lässt sich mit Gleichung (7.3-10) feststellen, dass sich die Transportkraft zur Abbildung der Produktivität eignet.

Die Quotienten $f_{N,p} = \frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}^2}$ und $f_{N,p} = \frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}^3}$ reagieren, wie bereits die Beispiele in Kapitel 6 (Kap. 6.2.4 u. Kap. 6.3.4) zeigen, stärker auf die Auslastung als der Faktor $f_{N,p}$. Weder die Transportenergie noch die Transportleistung eignen sich somit, um die Produktivität darzustellen.

7.3.5.2 Lage des Maximums der Transportkraft für den Personenverkehr

Zur Beurteilung der auslastungsabhängigen Qualität ist die Zuganzahl an der Stelle, an der die Produktivität ihr Maximum annimmt, von besonderer Bedeutung. Im Weiteren wird daher geprüft, ob die Lage des Maximums der Transportkraft plausibel ist. Diese Prüfung lässt sich nicht bereits anhand des obigen Vergleichs der Funktionswerte (Kap. 7.3.5.1) durchführen, da dabei die Steigung der Funktion unberücksichtigt bleibt.

Zur Bestimmung der Produktivität kommen für den Personenverkehr die gleichen Nachfragemodelle wie in Unterkapitel 7.2.6 zur Anwendung. Für den Güterverkehr erfolgt die Untersuchung der Lage des Maximums der Transportkraft in Unterkapitel 7.3.5.3.

Für die Ableitung der Transportkraft ergibt sich mit Gleichung (7.3-4):

$$F'_{Zugtg}(n) = \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{m_{Zugtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot t_{bew\ Fz\ Zugtg}}{t_{bew\ Bef\ Zugtg} \cdot c_{K,Zugtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg} \right)} \right]$$

Unter Verwendung des Ansatzes aus VISEM (s. Gl. (6.2-16)) gilt für die Produktivität:

$$R'_{VISEM}(n) = \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{L_{Abschnitt} \cdot m_{Zugtg} \cdot c_2}{c_{K,Zugtg} \cdot \left(c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \cdot c_3 \right) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg} \right)} \right]$$

mit

$$c_1 = e^{U_{const Zuggtg}}$$

$$c_2 = c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}} = c_1 + e^{c_1 \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} \cdot c_3$$

$$c_3 = \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}$$

Entsprechend ergibt sich mit dem VIA-Widerstandsmodell nach Gleichung (6.2-23):

$$R'_{VIA}(n) = \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg} \cdot (1 + c_1 \cdot c_2)}{c_{K,Zuggtg} \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})] \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right)} \right]$$

mit

$$c_1 = \frac{1}{w_{MIV}}$$

$$c_2 = w_{Zuggtg,0} = t_{Fz Zuggtg} \cdot ZB_{WF} + w_{Zuggtg,k}$$

Die Ermittlung der Lage der Maxima erfolgt getrennt für die Transportkraft und die Produktivität. Daran schließt sich der Vergleich dieser Stellen an.

Die Ableitung der Transportkraft $F'_{Zuggtg}(n)$ ergibt sich zu:

$$F'_{Zuggtg}(n) = \frac{m'_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}{c_{K,Zuggtg} \cdot t_{bew Bef Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right)} - \frac{m_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zuggtg} \cdot t'_{bew Bef Zuggtg}}{c_{K,Zuggtg} \cdot t_{bew Bef Zuggtg}^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right)} - \frac{m_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zuggtg} \cdot (m'_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} + m_{Zuggtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg})}{c_{K,Zuggtg} \cdot t_{bew Bef Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right)^2} = 0$$

Der Term m'_{Zuggtg} lässt sich mit $m_{Zuggtg} = n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug}$ umschreiben zu:

$$m'_{\text{Zuggtg}} = \frac{\partial n_{\text{Zuggtg}}}{\partial n} \cdot m_{\text{Zug}}$$

Bei konstantem Zugmix gilt:

$$\frac{\partial n_{\text{Zuggtg}}}{\partial n} = \text{const.}$$

Mit

$$k_{\text{Zuggtg}} := \frac{\partial n_{\text{Zuggtg}}}{\partial n}$$

ergibt sich:

$$m'_{\text{Zuggtg}} = k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \quad (7.3-11)$$

Nach Division mit der von der Auslastung unabhängigen Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke, dem Einsetzen von Gleichung (7.3-11) und $m_{\text{Zuggtg}} = n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}}$ sowie nach Division mit der bewerteten Fahrzeit folgt:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}}}{c_{K,\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)} \\ &\quad - \frac{n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{bew Bef Zuggtg}}}{c_{K,\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)} \\ &\quad - \frac{n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left(k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)}{c_{K,\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)^2} \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nach Multiplikation mit $c_{K,\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)^2$

ergibt sich:

$$\begin{aligned}
0 = & k_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) \\
& - n_{\text{Zuggtg}} \cdot t'_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) \\
& - n_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)
\end{aligned}$$

Die Unterscheidung nach Termen, die von der bewerteten realisierten Beförderungszeit abhängen, und Termen, die ihre Ableitung enthalten, führt bei Multiplikation der Gleichung mit (-1) zu:

$$\begin{aligned}
0 = & t_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(n_{\text{Zuggtg}}^2 \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} - k_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \right) \\
& + t'_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(n_{\text{Zuggtg}}^2 \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \right) \quad (7.3-12)
\end{aligned}$$

Für das Maximum des Terms R_{VISEM} gilt:

$$\begin{aligned}
R'_{\text{VISEM}}(n) = & \frac{m'_{\text{Zuggtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot c_2}{c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)} \\
& - \frac{m_{\text{Zuggtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot c_2 \cdot \left(m'_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)}{c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)^2} \\
& - \frac{m_{\text{Zuggtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_t \cdot t'_{\text{bew Bef Zuggtg}}}{c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right)^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)} \\
= & 0
\end{aligned}$$

Mit Gleichung (7.3-11) und $m_{\text{Zuggtg}} = n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}}$ sowie nach Division mit der Konstanten c_2 und der von der Auslastung unabhängigen Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke folgt:

$$0 = \frac{m_{\text{Zug}} \cdot k_{\text{Zuggtg}}}{c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)} - \frac{n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left(k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)}{c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)^2} - \frac{n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot c_3 \cdot e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_t \cdot t'_{\text{bew Bef Zuggtg}}}{c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right)^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)}$$

Nach Division mit der Zugmasse m_{Zug} und Multiplikation mit

$$c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right)^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)^2 \text{ entsteht:}$$

$$0 = k_{\text{Zuggtg}} \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) - n_{\text{Zuggtg}} \cdot \left(k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) \cdot \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right) - n_{\text{Zuggtg}} \cdot c_3 \cdot e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_t \cdot t'_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)$$

Die Unterscheidung nach Termen, die von der bewerteten realisierten Beförderungszeit abhängen, und Termen, die ihre Ableitung enthalten, führt bei Multiplikation der Gleichung mit (-1) zu:

$$0 = \left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot c_3 \right) \cdot \left(n_{\text{Zuggtg}}^2 \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} - k_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \right) + c_3 \cdot c_t \cdot e^{c_t \cdot t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \cdot t'_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot \left(n_{\text{Zuggtg}}^2 \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \right) \quad (7.3-13)$$

Abschließend wird der Term $R_{\text{VIA}}(n)$ abgeleitet:

$$\begin{aligned}
 R'_{VIA}(n) = & \frac{L_{Abschnitt} \cdot m'_{Zuggtg} \cdot (1 + c_2 \cdot c_1)}{c_{K,Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right) \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]} \\
 & - \frac{L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg} \cdot (1 + c_2 \cdot c_1) \cdot c_1 \cdot t'_{bew Bef Zuggtg}}{c_{K,Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right) \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]^2} \\
 & - \frac{L_{Abschnitt} \cdot m_{Zuggtg} \cdot (1 + c_2 \cdot c_1) \cdot (m_{Zuggtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg} + m'_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg})}{c_{K,Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right)^2 \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]} \\
 = & 0
 \end{aligned}$$

Mit Gleichung (7.3-11) und $m_{Zuggtg} = n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug}$ sowie nach Division mit dem Faktor $(1 + c_2 \cdot c_1)$ und der von der Auslastung unabhängigen Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke folgt:

$$\begin{aligned}
 0 = & \frac{k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug}}{c_{K,Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right) \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]} \\
 & - \frac{n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot c_1 \cdot t'_{bew Bef Zuggtg}}{c_{K,Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right) \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]^2} \\
 & - \frac{n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot (n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg} + k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg})}{c_{K,Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right)^2 \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]}
 \end{aligned}$$

Nach Division mit der Zugmasse m_{Zug} und durch Multiplikation

$c_{K,Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right)^2 \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]^2$ ent-

steht:

$$\begin{aligned}
 0 = & k_{Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right) \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})] \\
 & - n_{Zuggtg} \cdot c_1 \cdot t'_{bew Bef Zuggtg} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg} \right) \\
 & - n_{Zuggtg} \cdot (n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg} + k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg}) \cdot [1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})]
 \end{aligned}$$

Die Unterscheidung nach Termen, die von der bewerteten realisierten Beförderungszeit abhängen, und Termen, die ihre Ableitung enthalten, führt bei Multiplikation der Gleichung mit (-1) zu:

$$\begin{aligned}
0 = & \left[1 + c_1 \cdot (t_{bew \text{ Bef Zuggtg}} + w_{Zuggtg,k}) \right] \cdot \left(n_{Zuggtg}^2 \cdot m_{Zug} \cdot t'_{Bef (Kosten) Zuggtg} - k_{Zuggtg} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} \right) \\
& + c_1 \cdot t'_{bew \text{ Bef Zuggtg}} \cdot \left(n_{Zuggtg}^2 \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef (Kosten) Zuggtg} + n_{Zuggtg} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} \right)
\end{aligned}
\tag{7.3-14}$$

Ein Vergleich der drei Gleichungen (7.3-12), (7.3-13) und (7.3-14) zeigt eine hohe Ähnlichkeit. Mit

$$a_p := t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}$$

$$a_{VISEM} := c_1 + e^{c_t \cdot t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}} \cdot c_3$$

$$a_{VIA} := 1 + c_1 \cdot (t_{bew \text{ Bef Zuggtg}} + w_{Zuggtg,k})$$

$$b_p := t'_{bew \text{ Bef Zuggtg}}$$

$$b_{VISEM} := c_3 \cdot c_t \cdot e^{c_t \cdot t_{bew \text{ Bef Zuggtg}}} \cdot t'_{bew \text{ Bef Zuggtg}}$$

$$b_{VIA} := c_1 \cdot t'_{bew \text{ Bef Zuggtg}}$$

$$d_1 := n_{Zuggtg}^2 \cdot m_{Zug} \cdot t'_{Bef (Kosten) Zuggtg} - k_{Zuggtg} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke}$$

$$d_2 := n_{Zuggtg}^2 \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef (Kosten) Zuggtg} + n_{Zuggtg} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke}$$

lassen sich die drei Gleichungen allgemein schreiben als:

$$0 = a \cdot d_1 + b \cdot d_2 \tag{7.3-15}$$

Während a , b und d_2 nicht negativ werden, nimmt d_1 für kleine Auslastungen negative Werte an und steigt mit zunehmender Zuganzahl progressiv an. Der Nulldurchgang der rechten Seite der Gleichung (7.3-15) wird bei umso kleineren Zuganzahlen erreicht, je größer das Verhältnis der Faktoren b und a ist. Da die Reaktion des Verkehrsnachfragemodells in VISEM auf eine Angebotsveränderung stärker ausfällt als die Reaktion des physikalischen Maßstabs (vgl. Kap. 7.2.6), sei zunächst angenommen

$$\frac{b_{VISEM}}{a_{VISEM}} > \frac{b_p}{a_p}$$

und entsprechend:

$$\frac{b_{VIA}}{a_{VIA}} < \frac{b_p}{a_p} \quad (7.3-16)$$

Durch Einsetzen in die obere dieser beiden Ungleichungen ergibt sich:

$$\frac{c_t \cdot c_3 \cdot e^{c_t \cdot t'_{bew Bef Zugtg}} \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{c_1 + e^{c_t \cdot t'_{bew Bef Zugtg}} \cdot c_3} > \frac{t'_{bew Bef Zugtg}}{t_{bew Bef Zugtg}}$$

Die Division mit $t'_{bew Bef Zugtg}$ ($n > 0$) und die Verwendung der Kehrwerte beider Brüche führt zu:

$$\frac{1}{c_t} \cdot \left(\frac{c_1}{c_3 \cdot e^{c_t \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}} + 1 \right) < t_{bew Bef Zugtg} \quad (7.3-17)$$

Das Einsetzen der Konstanten liefert:

$$\frac{1}{c_t} \cdot \left(\frac{e^{U_{const Zugtg}}}{\sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}} \cdot e^{c_t \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}} + 1 \right) < t_{bew Bef Zugtg}$$

Durch die Zusammenfassung der Nutzen des Verkehrsmittels Bahn mit $U_{Zugtg} = U_{const Zugtg} - c_t \cdot t_{bew Bef Zugtg}$ ergibt sich:

$$\frac{1}{c_t} \cdot \left(\frac{e^{U_{Zugtg}}}{\sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}} + 1 \right) < t_{bew Bef Zugtg}$$

Der Anteil eines Verkehrsmittels m lässt sich mit Gleichung (6.2-11) schreiben als:

$$P(m) = \frac{e^{U_m}}{e^{U_{Zugtg}} + \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}$$

Somit gilt:

$$\sum_{VM \neq Bahn} P(VM) = \frac{\sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}{e^{U_{Zugtg}} + \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}$$

Der Kehrwert lautet:

$$\frac{1}{\sum_{VM \neq Bahn} P(VM)} = \frac{e^{U_{Zugtg}} + \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}}{\sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}} = \frac{e^{U_{Zugtg}}}{\sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}} + 1$$

Daraus folgt für die linke Seite der oben aufgeführten Ungleichung:

$$\frac{1}{c_t \cdot \sum_{VM \neq Bahn} P(VM)} < t_{bew Bef Zugtg}$$

und mit $\sum_{VM \neq Bahn} P(VM) = 1 - P(Bahn)$

$$\frac{1}{c_t \cdot (1 - P(Bahn))} < t_{bew Bef Zugtg}$$

Diese Ungleichung ist bei hohem Modal-Split-Anteil der Bahn ($P(Bahn) \approx 40\%$) für $t_{bew Fz Zugtg} \geq 28$ min und beliebigen Wartezeiten und bei schlechtem Bahnangebot bereits für kleinere Fahrzeiten der Bahn erfüllt. Das bedeutet, dass das Maximum der Produktivität bei Verwendung des Verkehrsnachfragemodells aus VISEM in der Regel bei einer niedrigeren Auslastung erreicht wird als das Maximum der Transportkraft.

Gemäß Gleichung (7.3-16) sollte gelten:

$$\frac{b_{VIA}}{a_{VIA}} < \frac{b_p}{a_p}$$

Durch Einsetzen ergibt sich:

$$\frac{c_1 \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})} < \frac{t'_{bew Bef Zugtg}}{t_{bew Bef Zugtg}}$$

Die Division mit $t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}$ ($n > 0$) und die Verwendung der Kehrwerte beider Brüche führt zu:

$$\frac{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Bef\ Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})}{c_1} > t_{bew\ Bef\ Zuggtg}$$

Durch Multiplikation mit c_1 wird daraus:

$$1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Bef\ Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}) > c_1 \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}$$

Die Subtraktion von $c_1 \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}$ liefert:

$$1 + c_1 \cdot w_{Zuggtg,k} > 0$$

Diese Ungleichung ist wegen $c_1 > 0$ und $w_{Zuggtg,k} > 0$ für beliebige Zuganzahlen erfüllt. Somit liegt das Maximum der Produktivität bei Verwendung des VIA-Widerstandsmodells bei höherer Auslastung als das Maximum der Transportkraft. Das bedeutet, dass das Maximum der Transportkraft üblicherweise zwischen den Maxima der Produktivität der beiden Ansätze für den Personenverkehr liegt.

7.3.5.3 Lage des Maximums der Transportkraft für den Güterverkehr

Der Nachweis ist entsprechend für den Güterverkehr zu führen. Für den Güterverkehr stehen das Verkehrsnachfragemodell der Bundesverkehrswegeplanung und das nur graphisch dokumentierte Verfahren zur Verfügung.

Für die Bestimmung der auslastungsabhängigen Änderung der Produktivität mit Hilfe des graphischen Verfahrens sind die Veränderung sowohl der Massen als auch des Faktors $f_{N,GV\ gr}$ zu berechnen. Dazu muss ein Zusammenhang zwischen der Zuganzahl und der Veränderung der Beförderungszeit hergestellt werden. Da dieser Zusammenhang streckenspezifisch ist, lässt sich die Änderung der Produktivität mit dem graphischen Verfahren nicht allgemein ermitteln. Dadurch eignet sich das Verfahren nicht für den hier angestrebten allgemeingültigen Vergleich.

Bei Verwendung des Verkehrsnachfragemodells für die Bundesverkehrswegeplanung ergibt sich die Ableitung der Produktivität mit Gleichung (6.3-12) zu:

$$R'_{BVWP} = \frac{\partial}{\partial n} \left[c_3 \cdot \frac{m_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot e^{U_{ijg, Zuggtg} \cdot c_1}}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{ijg, Zuggtg}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)} \right]$$

Der Übersichtlichkeit halber werden im Weiteren die Indices i, j und g weggelassen. Für das Maximum der Produktivität gilt:

$$\begin{aligned} R'_{BVWP} &= c_3 \cdot \frac{m'_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot e^{U_{Zuggtg} \cdot c_1}}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)} \\ &+ c_3 \cdot \frac{m_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot c_1 \cdot e^{U_{Zuggtg} \cdot c_1} \cdot U'_{Zuggtg}}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)} \\ &- c_3 \cdot \frac{m_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot e^{U_{Zuggtg} \cdot c_1} \cdot e^{U_{Zuggtg}} \cdot U'_{Zuggtg}}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}})^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)} \\ &- c_3 \cdot \frac{m_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot e^{U_{Zuggtg} \cdot c_1} \cdot (m'_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} + m_{Zuggtg} \cdot t'_{Bef(Kosten) Zuggtg})}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)^2} \\ &= 0 \end{aligned}$$

Mit Gleichung (7.3-11) und $m_{Zuggtg} = n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug}$ sowie nach Division mit der von der Auslastung unabhängigen Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke und dem Term $c_3 \cdot e^{U_{Zuggtg} \cdot c_1}$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug}}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)} \\ &+ \frac{c_1 \cdot n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot U'_{Zuggtg}}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)} \\ &- \frac{e^{U_{ijg, Zuggtg}} \cdot n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot U'_{Zuggtg}}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}})^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)} \\ &- \frac{n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot (k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} + n_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot t'_{Bef(Kosten) Zuggtg})}{c_{K, Zuggtg} \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right)^2} \end{aligned}$$

Nach Division mit der Zugmasse m_{Zug} und Multiplikation mit

$c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}})^2 \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right)^2$ entsteht:

$$\begin{aligned} 0 = & k_{\text{Zuggtg}} \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) \\ & + c_1 \cdot n_{\text{Zuggtg}} \cdot U'_{\text{Zuggtg}} \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}}) \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) \\ & - e^{U_{\text{Zuggtg}}} \cdot n_{\text{Zuggtg}} \cdot U'_{\text{Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) \\ & - n_{\text{Zuggtg}} \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}}) \cdot (k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}}) \end{aligned}$$

Die Unterscheidung nach Termen, die von der bewerteten realisierten Beförderungszeit abhängen, und Termen, die ihre Ableitung enthalten, führt bei Multiplikation der Gleichung mit (-1) zu:

$$\begin{aligned} 0 = & (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}}) \cdot \left(n_{\text{Zuggtg}}^2 \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t'_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} - k_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \right) \\ & + U'_{\text{Zuggtg}} \cdot \left(n_{\text{Zuggtg}}^2 \cdot m_{\text{Zug}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} + n_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \right) \cdot [e^{U_{\text{Zuggtg}}} - c_1 \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}})] \end{aligned}$$

Mit den Variablenbezeichnungen der Gleichung (7.3-15) ergibt sich:

$$\begin{aligned} a_{\text{BVWP}} &:= c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}} \\ b_{\text{BVWP}} &:= U'_{\text{Zuggtg}} \cdot [e^{U_{\text{Zuggtg}}} - c_1 \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}})] \end{aligned}$$

Durch Einsetzen von c_1 nach Gleichung (6.3-12) lässt sich die Variable b_{BVWP} umformen zu:

$$\begin{aligned} b_{\text{BVWP}} &= U'_{\text{Zuggtg}} \cdot [e^{U_{\text{Zuggtg}}} - (1 + P_{\text{Zuggtg}}) \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg}}})] \\ &= U'_{\text{Zuggtg}} \cdot [e^{U_{\text{Zuggtg}}} - c_2 - P_{\text{Zuggtg}} \cdot c_2 - e^{U_{\text{Zuggtg}}} - P_{\text{Zuggtg}} \cdot e^{U_{\text{Zuggtg}}}] \\ &= -U'_{\text{Zuggtg}} \cdot [c_2 + P_{\text{Zuggtg}} \cdot c_2 + P_{\text{Zuggtg}} \cdot e^{U_{\text{Zuggtg}}}] \end{aligned}$$

Mit $c_2 > 0$ und $U'_{\text{Zuggtg}} < 0$ für $\rho > 0$ werden auch bei diesem Ansatz a_{BVWP} , b_{BVWP} und d_2 nicht negativ, während d_1 wiederum für kleine Auslastungen negative Werte annimmt. Der Nulldurchgang der rechten Seite der Gleichung (7.3-15) wird für umso kleinere Zuganzahlen erreicht, je größer das Verhältnis der Faktoren b und a ist. Da die Reaktion nach dem Modell für die Bundesverkehrswegeplanung auf eine Ange-

botsveränderung für übliche Angebotskonstellationen schwächer ausfällt als die Reaktion des physikalischen Maßstabs (vgl. Kap. 7.2.6), sei zunächst angenommen:

$$\frac{b_{BVWP}}{a_{BVWP}} < \frac{b_p}{a_p}$$

Durch Einsetzen ergibt sich:

$$-\frac{U'_{Zuggtg\ 1} \cdot [c_2 + P_{Zuggtg} \cdot c_2 + P_{Zuggtg} \cdot e^{U_{Zuggtg\ 1}}]}{c_2 + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} < \frac{t'_{Bef\ Zuggtg}}{t_{Bef\ Zuggtg}} \quad (7.3-18)$$

Mit $c_2 = \sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)}$ (Gl. (6.3-12)) und Gleichung (6.3-7) für P_{Zuggtg} wird daraus:

$$-U'_{Zuggtg\ 1} \cdot \frac{\left[\sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)} + \frac{e^{U_{Zuggtg\ 1}}}{\sum_m e^{U_1(m)}} \cdot \left(\sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)} + e^{U_{Zuggtg\ 1}} \right) \right]}{\sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)} + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} < \frac{t'_{Bef\ Zuggtg}}{t_{Bef\ Zuggtg}}$$

Mit $\sum_m e^{U_1(m)} = \sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)} + e^{U_{Zuggtg\ 1}}$ lässt sich die Klammer im Zähler kürzen. Dies führt zu:

$$-U'_{Zuggtg\ 1} \cdot \frac{\sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)} + e^{U_{Zuggtg\ 1}}}{\sum_{m \neq \text{Bahn}} e^{U(m)} + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} < \frac{t'_{Bef\ Zuggtg}}{t_{Bef\ Zuggtg}}$$

Der Bruch auf der linken Seite der Ungleichung nimmt immer den Wert eins an. Somit gilt:

$$-U'_{Zuggtg\ 1} < \frac{t'_{Bef\ Zuggtg}}{t_{Bef\ Zuggtg}}$$

Die Ableitung des Nutzens kann mit Gleichung (6.3-8) berechnet werden zu:

$$\begin{aligned} U'_{Zuggtg\ 1} &= c_t \cdot \frac{t_{Bef\ Zuggtg}^{\lambda} - 1}{\lambda} + U_{const}(m) \\ &= c_t \cdot \lambda \cdot \frac{t_{Bef\ Zuggtg}^{\lambda-1}}{\lambda} \cdot t'_{Bef\ Zuggtg} \\ &= c_t \cdot t_{Bef\ Zuggtg}^{\lambda-1} \cdot t'_{Bef\ Zuggtg} \end{aligned}$$

Durch Einsetzen in die Ungleichung ergibt sich:

$$-c_t \cdot t_{Bef\ Zugtg}^{\lambda-1} \cdot t'_{Bef\ Zugtg} < \frac{t'_{Bef\ Zugtg}}{t_{Bef\ Zugtg}}$$

Die Multiplikation der Ungleichung mit der Beförderungszeit und die Division mit ihrer Ableitung führen zu:

$$-c_t \cdot t_{Bef\ Zugtg}^{\lambda} < 1$$

Das Einsetzen der Tripel (c_t / λ) je Nachfragesegment ergibt, dass die Ungleichung je nach Segment für Beförderungszeiten bis zu 2 bis 4 Tagen erfüllt ist. Somit liegt das Maximum der Transportkraft bei kleineren oder ähnlichen Auslastungen wie das Maximum der Produktivität bei Verwendung des Modells für die Bundesverkehrswegeplanung.

Da die Transportkraft die Grenzwerte für die Produktivität an den Rändern des Definitionsbereichs erfüllt und auch ihr Verlauf zwischen den Grenzwerten dem der Produktivität entspricht, steht mit der Transportkraft eine physikalische Größe zur Verfügung, mit der sich das Leistungsverhalten einer Eisenbahnstrecke beurteilen lässt.

7.3.6 Berechnung der Gesamttransportkraft mit physikalischen Größen

Verkehren mehrere Zuggattungen auf einer Eisenbahnstrecke folgt aus der Definition für die Produktivität als Quotient aus Erzeugnismenge und Einsatzmenge für die Gesamttransportkraft:

$$F_{Gesamt} = \frac{P_{Gesamt}}{\hat{t}_{Bef\ Gesamt}}$$

Unter Verwendung der Gleichungen zur Berechnung des Gesamttransportimpulses (Gl. (7.2-12)) als Summe der Einzeltransportimpulse einer Zuggattung und der Gleichung (7.1-3) für die Summe der gewichteten Beförderungszeiten wird daraus:

$$F_{Gesamt} = \frac{\sum_{Zuggtg} (m_{Zuggtg} \cdot v_{bew\ Bef\ Zuggtg} \cdot t_{bew\ Fz\ Zuggtg})}{c_{K, Zuggtg} \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{Strecke} + \sum_{Zuggtg} (c_{K\ Zuggtg} \cdot m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef\ (Kosten)\ Zuggtg})} \quad (7.3-19)$$

7.3.7 Grenzwertbetrachtungen für die Transportimpulsdifferenz

Als weitere betriebswirtschaftliche Kenngröße ist der Gewinn durch physikalische Größen abzubilden.

Als Ansatz ergibt sich nach Unterkapitel 7.3.3 die Transportimpulsdifferenz:

$$\Delta p_{\text{Zuggtg}}(\rho) = m_{\text{Zuggtg}}(\rho) \cdot \left[\frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}(\rho)} - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}}(\rho) \right] - c_K \cdot \frac{m_0 \cdot L_{\text{Strecke}}}{v_0} \quad (7.3-8)$$

Im Folgenden ist diese Hypothese auf ihre Eignung zu prüfen. Diese Prüfung erfolgt zunächst anhand der Bedingungen für die Grenzen des Definitionsbereichs (vgl. Kap. 7.3.2). Daran schließt sich in Unterkapitel 7.3.8 die Untersuchung des Verlaufs zwischen den Grenzen an.

Durch Einsetzen der Gleichung (7.3-8) in die Bedingungen G1 und G2 ergibt sich:

- Bedingung G1:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{Zuggtg}}(0) &= m_{\text{Zuggtg}}(0) \cdot \left[\frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}(0)} - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}}(0) \right] - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \\ &= n_{\text{Zuggtg}}(0) \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left[\frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Fz Zuggtg}}} - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Fz (Kosten) Zuggtg}} \right] - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \\ &= 0 \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left[L_{\text{Abschnitt}} - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Fz (Kosten) Zuggtg}} \right] - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \\ &= -c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \end{aligned}$$

- Bedingung G2:

$$\begin{aligned}
\lim_{\rho \rightarrow 1} \Delta p_{\text{nied Zugtg}}(\rho) &= \lim_{\rho \rightarrow 1} \left(m_{\text{nied Zugtg}}(\rho) \cdot \left[\frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz nied Zugtg}}}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} - c_{K, \text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) nied Zugtg}}(\rho) \right] \right) \\
&\quad - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \\
&= m_{\text{nied Zugtg}}(1) \cdot \left[L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz nied Zugtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} \left(\frac{1}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} \right) \right. \\
&\quad \left. - c_{K, \text{Zugtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} (t_{\text{Bef (Kosten) nied Zugtg}}(\rho)) \right] \\
&\quad - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \\
&= -\infty
\end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned}
\lim_{\rho \rightarrow 1} \left(\frac{1}{t_{\text{bew Bef nied Zugtg}}(\rho)} \right) &= 0 \\
\lim_{\rho \rightarrow 1} (t_{\text{Bef (Kosten) nied Zugtg}}(\rho)) &= \infty
\end{aligned}$$

Folglich sind die beiden Bedingungen erfüllt. Die Transportimpulsdifferenz könnte sich aufgrund der Grenzwerte daher zur physikalischen Abbildung des Gewinns eignen.

Somit ist im Weiteren zusätzlich zum Konvergenzverhalten an den Rändern des Definitionsbereichs der Verlauf der physikalischen Größe zwischen den Rändern zu prüfen.

7.3.8 Verlauf der Transportimpulsdifferenz zwischen den Grenzwerten

Zur Untersuchung des Verlaufs zwischen den Grenzwerten werden (analog zu Kap. 7.3.5) sowohl die Funktionswerte für beliebige Belegungsgrade innerhalb des Definitionsbereichs (Kap. 7.3.8.1) als auch die Lage des Maximums (Kap. 7.3.8.2 bis 7.3.8.4) für die physikalische und die betriebswirtschaftliche Größe verglichen.

