

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

**Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“**

Institut für Bahnsysteme und Öffentlichen Verkehr, Professur für Gestaltung von Bahnanlagen

---

## **Kurzfassung**

# **Verfahren zur Ermittlung des Einflusses von infrastrukturellen und betrieblichen Faktoren auf die spezifischen Kosten der Eisenbahninfrastruktur**

Von der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur

genehmigte Dissertation

Verfasser: Hassan Alsalamat  
Betreut durch: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fengler  
Eingereicht am: 23. Dezember 2011



## Ziel der Arbeit

Bei der Auslegung einer Eisenbahninfrastruktur stellt sich am Anfang der Vorplanung folgende Frage: Welche Infrastruktur gewährleistet die geforderte Betriebsleistung<sup>1</sup> und verursacht gleichzeitig die niedrigsten Kosten? Die Antwort auf diese Frage wird klassischerweise durch Entwicklung von einigen Infrastrukturvarianten<sup>2</sup> aus früheren Erfahrungen sowie an Hand von vordefinierten Standardvarianten gegeben. Die entwickelten Varianten werden betriebswissenschaftlich untersucht, um zu überprüfen, ob sie die geforderte Betriebsleistung erbringen können. Varianten, die dies nicht leisten, werden verworfen. Für die übrigen Varianten werden die Kosten berechnet und die günstigste Variante wird ausgewählt.

Da die erforderlichen Kosten- und Betriebsleistungsberechnungen aufwendig sind, führt das in der Regel zu einer Begrenzung der Anzahl untersuchter Varianten, was zur Folge hat, dass die Wahrscheinlichkeit, die optimale Infrastrukturvariante mit den niedrigsten Kosten nicht zu treffen, hoch ist.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur betrieblich-wirtschaftlichen Grundoptimierung der Infrastruktur, die auf funktionalen Zusammenhängen von Kosten und Betriebsleistung basiert. Eine funktionale Formulierung hat den Vorteil, dass das Auslegungsoptimum (geringste Kosten bei Erfüllung der Betriebsleistungsforderung) mittels Variation der Zugzahl und der Infrastrukturparameter (s.u.) durch Rechnung schnell ermittelt werden kann. Die funktionalen Zusammenhänge dienen somit als Grundlage zur Durchführung von Kosten- und Betriebsleistungsberechnungen von prinzipiell allen denkbaren Infrastrukturvarianten, um so die optimale Variante bezüglich des günstigsten Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu finden. Das Optimum wird ausgedrückt durch das Minimum der sog. „spezifischen Kosten“ (Kosten pro Zugtrassenkilometer, s.u.).

## Einflussfaktoren

Die in der Zielsetzung der Arbeit genannten funktionalen Zusammenhänge beschreiben die spezifischen Kosten der Eisenbahninfrastruktur in Abhängigkeit von drei infrastrukturellen (Bahnhofsabstand, Blocklänge und Gleisanzahl) und zwei betrieblichen Einflussfaktoren (Streckenhöchstgeschwindigkeit und Zugmischung<sup>3</sup>)<sup>4</sup>. Die fünf Einflussfaktoren wurden gewählt, weil sie bei gegebener

---

<sup>1</sup> Die Betriebsleistung einer Eisenbahnstrecke bezeichnet deren Fähigkeit Personen und Güter mit einer gewünschten Qualität in Bezug auf z. B. Wartezeiten, Schnelligkeit und Warteschlangenlänge zu fordern.

<sup>2</sup> Die Variation der Eisenbahninfrastruktur wird durch Änderung von betrieblichen (wie z. B. Geschwindigkeit und Zugmischung) und infrastrukturellen Komponenten (wie z. B. Gleisanzahl und Bahnhofsabstand) realisiert.

<sup>3</sup> Die Zugmischung wird durch Einsetzen von unterschiedlichen Zug-Typen mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten sowie unterschiedlichen Zugmassen durchgeführt.



Trassenanzahl den wesentlichen Einfluss auf die Betriebsleistung und den größten systematisch fassbaren, d.h. von Topographie und Besiedlung unabhängigen, Einfluss auf die Infrastrukturkosten haben.

### Infrastrukturkomponenten

Die Auswahl der in der Arbeit quantitativ berücksichtigten Infrastrukturkomponenten folgt der gleichen Logik: Es sind nur diejenigen Infrastrukturkomponenten in die Berechnungen einbezogen, die systematisch fassbar sind, einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtkosten haben und mit der Betriebsleistung bzw. betrieblichen Parametern in Zusammenhang stehen. Dies sind:

- Oberbau.
- Unterbau.
- Leit- und Sicherungstechnik.
- Oberleitung.