7.3.8.1 Funktionswerte der Transportimpulsdifferenz

Der Vergleich der Funktionswerte erfolgt anhand der Differenz aus Gewinn und Transportimpulsdifferenz.

Der Gewinn lässt sich durch Verwendung der Gleichung (6.1-2) und (6.2-2) für die Kosten und die Erlöse schreiben als:

$$\begin{aligned}
 \text{Gewinn} &= m_{\text{Zuggtg}} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot f_N - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) \\
 &= m_{\text{Zuggtg}} \cdot \left(L_{\text{Abschnitt}} \cdot f_N - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}}
 \end{aligned}
 \tag{7.3-20}$$

Damit und mit Gleichung (7.3-6) ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 \Delta p - \text{Gewinn} &= m_{\text{Zuggtg}} \cdot \left[\frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right] - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \\
 &\quad - m_{\text{Zuggtg}} \cdot \left(L_{\text{Abschnitt}} \cdot f_N - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}} \right) - c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} \\
 &= \frac{t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} - f_N
 \end{aligned}
 \tag{7.3-21}$$

Zur Bestimmung des Faktors f_N stehen für den Personen- und den Güterverkehr jeweils zwei Nachfragemodelle (vgl. Kap. 7.2.6) zur Verfügung.

Im Personenverkehr sind dies das Verkehrsnachfragemodell in VISEM und das VIA-Widerstandsmodell. Für das Verkehrsnachfragemodell in VISEM fällt die Reaktion auf eine Angebotsveränderung in der Regel stärker aus als die Reaktion des physikalischen Maßstabs (vgl. Kap. 7.2.6):

$$f_{N, \text{PV VISEM}} < \frac{t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}}$$

Das entspricht:

$$0 < \frac{t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} - f_{N, \text{PV VISEM}}$$

Daraus ergibt sich für Gleichung (7.3-21)

$$\Delta p(\rho) - \text{Gewinn}_{\text{VISEM}}(\rho) > 0$$

Das bedeutet:

$$\text{Gewinn}_{\text{VISEM}}(\rho) < \Delta p(\rho) \tag{7.3-22}$$

Mit dem VIA-Widerstandsmodell fällt die Reaktion der Verkehrsnachfrage geringer aus als die Reaktion des physikalischen Faktors $f_{N,p}$ (vgl. Kap. 7.2.6):

$$f_{N,PV\ VIA} > \frac{t_{bew\ Fz\ Zugtg}}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}}$$

Somit folgt mit Gleichung (7.3-21):

$$\Delta p(\rho) - \text{Gewinn}_{VIA}(\rho) < 0$$

Das bedeutet:

$$\Delta p(\rho) < \text{Gewinn}_{VIA}(\rho) \quad (7.3-23)$$

Unter Verwendung der beiden Ungleichungen (7.3-22) und (7.3-23) ergibt sich für übliche Angebotskonstellationen im Personenverkehr:

$$\text{Gewinn}_{VISEM}(\rho) < \Delta p(\rho) < \text{Gewinn}_{VIA}(\rho) \quad (7.3-24)$$

Das bedeutet, dass die Berechnung des Gewinns für den Personenverkehr mit Hilfe der Transportimpulsdifferenz üblicherweise Ergebnisse zwischen den beiden betriebswirtschaftlichen Berechnungsergebnissen liefert. So lässt sich für den Personenverkehr das Fazit ziehen, dass die Kurve der Transportimpulsdifferenz auch zwischen den Grenzen des Definitionsbereichs einen plausiblen Verlauf aufweist.

Im Güterverkehr stehen ebenfalls zwei Nachfragemodelle zur Verfügung. Das Modell für die Bundesverkehrswegeplanung reagiert gemäß Unterkapitel 7.2.6 für übliche Angebotskonstellationen schwächer auf Angebotsveränderungen als die physikalische Größe:

$$f_{N,GV\ BVWP} > \frac{t_{bew\ Fz\ Zugtg}}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}}$$

Somit lässt sich Gleichung (7.3-21) wie folgt schreiben:

$$\Delta p(\rho) - \text{Gewinn}_{BVWP}(\rho) < 0$$

Das bedeutet:

$$\Delta p(\rho) < \text{Gewinn}_{BVWP}(\rho) \quad (7.3-25)$$

Unter Verwendung des graphischen Verfahrens wird aus Gleichung (7.3-21):

$$f_{N, GV\ gr} < \frac{t_{bew\ Fz\ Zuggtg}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$$

Somit ist:

$$\Delta p(\rho) - \text{Gewinn}_{gr}(\rho) > 0 \quad (7.3-26)$$

Das bedeutet:

$$\text{Gewinn}_{gr}(\rho) < \Delta p(\rho)$$

Unter Verwendung der beiden Ungleichungen (7.3-25) und (7.3-26) ergibt sich somit:

$$\text{Gewinn}_{gr}(\rho) < \Delta p(\rho) < \text{Gewinn}_{BVWP}(\rho) \quad (7.3-27)$$

Auch für den Güterverkehr zeigt sich, dass die Gewinnberechnung mit Hilfe der Transportimpulsdifferenz in der Regel Ergebnisse zwischen den beiden betriebswirtschaftlichen Berechnungsmethoden liefert. So lässt sich für den Güterverkehr das Fazit ziehen, dass die Kurve der Transportimpulsdifferenz ebenfalls einen plausiblen Verlauf aufweist.

Im Weiteren ist die Lage des Maximums der Transportimpulsdifferenz auf Plausibilität zu prüfen.

7.3.8.2 Lage des Maximums der Transportimpulsdifferenz

Für diese Prüfung wird der Gewinn zunächst allgemeingültig für beliebige Faktoren f_N abgeleitet. Daran anschließend lassen sich in diese Ableitung die Funktionen für die Faktoren f_N der einzelnen Nachfragemodelle und des physikalischen Maßstabs einsetzen.

Für den Gewinn gilt unter Verwendung der Gleichungen (6.1-2), (6.2-2) und (7.3-5):

$$\begin{aligned} \text{Gewinn}_{Zuggtg}(\rho) &= \text{Erlös}_{Zuggtg}(\rho) - \text{Kosten}_{Zuggtg}(\rho) \\ &= m_{Zuggtg} \cdot L_{Abschnitt} \cdot f_N - c_{K, Zuggtg} \left(\frac{m_0 \cdot L_{Strecke}}{v_0} + m_{Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right) \end{aligned}$$

Durch Ausklammern der Masse wird daraus:

$$\text{Gewinn}_{Zuggtg}(\rho) = m_{Zuggtg} \cdot \left(L_{Abschnitt} \cdot f_N - c_{K, Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zuggtg} \right) - c_K \cdot \frac{m_0 \cdot L_{Strecke}}{v_0}$$

Die Ableitung $Gewinn'_{Zugtg}(\rho)$ ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} Gewinn'_{Zugtg}(\rho) &= \frac{\partial}{\partial n} \left(m_{Zugtg} \cdot [L_{Abschnitt} \cdot f_N - c_{K,Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg}] - c_K \cdot \frac{m_0 \cdot L_{Strecke}}{v_0} \right) \\ &= m'_{Zugtg} \cdot [L_{Abschnitt} \cdot f_N - c_{K,Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg}] \\ &\quad + m_{Zugtg} \cdot [L'_{Abschnitt} \cdot f_N - c_{K,Zugtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zugtg}] \end{aligned}$$

Die Gleichung lässt sich mit $m_{Zugtg} = n_{Zugtg} \cdot m_{Zug}$, $n_{Zugtg} = k_{Zugtg} \cdot n$ und Gleichung (7.3-11) umschreiben zu:

$$\begin{aligned} Gewinn'_{Zugtg}(\rho) &= k_{Zugtg} \cdot m_{Zug} \cdot [L_{Abschnitt} \cdot f_N - c_{K,Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zugtg}] \\ &\quad + k_{Zugtg} \cdot n \cdot m_{Zug} \cdot [L'_{Abschnitt} \cdot f_N - c_{K,Zugtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zugtg}] \end{aligned} \quad (7.3-28)$$

Um anhand dieser Gleichungen den angestrebten Vergleich der betriebswirtschaftlichen und der physikalischen Ansätze durchführen zu können, wären die Bestimmung der Zuganzahl bei $Gewinn'(\rho) = 0$ für jeden Ansatz und ein anschließender Vergleich der Stellen möglich. Mathematisch einfacher ist unter den Bedingungen $Gewinn'(0) > 0$, $\lim_{\rho \rightarrow 1} Gewinn'(\rho) < 0$ und stetig und differenzierbaren Funktionen $Gewinn(\rho)$ der Nachweis von

$$Gewinn'_1(n) < Gewinn'_2(n) \quad (7.3-29)$$

für beliebige $n > 0$.

Wird diese Ungleichung erfüllt, folgt daraus mit den oben aufgeführten Bedingungen, dass $Gewinn'_1(n_1)$ eine Nullstelle bei niedrigerem n_1 besitzt als $Gewinn'_2(n_2)$. Sofern jede Gewinnfunktion nur ein Maximum aufweist ($Gewinn''(\rho) = 0$ für alle $\rho > 0$) liegt das Maximum von $Gewinn_1$ bei einer niedrigeren Auslastung als das Maximum von $Gewinn_2$.

Um die Ungleichung (7.3-29) nutzen zu können, ist zuvor die Erfüllung der genannten Bedingungen zu prüfen.

Es soll gelten:

$$Gewinn'(0) > 0$$

Durch Einsetzen ergibt sich:

$$(Erlös(0) - Kosten(0))' > 0$$

Das bedeutet:

$$Erlös'(0) - Kosten'(0) > 0$$

Oder auch:

$$Erlös'(0) > Kosten'(0)$$

Wäre diese Bedingung nicht erfüllt, lägen die Grenzkosten für den ersten Zug bereits höher als seine Grenzerlöse, so dass sich der Betrieb dieses Zuges als unwirtschaftlich herausstellen würde. Da die Grenzkosten mit zunehmender Auslastung wachsen (vgl. Kap. 3.3), die Grenzerlöse wegen des Absinkens des Nachfragefaktors jedoch abnehmen (vgl. Abb. 6.2-2), wäre auch der Betrieb weiterer Züge auf der untersuchten Strecke unwirtschaftlich. Für eine solche Strecke existiert daher keine wirtschaftlich optimale Auslastung, so dass die Anwendung der Ungleichung (7.3-29) nicht zielführend wäre. Diese Bedingung bedeutet daher keine Einschränkung der Anwendbarkeit der Ungleichung.

Weiter muss gelten:

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \text{Gewinn}'(\rho) < 0$$

Durch Einsetzen von Gleichung (7.3-28) ergibt sich:

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \left(k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left[L_{\text{Abschnitt}} \cdot f_N(\rho) - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef}(\text{Kosten}) \text{Zuggtg}}(\rho) \right] + k_{\text{Zuggtg}} \cdot n(\rho) \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left[L_{\text{Abschnitt}} \cdot f'_N(\rho) - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot t'_{\text{Bef}(\text{Kosten}) \text{Zuggtg}}(\rho) \right] \right) < 0$$

Mit $f(1)=0$ und $f'(1)<0$ (vgl. Kap. 6.2.3.1) und $n(1)=n_{\max}$ (vgl. Kap. 2.2) wird daraus:

$$k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left[L_{\text{Abschnitt}} \cdot 0 - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} t_{\text{Bef}(\text{Kosten}) \text{Zuggtg}}(\rho) \right] + k_{\text{Zuggtg}} \cdot n_{\max} \cdot m_{\text{Zug}} \cdot \left[L_{\text{Abschnitt}} \cdot f'_N(1) - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} t'_{\text{Bef}(\text{Kosten}) \text{Zuggtg}}(\rho) \right] < 0$$

Die Division durch $k_{\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zug}}$ führt zu:

$$n_{\max} \cdot L_{\text{Abschnitt}} \cdot f'_N(1) - c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} t'_{\text{Bef}(\text{Kosten}) \text{Zuggtg}}(\rho) - n_{\max} \cdot c_{K, \text{Zuggtg}} \cdot \lim_{\rho \rightarrow 1} t_{\text{Bef}(\text{Kosten}) \text{Zuggtg}}(\rho) < 0$$

Die Beförderungszeit und ihre Ableitung nehmen nur positive Werte an. Die beiden Grenzwerte divergieren für die Zuggattung im Betriebsprogramm mit der niedrigsten

Rangordnung. Daher nimmt die linke Seite der Ungleichung für jede Strecke negative Werte an, so dass die oben aufgeführte Bedingung immer erfüllt ist. Somit lässt sich die Ungleichung (7.3-29) ohne Einschränkung auf stetige und differenzierbare Funktionen $Gewinn(\rho)$ anwenden.

Durch Einsetzen der Gleichung (7.3-28) in die Ungleichung (7.3-29) ergibt sich:

$$\begin{aligned} & k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot (L_{Abschnitt} \cdot f_{N1} - c_{K,Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg}) \\ & + k_{Zuggtg} \cdot n \cdot m_{Zug} \cdot (L_{Abschnitt} \cdot f'_{N1} - c_{K,Zuggtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg}) \\ & < k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug} \cdot (L_{Abschnitt} \cdot f_{N2} - c_{K,Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg}) \\ & + k_{Zuggtg} \cdot n \cdot m_{Zug} \cdot (L_{Abschnitt} \cdot f'_{N2} - c_{K,Zuggtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg}) \end{aligned}$$

Die Division durch $k_{Zuggtg} \cdot m_{Zug}$ liefert:

$$\begin{aligned} & (L_{Abschnitt} \cdot f_{N1} - c_{K,Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg}) + n \cdot (L_{Abschnitt} \cdot f'_{N1} - c_{K,Zuggtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg}) \\ & < (L_{Abschnitt} \cdot f_{N2} - c_{K,Zuggtg} \cdot t_{Bef(Kosten)Zuggtg}) + n \cdot (L_{Abschnitt} \cdot f'_{N2} - c_{K,Zuggtg} \cdot t'_{Bef(Kosten)Zuggtg}) \end{aligned}$$

Durch Addition der von $t_{Bef(Kosten)Zuggtg}$ oder von der Ableitung abhängigen Summanden lässt sich die Ungleichung umschreiben zu:

$$L_{Abschnitt} \cdot f_{N1} + n \cdot L_{Abschnitt} \cdot f'_{N1} < L_{Abschnitt} \cdot f_{N2} + n \cdot L_{Abschnitt} \cdot f'_{N2}$$

Die Division durch die Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke führt zu:

$$f_{N1} + n \cdot f'_{N1} < f_{N2} + n \cdot f'_{N2} \quad (7.3-30)$$

Für die Faktoren f_N sind im Weiteren der physikalische Faktor $f_{N,p}$ (vgl. Gl. (7.1-1)) und die Faktoren aus den Nachfragemodellen einzusetzen.

Es gilt für den Faktor $f_{N,p}$:

$$f_{N,p} = \frac{t_{bew Fz Zuggtg}}{t_{bew Bef Zuggtg}}$$

Seine Ableitung lautet:

$$\begin{aligned}
 f'_{N,p} &= -\frac{t_{bew\ Fz\ Zuggtg}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}^2} \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg} \\
 &= -\frac{f_{N,p}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}
 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen in die auf beiden Seiten der Ungleichung (7.3-30) vorhandene Summe ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 f_{N,p} + n \cdot f'_{N,p} &= f_{N,p} - n \cdot \frac{f_{N,p}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg} \\
 &= f_{N,p} \cdot \left(1 - n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg} \cdot \frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \right) \quad (7.3-31)
 \end{aligned}$$

Die Bestimmung der Ableitungen der Faktoren aus den Nachfragemodellen und das Einsetzen in die Ungleichung (7.3-30) erfolgen getrennt für den Personenverkehr (Kap. 7.3.8.3) und den Güterverkehr (Kap. 7.3.8.4).

7.3.8.3 Lage des Maximum der Transportimpulsdifferenz für den Personenverkehr

Unter Verwendung des Nachfragemodells aus VISEM gilt für den Faktor $f_{N,PV\ VISEM}$ (vgl. Gl. (6.2-14)):

$$f_{N,PV\ VISEM} = \frac{c_2}{c_1 + e^{c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot c_3}$$

Die Ableitung dieser Gleichung lautet:

$$\begin{aligned}
 f'_{N,PV\ VISEM} &= -\frac{c_2 \cdot c_3 \cdot e^{c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot c_t \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}}{\left(c_1 + e^{c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot c_3 \right)^2} \\
 &= -f_{N,PV\ VISEM} \cdot \frac{c_3 \cdot e^{c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot c_t \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}}{c_1 + e^{c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot c_3}
 \end{aligned}$$

Eingesetzt in eine Seite der Ungleichung (7.3-30) entsteht:

$$\begin{aligned}
f_{N,PV VISEM} + n \cdot f'_{N,PV VISEM} &= f_{N,PV VISEM} - n \cdot f_{N,PV VISEM} \cdot \frac{c_3 \cdot e^{c_1 \cdot t'_{bew Bef Zugtg}} \cdot c_t \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{c_1 + e^{c_1 \cdot t'_{bew Bef Zugtg}} \cdot c_3} \\
&= f_{N,PV VISEM} \cdot \left(1 - n \cdot t'_{bew Bef Zugtg} \cdot \frac{c_t}{\frac{c_1}{c_3} + e^{-c_1 \cdot t'_{bew Bef Zugtg}} + 1} \right)
\end{aligned}
\tag{7.3-32}$$

Mit dem VIA-Widerstandsmodell beträgt der Faktor $f_{N,PV VIA}$ (vgl. Gl. (6.2-22)):

$$f_{N,PV VIA} = \frac{1 + c_2 \cdot c_1}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})}$$

Für die Ableitung gilt:

$$\begin{aligned}
f'_{N,PV VIA} &= - \frac{(1 + c_2 \cdot c_1) \cdot c_1 \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{[1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})]^2} \\
&= -f_{N,PV VIA} \cdot \frac{c_1 \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})}
\end{aligned}$$

Durch Einsetzen dieser beiden Gleichungen in eine Seite der Ungleichung (7.3-30) wird daraus:

$$\begin{aligned}
f_{N,PV VIA} + n \cdot f'_{N,PV VIA} &= f_{N,PV VIA} - n \cdot f_{N,PV VIA} \cdot \frac{c_1 \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})} \\
&= f_{N,PV VIA} \cdot \left(1 - n \cdot t'_{bew Bef Zugtg} \cdot \frac{c_1}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})} \right)
\end{aligned}
\tag{7.3-33}$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen lässt sich nun der Vergleich zwischen der Lage der Maxima der betriebswirtschaftlichen und der physikalischen Größen für den Gewinn durchführen. Zunächst wird das Nachfragemodell nach VISEM mit dem physikalischen Ansatz verglichen. Entsprechend der Erkenntnisse aus Unterkapitel 7.2.6 sei angenommen:

$$Gewinn'_{VISEM}(n) < \Delta p'_p(n)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (7.3-31), (7.3-32) sowie der Ungleichung (7.3-30) ergibt sich Ungleichung (7.3-29) zu:

$$f_{N,PV\ VISEM} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zugtg} \cdot c_t}{\frac{c_1}{c_3} \cdot e^{-c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} + 1} \right) < f_{N,p} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zugtg}}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \right)$$

Da bei üblichen Angebotskonstellationen gilt (vgl. Kap. 7.2.6)

$$f_{N,PV\ VISEM} < f_{N,p}$$

lässt sich die Ungleichung durch Abschätzen von $f_{N,PV\ VISEM}$ gegen $f_{N,p}$ umschreiben zu:

$$f_{N,p} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zugtg} \cdot c_t}{\frac{c_1}{c_3} \cdot e^{-c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} + 1} \right) \leq f_{N,p} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zugtg}}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \right)$$

Die Division durch $f_{N,p}$ führt zu:

$$1 - n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zugtg} \cdot \frac{c_t}{\frac{c_1}{c_3} \cdot e^{-c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} + 1} \leq 1 - n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zugtg} \cdot \frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}}$$

Die Subtraktion von 1 und Division mit $-n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zugtg}$ ($t'_{bew\ Bef\ Zugtg}(\rho) > 0$ für alle $\rho \in]0; 1[$) ergibt:

$$\frac{1}{t_{bew\ Bef\ Zugtg}} \leq \frac{c_t}{\frac{c_1}{c_3} \cdot e^{-c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} + 1}$$

Durch Bildung des Kehrwerts der Ungleichung entsteht:

$$\frac{1}{c_t} \cdot \left(\frac{c_1}{c_3} \cdot e^{-c_t \cdot t_{bew\ Bef\ Zugtg}} + 1 \right) \leq t_{bew\ Bef\ Zugtg} \quad (7.3-34)$$

Diese Ungleichung entspricht der Ungleichung (7.3-17). Sie ist somit ebenfalls bei hohem Modal-Split-Anteil der Bahn ($P(\text{Bahn}) \approx 40\%$) für $t_{bew\ Fz\ Zugtg} \geq 28$ min und beliebigen Wartezeiten sowie bei schlechtem Bahnangebot bereits für kleinere Fahrzeiten der Bahn erfüllt.

Folglich gilt bei schlechtem Bahnangebot und in jedem Falle für größere Fahrzeiten der Bahn:

$$Gewinn'_{VISEM}(n) < \Delta p'(n) \quad (7.3-35)$$

Gemäß den Annahmen zum VIA-Widerstandsmodell aus Unterkapitel 7.2.6 wird postuliert:

$$\Delta p'(n) < Gewinn'_{VIA}(n)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (7.3-31) und (7.3-33) ergibt sich Ungleichung (7.3-29) mit (7.3-30) zu:

$$f_{N,p} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{t_{bew Bef Zugtg}} \right) < f_{N,PV VIA} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew Bef Zugtg} \cdot c_1}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})} \right)$$

Mit (vgl. Kap. 7.2.6)

$$f_{N,p} < f_{N,PV VIA}$$

lässt sich der Faktor $f_{N,p}$ gegen $f_{N,PV VIA}$ abschätzen. Die Division durch $f_{N,PV VIA}$ führt zu:

$$1 - \frac{n \cdot t'_{bew Bef Zugtg}}{t_{bew Bef Zugtg}} \leq 1 - \frac{n \cdot t'_{bew Bef Zugtg} \cdot c_1}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})}$$

Die Subtraktion von 1 und Division mit $-n \cdot t'_{bew Bef Zugtg}$ ($t'_{bew Bef Zugtg}(\rho) > 0$ für alle $\rho \in]0; 1[$) ergibt:

$$\frac{c_1}{1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})} \leq \frac{1}{t_{bew Bef Zugtg}}$$

Durch Bildung des Kehrwerts der Ungleichung entsteht folgende Ungleichung:

$$c_1 \cdot t_{bew Bef Zugtg} \leq 1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zugtg} + w_{Zugtg,k})$$

Durch Subtraktion von $c_1 \cdot t_{bew Bef Zugtg}$ lässt sich die Ungleichung wie folgt umschreiben:

$$0 \leq 1 + c_1 \cdot w_{Zugtg,k} \quad (7.3-36)$$

Diese Ungleichung ist wegen $c_1 > 0$ und $w_{Zugtg,k} > 0$ für beliebige Zuganzahlen erfüllt. Folglich gilt für alle $\rho > 0$:

$$\Delta p'(n) < \text{Gewinn}'_{VIA}(n) \quad (7.3-37)$$

Unter Verwendung der Ungleichungen (7.3-35) und (7.3-37) ergibt sich:

$$\text{Gewinn}'_{VISEM}(n) < \Delta p'(n) < \text{Gewinn}'_{VIA}(n) \quad (7.3-38)$$

Das bedeutet, dass das Maximum der Transportimpulsdifferenz üblicherweise zwischen den Maxima des Gewinns für den Personenverkehr liegt.

7.3.8.4 Lage des Maximums der Transportimpulsdifferenz für den Güterverkehr

Der Nachweis ist entsprechend für den Güterverkehr zu führen. Für den Güterverkehr stehen das Verkehrsnachfragemodell der Bundesverkehrswegeplanung und das graphisch dokumentierte Verfahren zur Verfügung.

Mit dem Nachfragemodell der Bundesverkehrswegeplanung ergibt sich der Faktor $f_{N,GV BVWP}$ zu (vgl. Gl. (6.3-10)):

$$f_{N,GV BVWP} = \frac{e^{U_{Zugtg,1} \cdot c_1}}{c_2 + e^{U_{Zugtg,1}}} \cdot c_3$$

Für die Ableitung gilt:

$$\begin{aligned} f'_{N,GV BVWP} &= c_3 \cdot \frac{c_1 \cdot e^{U_{Zugtg,1} \cdot c_1} \cdot U'_{Zugtg,1}}{c_2 + e^{U_{Zugtg,1}}} - c_3 \cdot \frac{e^{U_{Zugtg,1} \cdot c_1} \cdot e^{U_{Zugtg,1}} \cdot U'_{Zugtg,1}}{(c_2 + e^{U_{Zugtg,1}})^2} \\ &= f_{N,GV BVWP} \cdot \left(c_1 \cdot U'_{Zugtg,1} - \frac{e^{U_{Zugtg,1}} \cdot U'_{Zugtg,1}}{c_2 + e^{U_{Zugtg,1}}} \right) \end{aligned}$$

Das Einsetzen dieser Gleichung in eine Seite der Ungleichung (7.3-30) führt zu:

$$\begin{aligned} f_{N,GV BVWP} + n \cdot f'_{N,GV BVWP} &= f_{N,GV BVWP} + n \cdot f_{N,GV BVWP} \cdot \left(c_1 \cdot U'_{Zugtg,1} - \frac{e^{U_{Zugtg,1}} \cdot U'_{Zugtg,1}}{c_2 + e^{U_{Zugtg,1}}} \right) \\ &= f_{N,GV BVWP} \cdot \left[1 + n \cdot \left(c_1 \cdot U'_{Zugtg,1} - \frac{e^{U_{Zugtg,1}} \cdot U'_{Zugtg,1}}{c_2 + e^{U_{Zugtg,1}}} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.3-39)$$

Aufgrund der geringen Reagibilität des Nachfragemodells für die Bundesverkehrswegeplanung (vgl. Kap. 7.2.6) sei angenommen:

$$\Delta p'(n) < \text{Gewinn}'_{BVWP}(n)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (7.3-31) und (7.3-39) sowie der Ungleichung (7.3-30) ergibt sich Ungleichung (7.3-29) zu:

$$f_{N,p} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \right) < f_{N,GV\ BVWP} \cdot \left[1 + n \cdot \left(c_1 \cdot U'_{Zuggtg\ 1} - \frac{e^{U_{Zuggtg\ 1}} \cdot U'_{Zuggtg\ 1}}{c_2 + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} \right) \right]$$

Da bei üblichen Angebotskonstellationen gilt (vgl. Kap. 7.2.6):

$$f_{N,p} < f_{N,GV\ BVWP}$$

lässt sich der Faktor $f_{N,GV\ BVWP}$ gegen $f_{N,p}$ abschätzen:

$$f_{N,p} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \right) \leq f_{N,p} \cdot \left[1 + n \cdot \left(c_1 \cdot U'_{Zuggtg\ 1} - \frac{e^{U_{Zuggtg\ 1}} \cdot U'_{Zuggtg\ 1}}{c_2 + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} \right) \right]$$

Gemäß Unterkapitel 6.2.3.1 nimmt der Faktor f_N immer Werte größer Null an. Somit ergibt sich bei Division durch den Faktor $f_{N,p}$, Subtraktion mit 1 und Division mit $(-n)$:

$$\frac{e^{U_{Zuggtg\ 1}} \cdot U'_{Zuggtg\ 1}}{c_2 + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} - c_1 \cdot U'_{Zuggtg\ 1} \leq \frac{t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$$

Durch Zusammenfassung der linken Seite der Ungleichung entsteht:

$$U'_{Zuggtg\ 1} \cdot \left(\frac{e^{U_{Zuggtg\ 1}}}{c_2 + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} - c_1 \right) \leq \frac{t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$$

Das entspricht:

$$U'_{Zuggtg\ 1} \cdot \frac{e^{U_{Zuggtg\ 1}} - c_1 \cdot (c_2 + e^{U_{Zuggtg\ 1}})}{c_2 + e^{U_{Zuggtg\ 1}}} \leq \frac{t'_{bew\ Bef\ Zuggtg}}{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$$

Durch Einsetzen von c_1 folgt (vgl. Gl. (6.3-10)):

$$U'_{\text{Zuggtg } 1} \cdot \frac{e^{U_{\text{Zuggtg } 1}} - (1 + P_{\text{Zuggtg}}) \cdot (c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg } 1}})}{c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg } 1}}} \leq \frac{t'_{\text{bew Bef Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}}$$

Durch Ausklammern wird daraus:

$$U'_{\text{Zuggtg } 1} \cdot \frac{e^{U_{\text{Zuggtg } 1}} - c_2 - c_2 \cdot P_{\text{Zuggtg}} - e^{U_{\text{Zuggtg } 1}} - P_{\text{Zuggtg}} \cdot e^{U_{\text{Zuggtg } 1}}}{c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg } 1}}} \leq \frac{t'_{\text{bew Bef Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}}$$

Das Umformen des Zählers auf der linken Seite führt zu:

$$-U'_{\text{Zuggtg } 1} \cdot \frac{c_2 + c_2 \cdot P_{\text{Zuggtg}} + P_{\text{Zuggtg}} \cdot e^{U_{\text{Zuggtg } 1}}}{c_2 + e^{U_{\text{Zuggtg } 1}}} \leq \frac{t'_{\text{bew Bef Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}}$$

Diese Ungleichung entspricht der Ungleichung (7.3-18) und ist somit für übliche Werte der Beförderungszeit erfüllt. Somit gilt:

$$\text{Gewinn}'_{\text{BVWP}}(n) < \Delta p'(n) \quad (7.3-40)$$

Bei Verwendung des graphisch dokumentierten Verfahrens ließe sich aufgrund der hohen Reagibilität annehmen:

$$\Delta p'(n) < \text{Gewinn}'_{\text{gr}}(n)$$

Gemäß Ungleichung (7.2-10) gilt:

$$f_{N, \text{GV gr}} < f_{N, p}$$

Über die graphische Bestimmung der Steigung der beiden Faktoren lässt sich eine entsprechende Ungleichung für die Ableitung der Faktoren aufstellen. Aus den Abbildungen 7.2-1 und 7.2-2 ergeben sich die in der Abbildung 7.3-1 dargestellten Ableitungen. Da in den Diagrammen nicht der Faktor $f_{N, p}$ sondern der Modal-Split-Anteil über der Änderung der Transportdauer aufgetragen ist, sind in Abbildung 7.3-1 die Ableitungen des für die jeweilige Gütergruppe gültigen, normierten Faktors eingezeichnet.

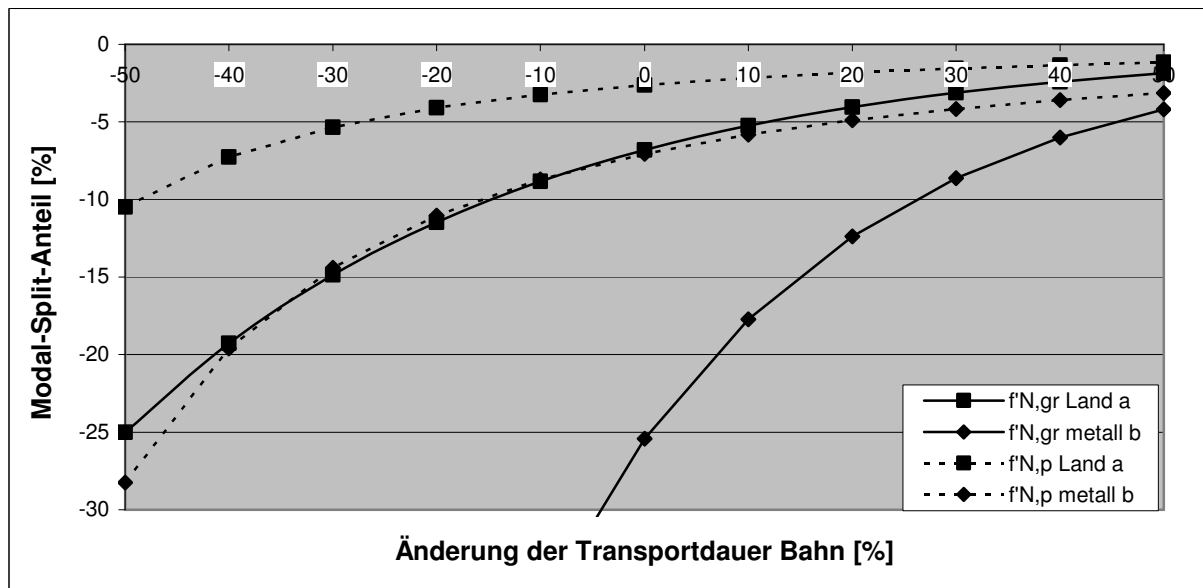


Abb. 7.3-1: Steigung der Faktoren $f_{N,p}$ und $f_{N,GV gr}$ für zwei Gütergruppen [4, eigene Berechnung]

Folglich gilt:

$$\left| f'_{N,GV gr} \right| > \left| f'_{N,p} \right|$$

Da die Steigungen durchweg negative Werte annehmen, lassen sich die Beträge auflösen zu:

$$-f'_{N,GV gr} > -f'_{N,p}$$

Die Multiplikation mit $(-n)$ führt zu:

$$n \cdot f'_{N,GV gr} < n \cdot f'_{N,p}$$

Die Addition von $f_{N,GV gr}$ ergibt:

$$f_{N,GV gr} + n \cdot f'_{N,GV gr} < f_{N,GV gr} + n \cdot f'_{N,p}$$

Die rechte Seite dieser Ungleichung lässt sich für übliche Werte für die Beförderungszeit mit (7.2-13) nach oben abschätzen zu:

$$f_{N,GV gr} + n \cdot f'_{N,GV gr} < f_{N,GV gr} + n \cdot f'_{N,p} < f_{N,p} + n \cdot f'_{N,p}$$

Somit gilt:

$$f_{N,GV\ gr} + n \cdot f'_{N,GV\ gr} < f_{N,p} + n \cdot f'_{N,p}$$

Durch Vergleich mit Ungleichung (7.3-30) ergibt sich:

$$Gewinn'_{gr}(n) < \Delta p'_p(n) \quad (7.3-41)$$

Die Zusammenführung der Ungleichungen (7.3-40) und (7.3-41) liefert:

$$Gewinn'_{gr}(n) < \Delta p'_p(n) < Gewinn'_{BVWP}(n) \quad (7.3-42)$$

7.3.8.5 Fazit

Sowohl diese Ungleichung (7.3-42) als auch die entsprechende Ungleichung für den Personenverkehr (7.3-38) zeigen, dass kein einheitlicher betriebswirtschaftlicher Vergleichsmaßstab für die physikalische Größe existiert. Die theoretischen Herleitungen in diesem Unterkapitel beweisen aber, dass die Transportimpulsdifferenz sowohl hinsichtlich ihrer Funktionswerte als auch der Lage ihres Maximums Ergebnisse in dem von den Vergleichsmaßstäben aufgespannten Bereich liefert.

7.3.9 Bestimmung der Proportionalitätskonstanten c_E und c_K

Der Erlös, der mit einer Tonne Zugmasse erzielt wird, unterscheidet sich, wie in Unterkapitel 6.2.2 kurz beschrieben und in den Beispielrechnungen (Kap. 6.2.4 und 6.3.4) verwendet, zwischen dem Personenverkehr und dem Güterverkehr. Entsprechende Unterschiede ergeben sich auch bei den Kosten (vgl. Kap. 6.1.4). Daher müssen bei der Zusammenfassung der Erlöse und der Kosten zum Gewinn Proportionalitätsfaktoren, hier mit c_E und c_K bezeichnet, berücksichtigt werden (vgl. Kap. 7.3.3). Im Weiteren sind ihre Ermittlung darzustellen und die Werte für diese Konstanten anzugeben.

Für den Gewinn, der sich mit einer Eisenbahnstrecke erzielen lässt, gilt:

$$Gewinn_{Gesamt} = \sum_{Zugtg} (Erlös_{Zugtg} - Kosten_{Zugtg})$$

Durch Einsetzen der Gleichung (7.3-5) ergibt sich:

$$Gewinn_{Gesamt} = \sum_{Zugtg} (c_{\varepsilon, Zugtg} \cdot p_{Zugtg} - c_{\kappa, Zugtg} \cdot \hat{t}_{Bef Zugtg})$$

Die Werte für die Konstanten c_{ε} unterscheiden sich wie oben beschrieben zwischen dem Personenverkehr und dem Güterverkehr; der Wert c_{κ} hängt von der Zuggattung ab. Als Bezugsgröße dient gemäß Unterkapitel 6.2.2 der Personennahverkehr, mit dem die Eisenbahnen in Deutschland die höchsten Erlöse erzielen.

Das Ausklammern von $c_{\varepsilon, PNV} = c_{\varepsilon, PFV} = c_{\varepsilon, PV}$ liefert:

$$\begin{aligned} Gewinn_{Gesamt} &= c_{\varepsilon, PV} \cdot \sum_{Zugtg} \left(\frac{c_{\varepsilon, Zugtg}}{c_{\varepsilon, PV}} \cdot p_{Zugtg} - \frac{c_{\kappa, Zugtg}}{c_{\varepsilon, PV}} \cdot \hat{t}_{Bef Zugtg} \right) \\ &= c_{\varepsilon, PV} \cdot \sum_{Zugtg} \left(\frac{c_{\varepsilon, Zugtg}}{c_{\varepsilon, PV}} \cdot p_{Zugtg} - \frac{c_{\kappa, Zugtg}}{c_{\varepsilon, PV}} \cdot \frac{c_{\varepsilon, Zugtg}}{c_{\varepsilon, Zugtg}} \cdot \hat{t}_{Bef Zugtg} \right) \end{aligned}$$

Mit

$$c_{E, Zugtg} := \frac{c_{\varepsilon, Zugtg}}{c_{\varepsilon, PV}} \quad \text{und} \quad c_{K, Zugtg} := \frac{c_{\kappa, Zugtg}}{c_{\varepsilon, PV}} \quad (7.3-43)$$

wird daraus:

$$Gewinn_{Gesamt} = c_{\varepsilon, PV} \cdot \sum_{Zugtg} (c_{E, Zugtg} \cdot p_{Zugtg} - c_{E, Zugtg} \cdot c_{K, Zugtg} \cdot \hat{t}_{Bef Zugtg})$$

Die Konstante c_E ist der in den Unterkapiteln 6.2.2 und 6.3.2 verwendete Erlösfaktor.

Aus der letzten Gleichung ergibt sich:

$$Gewinn_{Gesamt} \sim \sum_{Zugtg} (c_{E, Zugtg} \cdot p_{Zugtg} - c_{E, Zugtg} \cdot c_{K, Zugtg} \cdot \hat{t}_{Bef Zugtg})$$

oder auch

$$\Delta p_{Gesamt} = \sum_{Zugtg} (c_{E, Zugtg} \cdot p_{Zugtg} - c_{E, Zugtg} \cdot c_{K, Zugtg} \cdot \hat{t}_{Bef Zugtg}) \quad (7.3-44)$$

Entsprechend lassen sich der Gesamttransportimpuls gemäß Gleichung (7.2-12) und die Gesamttransportkraft nach Gleichung (7.3-19) mit Gleichung (7.3-43) wie folgt schreiben:

$$p_{Gesamt} = \sum_{Zugtg} p_{Zugtg} = \sum_{Zugtg} \left(c_{E, Zugtg} \cdot m_{Zugtg} \cdot \frac{L_{Abschnitt} \cdot t_{bew Fz Zugtg}}{t_{bew Bef Zugtg}} \right) \quad (7.3-45)$$

und

$$F_{\text{Gesamt}} = \frac{\sum_{\text{Zugtg}} (c_{E,\text{Zugtg}} \cdot m_{\text{Zugtg}} \cdot v_{\text{bew Bef Zugtg}} \cdot t_{\text{bew Fz Zugtg}})}{c_{E,\text{Zugtg}} \cdot c_{K,\text{Zugtg}} \cdot \left(\frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + \sum_{\text{Zugtg}} (m_{\text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}}) \right)} \quad (7.3-46)$$

Für die in den Gleichungen verwendeten Konstanten sind im Weiteren Werte anzugeben.

Die Proportionalitätskonstanten c_K und c_E ergeben sich aus den beiden Konstanten c_ε und c_K , die sich aus der Gegenüberstellung der betriebswirtschaftlichen und physikalischen Größen für die Erlöse und die Kosten bestimmen lassen.

Für die Konstanten c_ε und c_K gilt (vgl. Gl. (7.3-5)):

$$c_{\varepsilon,\text{Zugtg}} = \frac{\text{Erlös}_{\text{Zugtg}}}{P_{\text{Zugtg}}} \quad \text{und} \quad c_{K,\text{Zugtg}} = \frac{\text{Kosten}_{\text{Zugtg}}}{\hat{t}_{\text{Bef Zugtg}}}$$

Für den Personenverkehr folgt aus (s. auch Kap. 6.2.2)

$$c_{\varepsilon,\text{PNV}} = c_{\varepsilon,\text{PFV}} = c_{\varepsilon,\text{PV}}$$

durch Einsetzen in Gleichung (7.3-43):

$$c_{E,\text{PV}} = \frac{c_{\varepsilon,\text{PV}}}{c_{\varepsilon,\text{PV}}} = 1$$

Für den Güterverkehr ergibt sich gemäß der Abschätzung anhand der Umsatzerlöse für die drei Bereiche Personennah-, -fern- und Güterverkehr und dem Verhältnis von Brutto- zu Nettotonnen aus [9], [10] und [11] ein Verhältnis der Erlöse je Tonne im Personenverkehr zu den Erlösen je Tonne im Güterverkehr von 1,75. Mit Gleichung (7.3-5) folgt daraus:

$$c_{E,\text{GV}} := \frac{c_{\varepsilon,\text{GV}}}{c_{\varepsilon,\text{PNV}}} = \frac{1}{1,75} = 0,57$$

Die obige Gleichung für die Transportimpulsdifferenz kann daher umgeschrieben werden zu:

$$\Delta p_{\text{Gesamt}} = \sum_{\text{Zuggtg,PV}} (p_{\text{Zuggtg,PV}} - c_{K,\text{Zuggtg,PV}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg,PV}}) - c_{E,\text{GV}} \cdot \sum_{\text{Zuggtg,GV}} (p_{\text{Zuggtg,GV}} - c_{K,\text{Zuggtg,GV}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg,GV}})$$

Für die Proportionalitätskonstante c_K ergibt sich aus Gleichung (7.3-6):

$$c_{K,\text{Zuggtg}} = \frac{c_{\kappa,\text{Zuggtg}}}{\frac{c_{\varepsilon,\text{Zuggtg}}}{\text{Kosten}_{\text{Zuggtg}}}} = \frac{\hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}}{\frac{\text{Erlös}_{\text{Zuggtg}}}{p_{\text{Zuggtg}}}}$$

Durch Auflösen der Doppelbrüche wird daraus:

$$c_{K,\text{Zuggtg}} = \frac{\text{Kosten}_{\text{Zuggtg}} \cdot p_{\text{Zuggtg}}}{\text{Erlös}_{\text{Zuggtg}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}} \quad (7.3-47)$$

Die Konstante $c_{K,\text{Zuggtg}}$ lässt sich zuggattungsspezifisch, und bei Vorliegen strecken-spezifischer Eingangsgrößen, auch zuggattungs- und streckenspezifisch bestimmen.

Es wird angenommen, dass der Gewinn mit circa 10% (Zielgröße gem. [10]) ausfällt, so dass sich ein Verhältnis von Kosten zu Erlösen von 1 zu 1,1 ergibt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Kosten alle variablen und fixen Kosten der EVUs und des EUs enthalten. Mit den Erlösen werden aber lediglich die Erlöse des EVUs abgebildet. Anhand der Daten aus [9], [10] und [11], die auch die Grundlage für die Abschätzung des Erlösfaktors c_E bilden, lässt sich ein Verhältnis von Kosten der EVU und Erlösen unter Berücksichtigung eines Gewinns von ca. 10% von 1 zu 1,19 ermitteln.

Für Gleichung (7.3-45) ergibt sich mit diesem Verhältnis durch Einsetzen der physikalischen Größen für den Erlös und die Kosten:

$$c_{K,\text{Zuggtg}} = \frac{p_{\text{Zuggtg}}}{1,19 \cdot \hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}} = \frac{m_{\text{Zuggtg}} \cdot f_{N,p}}{1,19 \cdot m_{\text{Zuggtg}} \cdot \hat{t}_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}}}$$

Durch Kürzen mit m_{Zuggtg} und Einsetzen eines Mittelwertes für den Faktor $f_{N,p}$ von 0,95 wird daraus:

$$c_{K,Zuggtg} = \frac{0,95}{1,19 \cdot t_{Bef (Kosten) Zuggtg}}$$

Bezogen auf eine Streckenlänge $L = 1$ km lässt sich die Gleichung umschreiben zu:

$$c_{K,Zuggtg} = \frac{v_{Bef (Kosten) Zuggtg}}{1,25}$$

Unter der Verwendung zuggattungsspezifischer Eingangsgrößen für die Beförderungsgeschwindigkeit ergeben sich die in Tabelle 7.3.1 angegebenen Werte für den Faktor $c_{K,Zuggtg}$.

Zuggattung	Faktor c_K [km/min]
Tha	1,33
ICE	1,33
IC	1,20
D	1,20
SE	0,93
RB	0,73
Sg	1,07
Dg	0,80
CB	0,47

Tab. 7.3-1: Zuggattungsspezifische Werte für die Proportionalitätskonstante $c_{K,Zuggtg}$ [16, eig. Berechnungen]

7.3.10 Berechnung der Gesamttransportimpulsdifferenz mit physikalischen Größen

Verkehren mehrere Zuggattungen auf einer Eisenbahnstrecke folgt aus der Definition für den Gewinn als Differenz aus Erlösen und Kosten gemäß Gleichung (7.3-44):

$$\Delta p_{Gesamt} = \sum_{Zuggtg} (c_{E,Zuggtg} \cdot p_{Zuggtg} - c_{E,Zuggtg} \cdot c_{K,Zuggtg} \cdot \hat{t}_{Bef Zuggtg}) \quad (7.3-44)$$

Unter Verwendung der Gleichungen zur Berechnung des Gesamttransportimpulses (Gl. (7.2-13)) als Summe der Einzeltransportimpulse einer Zuggattung und der Gleichung (7.1-3) für die Summe der gewichteten Beförderungszeiten wird daraus:

$$\Delta p_{\text{Gesamt}} = \sum_{\text{Zugtg}} \left(c_{E, \text{Zugtg}} \cdot m_{\text{Zugtg}} \cdot v_{\text{bew Bef Zugtg}} \cdot t_{\text{bew Fz Zugtg}} \right) - \left(c_E \cdot c_K \cdot \frac{m_0}{v_0} \cdot L_{\text{Strecke}} + \sum_{\text{Zugtg}} \left(c_{E, \text{Zugtg}} \cdot c_{K, \text{Zugtg}} \cdot m_{\text{Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}} \right) \right) \quad (7.3-48)$$

7.3.11 Zusammenfassung

Das Ziel von Unterkapitel 7.3 bestand in der theoretischen Herleitung von physikalischen Ansätzen für die beiden betriebswirtschaftlichen Kenngrößen „Produktivität“ und „Gewinn“.

Die Eingangsgrößen für beide Kenngrößen bilden die Kosten und die Erlöse, für die bereits in den Unterkapiteln 6.1 und 7.2.6 die geeigneten physikalischen Größen festgelegt und auf ihre Eignung geprüft wurden. Aus der Kombination dieser Eingangsgrößen in Unterkapitel 7.3 ergibt sich die Transportkraft als geeignete physikalische Größe zur Beschreibung der Produktivität. Der Gewinn lässt sich über die Größe „Transportimpulsdifferenz“ abbilden.

Sowohl die Transportkraft als auch die Transportimpulsdifferenz zeigen das gleiche Konvergenzverhalten an den Rändern des Definitionsbereichs wie die entsprechenden betriebswirtschaftlichen Kenngrößen. Auch für den Bereich zwischen den Grenzwerten besteht diese Konsistenz. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass die Maxima der physikalischen Größen im Bereich der Maxima der betriebswirtschaftlichen Größen liegen.

7.4 Fazit

In diesem Kapitel wurden die physikalischen Ansätze zur Bewertung der Auslastung von Eisenbahnstrecken als Kernstück der Arbeit entwickelt und validiert. Sie ermöglichen, theoretisch fundiert aus verfügbaren Daten mit geringem Aufwand die Fahrplan-Nennleistung zu ermitteln.

Unter Verwendung der auf zwei parallelen Wegen in den Kapiteln 5 und 6 theoretisch hergeleiteten physikalischen Größen wurde zunächst der Transportimpuls als Hypothese zur physikalischen Beschreibung des Erlöses festgelegt. Diese Hypothese ließ sich sowohl anhand des Konvergenzverhaltens als auch anhand des Funktionsverlaufs zwischen den Grenzwerten theoretisch validieren.

Auf dieser Grundlage und mit der Summe der gewichteten Beförderungszeiten als physikalischem Maßstab für die Kosten konnten die Transportkraft und die Transportimpulsdifferenz als physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken identifiziert werden. Auch für diese Größen ist der theoretische Nachweis ihrer Eignung gelungen. Gemäß der Zielstellung sollte der Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung einer Eisenbahnstrecke die betriebswirtschaftliche Kenngröße „Gewinn“ zugrunde liegen, die sich nun durch die physikalische Größe „Transportimpulsdifferenz“ ausdrücken lässt. Ist beispielsweise die Rentabilität einer Infrastrukturmaßnahme für das Gesamtsystem Bahn zu beurteilen, ist das Verhältnis aus Erlösen und Kosten zu bilden. Dieser Quotient lässt sich nun durch die Transportkraft berechnen.

Zur Beurteilung der auslastungsabhängigen Qualität sind die Zuganzahlen an den Stellen, an denen die physikalischen Maßstäbe ihre Maxima annehmen, von Bedeutung. Die Validierung der physikalischen Maßstäbe umfasst daher auch den allgemeingültigen Nachweis, dass die Lage ihrer Maxima der Lage der Maxima der korrespondierenden betriebswirtschaftlichen Größen entsprechen.

Mit diesem Kapitel ist die Entwicklung des neuen physikalischen Ansatzes abgeschlossen. Das folgende Kapitel liefert ein Beispiel für die praktische Anwendung anhand der Eisenbahnstrecke Aachen Hbf – Düren Hbf.

8 Berechnungsbeispiele

8.1 Einleitung

Anhand der Kapitel 6 und 7 konnte auf theoretischem Weg nachgewiesen werden, dass die Transportkraft und die Transportimpulsdifferenz geeignete physikalische Größen zur Beschreibung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken sind.

Das Ziel des Kapitels 8 besteht in der Überprüfung der Plausibilität und der beispielhaften Anwendung der physikalischen Größen auf die Eisenbahnstrecke Düren Hbf – Aachen Hbf. Dabei werden in vier Berechnungsbeispielen unterschiedliche Betrachtungszeiträume und Ausbauzustände der Infrastruktur untersucht, um die Eignung des Modells für unterschiedliche Anwendungsgebiete darzustellen. Die Beispiele entsprechen den beiden wesentlichen Anwendungsgebieten des neuen Modells. Dies ist zum einen die Untersuchung der Homogenität der Verkehrsströme mit jeweils unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einzelner Zugfolgefälle infolge verschiedener Betriebsprogramme und zum anderen die Veränderung der Verkehrswiderstände für schnellfahrende Züge durch angebotsrelevante Infrastrukturmaßnahmen.

Die neuen Maßstäbe werden in den Beispielen mit den Ergebnissen vorhandener Verfahren verglichen. Dabei kommen nur Verfahren zum Einsatz, die nicht bereits bei der Modellentwicklung genutzt wurden.

Zuerst werden die Eingangsdaten für die verwendeten Tools zur Wartezeitberechnung und das Vorgehen zur Berechnung der physikalischen Größen aus den Wartezeiten vorgestellt (Kap. 8.2). Daran schließt sich die Charakterisierung der Eisenbahnstrecke (Kap. 8.3) an.

Abschließend werden die abgeleiteten physikalischen Größen „Transportimpuls“, „Summe der gewichteten Beförderungszeiten“, „Transportkraft“ und „Transportimpulsdifferenz“ berechnet und die Ergebnisse bewertet. Ziel ist dabei, den Berechnungsablauf komplett darzustellen und die Güte der Übereinstimmung zwischen den betriebswirtschaftlichen und den physikalischen Größen anhand eines Beispiels aufzuzeigen (Kap. 8.4 bis 8.6).

8.2 Methode und Eingangsgrößen

Zu den wesentlichen Eingangsgrößen des neu entwickelten Modells zählen die Wartezeiten. Diese werden in der vorliegenden Arbeit mit den beiden Tools BABSI (zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten) und ASDIS (zur Ermittlung der außerplanmäßigen Wartezeiten) für die Strecke inklusive der anschließenden Knoten berechnet (vgl. Kap. 6.1.4).

Eingangsgrößen für die beiden Simulationsprogramme sind im Wesentlichen:

- Infrastrukturdaten der zur untersuchenden Strecke und der Knoten,
- technische Modellzugdaten,
- Einbruchs- und Urverspätungen sowie
- das Betriebsprogramm.

Für die Beispielstrecke werden auf der Basis spurplanfeiner Eingangsdaten in fest definierten Hochrechnungsstufen die Wartezeiten bei der Trassenvergabe und bei der Betriebsdisposition simulativ ermittelt, wobei das Mischungsverhältnis der Züge im Betriebsprogramm weitgehend konstant bleibt. Die Wartezeiten fließen in die bewertete Fahrzeit, die bewertete realisierte Beförderungszeit und in die kostenrelevante Beförderungszeit ein. Mit Hilfe dieser Zeiten und den weiteren Eingangsgrößen (s. Kap. 8.3) lassen sich die verschiedenen physikalischen Größen ermitteln.

Zur Bestätigung des neu entwickelten Ansatzes anhand der Beispiele, werden als Vergleich zum Transportimpuls die Erlöse im Personenverkehr mit Hilfe der Faktoren für den Erlösverlust nach Ackermann [2] und als Vergleich zur Transportkraft die Produktivität nach Sauer [43] berechnet.

Zudem lässt sich die anhand des Maximums der Transportimpulsdifferenz mit dem neuen Ansatz ermittelte Fahrplan-Nennleistung mit der Zuganzahl bei befriedigender Betriebsqualität nach [14], die sich gemäß dem Maßstab in [46] ergibt, vergleichen. Diese Gegenüberstellung ist nur begrenzt möglich, da sich die Berechnungsgrundlagen unterscheiden.

8.3 Eingangsdaten für die Eisenbahnstrecke Düren Hbf – Aachen Hbf

Die Untersuchung erfolgt für den Abschnitt Düren Hbf – Aachen Hbf der Strecke 2600 der DB AG. Die Grundlage bilden der Infrastrukturzustand im Jahre 1999 und ein Betriebsprogramm, welches in etwa dem Fahrplan 1999/2000 entspricht. Der untersuchte Abschnitt ist 31,25 km lang, zweigleisig und elektrifiziert. An mehreren Betriebsstellen bestehen Überholmöglichkeiten. Dem Streckenabschnitt ist der Streckenstandard M 160 zugewiesen.

Etwa jede Stunde verkehren ein internationaler Fernverkehrszug je Richtung sowie zwei Nahverkehrszüge jeweils im Stundentakt mit unterschiedlich vielen Verkehrshalten. Im Güterverkehr wurden die Modellzüge Schnellgüterzug (Sg), Durchgangsgüterzug (Dg) sowie Cargo Bedienungsfahrt (CB), die vom Bahnhof Stolberg (Rheinl) Gbf aus Aachen Hbf anfährt, angesetzt. Die CB verkehrt vor allem tagsüber, während der lang laufende Güterverkehr im Wesentlichen in den Nachtstunden unterwegs ist. Die Eigenschaften der Modellzüge enthält Tabelle 8.3-1.

Modellzug	Rang	$L_{\text{Abschnitt}}$ [km]	t_{Fz} [min]	t_{Ve} [min]	p_{Ve} [%]	m_{Zug} [t]	t_{Bef} [min]
Tha	2	31,25	15,09	5	20	416	180
D	8	31,25	18,63	5	30	550	81
Sg	10	31,25	20,74	10	40	1000	137
SE	14	31,25	26,87	5	50	300	27
RB	16	31,25	32,56	5	20	200	23
Dg	18	31,25	23,14	15	60	1200	167
CB	22	12,77	21,58	20	60	500	18

Tab. 8.3-1: Eigenschaften der Modellzüge für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf [u. a. 20]

Für diese Eisenbahnstrecke werden vier Beispiele untersucht. Die verschiedenen Betrachtungszeiträume sind so gewählt, dass sie unterschiedliche Ausschnitte (Hauptverkehrszeit, Schwachverkehrszeit) aus dem täglichen Betriebsprogramm abdecken:

- Variante 1: Tagesstunden (6 bis 23 Uhr) (Kap. 8.4),
- Varianten 2 und 3: kürzere Betrachtungszeiträume (nachmittägliche Hauptverkehrszeit 15 bis 20 Uhr und Nachtstunden 0 bis 6 Uhr) (Kap. 8.5) und

- Variante 4: Anhebung der Streckengeschwindigkeit um 20 km/h für die Tagesstunden (Kap. 8.6)

Dadurch ergeben sich unterschiedliche Betriebsprogramme. Beispielsweise macht der Güterverkehr im Betriebsprogramm von Variante 3 über 80 % aller Züge aus, während sein Anteil tagsüber bei nur circa 30 % liegt. Für die vier Varianten ergeben sich die in Tabelle 8.3-2 wiedergegebenen Mischungsverhältnisse.

Modellzug- gattung	Anteil [%]		
	Varianten 1 und 4	Variante 2	Variante 3
Tha	8	8	0
D	11	8	0
Sg	6	8	41
SE	25	28	5
RB	25	24	13
Dg	19	16	41
CB	6	8	0

Tab. 8.3-2: Mischungsverhältnisse für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf

Für die Variante 1 werden die Berechnungen der einzelnen betriebswirtschaftlichen und physikalischen Größen im Folgenden ausführlich dargestellt. Für die anderen Varianten erfolgt lediglich die Darstellung der Endergebnisse.

8.4 Variante 1 „Tagesstunden“

8.4.1 Berechnung des Transportimpulses

Für die Berechnung des Transportimpulses als physikalische Größe für die Erlöse sind die Wartezeiten im Fahrplan und im Betrieb (in diesem Falle die Zuwachsverspätungen) zu ermitteln.

Aus den Simulationen ergeben sich die in den Tabellen 8.4-1 und 8.4-2 getrennt für den Personenverkehr und den Güterverkehr ausgewiesenen zuggattungsspezifischen Wartezeiten je Simulationsstufe und Zug.