Diese Komponenten machen im Mittel etwa 70 % der gesamten Infrastrukturkosten aus.

### Ermittlung der Kosten in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

Die Kostenstruktur wird durch sechs Größen geprägt:

- Anschaffungskosten.
- Lebensdauer.
- Jährliche Erneuerungskosten (Jährliche Abschreibung).
- Instandhaltungskosten.
- Betriebserschwerungskosten.
- Gesamtkosten.

Die Anschaffungskosten ( $K_{An}$ ) sind die Summe der Anschaffungskosten der  $j$  Infrastrukturkomponenten (Oberbau (OB), Unterbau (UB), Leit- und Sicherungstechnik (LST) sowie Oberleitung (OL)):

$$\bullet \quad K_{An} = \sum_j K_{An,j} \quad [€]$$

*Gleichung 1: Anschaffungskosten*

- $j = OB, UB, LST, OL.$

---

<sup>4</sup> Diese beiden betrieblichen Einflussfaktoren werden gewählt, weil sie stark die Leistungsfähigkeit und die Erneuerungs- bzw. Instandhaltungskosten einer Eisenbahnstrecke beeinflussen.



Jede Infrastrukturkomponente ( $j$ ) hat eine bestimmte Lebensdauer ( $LD_j$ ) [a]. Aus den Anschaffungskosten und der Lebensdauer ergeben sich die Erneuerungskosten der Infrastruktur:

$$\bullet \quad K_{Em} = \sum_j \frac{K_{An.j}}{LD_j} \quad [\text{€/a}]$$

*Gleichung 2: Erneuerungskosten*

- $j = \text{OB, UB, LST, OL.}$

Die Erneuerungskosten haben in der Arbeit eine maßgebliche Bedeutung, da sie als Bezugsgröße zur Formulierung der Instandhaltungs- und Betriebserschwerniskosten verwendet werden. Danach ergeben sich die Instandhaltungskosten ( $K_{Ins}$ ) aus einem Instandhaltungsfaktor ( $f_{Ins}$ ) und den Erneuerungskosten:

$$\bullet \quad K_{Ins} = f_{Ins} \cdot K_{Em} \quad [\text{€/a}]$$

*Gleichung 3: Instandhaltungskosten*

Analog zu den Instandhaltungskosten ergeben sich die Betriebserschwerniskosten ( $K_{BE}$ ) aus einem Betriebserschwernisfaktor ( $f_{BE}$ ) und den Erneuerungskosten:

$$\bullet \quad K_{BE} = f_{BE} \cdot K_{Em} \quad [\text{€/a}]$$

*Gleichung 4: Betriebserschwerniskosten*

Die Gesamtkosten entsprechen der Summe aus den Erneuerungs- und Instandhaltungskosten sowie den Betriebserschwerniskosten:

$$\bullet \quad K_{ges} = K_{Em} + K_{Ins} + K_{BE} \quad [\text{€/a}]$$

*Gleichung 5: Gesamtkosten*

In Abbildung 1 ist die Herangehensweise zur Kostenmodellentwicklung dargestellt:

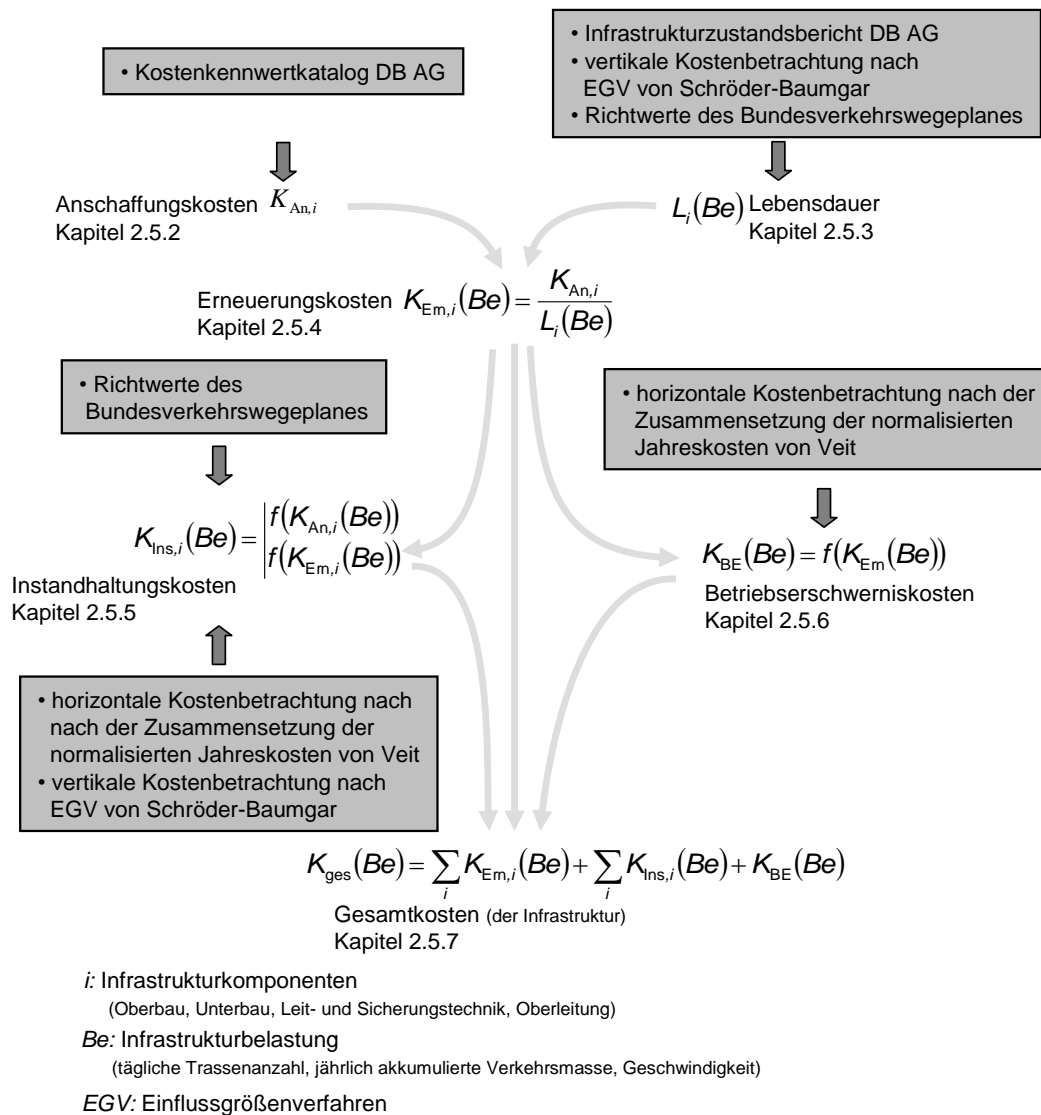


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kostenmodellentwicklung der Eisenbahninfrastruktur

### Ermittlung der Betriebsleistung in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

Die Betriebsleistung einer Eisenbahninfrastruktur ist als Produkt aus der Anzahl der befahrbaren Trassen und der Streckenlänge definiert. Für die Ermittlung der maximal möglichen täglichen Trassenanzahl und demzufolge der betrieblichen Leistungsfähigkeit wird das Programm STRELE eingesetzt. Dafür wurden mikroskopische Modelle von Eisenbahnstrecken mit einer Gesamtlänge von 102,15 km erstellt, die auf den Streckenstandards M160 und R120 der DB AG fußen. Sie sind durch folgende Informationen gekennzeichnet:

- Zahl der Streckengleise auf der freien Strecke und im Bahnhofsbereich.
- Art und Anzahl der Bahnhöfe.
- Lage der einzelnen Bahnhöfe.



- Sicherungssystem.
- Hauptsignale mit Signalzugschlussstellen (Blockteilung).
- Kilometrierung.

Im Bereich eines jeden Bahnhofes sind zusätzlich Informationen zu folgenden Parametern enthalten:

- Fahrstraßenzugschlussstellen.
- Haltepositionen für Betriebshalte.
- Haltepositionen für Verkehrshalte der Reisezüge.

Die Grundmodelle wurden bezüglich der untersuchten Einflussfaktoren infrastrukturell und betrieblich variiert. Schließlich wurde für jeden Einflussfaktor ein funktionaler Zusammenhang zwischen der laut STRELE maximal möglichen Trassenanzahl und dem jeweiligen Einflussfaktor abgeleitet.