Belegungs- grad	Anzahl der Züge	Wartezeiten [min/Zug]							
		Tha		D		SE		RB	
		Fahr- plan	Be- trieb	Fahr- plan	Be- trieb	Fahr- plan	Be- trieb	Fahr- plan	Be- trieb
0,22	40	0	-0,1	0	-0,4	0	-0,7	0	-0,1
0,27	50	0	-0,1	0	-0,4	0	-0,5	0	0,1
0,32	60	0	-0,1	0	-0,3	0	-0,3	0	0,1
0,38	70	0	-0,1	0	-0,2	0	-0,2	0	0,2
0,45	84	0	-0,1	0,3	-0,2	0,2	-0,2	0,0	0,3
0,49	90	0	-0,1	0,6	-0,2	0,2	-0,1	0,1	0,6
0,54	100	0	-0,1	0,8	-0,2	0,3	0,0	0,3	0,9
0,65	120	0	-0,1	1,0	-0,2	0,5	0,0	1,6	2,4
0,76	140	0	0	1,7	-0,1	1,0	0,1	3,1	2,9
0,86	160	0	0,1	3,0	-0,1	2,1	0,1	4,3	9,1

Tab. 8.4-1: Zuggattungsspezifische Wartezeiten bei der Trassenvergabe und Zuwachsverspätungen je Simulationsstufe für den Personenverkehr (Variante 1)

Belegungs- grad	Anzahl der Züge	Wartezeiten [min/Zug]					
		Sg		Dg		CB	
		Fahrplan	Betrieb	Fahrplan	Betrieb	Fahrplan	Betrieb
0,22	40	0	-1,0	0	-3,8	0	-5,1
0,27	50	0	-0,6	0	-1,7	0	-0,8
0,32	60	0	-0,5	0	-1,4	0	-0,7
0,38	70	0	-0,5	0,2	-0,9	0	-0,5
0,45	84	0	-0,4	0,6	-0,7	0	-0,5
0,49	90	0	-0,4	0,7	-0,2	0	-0,4
0,54	100	0	-0,2	1,6	-0,2	0	0,2
0,65	120	0,2	-0,2	4,5	-0,1	6,4	2,6
0,76	140	3,1	-0,2	12,6	0,0	19,3	32,6
0,86	160	6,5	-0,1	20,6	0,0	30,0	39,1

Tab. 8.4-2: Zuggattungsspezifische Wartezeiten bei der Trassenvergabe und Zuwachsverspätungen je Simulationsstufe für den Güterverkehr (Variante 1)

Aus diesen Wartezeiten und weiteren Größen (aus Tab. 8.3-1) lässt sich der Transportimpuls als physikalische Größe zur Abbildung der Erlöse nach Kapitel 7.1 zunächst für jede Zuggattung und anschließend als Gesamttransportimpuls wie folgt berechnen:

$$p_{\text{Gesamt}} = \sum_{\text{Zuggtg}} p_{\text{Zuggtg}} = \sum_{\text{Zuggtg}} \left(c_{E, \text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zuggtg}} \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}}}{t_{\text{bew Bef Zuggtg}}} \right) \quad (7.3-45)$$

Die Masse je Zuggattung ergibt sich als Produkt aus der Anzahl der Züge je Zuggattung und der Masse eines Zuges (vgl. Kap. 6.2.2 und 6.3.2). Die Masse eines Zuges sowie die bewertete Fahrzeit der Zuggattung im Zustand ohne Wartezeiten und die Länge des durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke können Tabelle 8.3-1 entnommen werden. Die bewertete Beförderungszeit lässt sich aus der Fahrzeit ohne Wartezeiten sowie den Wartezeiten einschließlich deren Gewichtungsfaktoren gemäß den Tabellen 6.2-1 und 6.2-2 (Personenverkehr) beziehungsweise Gleichung (6.3-4) (Güterverkehr) berechnen. Die bewertete Beförderungszeit nimmt für die Zuggattung SE und einen Belegungsgrad $\rho \approx 0,49$ folgenden Wert an:

$$\begin{aligned} t_{\text{bew Bef SE}}(\rho \approx 0,49) &= (t_{\text{bew Fz SE}} + t_{\text{WF SE}}) \cdot ZB_{\text{WF}} + t_{\text{WB SE}} \cdot ZB_{\text{WB}} \\ &= (27 + 0,2) \cdot 1 + (-0,07) \cdot 1,11 \\ &= 27,1 \text{ min} \end{aligned}$$

Für den SE und $\rho \approx 0,49$ ergibt sich der Transportimpuls gemäß Gleichung (7.1-2) wie folgt:

$$\begin{aligned} p_{\text{SE}}(0,49) &= m_{\text{SE}} \cdot c_E \cdot \frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz SE}}}{t_{\text{bew Bef SE}}(0,49)} \\ &= 23 \cdot 300 \cdot 1,0 \cdot \frac{31,25 \cdot 27}{27,1} \\ &= 214828 \text{ MNs}^2 \end{aligned}$$

Die Ergebnisse für die weiteren Zuggattungen und Belegungsgrade enthält Tabelle 8.4-3. Mit Hilfe der Gleichung (7.3-19) lässt sich dann aus den zuggattungsspezifischen Werten der Gesamttransportimpuls berechnen.

Bele- gungs- grad	Tha	D	Sg	SE	RB	Dg	CB	Gesamt- transport impuls
0,22	50,99	68,00	35,98	96,44	62,80	153,46	15,17	482,83
0,27	50,97	101,97	53,80	124,12	74,63	194,81	11,45	611,75
0,32	63,72	118,73	71,68	142,18	93,29	216,02	15,18	720,79
0,38	76,46	135,60	71,66	170,27	105,21	258,07	15,01	832,27
0,45	89,20	151,93	89,55	197,44	123,11	300,11	18,76	970,10
0,49	101,93	168,21	107,44	214,63	132,85	341,88	18,66	1085,60
0,54	114,67	184,54	107,33	240,43	147,55	361,30	21,66	1177,48
0,65	127,40	217,37	124,98	284,77	155,91	438,34	19,59	1368,35
0,76	152,82	248,71	157,34	325,14	168,27	478,10	8,57	1538,95
0,86	178,09	293,40	170,57	355,67	131,85	514,94	7,65	1652,17

Tab. 8.4-3: Transportimpuls je Zuggattung und Gesamttransportimpuls je Simulationsstufe [$10^3 \cdot \text{MNs}^2$] (Variante 1)

In der nachfolgenden Abbildung 8.4-1 sind die Werte als Funktion der Auslastung dargestellt.

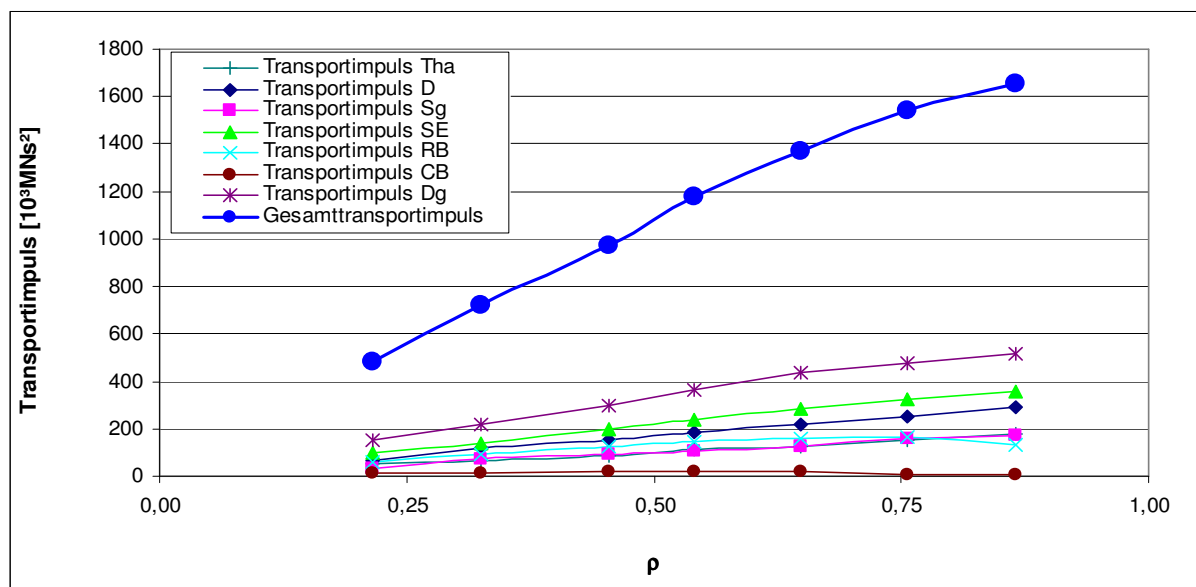


Abb. 8.4-1: Transportimpuls je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 1)

Ein Maximum des Gesamttransportimpulses stellt sich bei dieser Variante nicht ein. Nur die Transportimpulse der CB und der RB bilden bei einer Auslastung von $\rho \approx 0,54$ beziehungsweise bei einer Auslastung von $\rho \approx 0,76$ ein Maximum aus. Da

beide Zuggattungen ein geringes Gewicht haben und die CB auch nur einen Teil der Gesamtstrecke Düren Hbf – Aachen Hbf befährt, ist deren Einfluss auf den Gesamttransportimpuls relativ gering.

8.4.2 Berechnung des Erlöses und Vergleich mit dem Transportimpuls

Ziel dieses Unterkapitels ist es, die Ergebnisse für den Transportimpuls den Erlösen, die sich mit betriebswirtschaftlichen Verfahren ergeben, gegenüberzustellen und auf diese Weise auch anhand einer Beispieluntersuchung die Qualität der Ergebnisse darzustellen.

Für den Personenverkehr besteht die Möglichkeit, den Erlös mit einer Berechnungsmethode für den Erlösverlust nach Ackermann [2] zu ermitteln. Für den Erlös im Güterverkehr liegt keine weitere Möglichkeit, die nicht bereits bei der Herleitung in Unterkapitel 6.3.3 genutzt wurde, vor, so dass kein Vergleich der Ergebnisse möglich ist.

Der Ansatz von Ackermann basiert auf zuggattungsspezifischen Durchschnittswerten je Verspätungsminute, die den Rückgang der Erlöse infolge geringerer Nachfrage angeben. Zunächst ist der Bruttoerlös je Zuggattung auf dem von der Zuggattung durchfahrenen Abschnitt ohne Berücksichtigung von Wartezeiten zu berechnen:

$$\text{Bruttoerlös}_{\text{Zuggtg}} = L_{\text{Abschnitt}} \cdot F_{\text{Zuggtg}} \cdot E_{\text{spez}} \quad (8.4-1)$$

Dann erfolgt die Umrechnung von Folgeverspätungen je Zuggattung und Simulationsstufe in einen Erlösverlust anhand der Durchschnittswerte je Verspätungsminute:

$$W_{\text{Versp Zuggtg}} = L_{\text{Abschnitt}} \cdot F_{\text{Zuggtg}} \cdot E_{\text{spez}} \cdot FRW$$

mit

FRW Faktor-Reisenden-Wirkung nach [2]

Die Erlösminderung aus einer planmäßigen Fahrzeitverlängerung wird über einen Faktor b berücksichtigt. Dieser ergibt sich gemäß folgender Gleichung:

$$b_{Zuggtg} = \left(\frac{t_{Fz} + t_{WF}}{t_{Fz}} \right)^{\eta}$$

mit

b_{Zuggtg} Faktor für Erlösminderung aus einer planmäßigen Fahrzeitverlängerung
 η Fahrzeitelastizität

Dabei verwendet Ackermann die Werte in Tabelle 8.4-4 für die Fahrzeitelastizität.

Zuggattung	Wert für die Fahrzeitelastizität
ICE	-0,9396
IC	-0,7854
EC	-0,7471
IR	-0,7359
D	-0,7035
Nahverkehr	-0,5639

Tab. 8.4-4: Werte für die Fahrzeitelastizität nach Ackermann [2]

Der Nettoerlös ergibt sich schließlich wie folgt:

$$Nettoerlös_{Zuggtg} = Bruttoerlös_{Zuggtg} \cdot b_{Zuggtg} - W_{Versp\ Zuggtg} \cdot t_{WB\ Zuggtg} \quad (8.4-2)$$

Der so ermittelte Nettoerlös lässt sich anschließend dem Transportimpuls gegenüberstellen.

Die zuggattungsspezifischen Ergebnisse für den Transportimpuls je Simulationsstufe, normiert auf den Wert bei optimaler Auslastung ($\rho \approx 0,45$) nach Gl. (3.1-1) bestimmt, enthält Tabelle 8.4-5. Die entsprechend normierten Werte für den Erlös für die Zuggattungen im Personenverkehr gibt Tabelle 8.4-6 wieder.

Belegungs- grad	normierter Transportimpuls [-]			
	Tha	D	SE	RB
0,22	0,57	0,45	0,49	0,51
0,27	0,57	0,67	0,63	0,61
0,32	0,71	0,78	0,72	0,76
0,38	0,86	0,89	0,86	0,85
0,45	1	1	1	1
0,49	1,14	1,11	1,09	1,08
0,54	1,29	1,21	1,22	1,20
0,65	1,43	1,43	1,44	1,27
0,76	1,71	1,64	1,65	1,37
0,86	2,00	1,93	1,80	1,07

Tab. 8.4-5: Transportimpuls je Zuggattung und je Simulationsstufe für den Personenverkehr (Variante 1)

Belegungs- grad	normierte Erlöse [-]			
	Tha	D	SE	RB
0,22	0,48	0,48	0,51	0,51
0,27	0,60	0,60	0,61	0,63
0,32	0,72	0,72	0,72	0,73
0,38	0,83	0,84	0,88	0,84
0,45	1	1	1	1
0,49	1,07	1,06	1,08	0,96
0,54	1,19	1,18	1,20	1,02
0,65	1,43	1,40	1,40	0,83
0,76	1,67	1,61	1,64	0,92
0,86	1,91	1,78	1,61	0,31

Tab. 8.4-6: Erlöse je Zuggattung und je Simulationsstufe für den Personenverkehr (Variante 1)

Die nachfolgende Abbildung 8.4-2 enthält die Gegenüberstellung des Gesamttransportimpulses und des Gesamterlöses für den Personenverkehr.

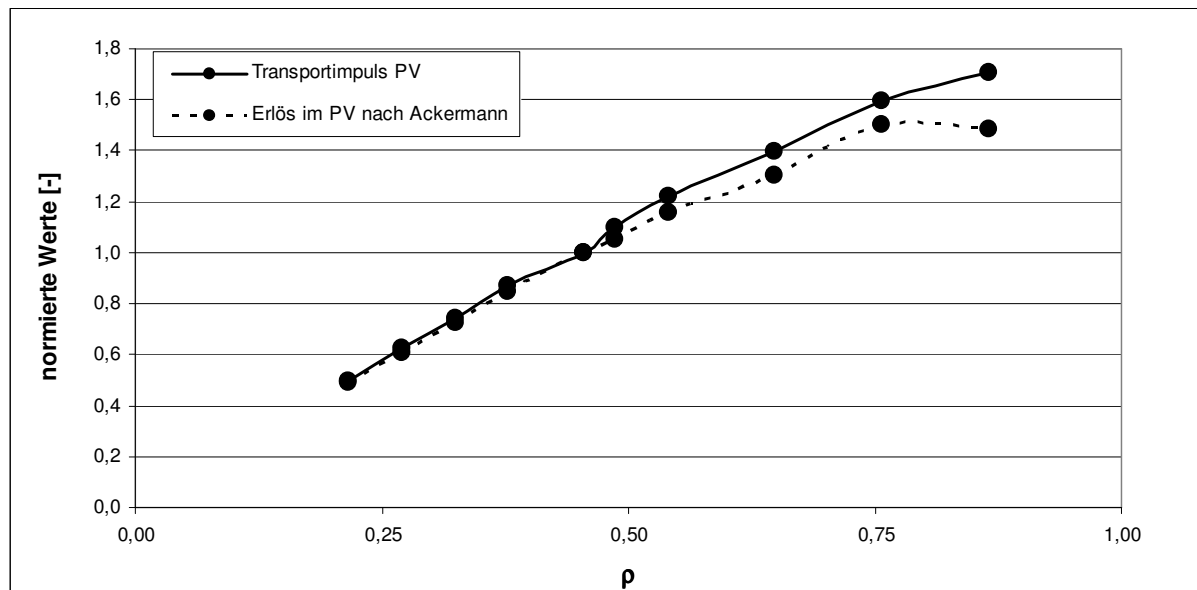


Abb. 8.4-2: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 1), normiert

Aus dieser Abbildung und der Gegenüberstellung der beiden Tabellen 8.4-5 und 8.4-6 lässt sich die gute Übereinstimmung der beiden Berechnungsmethoden, vor allem im Bereich kleiner und mittlerer Belegungsgrade, erkennen. Die Abweichungen liegen bei den für das Leistungsverhalten einer Eisenbahnstrecke interessanten Auslastungen zwischen $\rho \approx 0,3$ und $\rho \approx 0,8$ zwischen circa 3 % und 5 %. Für hohe Belegungsgrade können sich mit der Berechnungsmethode von Ackermann negative Erlöse ergeben (vgl. Gl. (8.4-2)). Aus diesem unplausiblen Konvergenzverhalten resultieren die Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsmethoden für hohe Belegungsgrade.

8.4.3 Berechnung der Transportkraft

Für die Berechnung der Transportkraft sind neben den Erlösen als zweite betriebswirtschaftliche Größe die Kosten zu berechnen. Sie werden in den physikalischen Maßstäben durch die Summe der gewichteten Beförderungszeiten (s. Gl. (6.1-2)) dargestellt.

Diese Summe hängt von der Zuganzahl, den zuggattungsspezifischen Massen (s. Tab. 8.3-1), den planmäßigen Wartezeiten (s. Tab. 8.4-1 und 8.4-2) sowie den Folgeverspätungen je Zuggattung und Simulationsstufe nach Tabelle 8.4-7 ab.

Belegungs- grad	Folgeverspätungen [min/Zug]						
	Tha	D	Sg	SE	RB	Dg	CB
0,22	0	0	0	0,10	0,02	2,12	1,03
0,27	0,17	0	0	0,43	0,10	2,21	1,09
0,32	0	0	0,16	0,49	0,25	2,26	2,96
0,38	0,04	0,08	0,31	0,21	0,38	2,93	2,72
0,45	0,04	0,15	0,19	0,58	0,41	3,60	0,80
0,49	0,05	0,10	0	0,53	1,02	3,58	3,11
0,54	0,03	0,04	0,43	0,47	1,25	7,34	5,24
0,65	0,14	0,06	0,83	0,66	2,73	12,08	11,69
0,76	0,11	0,01	0,60	0,60	2,78	20,35	32,93
0,86	0,04	0,22	1,41	1,43	14,68	34,51	30,69

Tab. 8.4-7: Folgeverspätungen je Zuggattung und Simulationsstufe (Variante 1)

Für die Berechnung der Gesamtkosten wird zudem das Zeitäquivalent für die fixen Kosten benötigt. Da dem Abschnitt Düren Hbf – Aachen Hbf der Streckenstandard M 160 zugeordnet ist, ergibt sich aus Tabelle 6.1-10 ein Wert für das Zeitäquivalent m_0/v_0 von 6799 min/km.

Eingesetzt in Gleichung (7.3-46) wird daraus:

$$F_{\text{Gesamt}} = \frac{\sum_{\text{Zuggtg}} (c_{E,\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zuggtg}} \cdot v_{\text{bew Bef Zuggtg}} \cdot t_{\text{bew Fz Zuggtg}})}{c_E \cdot c_K \cdot 6799 \cdot L_{\text{Strecke}} + \sum_{\text{Zuggtg}} (c_{E,\text{Zuggtg}} \cdot c_{K,\text{Zuggtg}} \cdot m_{\text{Zuggtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zuggtg}})} \quad (7.3-46)$$

Mit Hilfe der Wartezeiten aus den Tabellen 8.4-1, 8.4-2 und 8.4-7 und der Fahrzeit aus Tabelle 8.3-1 lässt sich die kostenrelevante Beförderungszeit je Zuggattung für den durchfahrenen Abschnitt berechnen.

Für die Summe der gewichteten Beförderungszeiten ohne den die Fixkosten widerspiegelnden Term m_0/v_0 ergibt sich für die Zuggattung SE bei einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,49$ und mit den beiden Konstanten aus Tabelle 7.3-1.

$$c_E = 1,0$$

$$c_K = 0,93$$

ein Wert von:

$$\begin{aligned}
 \hat{t}_{Bef\ SE} &= m_{SE}(0,49) \cdot t_{Bef(Kosten)SE}(0,49) \\
 &= 23 \cdot 300 \cdot 1,0 \cdot 0,93 \cdot (26,87 + 0,2 + 0,53) \\
 &= 177,585 \cdot 10^3 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Die Ergebnisse für die weiteren Zuggattungen und Belegungsgrade enthält Tabelle 8.4-8.

Belegungs- grad	Tha	D	Sg	SE	RB	Dg	CB
0,22	33,46	49,15	25,26	75,46	47,74	96,94	9,04
0,27	33,82	73,72	37,90	99,30	57,43	125,07	9,06
0,32	41,82	86,01	50,91	114,84	72,14	139,23	13,08
0,38	50,31	98,70	51,29	136,36	82,08	173,08	16,19
0,45	58,71	113,02	63,73	162,14	96,68	210,05	14,91
0,49	67,11	127,16	75,79	177,59	108,64	240,62	16,45
0,54	75,41	140,93	77,37	201,24	124,98	298,73	21,44
0,65	84,42	169,03	92,78	243,15	162,29	456,90	42,27
0,76	101,10	200,73	133,89	286,25	197,36	738,35	88,53
0,86	117,37	259,59	174,50	348,76	302,27	1157,86	109,66

Tab. 8.4-8: Summe der gewichteten Beförderungszeiten je Zuggattung und je Simulationsstufe [$10^3 \cdot \text{min}$] (Variante 1)

Die Gesamttransportkraft für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf für jede Simulationsstufe ergibt sich gemäß Gleichung (7.3-46). Die Ergebnisse dieser Rechnung gibt die nachfolgende Tabelle 8.4-9 wieder.

Belegungs- grad	Gesamttransport- impuls p [$10^3 \cdot \text{MNs}^2$]	Summe $\hat{t}_{\text{Bef Zuggtg}}$ [$10^3 \cdot \text{s}$]	Gesamttransport- kraft F [MNs]
0,22	482,83	451,62	1,069
0,27	611,75	550,89	1,110
0,32	720,79	632,60	1,139
0,38	832,27	722,58	1,157
0,45	970,10	833,83	1,163
0,49	1085,60	927,93	1,170
0,54	1177,48	1054,69	1,116
0,65	1368,35	1365,42	1,002
0,76	1538,95	1860,80	0,827
0,86	1652,17	2584,60	0,639

Tab. 8.4-9: Gesamttransportimpuls, Summe der gewichteten Beförderungszeiten und Gesamttransportkraft je Simulationsstufe (Variante 1)

Den Verlauf der Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie der Gesamttransportkraft gibt Abbildung 8.4-3 wieder.

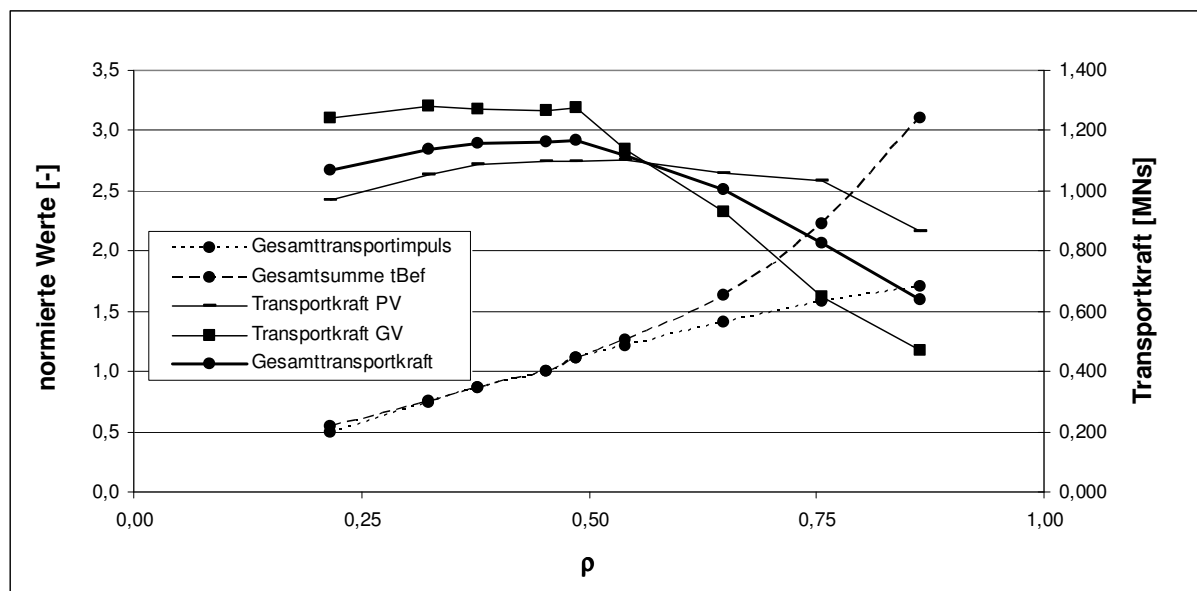


Abb. 8.4-3: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 1)

Das Maximum für die Gesamttransportkraft bildet sich bei einer Auslastung von $\rho \approx 0,46$, entsprechend 85 Zügen in 17 Stunden, aus.

8.4.4 Berechnung der Produktivität und Vergleich mit der Transportkraft

Der Transportkraft lässt sich die Produktivität nach [43] als Vergleichsgröße gegenüberstellen. Zur Bestimmung der Produktivität sind die dynamische Betriebsleistung und die Kosten je Simulationsstufe zu ermitteln und der Quotient daraus zu bilden.

Die dynamische Betriebsleistung je Zuggattung errechnet sich gemäß Gleichung (3.3-1):

$$P_{B,Zuggtg} = \text{Betriebsmenge}_{Zuggtg} \cdot \text{Beförderungsgeschwindigkeit}_{Zuggtg} \quad (3.3-1)$$

mit

$\text{Betriebsmenge}_{Zuggtg}$ Anzahl der Züge pro Jahr in einer Zuggattung

Die Kosten werden gemäß Unterkapitel 6.1.4 berechnet. Die Werte für die dynamische Betriebsleistung, die Kosten und die Produktivität je Simulationsstufe enthält Tabelle 8.4-10.

Belegungs- grad	dynamische Betriebs- leistung P_B [$10^3 \cdot \text{km/h}$]	Kosten K_{Gesamt} [$10^3 \cdot \text{€}$]	Produktivität R [km/€h]
0,22	1032,73	3792,01	0,272
0,27	1288,59	4486,73	0,287
0,32	1538,41	5171,00	0,298
0,38	1741,94	5859,01	0,297
0,45	2100,73	6850,84	0,307
0,49	2248,51	7293,06	0,308
0,54	2404,93	8035,13	0,299
0,65	2742,12	9731,56	0,282
0,76	2874,71	11504,04	0,251
0,86	3124,46	26836,63	0,116

Tab. 8.4-10: Dynamische Betriebsleistung nach Sauer [43], Kosten sowie Gesamtproduktivität (Variante 1)

In der nachfolgenden Abbildung 8.4-4 sind die Werte der Produktivität denen der Transportkraft gegenübergestellt.

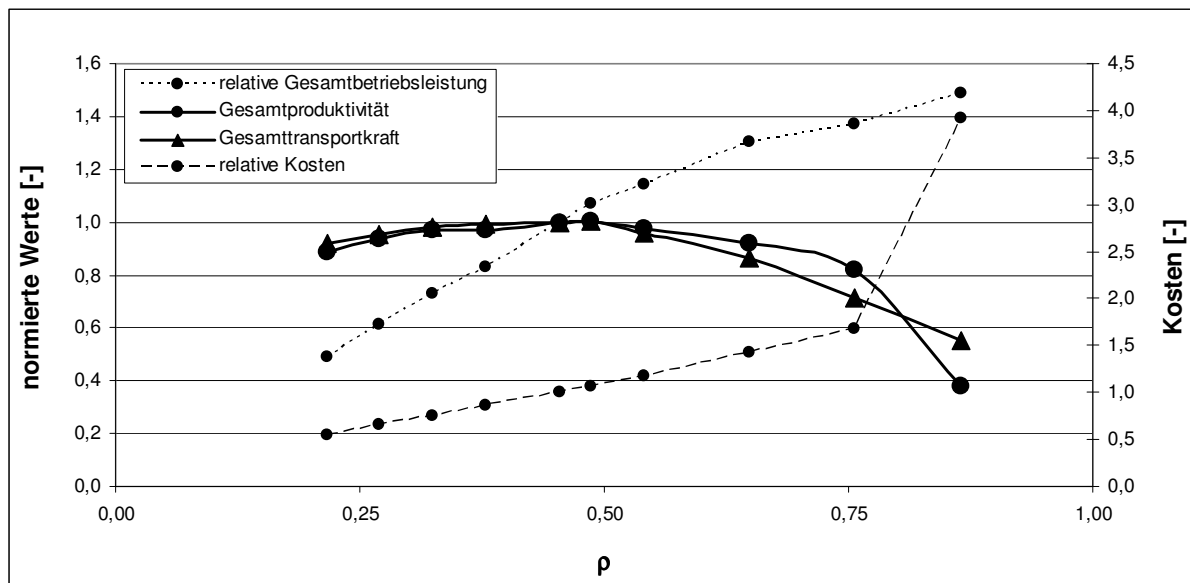


Abb. 8.4-4: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 1)

Das Maximum der Produktivität bildet sich bei $\rho \approx 0,46$, entsprechend 84 Zügen in 17 Stunden, aus. Das Maximum der Gesamttransportkraft liegt in etwa an derselben Stelle.

Aus Abbildung 8.4-4 lässt sich zudem erkennen, dass die beiden Kurven einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Vor allem im Bereich gebräuchlicher Belegungsgrade ist eine gute Übereinstimmung der beiden Größen festzustellen - die Abweichungen liegen bei einer Auslastung von $\rho \approx 0,3$ bei circa -2 % und betragen bei $\rho \approx 0,8$ circa 10 %. Diese Ungenauigkeit liegt daran, dass die Summe der gewichteten Beförderungszeiten in dieser Variante ab einem Belegungsgrad von circa $\rho \approx 0,75$ wesentlich steiler ansteigt als die Kosten für die Produktivität (s. auch Kap. 6.1.4).

Somit lässt sich die Transportkraft als physikalischer Maßstab für die Produktivität auch anhand dieses Beispiels bestätigen.

8.4.5 Berechnung der Transportimpulsdifferenz

Zur Berechnung der physikalischen Größe für den Gewinn, der Transportimpulsdifferenz, ist die Differenz aus den beiden physikalischen Größen „Transportimpuls“ und „Summe der gewichteten Beförderungszeiten“ zu bilden.

Die Berechnung für den Transportimpuls wurde in Unterkapitel 8.4.1 dargestellt. Für die Zuggattung SE bei einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,49$ ergibt sich ein Wert von 214628 MNs².

Die Summe der gewichteten Beförderungszeiten ohne den Term m_0/v_0 für die Zuggattung SE und den Belegungsgrad $\rho \approx 0,49$ beträgt gemäß Unterkapitel 8.4.3 177585 min. Somit ergibt sich die zuggattungsspezifische Transportimpulsdifferenz für den SE und die Auslastung $\rho \approx 0,49$ wie folgt:

$$\begin{aligned}\Delta p_{SE}(\rho \approx 0,49) &= p_{SE} - \hat{t}_{Bef\ Zuggtg} \\ &= 214628 - 177585 \\ &= 37043 \text{ MNs}^2\end{aligned}$$

Die Werte für die physikalischen Größen über alle Zuggattungen je Stufe enthält Tabelle 8.4-11. Dabei wurde der Term m_0/v_0 mit Mittelwerten für die Konstanten von $c_E = 0,8$ und $c_K = 0,9$ multipliziert und von der Gesamttransportkraft ebenfalls subtrahiert.

Belegungsgrad	Gesamttransportimpuls p [$10^3 \cdot \text{MNs}^2$]	Summe $\hat{t}_{Bef\ Zuggtg}$ [$10^3 \cdot \text{s}$]	Gesamttransportimpulsdifferenz Δp [MNs^2]
0,22	482,83	451,62	31,20
0,27	611,75	550,89	60,86
0,32	720,79	632,60	88,19
0,38	832,27	719,35	112,92
0,45	970,10	833,83	136,27
0,49	1085,60	927,93	157,67
0,54	1177,48	1054,69	122,79
0,65	1368,35	1365,41	2,94
0,76	1538,95	1860,80	-321,85
0,86	1652,17	2584,60	-932,43

Tab. 8.4-11: Gesamttransportimpuls, Summe der gewichteten Beförderungszeiten und Gesamttransportimpulsdifferenz je Simulationsstufe (Variante 1)

Die zuggattungsspezifische Transportimpulsdifferenz, das Äquivalent für die fixen Kosten, sowie die Gesamttransportimpulsdifferenz als Funktion der Auslastung zeigt die nachfolgende Abbildung 8.4-5.

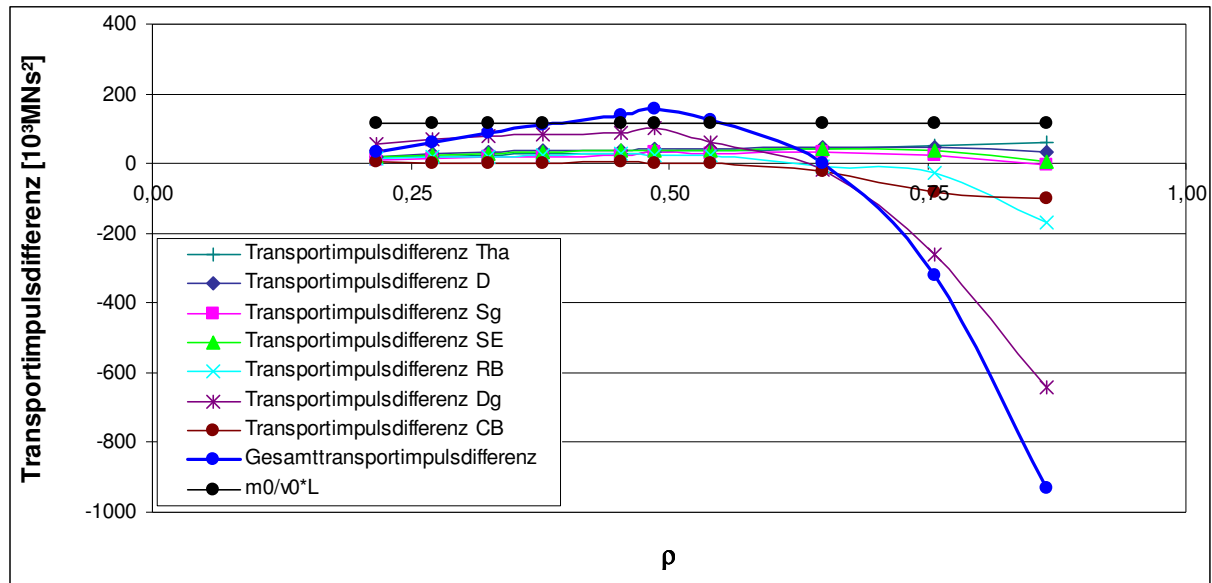


Abb. 8.4-5: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 1)

Das Maximum für die Gesamttransportimpulsdifferenz der Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf und damit die optimale Auslastung liegt bei $\rho \approx 0,49$, entsprechend 90 Zügen in 17 Stunden.

Die Maxima der Transportimpulsdifferenz der einzelnen Zuggattungen bilden sich bei sehr unterschiedlichen Belegungsgraden und in unterschiedlicher Höhe aus. So erleidet die ranghöchste Zuggattung „Thalys“ relativ geringe Wartezeiten, so dass ihre Transportimpulsdifferenz im untersuchten Bereich bis zu Belegungsgraden von 0,86 monoton steigt. Aus gleichem Grunde erreicht auch der Sg sein Gewinnmaximum erst bei sehr hohen Belegungsgraden.

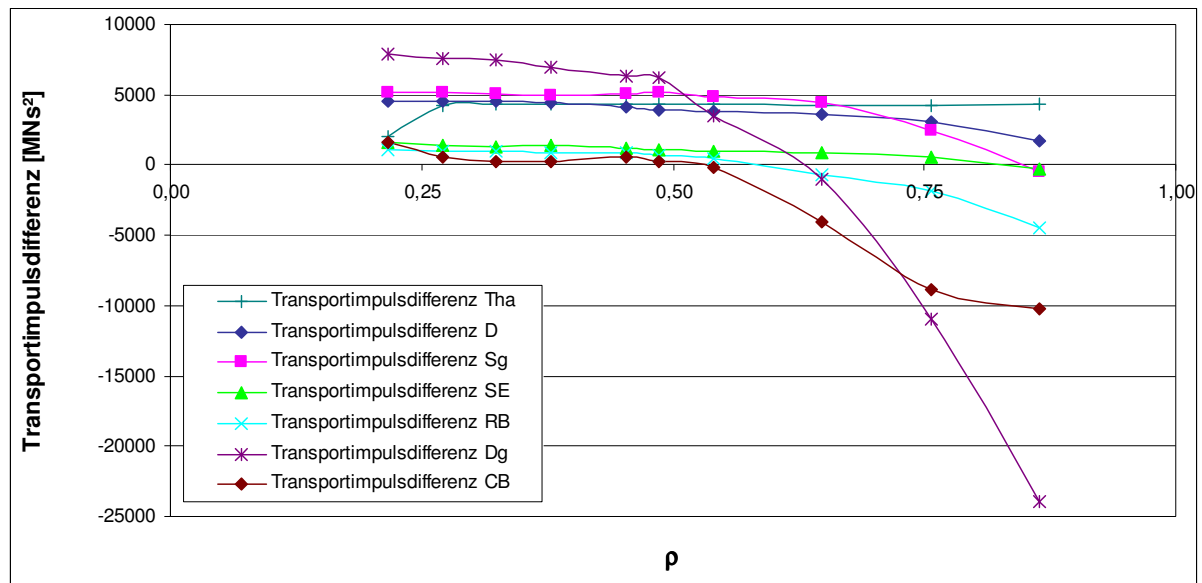


Abb. 8.4-6: Transportimpulsdifferenz für einen Zug je Zuggattung (Variante 1)

Aus der Abbildung 8.4-6 lässt sich erkennen, dass sich die Transportimpulsdifferenz je Zug im Bereich der optimalen Auslastung nur wenig mit der Auslastung verändert. Dies gilt sowohl für die einzelnen Zuggattungen als auch für den Gesamttransportimpulsdifferenz nach Abbildung 8.4-5. Somit sind einerseits die Auswirkungen einer eventuellen Ungenauigkeit durch verallgemeinerte Annahmen bei der Bestimmung des Maximums der Transportimpulsdifferenz gering und andererseits beeinflusst eine Abweichung der tatsächlichen von der optimalen Zuganzahl das Wirtschaftsergebnis in gewissen Grenzen nur wenig.

Abbildung 8.4-6 zeigt zudem, dass erst im Bereich höherer Belegungsgrade die Transportimpulsdifferenz für die niedrigrangigen und leichten Zuggattungen negativ wird.

8.4.6 Berechnung der optimalen Auslastung bei befriedigender Betriebsqualität und Vergleich mit der Transportimpulsdifferenz

Als Vergleichsgröße für die optimale Auslastung gemäß der Transportimpulsdifferenz wird die optimale Auslastung bei befriedigender Betriebsqualität nach STRELE herangezogen. Der Gewinn, berechnet zum Beispiel nach der Methode von Jochim, eignet sich nicht als Vergleichsgröße, weil die Berechnung der Erlöse und Kosten auf vielen Näherungsgrößen beruht und damit zu ungenau würde.

Mit Hilfe der Größen aus Tabelle 8.3-1 errechnet STRELE für Variante 1 für die drei Stufen der Betriebsqualität nach der DS 405 [14] die in Tabelle 8.4-12 angegebenen Werte.

	sehr gute Betriebsqualität	befriedigende Betriebsqualität	mangelhafte Betriebsqualität
Zuganzahl	63 Züge	84 Züge	96 Züge
Belegungsgrad	0,35	0,46	0,53
zul I_{WB}	0,05	0,10	0,16

Tab. 8.4-12: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 1)

Im Vergleich mit den Ergebnissen aus Unterkapitel 8.4.5 zeigt sich, dass die Transportimpulsdifferenz für die optimale Auslastung für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf für Variante 1 ähnliche Zuganzahlen liefert wie der Maßstab aus [46].

8.4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse für Variante 1

Ziel von Unterkapitel 8.4 war die beispielhafte Darstellung der Berechnung der drei physikalischen Größen „Transportimpuls“, „Transportkraft“ und „Transportimpulsdifferenz“ sowie die Prüfung der Ergebnisse durch Vergleiche mit Ergebnissen für betriebswirtschaftliche Größen. Für die in den Unterkapiteln 8.5 und 8.6 folgenden Varianten wird der Berechnungsablauf verkürzt dargestellt.

Dem Transportimpuls lassen sich im Personenverkehr Erlöse gegenüberstellen. Als Vergleich für die Transportkraft dient die Produktivität. Als Referenz für die optimale Auslastung, die sich aus der Transportimpulsdifferenz ergibt, stehen STRELE-Ergebnisse zur Verfügung.

Alle drei physikalischen Maßstäbe zeigen eine gute Übereinstimmung mit der jeweiligen betriebswirtschaftlichen Vergleichsgröße. Vor allem in dem für die Bestimmung der Fahrplan-Nennleistung relevanten Bereich mittlerer Belegungsgrade eignen sich die physikalischen Größen sehr gut, um das Leistungsverhalten einer Eisenbahnstrecke hinsichtlich des Erlöses, des Gewinns oder der Wirtschaftlichkeit beurteilen zu können. Durch die geringe Änderung der Kurven für die Transportkraft und die Transportimpulsdifferenz im Bereich der optimalen Auslastung sind zudem Auswirkungen von eventuellen Ungenauigkeiten durch verallgemeinerte Annahmen bei der Bestimmung des Maximums der physikalischen Größen gering.

8.5 Varianten 2 und 3: Kürzere Betrachtungszeiträume

Die beiden Varianten 2 und 3 unterscheiden sich von Variante 1 durch den Betrachtungszeitraum und somit durch das Betriebsprogramm. Der Betrachtungszeitraum umfasst bei Variante 2 die nachmittägliche Hauptverkehrszeit von 15 bis 20 Uhr und bei Variante 3 die Nachtstunden zwischen 0 bis 6 Uhr. Damit sind beide Betrachtungszeiträume wesentlich kürzer als bei Variante 1.

Der Anteil aller Reisezüge macht in Variante 2 68 % aus, wohingegen der Anteil der Reisezüge bei Variante 3 bei nur circa 18 % liegt. Die Mischungsverhältnisse für die beiden Varianten gibt Tabelle 8.3-2 wieder.

Für die Berechnung des Gesamttransportimpulses sind nach der Ermittlung der Wartezeiten je Simulationsstufe die bewertete realisierte Beförderungszeit zu bestimmen und die zuggattungsspezifischen Transportimpulse zu berechnen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die zuggattungsspezifischen Transportimpulse und den Gesamttransportimpuls für die Varianten 2 und 3 als Funktion des Belegungsgrades (Abb. 8.5-1 und Abb. 8.5-2).

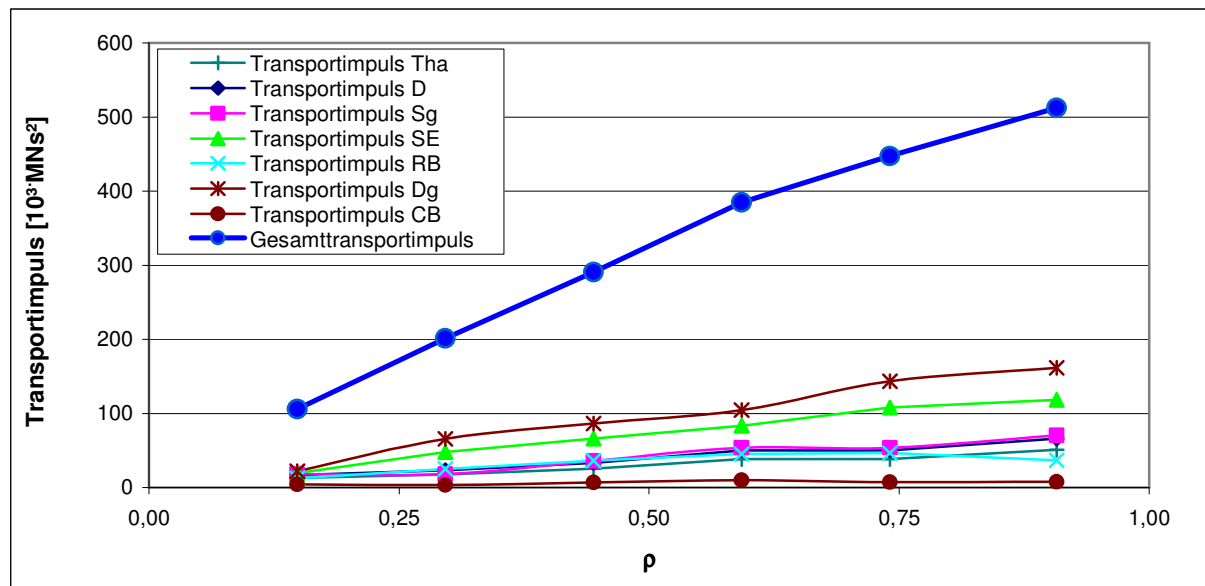


Abb. 8.5-1: Transportimpulse je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 2)

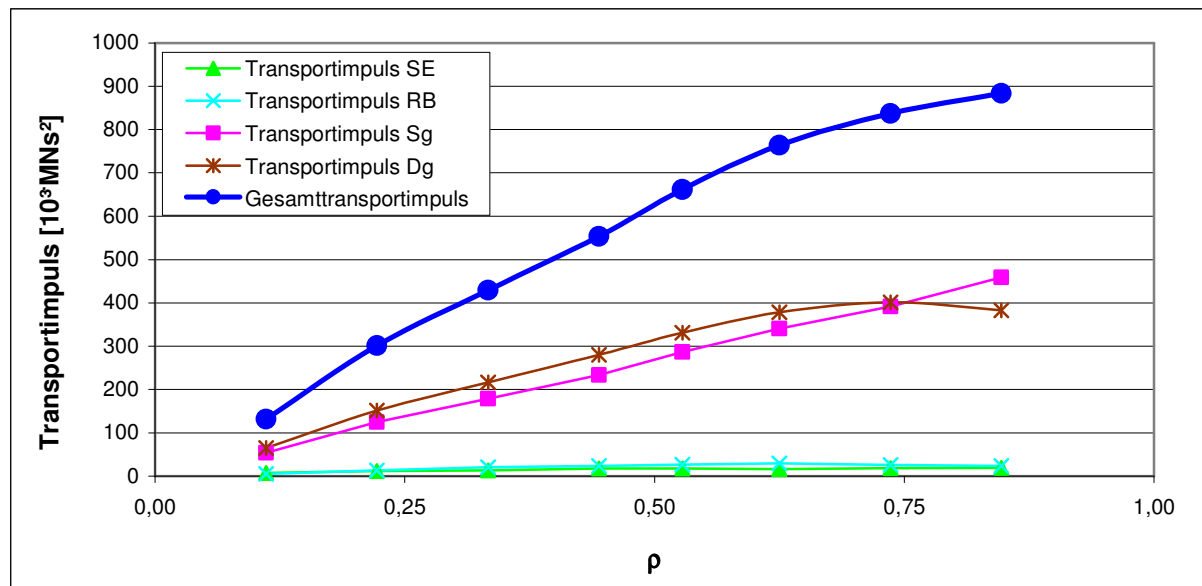


Abb. 8.5-2: Transportimpulse je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 3)

Auch bei diesen beiden Varianten bildet der Gesamttransportimpuls kein Maximum aus sondern nur der Transportimpuls der Zuggattungen RB und Dg.

Bei Variante 3 macht der Anteil der beiden Zuggattungen Sg und Dg am Gesamttransportimpuls im Mittel circa 44 % (Sg) bzw. 49 % (Dg) im Vergleich zu 9 % (Sg) bzw. 31 % (Dg) bei Variante 1 aus. Diese Unterschiede zwischen den beiden Varianten spiegeln sich in etwa im Anteil der Zuggattungen am Betriebsprogramm wider. Der Anstieg des Anteils am Gesamttransportimpuls ist aber nicht proportional zum Anstieg des Anteils der Güterzüge in den beiden Betriebsprogrammen, was an dem bereits sehr hohen Anteil der Güterzüge am Gesamttransportimpuls in der Variante 1 begründet liegt.

Als Vergleichsgröße für den Transportimpuls dient der Erlös. Die nachfolgenden Abbildungen 8.5-3 und 8.5-4 zeigen die Gegenüberstellung des Gesamttransportimpulses und des Gesamterlöses für den Personenverkehr.

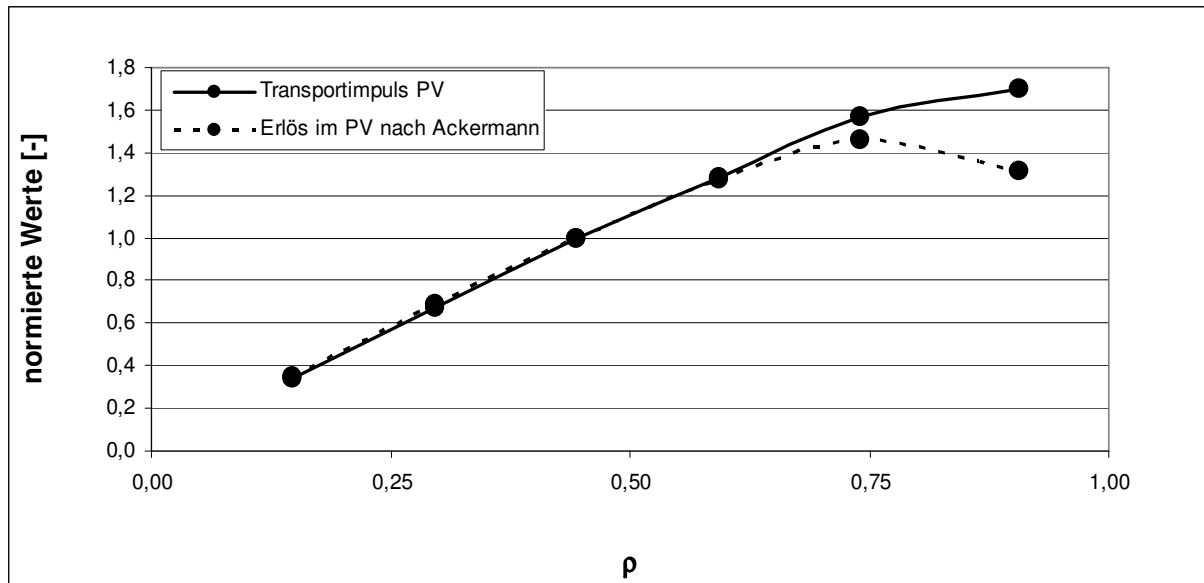


Abb. 8.5-3: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 2) normiert

Wie bei Variante 1 liefert die Gegenüberstellung der beiden Berechnungsmethoden für Variante 2 eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen liegen in dem für die Auslastung interessanten Bereich von $\rho = 0,3$ bis $\rho = 0,8$ zwischen circa -2 % und 5 %.

Im Bereich sehr hoher Belegungsgrade ($\rho > 0,75$) ergeben sich aufgrund des unplausiblen Konvergenzverhaltens des Erlöses nach [2] (vgl. Kap. 8.4.2) größere Unterschiede zwischen den beiden Funktionen.

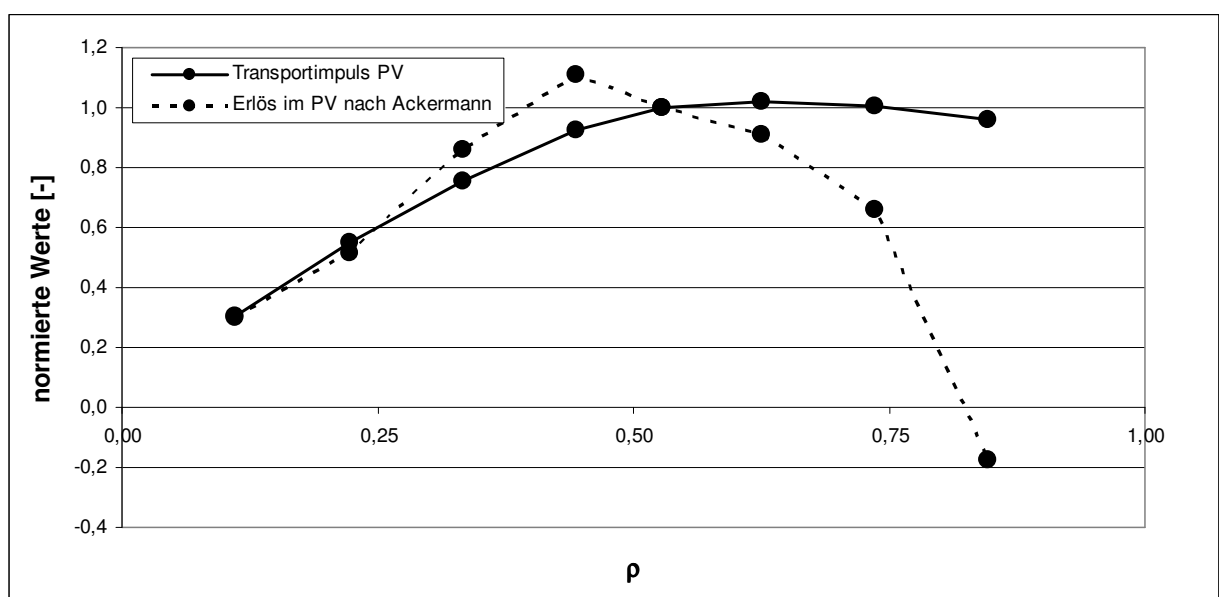


Abb. 8.5-4: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 3) normiert

In Variante 3 erhält die RB aufgrund der großen Anzahl höherrangiger Güterzüge bereits bei niedrigen Belegungsgraden hohe Wartezeiten. Die hohen Wartezeiten führen wegen des oben aufgeführten unplausiblen Konvergenzverhaltens zu großen Unterschieden zwischen den Werten der beiden Funktionen in Abbildung 8.5-4. Verbunden mit der Normierung bei $\rho \approx 0,53$ ergeben sich daraus auch für $\rho < 0,53$ deutliche Unterschiede. Ein Vergleich zwischen den beiden Berechnungsmethoden lässt sich für Variante 3 nicht durchführen.

Zur Bestimmung der Transportkraft als weitere physikalische Größe sind analog zu Unterkapitel 8.4.3 der Gesamttransportimpuls und die Summe der gewichteten Beförderungszeiten über alle Zuggattungen je Simulationsstufe zu ermitteln und der Quotient aus den beiden Größen zu bilden. Die nachfolgenden Abbildungen 8.5-5 und 8.5-6 zeigen die normierten Werte für die beiden physikalischen Größen für die Kosten und die Erlöse sowie die Transportkraft für den Personen- und Güterverkehr und die Gesamttransportkraft.

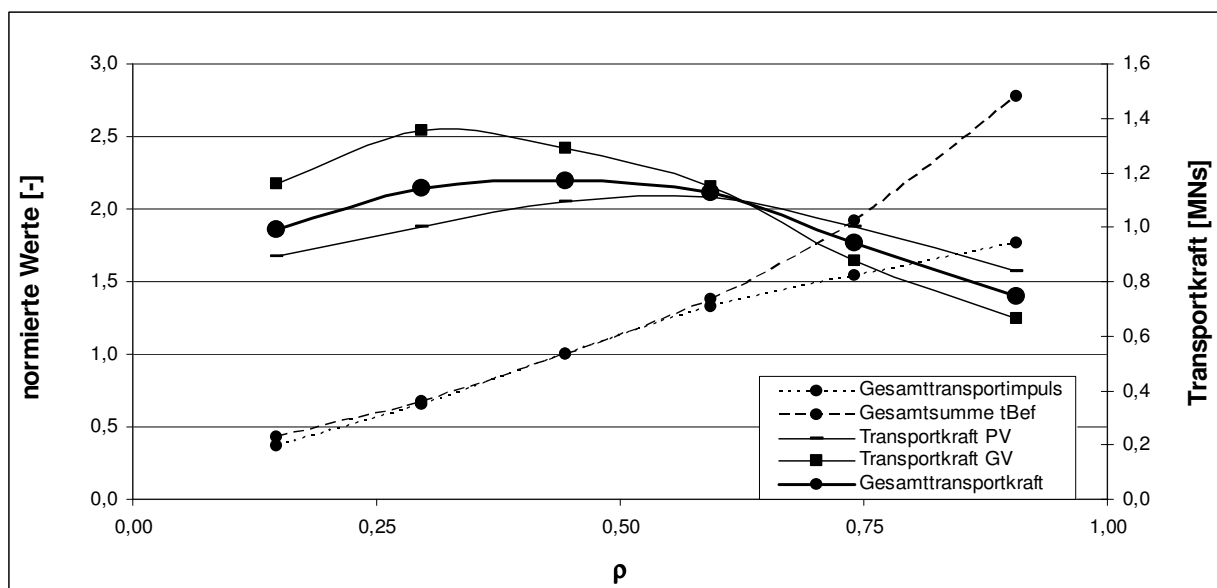


Abb. 8.5-5: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 2)

Das Maximum der Gesamttransportkraft bildet sich bei einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,44$ entsprechend 24 Zügen aus.

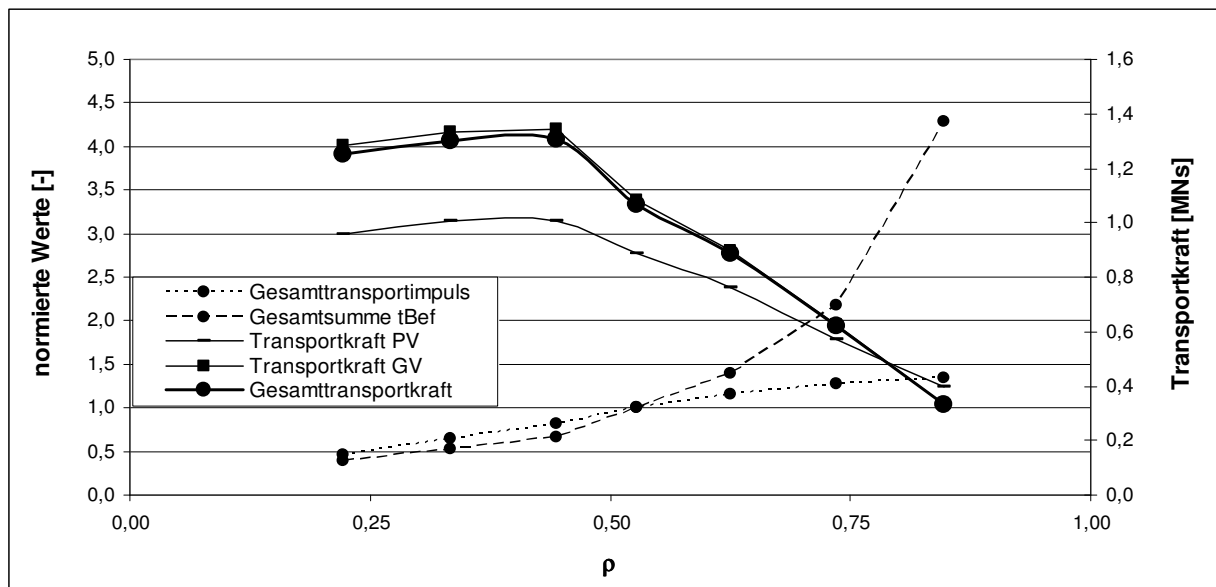


Abb. 8.5-6: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 3)

Das Maximum der Gesamttransportkraft liegt bei Variante 3 bei 30 Zügen, entsprechend einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,41$.

Auch bei der Transportkraft zeigt sich für Variante 3 der veränderte Anteil der beiden Güterzuggattungen für die physikalische Größe und beim Betriebsprogramm im Vergleich zu Variante 1. So beträgt beispielsweise der Anteil des Sg an der Transportkraft bei Variante 3 im Mittel circa 50 % im Vergleich zu 7 % bei Variante 1. Dies gibt den Anstieg des Anteils am Betriebsprogramm in etwa wieder.

Als Vergleichsgröße für die Transportkraft lässt sich die Produktivität aus der Betriebsleistung und den Kosten für jede Simulationsstufe bestimmen. In den nachfolgenden Abbildungen 8.5-7 und 8.5-8 ist die Produktivität der Transportkraft für die Varianten 2 und 3 gegenübergestellt.

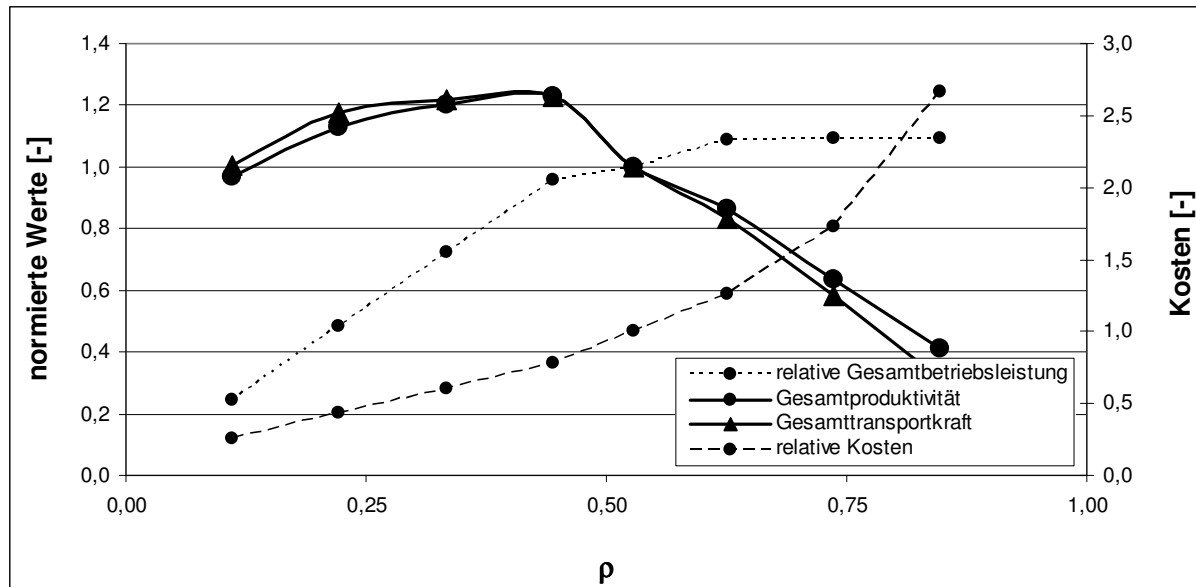


Abb. 8.5-7: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 2)

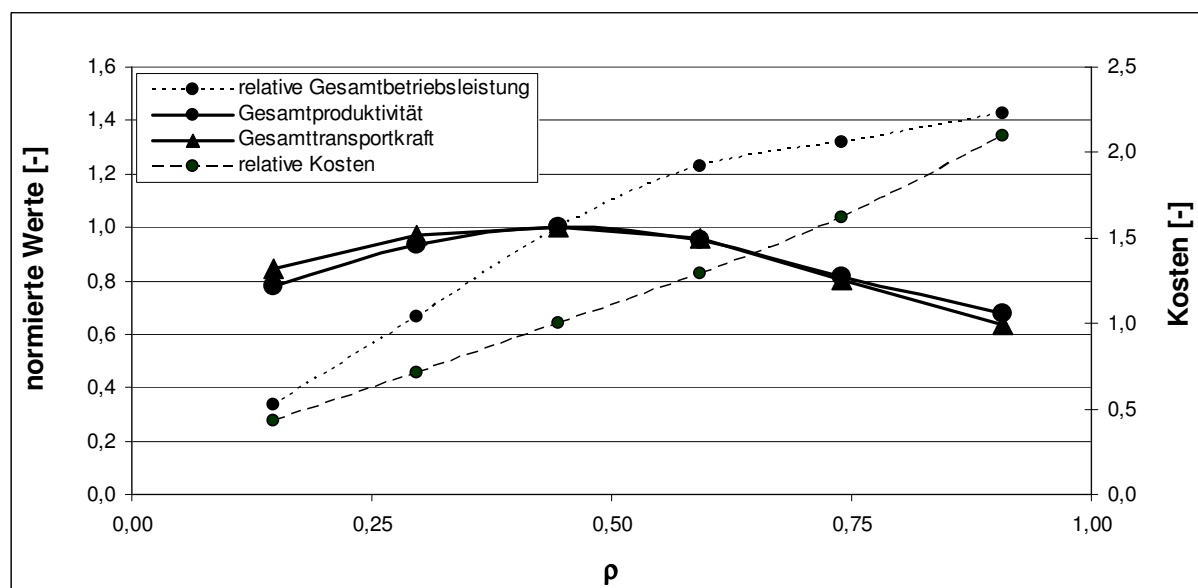


Abb. 8.5-8: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 3)

Die beiden Abbildungen 8.5-7 und 8.5-8 zeigen jeweils eine gute Übereinstimmung der Funktionen für die Gesamttransportkraft und die Gesamtproduktivität.

Das Maximum der Produktivität bildet sich bei Variante 2 bei 25 Zügen in 5 Stunden oder $\rho \approx 0,46$ aus und liegt damit an ähnlicher Stelle wie das Maximum der Transportkraft. Die Abweichungen zwischen den beiden Kurven betragen bei einer Auslastung von $\rho \approx 0,3$ circa -4 % und bei $\rho \approx 0,8$ circa 2 %.

Das Maximum der Produktivität bei Variante 3 liegt bei 30 Zügen in 6 Stunden oder $\rho \approx 0,41$ und bildet sich ebenfalls etwa an der gleichen Stelle wie das Maximum der Transportkraft aus. Die Abweichungen zwischen den beiden Kurven betragen für den Bereich der Auslastung zwischen $\rho \approx 0,3$ und $\rho \approx 0,8$ zwischen -4 % und 8 %.

Für die Berechnung der Transportimpulsdifferenz wird die Differenz zwischen dem Transportimpuls und der Summe der gewichteten Beförderungszeiten gebildet. Die beiden Abbildungen 8.5-9 und 8.5-10 zeigen die Werte für die zuggattungsspezifische Transportimpulsdifferenz sowie die Gesamttransportimpulsdifferenz als Funktion der Auslastung.

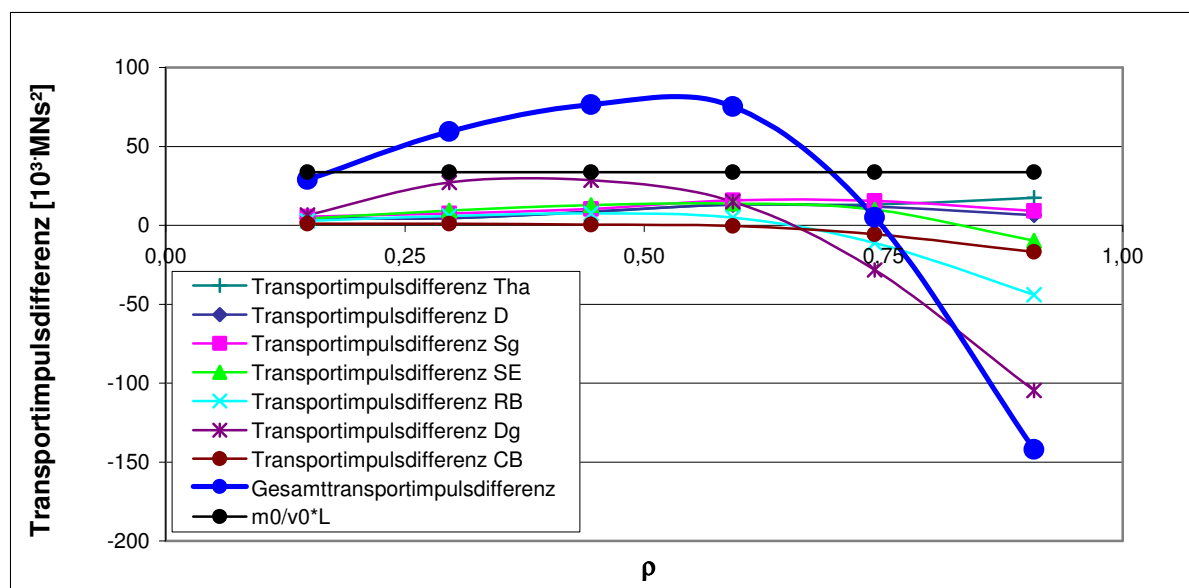


Abb. 8.5-9: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 2)

In Variante 2 bildet sich das Maximum der Gesamttransportimpulsdifferenz bei 27 Zügen aus, entsprechend einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,5$.

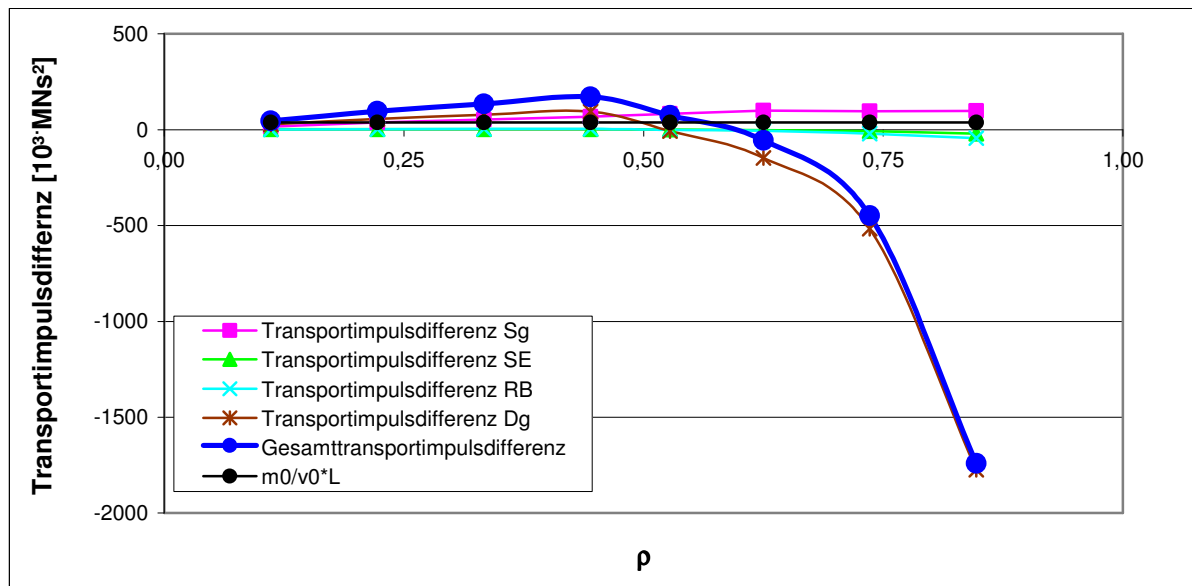


Abb. 8.5-10: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 3)

Das Maximum der Gesamttransportimpulsdifferenz liegt bei einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,46$ entsprechend 33 Zügen.

Wie Abbildung 8.5-10 zeigt, bestimmt der Dg aufgrund seines hohen Anteils und Gewichts bei dieser Variante den Verlauf der Gesamttransportimpulsdifferenzkurve noch stärker als bei Variante 1.

Für beide Varianten liegt das Maximum der Transportimpulsdifferenz bei einem um etwa 10 Prozentpunkte höheren Belegungsgrad als das Maximum der Transportkraft. Dies entspricht der relativen Lage der Maxima des Gewinns und der Produktivität zueinander, die sich aufgrund der Definition der beiden Größen notwendiger Weise ergibt.

Als Vergleichsgröße für die Lage des Maximums der Transportimpulsdifferenz lassen sich die Zuganzahlen für die drei Stufen der Betriebsqualität aus der DS405 [14] berechnen. Die Ergebnisse für die Variante 2 enthält Tabelle 8.5-1.

	sehr gute Betriebsqualität	befriedigende Betriebsqualität	mangelhafte Betriebsqualität
Zuganzahl	18 Züge	24 Züge	28 Züge
Belegungsgrad	0,33	0,44	0,52
zul l_{WB}	0,05	0,11	0,16

Tab. 8.5-1: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 2)

Der Vergleich für die Lage des Maximums aus Abbildung 8.5-9 mit der Zuganzahl bei befriedigender Betriebsqualität nach STRELE zeigt eine etwas höhere optimale Auslastung bei Verwendung der Transportimpulsdifferenz.

Ein Grund für diese Abweichung liegt in dem von STRELE verwendeten Maßstab. Zur Berechnung der zulässigen Länge der Warteschlange fließt in STRELE nur der Anteil der Reisezüge am Betriebsprogramm ein. Beispielsweise bleiben die unterschiedliche Ertragsstärken der Reisezüge oder die Verspätungsempfindlichkeit von hochwertigen Güterzügen unberücksichtigt.

So trägt eine Regionalbahn mit geringer Länge – und damit auch mit geringer Zugmasse – im Vergleich zu einem hochwertigen Thalys weniger zum Gesamtgewinn bei. In dem Maßstab in STRELE ist dieser Effekt nicht berücksichtigt.

Im Vergleich zu einem hochwertigen Güterzug würde die Regionalbahn aufgrund ihrer Zugmasse bei dem neuen Maßstab nur einen geringen Teil des Gesamtergebnisses ausmachen. Ihre Verspätungsanfälligkeit hat somit einen geringeren Einfluss auf die optimale Auslastung einer Eisenbahnstrecke als in dem Maßstab in STRELE angenommen.

In Variante 3 nimmt die zulässige Länge der Warteschlange (vgl. Gl. (3.1-1)) aufgrund des geringen Anteils der Reisezüge (18 %) einen fast doppelt so großen Wert wie in den Varianten 1 und 2 an. Die optimale Auslastung nach STRELE (vgl. Tab. 8.5-2) ist deshalb im Vergleich zu anderen Betriebsprogrammen relativ hoch.

	sehr gute Betriebsqualität	befriedigende Betriebsqualität	mangelhafte Betriebsqualität
Zuganzahl	30 Züge	38 Züge	43 Züge
Belegungsgrad	0,42	0,53	0,60
zul l_{WB}	0,10	0,20	0,30

Tab. 8.5-2: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 3)

Der Vergleich der Lage des Maximums aus Abbildung 8.5-10 mit der Zuganzahl bei befriedigender Betriebsqualität nach STRELE zeigt, dass sich das Maximum der Transportimpulsdifferenz bei einer geringfügig niedrigeren Auslastung ausbildet. Bei dieser Variante zeigt sich ebenfalls der, aufgrund seines hohen Gewichts und seines hohen Anteils am Betriebsprogramm, große Einfluss des Dg. Da die Änderung der Transportimpulsdifferenz des Dg wesentlich höher ist als die des Sg, bewirkt die hohe Transportimpulsdifferenz des Sg keinerlei Verschiebung des Maximums in den Bereich höherer Belegungsgrade.

Durch den Vergleich der Varianten 1 und 2 mit Variante 3 zeigt sich, dass sich durch die unterschiedlichen Eingangsgrößen in die Bewertungsmaßstäbe unterschiedliche optimale Auslastungen ergeben. Der neu entwickelte Maßstab berücksichtigt wesentlich mehr Eingangsgrößen und erlaubt dadurch eine umfassendere Bewertung. Die Lage des Maximums der Transportimpulsdifferenz bei Variante 3 ergibt sich aus der Kombination aus hohen Wartezeiten für den Dg und einem geringen Anstieg der Massen in Abhängigkeit von der Auslastung für andere Zuggattungen, insbesondere des Sg.

8.6 Variante 4: Anhebung der Streckengeschwindigkeit

Diese Variante ist ein Beispiel für die Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen als weiteres Anwendungsgebiet des Modells. Dabei wird eine Änderung der Streckengeschwindigkeit angenommen. Durch die im Modell verwendete bewertete Beförderungszeit anstelle der bewerteten Wartezeiten lassen sich nicht nur infrastrukturbedingte Veränderungen der Betriebsqualität auf ihre nachfragerrelevante Wirkung untersuchen sondern auch die Auswirkungen von Geschwindigkeitsänderungen bewerten.

Das Betriebsprogramm bleibt in dieser Variante gegenüber Variante 1 nahezu unverändert. Es steigen die Streckenhöchstgeschwindigkeit der einzelnen Streckenabschnitte und damit die Höchstgeschwindigkeiten der Thalys-, D-, Sg- und SE-Züge um 20 km/h. Dadurch ändern sich die Fahrzeiten auf der Strecke und damit die der Kostenberechnung zugrunde liegenden kostenrelevanten Fahrzeiten je Zuggattung und die bewertete Beförderungszeit.

Da die Auswirkungen der Geschwindigkeitsänderung gegenüber Variante 1 bewertet werden sollen, bildet die bewertete Fahrzeit bei Variante 1 die Bezugsgröße bei der Berechnung des Nachfragefaktors $f_{N,p}$. Es gilt:

$$f_{N,p} = \frac{t_{bew\ Fz\ Variante1}}{t_{bew\ Fz\ Variante4} + t_{bew\ W\ Variante4}}$$

Dadurch ist es möglich, dass der Faktor $f_{N,p}$ auch Werte größer Eins annimmt. Da sich die obere Schranke von Eins für diesen Faktor in Unterkapitel 6.2.3.1 lediglich aufgrund des gewählten Bezugspunktes ($t_{bew\ Bef\ 0} = t_{bew\ Fz}$) ergab, ist die Überschreitung dieser Schranke bei sinkenden Fahrzeiten zulässig.

Die gegenüber Variante 1 veränderten Werte für die kostenrelevante Fahrzeit und die Beförderungszeit im Zustand ohne Wartezeiten enthält Tabelle 8.6-1.

Modellzug	t_{Fz} [min]	t_{Bef} [min]
Tha	11,91	177
D	17,92	80
Sg	17,03	133
SE	25,77	26
RB	32,07	23
Dg	22,55	166
CB	21,51	18

Tab. 8.6-1: Fahrzeiten t_{Fz} und nachfragerrelevante Beförderungszeiten t_{Bef} der Modellzüge für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf (Variante 4)

Die Abbildung 8.6-1 zeigt die zuggattungsspezifischen Transportimpulse und den Gesamttransportimpuls für Variante 4.

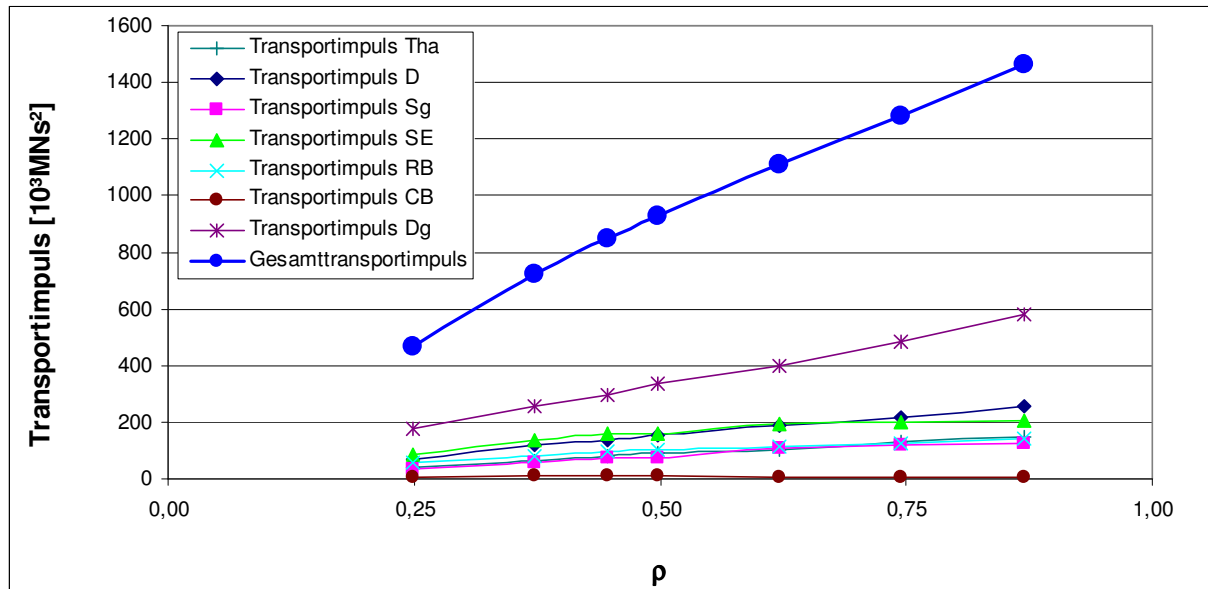


Abb. 8.6-1: Transportimpuls je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 4)

Ein Vergleich mit Abbildung 8.4-1 zeigt, dass die zuggattungsspezifischen Transportimpulse bei dieser Variante für den Sg, SE und RB geringfügig niedriger liegen, da sich deren Verspätungsniveau leicht erhöht hat.

Auch für diese Variante werden die Werte für den Transportimpuls im Personenverkehr mit den Werten für den Erlös nach Ackermann verglichen. Die Abbildung 8.6-2 zeigt die Gegenüberstellung des Gesamterlöses und des Gesamttransportimpulses für den Personenverkehr.

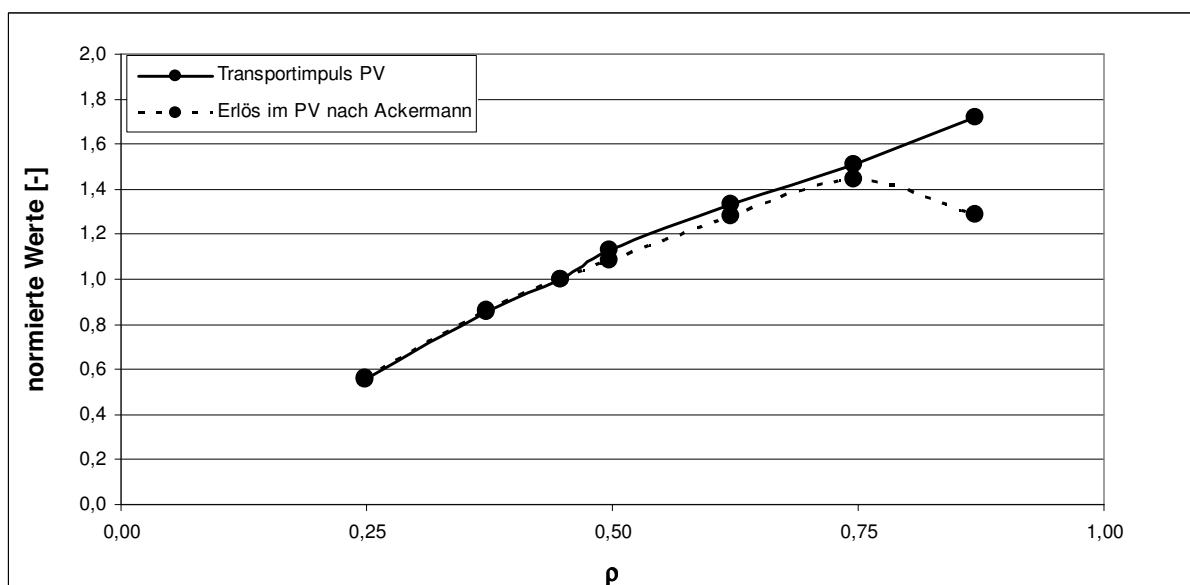


Abb. 8.6-2: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 4) normiert

Die Abweichungen zwischen den beiden Kurven sind insbesondere unter Berücksichtigung des Konvergenzverhaltens von [2] gering und betragen in den für die Betrachtung interessanten Bereichen der Auslastung circa 5 %.

Die Gesamttransportkraft ergibt sich als Quotient aus dem Gesamttransportimpuls und der Summe der gewichteten Beförderungszeiten über alle Zuggattungen je Simulationsstufe. Die nachfolgende Abbildung 8.6-3 enthält die Transportkraft für den Personen- und Güterverkehr und die Gesamttransportkraft.

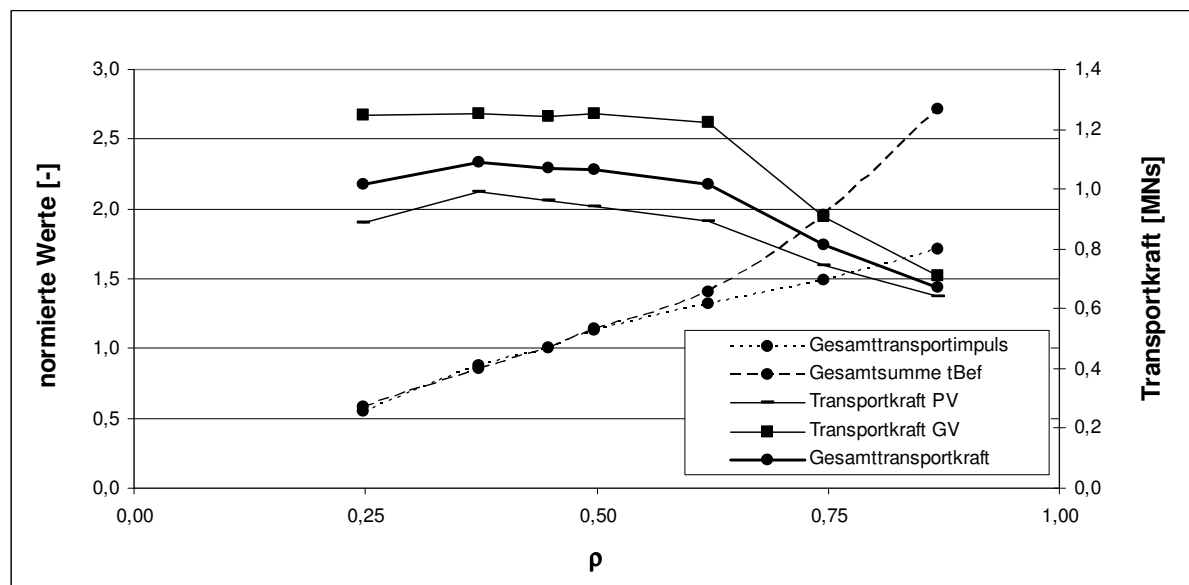


Abb. 8.6-3: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 4)

Das Maximum der Gesamttransportkraft bildet sich bei 70 Zügen aus, entsprechend einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,43$. Der Belegungsgrad, bei dem das Maximum der Produktivität erreicht wird, liegt gegenüber Variante 1 niedriger. Dies ergibt sich aufgrund der mit der höheren Spreizung verbundenen höheren Mindestzugfolgezeiten und den damit steigenden Wartezeiten.

Die Produktivität ist in der nachfolgenden Abbildung 8.6-4 der Gesamttransportkraft für die Variante 4 gegenübergestellt.

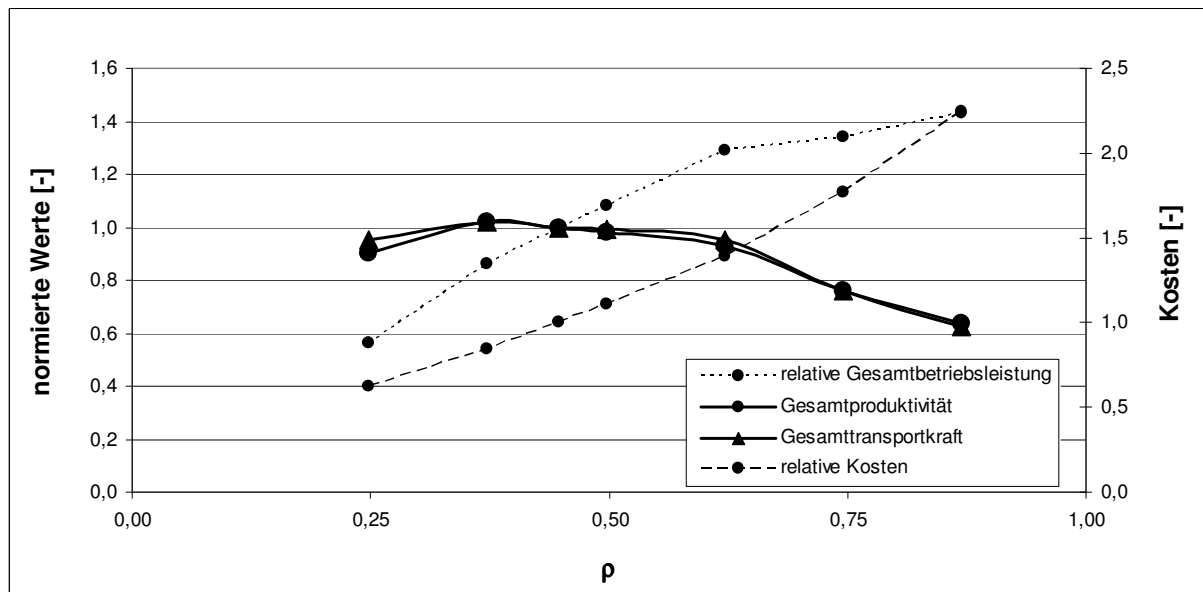


Abb. 8.6-4: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 4)

Die Abbildung zeigt, dass die beiden Kurven sehr gut übereinstimmen. Die Abweichungen liegen für den Bereich der Auslastung zwischen $\rho \approx 0,3$ und $\rho \approx 0,8$ zwischen -5 % und 1 %. Das Maximum der Produktivität bildet sich bei 70 Zügen in 17 Stunden und $\rho \approx 0,43$ aus und fällt somit mit dem Maximum der Gesamttransportkraft zusammen.

Das zuggattungsspezifische Ergebnis der Berechnung der Transportimpulsdifferenz und die Gesamttransportimpulsdifferenz für Variante 4 zeigt Abbildung 8.6-5.

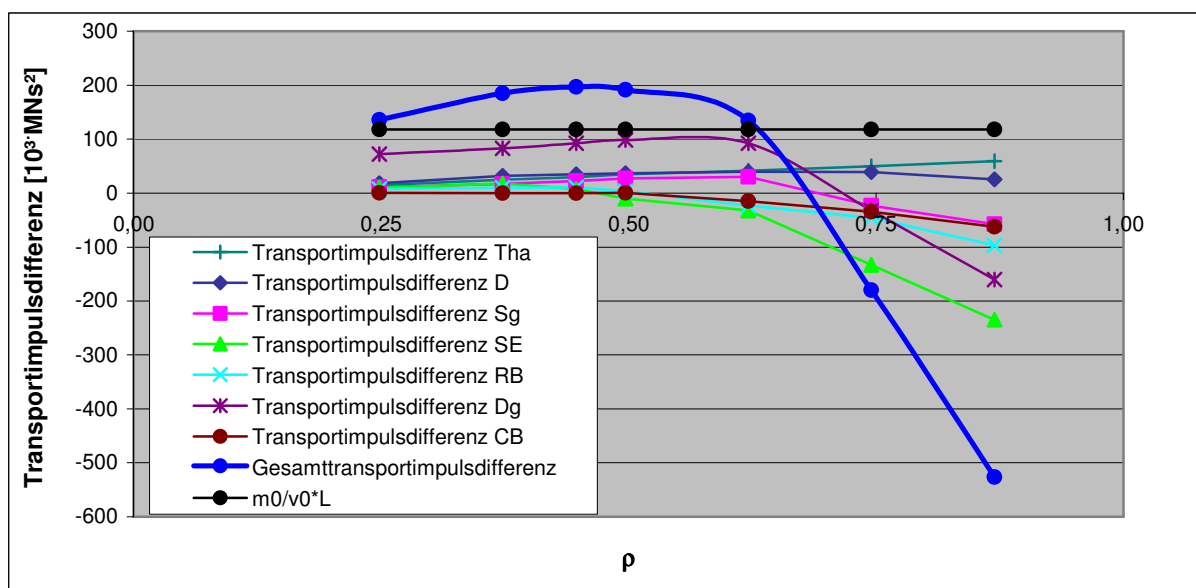


Abb. 8.6-5: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 4)

Das Maximum der Gesamttransportimpulsdifferenz liegt bei einem Belegungsgrad von $\rho \approx 0,45$, entsprechend 72 Zügen.

Da die Erhöhung der Streckenhöchstgeschwindigkeit bei einem Teil der Modellzüge zu einer Steigerung der Mindestzugfolgezeiten und somit des Belegungsgrades führt, erhöht sich bei gleicher Zuganzahl das Verspätungsniveau für alle Züge des Betriebsprogramms. So lässt sich gegenüber Variante 1 erkennen, dass sich das Maximum der Transportimpulsdifferenz bei einer geringeren Auslastung ausbildet. Die Reagibilität des neuen Modells ist somit auch für Infrastrukturmaßnahmen mit Wirkungen auf die Fahrzeit plausibel.

Gegenüber Variante 1 sind die Zuganzahlen auch nach STRELE für die einzelnen Stufen der Betriebsqualität geringer, da sich die zulässige Länge der Warteschlange nicht ändert, sich die Mindestzugfolgezeiten aber geringfügig erhöhen und somit die vorhandene Summe der Folgeverspätungen in STRELE bei gleicher Streckenbelastung höhere Werte annimmt. Die Zuganzahlen für die verschiedenen Stufen der Betriebsqualität nach DS405 [14] enthält Tabelle 8.6-2:

	sehr gute Betriebsqualität	befriedigende Betriebsqualität	mangelhafte Betriebsqualität
Zuganzahl	55 Züge	72 Züge	83 Züge
Belegungsgrad	0,34	0,45	0,52
zul l_{WB}	0,05	0,10	0,16

Tab. 8.6-2: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 4)

Der Vergleich der Abbildung 8.6-5 und der Werte aus Tabelle 8.6-2 zeigt, dass STRELE und der neue Maßstab auch bei dieser Variante ähnliche Ergebnisse liefern.

8.7 Betriebsprogramme mit starrem Takt

Fahrpläne mit starren Takten treten beispielsweise bei S-Bahnverkehren mit eigener Infrastruktur auf. Bei diesen Betriebsprogrammen sind alle Züge gleichrangig und verkehren im Fahrplan in zeitlich konstantem Abstand. Sofern sich verschiedene Taktfahrpläne überlagern, ist auch der resultierende Fahrplan ein Taktfahrplan.

Dadurch entstehen bei der Fahrplankonstruktion in dem für Leistungsuntersuchungen üblichen Bereich der Auslastung von $0 \leq \rho \leq 0,8$ quasi keine planmäßigen

Wartezeiten, weil sich die Züge aufgrund ihrer Ranggleichheit nicht behindern. Bei Erreichen der Leistungsfähigkeit divergieren die Wartezeiten, wie bei anderen Betriebsprogrammen auch. Der Verlauf der Funktion der Verspätungen über dem Belegungsgrad ist qualitativ ähnlich.

Die in Unterkapitel 7.2.2 aufgestellten Randbedingungen für die Kosten und Erlöse werden auch für diese Betriebsprogramme von der Summe der gewichteten Beförderungszeiten und dem Transportimpuls erfüllt. Für den Bereich zwischen diesen Grenzen lässt sich feststellen, dass wegen der für übliche Belegungsgrade fehlenden Wartezeiten die Transportkraft und die Transportimpulsdifferenz nahezu linear mit dem Belegungsgrad wachsen und sich somit hohe optimale Auslastungen ergeben. Aus gleichen Gründen beeinflusst das Verspätungsniveau über die außerplanmäßigen Wartezeiten die Fahrplan-Nennleistung beziehungsweise die Wirtschaftlichkeit des Betriebs auf der betrachteten Eisenbahnstrecke stärker als bei unvertaktetem Verkehr. Da sich bei vertaktetem gegenüber unvertaktetem Verkehr lediglich die Werte der Einflussgrößen nicht aber die Algorithmen, die der Herleitung der physikalischen Maßstäbe zugrunde liegenden betriebswirtschaftlichen Maßstäbe ändern, ermöglichen die physikalischen Größen somit ebenfalls eine Beurteilung des Leistungsverhaltens von Betriebsprogrammen dieser Art.

8.8 Fazit

Ziel des Kapitels 8 war die Bestimmung der verschiedenen physikalischen Größen und der Vergleich mit betriebswirtschaftlichen Größen anhand der Beispielstrecke Düren Hbf – Aachen Hbf. Dabei waren die Berechnung der physikalischen Größen darzustellen und die Güte der Übereinstimmung zwischen den betriebswirtschaftlichen und den physikalischen Ansätzen zur abermaligen Bestätigung der neuen Maßstäbe zu ermitteln. Grundlage der Untersuchung bilden vier Varianten, die sich hinsichtlich des Betriebsprogramms beziehungsweise des Infrastrukturausbaus der Strecke unterscheiden.

Die Gegenüberstellung der betriebswirtschaftlichen und physikalischen Größen für die Erlöse und die Produktivität zeigte eine hohe Übereinstimmung in dem für das Betreiben einer Eisenbahnstrecke relevanten Bereich der Auslastung. In den Bereichen höherer Auslastung treten beim Vergleich zwischen Erlösen und Transportimpuls systematische Abweichungen auf, die jedoch durch das fehlerhafte

Konvergenzverhalten des betriebswirtschaftlichen Vergleichsmaßstabs an der Polstelle ($\rho = 1$) bedingt sind.

Eine geringe Abweichung zeigt sich auch zwischen der mit STRELE ermittelten und der mit dem neuen Maßstabe bestimmten optimalen Auslastung. Diese Abweichungen bei den einzelnen Varianten lassen sich auf die unterschiedliche Art und Weise der Berechnung der Zuganzahl der optimalen Auslastung und die bei den Verfahren unterschiedlichen berücksichtigten Eingangsgrößen zurückführen.

Für die Transportimpulsdifferenz lässt sich zudem feststellen, dass sie im Bereich ihres Maximums relativ flach verläuft. Somit ist eine begrenzte Abweichung der Zuganzahl im Betrieb von der optimalen Auslastung immer noch wirtschaftlich vertretbar. Die Veränderung des Belegungsgrades ρ um $\pm 5\%$ bewirkt in allen untersuchten Varianten eine Veränderung der Transportimpulsdifferenz um maximal 2 %. Die für die Entwicklung des physikalischen Maßstabs angenommenen Vereinfachungen (vgl. Kap. 4.1), die zu einer leicht veränderten Lage des Maximums führen können, haben somit für die Praxis nur geringe Auswirkungen.

Der Vergleich der verschiedenen Varianten zeigt, dass die Werte einer Größe untereinander in Bezug auf ihre Höhe und die Lage des Maximums konsistent sind. Zudem ergibt der Vergleich der Werte der verschiedenen physikalischen Größen einer Variante, dass auch diese Werte in sich konsistent sind. Beispielsweise liegt das Maximum der Transportimpulsdifferenz immer bei einem höheren Belegungsgrad als das Maximum der Transportkraft.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden zwei auf betriebswirtschaftlichen Kriterien beruhende physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken entwickelt.

Insbesondere für die Trassenvergabe aber auch für die Betriebsführung muss dem Infrastrukturbetreiber ein objektiver Maßstab zur Ermittlung der über alle Unternehmen optimalen Auslastung einer Eisenbahnstrecke zur Verfügung stehen. Bisher konnte die wirtschaftlich optimale Auslastung von Eisenbahnbetriebsanlagen nicht über betriebswirtschaftliche Ansätze bestimmt werden. Für hierzu hilfsweise verwendete empirische Verfahren fehlte der Nachweis, dass die von ihnen ausgewiesene Fahrplan-Nennleistung etwa dem wirtschaftlichen Optimum entspricht.

In der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, die beiden betriebswirtschaftlichen Maßstäbe „Produktivität“ und „Gewinn“ durch auslastungsabhängige physikalische Größen anzunähern. Als Grundlage dafür waren auslastungsabhängige physikalische Größen für die Kosten und die Erlöse zu bestimmen.

Bei der theoretischen Herleitung dieser physikalischen Größen wurde ein besonderes Augenmerk auf die verwendete Methode gelegt. Anstelle des bei Arbeiten zu physikalischen Maßstäben bisher üblichen induktiven Vorgehens erfolgte eine allgemeingültige Herleitung aus den betriebswirtschaftlichen Maßstäben. Die physikalischen Maßstäbe als Ergebnis dieser Herleitung sind daher nahezu eindeutig.

Zur weiteren Absicherung der neuen Maßstäbe erfolgte diese Herleitung des Modells auf zwei voneinander unabhängigen Wegen.

Bei der physikalischen Herleitung konnten aus den sieben physikalischen Basisgrößen die für die Höhe der Kosten und der Erlöse relevanten Grundgrößen identifiziert werden. Diese Grundgrößen lassen sich – aufbauend auf den qualitativen Abhängigkeiten der betriebswirtschaftlichen Größen von den Grundgrößen – zu abgeleiteten physikalischen Größen zusammensetzen.

Parallel erfolgte eine Analyse bestehender betriebswirtschaftlicher Verfahren auf die Einflussgrößen und deren Relevanz für die Berechnung der betriebswirtschaftlichen Größen. Durch die Umsetzung der Einflussgrößen in physikalische Größen ergaben sich ebenfalls physikalische Ansätze.

Dabei gestaltete sich die Übertragung der Mengen und der Längen in physikalischen Größen vergleichsweise einfach. Die physikalische Modellierung der Nachfrage-reaktion war wesentlich anspruchsvoller.

Die Bestimmung der physikalischen Größe für die Reaktion der Nachfrage erfolgte zunächst anhand einer Modellstrecke, woran sich in einem weiteren Schritt die allgemeingültige Validierung dieser Hypothese anschloss. Die Grundlage für die Validierung bilden Anforderungen sowohl an das Konvergenzverhalten an den Grenzen des Definitionsbereichs als auch an den Funktionsverlauf zwischen diesen Grenzen in Abhängigkeit von der Auslastung einer Eisenbahnstrecke. Letztere ergeben sich aus den in Verkehrsnachfragemodellen, die eine Wartezeitbewertung ermöglichen, verwendeten Algorithmen. Durch den Vergleich der Anforderungen und des Funktionsverlaufs der Hypothese konnte die Hypothese für die physikalische Größe ohne Verwendung von Beispieluntersuchungen allgemeingültig validiert werden.

Die auf dies Weise durchgeführte theoretische Herleitung des Modells ergab, dass die Erlöse durch ein Produkt aus Masse und Beförderungsgeschwindigkeit und die Kosten durch die mit der Masse gewichtete Summe der Beförderungszeiten ausgedrückt werden können.

Die Methode zur Validierung der physikalischen Größen für die Nachfragereaktion war auch die Grundlage für die Validierung der abgeleiteten physikalischen Größen für die Produktivität und den Gewinn. Da beide Größen als Funktion der Auslastung ein Maximum ausbilden, ließ sich darüber hinaus die Lage der Maxima der physikalischen Größen allgemeingültig prüfen. Die theoretische Herleitung führte zu den beiden Größen „Transportkraft“ für die Produktivität und „Transportimpulsdifferenz“ für den Gewinn. Die Transportimpulsdifferenz stellt den Maßstab zur Bestimmung der optimalen Auslastung der Eisenbahnstrecke wie folgt dar:

$$\Delta p_{\text{Zugtg}}(\rho) = m_{\text{Zugtg}}(\rho) \cdot \left[\frac{L_{\text{Abschnitt}} \cdot t_{\text{bew Fz Zugtg}}}{t_{\text{bew Bef Zugtg}}(\rho)} - c_{K \text{ Zugtg}} \cdot t_{\text{Bef (Kosten) Zugtg}}(\rho) \right] - c_K \cdot \frac{m_0 \cdot L_{\text{Strecke}}}{v_0} \quad (7.3-8)$$

Dieses Vorgehen bot die Möglichkeit, die verfügbaren Erhebungsdaten und weitere für die Herleitung der physikalischen Größen vorhandene aber nicht verwendete Modelle, zur Bestätigung der neuen physikalischen Ansätze für den Erlös, die Produktivität und den Gewinn anhand von Beispielrechnungen zu verwenden.

Der so entwickelte physikalische Ansatz erfüllt die in Unterkapitel 4.2 gestellten Anforderungen. Er ermöglicht zur Beschreibung der Angebotsqualität nicht nur die Berücksichtigung der Regelbeförderungszeit. Der Ansatz erfasst ebenso die planmäßigen und außerplanmäßigen Wartezeiten der Strecke sowie der angrenzenden Knoten. Zusätzlich garantiert das neue Modell neben der Modellierung der Angebotsqualität aufgrund der allgemeingültigen Herleitung auch ihre zuverlässige Bewertung einschließlich des Endkundenverhaltens zur vollständigen Abbildung der Erlösänderungen.

Das neue Modell berücksichtigt sowohl die die Nachfrage bestimmenden Einflüsse aus der Betriebsqualität und die Betriebsführungskosten der EVU als auch die für die Wirtschaftlichkeit einer Eisenbahnstrecke bedeutsamen Investitions- und Betriebsführungskosten der Infrastruktur.

Als Eingangsgrößen nutzt das physikalische Modell die Ergebnisse der bekannten Verfahren zur Ermittlung der Wartezeiten und verwendet weitere leicht verfügbare physikalische Größen wie beispielsweise die Zugmasse und die Beförderungszeit. Die erforderlichen Daten für das Verfahren stehen somit aus den für Untersuchungen des Leistungsverhaltens erforderlichen oder daraus generierten Daten zur Verfügung. Aufgrund der besseren Verfügbarkeit der Eingangsgrößen lassen sich im stärkeren Maße als bei betriebswirtschaftlichen Modellen untersuchungsgebietsspezifische Eingangsgrößen verwenden. Damit ist ein Ziel der Arbeit erreicht, ein anwenderfreundliches Verfahren zu entwickeln.

Anhand des neuen Ansatzes lassen sich die Auswirkungen von Veränderungen des Betriebsprogramms und der Infrastruktur einer Eisenbahnstrecke und der angrenzenden Knoten mit vergleichsweise geringem Aufwand zuverlässig berechnen. Somit werden Untersuchungen von Infrastrukturmaßnahmen und Angebotskonzepten unterschiedlicher Art auf Basis betriebswirtschaftlicher Maßstäbe unter Verwendung physikalischer Größen deutlich vereinfacht. Zudem besteht zwischen den bisher in der Praxis auf empirischen Eichungen beruhenden Verfahren und den neuen physikalischen Größen eine gute Übereinstimmung.

Bei Vorliegen von detaillierteren, zuggattungsspezifischen Daten zur Verkehrsnachfrage wäre es zukünftig möglich, die im Ansatz verwendeten mittleren Reiseweiten für den Personennah- und -fernverkehr sowie den Güterverkehr durch Wegweitenhäufigkeitsverteilungen zu ersetzen. Eine detailliertere Datenbasis könnte es ebenfalls ermöglichen, eine stärkere Differenzierung der Erlösstärke der einzelnen Zugattungen im Güterverkehr vorzunehmen.

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.2-1: Fundamentaldiagramm für den Straßenverkehr.....	29
Abb. 3.2-2: Zusammenhang zwischen Wagenbestand und Weiterleitung [41]	33
Abb. 3.2-3: Normierte Verkehrsleistung EQN und relative Fahrplanempfindlichkeit $EMPF$ als Funktion des Belegungsgrades ρ [31]	37
Abb. 3.3-1: Prinzipskizze der Gewinnlinse [35]	42
Abb. 3.3-2: Kurve der Produktivität für verschiedene Mischungsverhältnisse [43]	44
Abb. 6.1-1: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Personenverkehr für die Beispielstrecke	79
Abb. 6.1-2: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Güterverkehr für die Beispielstrecke	79
Abb. 6.1-3: Betriebskosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Personenverkehr für die Beispielstrecke.....	80
Abb. 6.1-4: Betriebskosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Güterverkehr für die Beispielstrecke	81
Abb. 6.1-5: Gesamtkosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Gesamtverkehr für die Beispielstrecke.....	82
Abb. 6.1-6: Fixe Kosten des Fahrwegs und Größe m_0/v_0 je Streckenstandard	85
Abb. 6.1-7: Gesamtkosten und Summe der realisierten Beförderungszeiten für den Gesamtverkehr unter Verwendung des Äquivalents m_0/v_0 für die Beispielstrecke	86
Abb. 6.1-8: Gesamtkostenkurve und Summe der realisierten Beförderungszeiten bei Verdoppelung der Streckenlänge für die Beispielstrecke	89
Abb. 6.2-1: Beispielhafte Darstellung einer Eisenbahnstrecke und mit ihr bediente Relationen	91
Abb. 6.2-2: Schematischer Verlauf der Kurve des Faktors $f_{N,PV}$ in Abhängigkeit vom Belegungsgrad ρ	101

Abb. 6.2-3: Faktor $f_{N,IC}$ nach British Rail, VISEM, VIA-Widerstandsmodell und für verschiedene physikalische Ansätze.....	133
Abb. 6.2-4: Faktor $f_{N,SE}$ nach British Rail, VISEM, VIA-Widerstandsmodell, Standardisierter Bewertung und für verschiedene physikalische Ansätze	133
Abb. 6.3-1: Modal-Split-Reaktion für den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“, 5 - 15 t und > 300 km [4]	141
Abb. 6.3-2: Erlös je Zuggattung für unterschiedliche Berechnungsmethoden (normiert) (nach [30], [35]).....	148
Abb. 6.3-3: Faktor $f_{N,GV}$ nach BVU und für verschiedene physikalische Ansätze ..	154
Abb. 7.2-1: Modal-Split-Reaktion für den Güterbereich „Landwirtschaftliche Erzeugnisse, Nahrungs- und Futtermittel“, 5 - 15 t und > 300 km und Faktor $f_{N,p}$ [4].....	172
Abb. 7.2-2: Modal-Split-Reaktion für den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“, 5 - 15 t und > 300 km und Faktor $f_{N,p}$ [4].....	172
Abb. 7.3-1: Steigung der Faktoren $f_{N,p}$ und $f_{N,GV\ gr}$ für zwei Gütergruppen [4, eigene Berechnung]	214
Abb. 8.4-1: Transportimpuls je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 1)	228
Abb. 8.4-2: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 1), normiert.....	232
Abb. 8.4-3: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 1)	235
Abb. 8.4-4: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 1)	237
Abb. 8.4-5: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 1)	239
Abb. 8.4-6: Transportimpulsdifferenz für einen Zug je Zuggattung (Variante 1) ...	240

Abb. 8.5-1: Transportimpulse je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 2)	242
Abb. 8.5-2: Transportimpulse je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 3)	243
Abb. 8.5-3: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 2) normiert	244
Abb. 8.5-4: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 3) normiert.....	244
Abb. 8.5-5: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 2)	245
Abb. 8.5-6: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 3)	246
Abb. 8.5-7: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 2)	247
Abb. 8.5-8: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 3)	247
Abb. 8.5-9: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 2)	248
Abb. 8.5-10: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 3)	249
Abb. 8.6-1: Transportimpuls je Zuggattung und Gesamttransportimpuls (Variante 4)	253
Abb. 8.6-2: Gesamttransportimpuls und Gesamterlös nach [2] für den Personenverkehr (Variante 4) normiert.....	253
Abb. 8.6-3: Transportkraft für den Personen- und den Güterverkehr sowie Gesamttransportkraft (Variante 4)	254
Abb. 8.6-4: Produktivität nach [43] und Gesamttransportkraft (Variante 4)	255
Abb. 8.6-5: Transportimpulsdifferenz je Zuggattung und Gesamttransportimpulsdifferenz (Variante 4)	255

11 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.3-1: Stufen der Betriebsqualität [14].....	22
Tab. 5.3-1: Eignung physikalischer Größen für den physikalischen Maßstab	59
Tab. 6.1-1: Kostenkomponenten des Fahrwegs nach Einflussgrößen	63
Tab. 6.1-2: Kostenkomponenten im Personenverkehr nach Einflussgrößen	73
Tab. 6.1-3: Kostenkomponenten im Güterverkehr nach Einflussgrößen	73
Tab. 6.1-4: Eingangswerte für die Beispielrechnung [49]	76
Tab. 6.1-5: Gesamtanzahl der Züge je Simulationsstufe für die Beispielstrecke.....	77
Tab. 6.1-6: Wartezeiten je Zug und je Simulationsstufe für die Beispielstrecke.....	77
Tab. 6.1-7: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Personenverkehr für die Beispielstrecke	78
Tab. 6.1-8: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Güterverkehr für die Beispielstrecke	78
Tab. 6.1-9: Gesamtkosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Gesamtverkehr für die Beispielstrecke.....	82
Tab. 6.1-10: Äquivalent m_0/v_0 je Streckenstandard	85
Tab. 6.1-11: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Personenverkehr bei Verdoppelung der Streckenlänge für die Beispielstrecke	87
Tab. 6.1-12: Betriebskosten je Simulationsstufe nach Kostenkomponenten für den Güterverkehr bei Verdoppelung der Streckenlänge für die Bei- spielstrecke	88
Tab. 6.2-1: Zuggattungsspezifische Fahrzeitbewertungsfaktoren [35]	98
Tab. 6.2-2: Werte für die Parameter der $ZB_{RZ\ B}$ und Anteile der Reisezwecke (Auszüge aus [35])	99

Tab. 6.2-3: Zeitbewertungsfaktoren und Zuwachsverspätungen für die Beispielstrecke	122
Tab. 6.2-4: Mittlere Beförderungsweiten und bewertete Fahrzeiten für die Beispielstrecke	122
Tab. 6.2-5: Faktor $f_{N,PV}$ nach British Rail	124
Tab. 6.2-6: $e^{C_i \cdot t_{bew}^{Bef} \cdot Zuggtg}$ und Faktor $f_{N,PV}$ nach VISEM	126
Tab. 6.2-7: Faktor $f_{N,PV}$ nach dem VIA-Widerstandsmodell	127
Tab. 6.2-8: Faktor $f_{N,PV}$ nach der Standardisierten Bewertung.....	130
Tab. 6.2-9: Faktor $f_{N,PV}$ als Reziprokwert der bewerteten Beförderungszeit.....	131
Tab. 6.2-10: Faktor $f_{N,PV}$ für verschiedene physikalische Ansätze	132
Tab. 6.3-1: Spezifischer Erlös und Zuggattungen nach Produktionssystemen ([30], eigene Einschätzung).....	147
Tab. 6.3-2: Erlös je Zuggattung für unterschiedliche Berechnungsmethoden	147
Tab. 6.3-3: Physikalische Eigenschaften der Zuggattung je Simulationsstufe im Güterverkehr für die Beispielstrecke	148
Tab. 6.3-4: Bewertete Beförderungszeit je Simulationsstufe im Güterverkehr	149
Tab. 6.3-5: Eingangsgrößen für das Modell für die Bundesverkehrswegeplanung (Partiegrößen > 100t, ohne Massengüter)	150
Tab. 6.3-6: Nutzen der Bahn und Faktor $f_{N,GV}$ nach dem Modell der Bundesverkehrswegeplanung	151
Tab. 6.3-7: Faktor $f_{N,GV}$ den Güterbereich „NE-Metallerze, Schrott, Eisen, Stahl und NE-Metalle“ für die Beispielstrecke	151
Tab. 6.3-8: Gewichtungsfaktoren der drei Klassen für die Ermittlung des güterbereichsspezifischen Faktors $f_{N,Dg\ gr}$	152
Tab. 6.3-9: Faktor $f_{N,Dg}$ nach dem graphischen Verfahren.....	152
Tab. 6.3-10: Faktor $f_{N,Dg}$ für verschiedene physikalische Ansätze	153

Tab. 7.3-1: Zuggattungsspezifische Werte für die Proportionalitätskonstante $c_{K,Zuggtg}$ [16, eig. Berechnungen]	219
Tab. 8.3-1: Eigenschaften der Modellzüge für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf [u. a. 20].....	224
Tab. 8.3-2: Mischungsverhältnisse für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf.....	225
Tab. 8.4-1: Zuggattungsspezifische Wartezeiten bei der Trassenvergabe und Zuwachsverspätungen je Simulationsstufe für den Personenverkehr (Variante 1)	226
Tab. 8.4-2: Zuggattungsspezifische Wartezeiten bei der Trassenvergabe und Zuwachsverspätungen je Simulationsstufe für den Güterverkehr (Variante 1)	226
Tab. 8.4-3: Transportimpuls je Zuggattung und Gesamttransportimpuls je Simulationsstufe [$10^3 \cdot \text{MNs}^2$] (Variante 1)	228
Tab. 8.4-4: Werte für die Fahrzeitelastizität nach Ackermann [2].....	230
Tab. 8.4-5: Transportimpuls je Zuggattung und je Simulationsstufe für den Personenverkehr (Variante 1).....	231
Tab. 8.4-6: Erlöse je Zuggattung und je Simulationsstufe für den Personenverkehr (Variante 1)	231
Tab. 8.4-7: Folgeverspätungen je Zuggattung und Simulationsstufe (Variante 1).233	
Tab. 8.4-8: Summe der gewichteten Beförderungszeiten je Zuggattung und je Simulationsstufe [$10^3 \cdot \text{min}$] (Variante 1).....	234
Tab. 8.4-9: Gesamttransportimpuls, Summe der gewichteten Beförderungszeiten und Gesamttransportkraft je Simulationsstufe (Variante 1).....	235
Tab. 8.4-10: Dynamische Betriebsleistung nach Sauer [43], Kosten sowie Gesamtproduktivität (Variante 1)	236
Tab. 8.4-11: Gesamttransportimpuls, Summe der gewichteten Beförderungszeiten und Gesamttransportimpulsdifferenz je Simulationsstufe (Variante 1)	238
Tab. 8.4-12: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 1)	241

Tab. 8.5-1: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 2)	250
Tab. 8.5-2: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 3)	251
Tab. 8.6-1: Fahrzeiten t_{Fz} und nachfragerrelevante Beförderungszeiten t_{Bef} der Modellzüge für die Strecke Düren Hbf – Aachen Hbf (Variante 4)	252
Tab. 8.6-2: Ergebnisse der Berechnung mit STRELE (Variante 4)	256

12 Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Variable	Bedeutung
$\alpha_{ig} \cdot \beta_{jg} \cdot \gamma_{ijg}, c_t, \lambda$	Parameter des Modells der BVWP
A	Fläche (wird anhand beobachteter Werte ermittelt)
a	Beschleunigung eines Zuges
A_{ijm}	Modal-Split-Anteil des Verkehrsmittels m auf der Relation ij
$a_{ij}, \text{ÖPNV}$	ÖPNV-Anteil an der Summe der motorisierten Fahrten auf einer Relation ij
$\frac{A_{\text{Zuggtg } 1}}{A_{\text{Zuggtg } 0}}$	Wartezeitfaktor nach [35]
$A_{\text{Zuggtg } 0} = \frac{1}{\sum_m \frac{w_{\text{Zuggtg } 0}}{w_{m0}}}$	Verkehrsanteil der Bahn am Gesamtverkehr ohne Ansatz der Wartezeiten
$A_{\text{Zuggtg } 1} = \frac{1}{\sum_m \frac{w_{\text{Zuggtg } 1}}{w_{m1}}}$	Verkehrsanteil der Bahn am Gesamtverkehr bei Ansatz der Wartezeiten
$A_{\text{Zuggtg}, RZ}$	Anteil des Reisezwecks RZ an der Zuggattung
$\text{Bruttoerlös}_{\text{Zuggtg}}$	Bruttoerlös einer Zuggattung ohne Berücksichtigung der Einflüsse aus Wartezeiten
b_{Zuggtg}	Faktor für Erlösminderung aus einer planmäßigen Fahrzeitverlängerung
c_ε, c_κ	Proportionalitätskonstanten zur Berücksichtigung der betriebswirtschaftlichen Größenordnung der Kosten und Erlöse
c_E	mittlere Konstante zur Berücksichtigung der spezifischen Erlösstärke im PNV, PFV und GV
c_K	mittlere Konstante zur Berücksichtigung der spezifischen Kosten

$\Delta a_{ij, \text{ÖPNV}}$	Änderung des ÖPNV-Anteils zwischen Mit- und Ohnefall
Δp_{Gesamt}	Gesamttransportimpulsdifferenz einer Eisenbahnstrecke
Δp_{Zuggtg}	Transportimpulsdifferenz einer Zuggattung
E_{kin}	kinetische Energie des durchfließenden Wagenstroms
EL_b	Erwartungswert der Zugdichte
$EMPF$	relative Fahrplanempfindlichkeit
E_{pot}	potentielle Energie des Wagenbestands im Direktionsbezirk
EQ	Erwartungswert der Verkehrsleistung
EQN	Erwartungswert der normierten Verkehrsleistung
$Erlös_p$	Erlös mit physikalischen Größen
$Erlös_{\text{Zuggtg}}$	Erlös einer Zuggattung
$E_{\text{spez, GV}}$	spezifischer Erlös je Zugkilometer im Güterverkehr
$E_{\text{spez, PV}}$	spezifischen Erlös je Reisendem und Kilometer
ε_t	Gesamtzeitelastizität ($\varepsilon_t < 0$)
ET_F	Mittelwert der Fahrzeit
ET_V	mittlere Verweilzeit
ET_{WF}	Mittelwert der planmäßigen Wartezeiten
EW_i	Anzahl der Einwohner einer Zelle i
E_{Zuggtg}	Energie einer Zuggattung
$f(w_{ij})$	Widerstandsfunktion
F	Anzahl F der Reisenden je Zug
F_0	Anzahl der Reisenden je Zug ohne Ansatz von Wartezeiten
F_1	Anzahl der Reisenden je Zug bei Ansatz von Wartezeiten

F_{Gesamt}	Gesamttransportkraft
F_{ij}	Anzahl der Wege von Zelle i nach Zelle j
$F_{ij,Gesamt\ 0,E}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im Nachfragesegment „Erwachsene“ auf einer Relation ij im Ohnefall
$F_{ij,\ddot{O}PNV\ 0}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im ÖPNV im Ohnefall auf einer Relation ij
$F_{ij,\ddot{O}PNV\ 1}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im ÖPNV im Mitfall auf einer Relation ij
$F_{ij,\ddot{O}PNV,ind}$	Anzahl aller im ÖPNV induzierten Fahrten pro Werktag auf einer Relation ij
$F_{ij,\ddot{O}PNV\ 0,E}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im Nachfragesegment „Erwachsene“ im ÖPNV auf einer Relation ij im Ohnefall
$F_{ij,verl}$	Anzahl aller Fahrten pro Werktag im ÖPNV auf einer Relation ij , die im Mitfall gegenüber dem Ohnefall vom MIV auf den ÖPNV verlagert werden
$f_{N,GV}$	Faktor zur Berücksichtigung der Erlösminderung der Bahn durch Nachfrageveränderungen im Güterverkehr
$f_{N,GV\ BVWP}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung im Güterverkehr nach dem Modell der BVWP
$f_{N,GV\ gr}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung im Güterverkehr nach dem graphischen Modell
$f_{N,PV}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung der Bahn im Personenverkehr
$f_{N,PV\ BR}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung im Personenverkehr nach dem Modell von British Rail
$f_{N,SE\ StandBew}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung im Personenverkehr nach Modell der Standardisierten Bewertung
$f_{N,PV\ VIA}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung im Personenverkehr nach VIA-Widerstandsmodell
$f_{N,PV\ VISEM}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nachfrageänderung im Personenverkehr nach VISEM
FRW	Faktor Reisenden-Wirkung

F_{Zuggt_i}	Transportkraft einer Zuggattung
g	Erdbeschleunigung
$\text{Gewinn}(0)$	Gewinn einer Eisenbahnstrecke in Abhängigkeit vom Belegungsgrad
g_1, g_2, a_0	Koeffizienten der Modal-Split-Funktion aus [32]
h	technologische Höhe
$i_{\text{WE}i}$	Eingangswagenstrom
I_{Zuggtg}	Verkehrsstromstärke
k	Verkehrsdichte
$L_{\text{Abschnitt}}$	Länge des von einem Zug durchfahrenen Abschnitts der untersuchten Strecke
l_{Bf}	Bahnhofslänge
l_{S}	Länge des Systems
L_{Strecke}	Länge der Strecke
l_{WB}	Länge der Warteschlange
$l_{\text{WB zul}}$	zulässige Länge der Warteschlange
L_{Zug}	Länge des Zuges
$\frac{m_0}{v_0}$	Äquivalent für die fixen Kosten des Fahrweg
$M_M(w_{ij})$	Mobilitätsrate der Mobilen
m_{Wg}	Masse eines Wagens
$\overline{m_{\text{W}}}$	mittlere Wagenmasse
m_{Zug}	Masse des Zuges
m_{Zuggtg}	Masse einer Zuggattung als Produkt aus Masse des Zuges und Anzahl der Züge in der Zuggattung
η	Fahrzeitelastizität
n	Anzahl der im Betrachtungszeitraum t_U fahrenden Züge
Nettoerlös	Erlös unter Berücksichtigung der Wartezeiten
n_{max}	Leistungsfähigkeit

n_{opt}	Fahrplan-Nennleistung
n_{Um}	Anzahl der Umsteigevorgänge je Beförderungsfall
n_{Zugtg}	Anzahl der Züge einer Zuggattung
P_B	Dynamische Betriebsleistung
P_{Gesamt}	Gesamttransportimpuls einer Eisenbahnstrecke
P_{ij}	Wahrscheinlichkeit für Wahl des Zieles j für die Quellzelle i
p_n	Nutzungswahrscheinlichkeit für die Route n
p_{RZ}	Anteil der Reisezüge an allen Zugfahrten
p_{stat}	statischer Druck
p_{Stau}	Staudruck
p_V	Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Verspätungen
p_{Ve}	Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Einbruchsverspätung
P_{Zugtg}	Leistung eines Zuges
p_{Zugtg}	Transportimpuls einer Zuggattung
Q	Verkehrsstärke
Q_i	Quellaufkommen der Zelle i
$R(\rho)$	Produktivität einer Eisenbahnstrecke in Abhängigkeit vom Belegungsgrad
r_{abs}	absoluter Zeitaufschlag
$R_{in\ Zugtg}$	Widerstand aus der Beförderungszeit
r_{rel}	relativer Zeitaufschlag
RZ	Reisezweck
ρ	Belegungsgrad
ρ_{opt}	optimaler Belegungsgrad
$\sum_{Zugtg} (m_{Zugtg} \cdot t_{Bef(Kosten) Zugtg})$	Summe der realisierten Beförderungszeiten

$\sum t_{VF}$	Summe der Folgeverspätungen
t_a	Aufenthaltszeit im System
$\bar{t}_{Auf}$	mittlere Wagonaufenthaltszeit
t_{Bef}	realisierte Beförderungszeit
$t_{Bef(Kosten)Zuggtg}$	kostenrelevante Beförderungszeit
$\hat{t}_{BefZuggtg}$	Summe der gewichteten Beförderungszeiten
t_{bewBef}	bewertete Beförderungszeit
$t_{bewFzZuggtg}$	bewertete Fahrzeit einer Zuggattung
$t_{bewWZuggtg}$	bewertete Wartezeiten im Fahrplan und im Betrieb einer Zuggattung
t_{Fz}	Regelfahrzeit
T_{ijg}	Transportaufkommen für eine Relation ij und eine Gütergruppe g
TM_m	Teilmobilitätsrate für das Verkehrsmittel m
t_p	Pufferzeit
$\bar{t}_{Takt}$	mittlere Taktzeit
t_U	Betrachtungszeitraum
$\bar{t}_{Um}$	mittlere Umsteigezeit je Umsteigevorgang
$\bar{t}_V$	mittlere Verspätung der verspäteten Züge
t_{VA}	Ausbruchsverspätung
t_{VE}	Einbruchsverspätung
t_{VF}	Folgeverspätung
t_{VU}	Urverspätung
t_W	Wartezeiten
t_{WB}	außerplanmäßige Wartezeiten
t_{WF}	Wartezeiten im Fahrplan
t_{Zu}	Zugangs- und Abgangszeit

$U_0(Bahn)$	Nutzen des Verkehrsmittels Bahn im Zustand ohne Wartezeiten
$U_1(Bahn)$	Nutzen des Verkehrsmittels Bahn im Zustand mit Wartezeiten
$U_{const\ Bahn}$	Summe aller Nutzenattribute einschließlich Gewichtung für das Verkehrsmittel Bahn mit Ausnahme des Attributes „Beförderungszeit“
$U_{gij}(m)$	Nutzen der Bevölkerungsgruppe oder der Gütergruppe g bei der Wahl des Verkehrsmittels m von i nach j
$U_{t\ Bahn}$	Beförderungszeitnutzen der Bahn
V	Volumen
v	mittlere momentane Geschwindigkeit
v_{Bef}	Beförderungsgeschwindigkeit
$\bar{v}_{Bef}$	mittlere Beförderungsgeschwindigkeit
$VB(w_{ij})$	Verkehrsbeteiligungsquote
VM	Verkehrsmittel
w_{ij}	Widerstand für einen Weg von Zelle i nach Zelle j
$W_{ij,MIV}, W_{ij,ÖPNV}$	MIV- und ÖPNV-Gesamtwiderstand
$W_{ij,ÖPNV\ 0}, W_{ij,ÖPNV\ 1}$	ÖPNV-Gesamtwiderstand im Ohne- und Mitfall
W_{kin}	äußere Verkehrsenergie
w_n	Widerstand des Verkehrsmittels n
W_p	Verkehrswiderstände aus Preisen
W_t	Verkehrswiderstände aus Zeiten
W_{Zuggtg}	Arbeit einer Zuggattung
y	Wagenstrom
z	Wagenbestand
ZA_j	Zielattraktivität einer Zelle j
ZB	Zeitbewertungsfunktion

Z_j	Zielpotential in der Zelle j
$\bar{z}$	mittlere Mindestzugfolgezeit
$\bar{z.W}_B$	mittlere Anzahl der Bestandswagen

13 Literaturverzeichnis

- [1] **Aberle, Gerd:** Transportwirtschaft.
Dritte Auflage, Wolls Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, R. Oldenbourg Verlag München Wien 2000
- [2] **Ackermann, Till:** Die Bewertung der Pünktlichkeit als Qualitätsparameter im Schienenpersonenfernverkehr auf Basis der direkten Nutzenmessung. Forschungsarbeiten am Verkehrswissenschaftlichen Institut der Universität Stuttgart, Bericht 21, Stuttgart 1998
- [3] **Baselau, Christian:** Anwendungsmöglichkeiten der Größe „Transportkraft“ im Verkehrswesen.
Internetdokument http://verkehr.bauing.uni-weimar.de/opdownload/bas_tk_posen1999.pdf
- [4] **Beratergruppe Verkehr und Umwelt (BVU):** Güterfernverkehrsmodell
Untersuchungsbericht zum Forschungsprojekt Nr. 98 037/80 des Bundesministers für Verkehr Band I und II; Freiburg im Breisgau Dezember 1982
- [5] **Breimeier, Rudolf:** Kosten im Schienenpersonenfernverkehr. Beispiele aus einer Studie zur NBS Köln – Rhein/Main
Deutsche Bahn AG, GB Netz Mainz 1994; unveröffentlicht
- [6] **British Rail Board, Director Policy Unit:** Passenger Demand Forecasting Handbook.
o. O., 1986
- [7] **Bronstein, I.N.; Semendjajew, K. A.:** Taschenbuch der Mathematik.
11. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfurt/M. 1971
- [8] **BVU, ifo, ITP, PLANCO:** Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung.
Schlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (FE-Nr. 96.578/1999), München/Freiburg/Essen April 2001
- [9] **Deutsche Bahn AG (Hrsg.):** Geschäftsbericht 2001
Berlin 2002
- [10] **Deutsche Bahn AG (Hrsg.):** Geschäftsbericht 2002
Berlin 2003

-
- [11] **Deutsche Bahn AG (Hrsg.):** Geschäftsbericht 2003
Berlin 2004
- [12] **Deutsche Bahn AG:** Leistungsuntersuchungen von Eisenbahnbetriebs-
anlagen. Teilheft 01 Einführung in die Problematik, Grundlagen
Mainz 15.01.1994
- [13] **Deutsche Bahn AG:** Fahrwegkapazität. Modul 405.0102 Zeitverbrauch bei
Nutzung der Fahrwegkapazität
Berlin 01.12.1999
- [14] **Deutsche Bahn AG:** Fahrwegkapazität. Modul 405.0103 Abschnitts-
bezogene Kenngrößen
Berlin 10.05.2001
- [15] **Deutsche Bahn AG:** Infrastruktur gestalten. Modul 413.0301, Anhänge
A01 bis A10
Frankfurt am Main 01.01.2002
- [16] **DB Fernverkehr AG:** Grundlagen für die wirtschaftliche Bewertung in
PRIMA VERA 2.0
unveröffentlicht
- [17] **DB Netz AG:** Trassenpreise
Mainz 1994
- [18] **Deutsche Bundesbahn:** Dienstvorschrift für die Berechnung der Kosten
einer Zugfahrt
DS 454, Frankfurt am Main 1983
- [19] **DB Ressortgespräch:** Erweitertes Ressortgespräch Produktion.
In: Ergebnisniederschrift Deutsche Bundesbahn, Zentrale Hauptverwaltung,
Frankfurt am Main 1990, – unveröffentlicht – (zitiert in [2])
- [20] **Deutschen Bundesbahn / Deutsche Reichsbahn (Hrsg.):** Die Bahn in
Zahlen
Frankfurt am Main 1992
- [21] **Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung:** Verkehr in Zahlen
Der Bundesminister für Verkehr (Hrsg.), Bonn, verschiedene Jahrgänge

- [22] **Dilli, Gustav:** Ihre Majestät die Toleranz - Ein Vorstoß in das Grenzgebiet der Leistungsfähigkeit der Eisenbahnen.
In: ETR (1952), Hefte 1 und 2
- [23] **Drew, D. R.:** „Traffic Flow Theory and Control”
- [24] **DB Fernverkehr AG:** Erlöswerte.
unveröffentlicht
- [25] **Franke, Lothar:** Transportkraft als dreidimensionale Verkehrsmessgröße.
In: Straßenverkehrstechnik, November 2000
- [26] **Gienke, Helmuth:** Produktionscontrolling Teil 3,
In: Internetrecherche unter www.ebz-beratungszentrum.de/Organisation/prodcon3.htm
- [27] **Geschwendtner; Alt:** Produktivität bei der Deutschen Bundesbahn.
In: Die Bundesbahn 7 (1981) (zitiert in [43])
- [28] **Gransalke, Rüdiger:** Zur Anwendung des Gesetzes von *Bernoulli* auf den Fluß der Güterwagenströme im Rangierbahnhof.
In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen Dresden 30 (1983), Heft 4
- [29] **Gröger, Thomas:** Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 60 (2002)
- [30] **Heinisch, Roland:** Zukunft des Güterverkehrs der Deutschen Bahn AG.
In: Rail international / Schienen der Welt (1996), Heft 2/3
- [31] **Hertel, Günter:** Die maximale Verkehrsleistung und die minimale Fahrplanempfindlichkeit auf Eisenbahnstrecken.
In: ETR 41 (1992), Heft 10
- [32] **Hofmann, Ulrich:** Makromodell zur Netzbelastung und Transportgeschwindigkeit der Eisenbahn.
In: Eisenbahnpraxis 33 (1989), Heft 3

-
- [33] **Intraplan und VWI Stuttgart:** Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des ÖPNV und Folgekostenrechnung.
Version 2000, Stuttgart
- [34] **Jacobs, Jürgen:** Rechnerunterstützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs.
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 61 (2003)
- [35] **Jochim, Haldor E.:** Verkehrswirtschaftliche Ermittlung von Qualitätsmaßstäben im Eisenbahnbetrieb.
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 54 (1999)
- [36] **Kuchling, Horst:** Taschenbuch der Physik.
5.-7. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt (M) 1985
- [37] **Leutzbach, Wilhelm:** Überall ist Babylon - Ein Beitrag zu einigen Begriffen im Verkehrswesen.
In: Internationales Verkehrswesen 27 (1975), Heft 5
- [38] **Melzow, Rainer:** Strecken und ihre Standards.
In: Eisenbahningenieurkalender 1999, S. 431, Frankfurt am Main
- [39] **Mühlhans, Edmund:** Verspätungsgewichtung.
In: Anlage zur Sitzungsniederschrift der 27. Sitzung (1988) des Wissenschaftlichen Ausschusses für Bau- und Betriebstechnik der Deutschen Bundesbahn (WABB), Mainz 1989, unveröffentlicht
- [40] **Oetting, Andreas:** Angebotsabhängige Modellierung der reisezweck-spezifischen Verkehrserzeugung und Anwendung auf den städtischen Freizeitverkehr.
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 58 (2002)
- [41] **Potthoff, Gerhart:** Wagenbestand und Weiterleitung
In: Eisenbahnpraxis 29 (1985), Heft 2
- [42] **PTV:** Benutzerhandbuch VISEM 8.0
Karlsruhe

- [43] **Sauer, Wolfgang:** Die Produktivität von Eisenbahnstrecken.
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 35 (1984)
- [44] **Schierenbeck, Henner:** Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre.
15. überarbeitete und erweiterte Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien 1999
- [45] **Schwanhäußer, Wulf:** Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn.
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen 1974
- [46] **Schwanhäußer, Wulf; Schulze, Kurt:** Ermittlung von Qualitätsmaßstäben für die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Streckenabschnitts und Entwicklung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung von Endverspätungen. Forschungsarbeit für die Deutsche Bundesbahn, unveröffentlicht, Aachen 1982
- [47] **Schwanhäußer, Wulf; Wolf, Peter:** Leistungsfähigkeit und Bemessung von Bahnanlagen.
Veröffentlichung des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 41 (1987)
- [48] **Schwanhäußer, Wulf; Jochim, Haldor E.:** Neueichung der Qualitätsmaßstäbe.
Vorläufiger Schlussbericht, Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Aachen 1997, unveröffentlicht
- [49] **Schwanhäußer, Wulf:** Nennleistung aus der maximalen Transportkraft herleiten.
unveröffentlicht, Aachen 2000
- [50] **Internationaler Eisenbahnverband:** Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit der Eisenbahnbetriebsanlagen und der Betriebsqualität.
UIC-Kodex 406, 1. Ausgabe, Paris 01.01.1996
- [51] **Vogel, Antje:** Ansätze zur Bewertung von Zugverspätungen im Güterverkehr.
Studienarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau- und -betrieb, Aachen 1995

- [52] **Walther, Klaus:** Maßnahmenreagibler Modal-Split für den städtischen Personenverkehr – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendung. Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 45 (1991)
- [53] **Walther, Klaus:** Die P & R-Nachfrage und ihre Einflußgrößen. Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 53 (1997)

Anhang 1: Überprüfung der möglichen physikalischen Ansätze für den Faktor f_N

Die folgenden physikalischen Ansätze sind zu prüfen:

$$f_{N,1} \sim \frac{1}{(t_{bew\ Bef\ Zuggtg})^n} \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}^{\geq 1}$$

$$f_{N,2} \sim \frac{1}{e^{t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}} \quad \text{oder}$$

$$f_{N,3} \sim \frac{1}{\ln t_{bew\ Bef\ Zuggtg}}$$

Gemäß Kapitel 6.2.3.1 muss für den Faktor $f_N(\rho)$ gelten:

- Bedingung 1: $f_N(0) = 1$ mit $t_{bew\ Bef}(0) = t_{bew\ Fz}$
- Bedingung 2: $f_N(1) = 0$ mit $\lim_{\rho \rightarrow 1} t_{bew\ Bef}(\rho) = \infty$

Bedingung 1:

Durch Verwendung des Funktionswertes an der Stelle Null für die Normierung des Faktors wird Bedingung 1 erfüllt:

$$f_{N,1}(\rho) = \frac{t_{bew\ Fz}^n}{t_{bew\ Bef}^n}$$

$$f_{N,2}(\rho) = \frac{e^{t_{bew\ Fz}}}{e^{t_{bew\ Bef}}}$$

$$f_{N,3}(\rho) = \frac{\ln t_{bew\ Fz}}{\ln t_{bew\ Bef}}$$

Bedingung 2:

$$f_{N,1}(1) = \frac{t_{bew\ Fz}^n}{\lim_{\rho \rightarrow 1} t_{bew\ Bef}^n} = 0$$

$$f_{N,2}(1) = \frac{e^{t_{bew} F_z}}{\lim_{\rho \rightarrow 1} e^{t_{bew} B_{ef}}} = 0$$

$$f_{N,3}(1) = \frac{\ln t_{bew} F_z}{\lim_{\rho \rightarrow 1} \ln t_{bew} B_{ef}} = 0$$

Alle Ansätze erfüllen somit die Bedingung 2.

Damit sind alle drei untersuchten physikalischen Ansätze aufgrund ihres Konvergenzverhaltens an den Grenzen grundsätzlich geeignet, den Faktor f_N zu beschreiben.

Anhang 2: Vergleich der Ansätze für den Faktor f_N nach VISEM und VIA

Für beliebige Belegungsgrade $\rho > 0$ folgt nun der Nachweis, dass diese Aussage wahr ist:

$$f_{N,VIA}(\rho) > f_{N,VISEM}(\rho) \quad (\text{A 2-1})$$

Gemäß Gleichung (6.2-16) gilt für den Faktor $f_{N,VISEM}$:

$$f_{N,VISEM} = \frac{c_{12}}{c_{11} + e^{c_i \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot c_{13}}$$

mit

$$c_{11} = e^{U_{const\ Zuggtg}}$$

$$c_{12} = c_{11} + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zuggtg}} \cdot \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}} = c_{11} + e^{c_i \cdot t_{bew\ Fz\ Zuggtg}} \cdot c_{13}$$

$$c_{13} = \sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}}$$

Für den Faktor $f_{N,VIA}$ ergibt sich nach Gleichung (6.2-23):

$$f_{N,VIA} = \frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Bef\ Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})}$$

mit

$$c_1 = \frac{1}{w_{MIV}}$$

$$c_2 = w_{Zuggtg,0} = t_{Fz\ Zuggtg} \cdot ZB_{WF} + w_{Zuggtg,k}$$

Das Einsetzen in Gleichung (A 2-1) führt zu:

$$\frac{1 + c_1 \cdot c_2}{1 + c_1 \cdot (t_{bew\ Bef\ Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})} > \frac{c_{12}}{c_{11} + e^{c_i \cdot t_{bew\ Bef\ Zuggtg}} \cdot c_{13}}$$

Durch Ersetzen der Konstanten c_2 und c_{12} , Multiplikation mit den Nennern der beiden Brüche sowie Division durch c_{13} und mit $t_{bew\ Fz\ Zuggtg} = t_{Fz\ Zuggtg} \cdot ZB_{WF}$ ergibt sich:

$$\left[1 + c_1 \cdot (t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})\right] \cdot \left[\frac{c_{11}}{c_{13}} + e^{c_t \cdot t_{bew Bef Zuggtg}}\right] > \left[\frac{c_{11}}{c_{13}} + e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}\right] \cdot \left[1 + c_1 \cdot (t_{bew Bef Zuggtg} + w_{Zuggtg,k})\right]$$

Das Auflösen der Klammern liefert mit $t_{bew Bef Zuggtg} = t_{bew Fz Zuggtg} + t_{bew W Zuggtg}$:

$$\begin{aligned} & \frac{c_{11}}{c_{13}} + e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} \cdot e^{c_t \cdot t_{bew W Zuggtg}} + c_1 \cdot (t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}) \cdot \frac{c_{11}}{c_{13}} \\ & + e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} \cdot e^{c_t \cdot t_{bew W Zuggtg}} \cdot c_1 \cdot (t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}) \\ & > \frac{c_{11}}{c_{13}} + e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} + c_1 \cdot (t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}) \cdot \frac{c_{11}}{c_{13}} + c_1 \cdot t_{bew W Zuggtg} \cdot \frac{c_{11}}{c_{13}} \\ & + c_1 \cdot (t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}) \cdot e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} + c_1 \cdot t_{bew W Zuggtg} \cdot e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} \end{aligned}$$

Durch Subtraktion des ersten und dritten Summanden auf beiden Seiten der Ungleichung sowie Division durch $e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}$ und c_1 wird daraus:

$$\begin{aligned} & e^{c_t \cdot t_{bew W Zuggtg}} \cdot \left(\frac{1}{c_1} + t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k} \right) \\ & > \frac{1}{c_1} + \frac{c_{11}}{c_{13}} \cdot \frac{t_{bew W Zuggtg}}{e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}} + t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k} + t_{bew W Zuggtg} \end{aligned}$$

Durch Division mit $\left(\frac{1}{c_1} + t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k} \right)$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} & e^{c_t \cdot t_{bew W Zuggtg}} \\ & > \frac{1}{\frac{1}{c_1} + t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}} \cdot \left[\frac{1}{c_1} + t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k} + t_{bew W Zuggtg} \cdot \left(\frac{c_{11}}{c_{13}} \cdot \frac{1}{e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}}} + 1 \right) \right] \end{aligned}$$

Das Auflösen der Klammer in zwei Summanden führt zu:

$$e^{c_t \cdot t_{bew W Zuggtg}} > 1 + t_{bew W Zuggtg} \cdot \frac{\frac{c_{11}}{c_{13}} \cdot e^{c_t \cdot t_{bew Fz Zuggtg}} + 1}{\frac{1}{c_1} + t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}}$$

Der Bruch der rechten Seite lässt sich durch Ersetzen der Konstanten und mit $w_{Zuggtg,0} = t_{bew Fz Zuggtg} + w_{Zuggtg,k}$ umschreiben zu:

$$e^{c_i \cdot t_{bew W Zugtg}} > 1 + t_{bew W Zugtg} \cdot \frac{\frac{e^{U_{const Zugtg}}}{\sum_{VM \neq Bahn} e^{U_{VM}} \cdot e^{c_i \cdot t_{bew Fz Zugtg}}} + 1}{\frac{1}{\sum_{VM \neq Bahn} \frac{1}{w_{VM}}} + w_{Bahn 0}}$$

Das Zusammenfassen des Zählers mit $\frac{1}{e^{c_i \cdot t_{bew Fz Zugtg}}} = e^{U_{bew Fz Zugtg}}$ ergibt:

$$e^{c_i \cdot t_{bew W Zugtg}} > 1 + t_{bew W Zugtg} \cdot \frac{\frac{e^{U_{Bahn 0}}}{\sum_{VM} e^{U_{VM 0}} - e^{U_{Bahn 0}}} + 1}{w_{Bahn 0} \cdot \left(\frac{\frac{1}{w_{Bahn 0}}}{\sum_{VM} \frac{1}{w_{VM 0}} - \frac{1}{w_{Bahn 0}}} + 1 \right)}$$

Mit $A_{Bahn 0 VISEM} = \frac{e^{U_{Bahn 0}}}{\sum_{VM} e^{U_{VM 0}}}$ für das Modell in VISEM und $A_{Bahn 0 VIA} = \frac{1}{\sum_{VM} \frac{1}{w_{VM 0}}}$ für das

VIA-Widerstandsmodell wird daraus:

$$e^{c_i \cdot t_{bew W Zugtg}} > 1 + t_{bew W Zugtg} \cdot \frac{\frac{\frac{1}{\sum_{VM} e^{U_{VM}}} + 1}{e^{U_{Bahn 0}}} - 1}{w_{Bahn 0} \cdot \left(\frac{\frac{1}{\sum_{VM} \frac{1}{w_{VM 0}}} + 1}{\frac{1}{w_{Bahn 0}} - 1} \right)}$$

$$e^{c_i \cdot t_{bew W Zugtg}} > 1 + t_{bew W Zugtg} \cdot \frac{\frac{1}{A_{Bahn,0,VISEM} - 1} + 1}{\frac{1}{A_{Bahn,0,VIA} - 1} + 1} \cdot \frac{1}{w_{Bahn 0}}$$

Unter der Annahme $A_{\text{Bahn 0 VISEM}} = A_{\text{Bahn 0 VIA}}$ lässt sich die Ungleichung vereinfachen zu:

$$e^{c_t \cdot t_{\text{bew W Zugtg}}} > 1 + \frac{1}{w_{\text{Bahn 0}}} \cdot t_{\text{bew W Zugtg}}$$

Mit $e^x > 1 + x$ für $x > 0$ wird die linke Seite der Ungleichung abgeschätzt zu:

$$1 + c_t \cdot t_{\text{bew W Zugtg}} > 1 + \frac{1}{w_{\text{Bahn 0}}} \cdot t_{\text{bew W Zugtg}}$$

Die Subtraktion von eins und die anschließende Division durch $c_t \cdot t_{\text{bew W Zugtg}}$ führt zu:

$$c_t > \frac{1}{w_{\text{Bahn 0}}}$$

Diese Ungleichung ist mit $c_t \approx 0,06$ erfüllt für:

$$w_{\text{Bahn 0}} > \frac{1}{0,06} = 16,7$$

Diese Ungleichung wird nahezu immer erfüllt sein, da bereits die Zugangswiderstände der Bahn für jede Entfernung einen größeren Wert als $1/c_t$ annehmen. Somit ist die Aussage (A 2-1) für beliebige Belegungsgrade $\rho > 0$ wahr.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Antje Oetting

geb. Vogel

geboren am 25. Juli 1970

in Dresden

Nationalität: deutsch

verheiratet seit dem 23. Juni 2000 mit Dr. Andreas Oetting

Schul Ausbildung

1977 – 1987 Polytechnische Oberschule Meißen

1987 – 1989 Erweiterte Polytechnische Oberschule Meißen

Hochschulausbildung

WS 90/91 – WS 95/96 Studium des Bauingenieurwesens an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH Aachen), Vertieferrichtung "Verkehrswesen und Raumplanung"

SS 93 – WS 93/94 Auslandsstudium an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) mit Erasmus-Stipendium

Beruflicher Werdegang

04/96 – 09/96 Freiberufliche Tätigkeit für Prof. Schwanhäußer und Ingenieurbüro Heusch / Boesefeldt Aachen

10/96 – 12/97 Angestellte bei der DB AG, Geschäftsbereich Netz

01/98 – 04/02 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft / Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen, Professor Schwanhäußer, Professor Wendler

04/02 – 07/05 Angestellte der DB Fernverkehr AG, Bereich Angebotsplanung, Abteilung Modelle und Verfahren sowie Koordination Nah- und Fernverkehr

seit August 2005 Assistentin des Vorstands Marketing und Vertrieb der DB Netz AG