#### Bewertung und Optimierung der spezifischen Kosten der Eisenbahninfrastruktur in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren

Die spezifischen Kosten ( $k_{spez}$ ) sind der Quotient aus den Gesamtkosten ( $K_{ges}$ ) und der Betriebsleistung in Form der Zugtrassenkilometer ( $P_B$ ). Die Ermittlung und Minimierung der spezifischen Kosten der Infrastruktur erfolgt durch Bestimmung der Kosten in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren und von der Zugzahl bis hin zur maximal möglichen Trassenanzahl, siehe Abbildung 2. Es zeigt sich, dass sich das günstigste Kosten-Nutzen-Verhältnis unterhalb der maximalen Trassenanzahl einstellt, bedingt durch den progressiven Verlauf der Betriebserschwerungskosten. Minimale spezifische Kosten werden also erzielt, wenn die Trassenanzahl auf diese optimale Trassenanzahl der Infrastruktur eingestellt ist. Das heißt, dass beim *Neubau* einer Eisenbahnstrecke versucht werden sollte, die Infrastruktur genau auf diesen „Arbeitspunkt“ auszulegen. Im Unterschied dazu gibt es für die betriebswirtschaftliche Optimierung von *Bestandsstrecken* zwei prinzipielle Möglichkeiten. Entweder wird die gewünschte Trassenanzahl auf die optimale Trassenanzahl der Infrastruktur begrenzt oder aber die optimale Infrastruktur auf die gewünschte Trassenanzahl angepasst. In der Praxis kann in der Regel von der ersten Möglichkeit kein Gebrauch gemacht werden, da die Eisenbahnverkehrsunternehmen das Anrecht auf die Zuweisung einer Trasse haben, solange die Streckenleistungsfähigkeit noch nicht erschöpft ist (freier Netzzugang). Damit verbleibt in der Praxis nur der zweite Weg, d.h. die Anpassung der Infrastruktur an die Nachfrage. Hierfür sind 2 Varianten denkbar:

Die zu fahrende Trassenanzahl ist größer als die optimale Trassenanzahl, d.h. die Infrastruktur ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht unterdimensioniert.

Die zu fahrende Trassenanzahl ist kleiner als die optimale Trassenanzahl, d.h. die Infrastruktur ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht überdimensioniert.

Ob eine Anpassung sinnvoll ist, muss im Einzelfall auch unter Berücksichtigung der anfallenden Anpassungskosten entschieden werden.

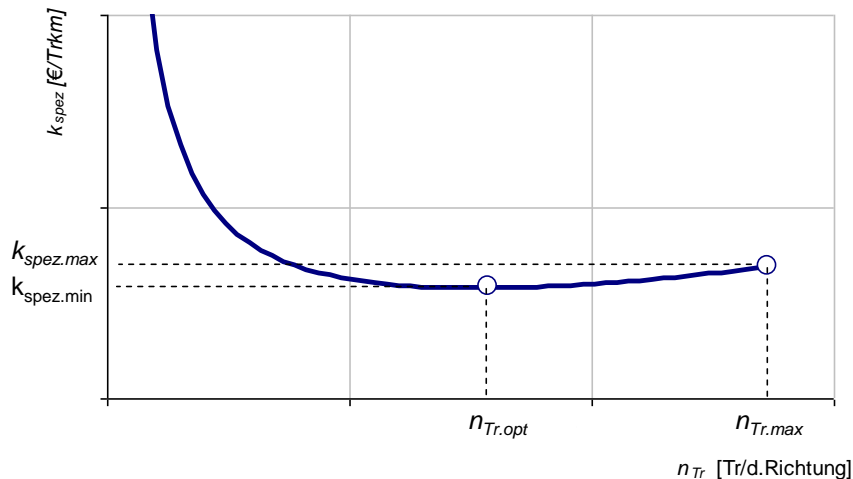


Abbildung 2: Spezifische Kosten in Abhängigkeit von der Trassenanzahl – Minimum und Maximum

### Zusammenfassung und Ausblick

Der wesentliche Inhalt der Arbeit ist die Erarbeitung einer Methodik, mit deren Hilfe die Kosten einer Eisenbahnstrecke je fahrbarer Zugtrasse, basierend auf Streckenstandards der Deutsche Bahn AG, berechnet werden können. Damit ist es möglich, in einer frühen (strategischen) Phase der Planung des Neu- oder Ausbaus von Eisenbahnstrecken eine erste Orientierung darüber zu erhalten, welche Kombination von Infrastrukturauslegung und möglicher Trassenanzahl zu betriebswirtschaftlich günstigen Verhältnissen führt. So wird unter betriebswirtschaftlicher Sicht, d.h. sowohl unter Berücksichtigung des betrieblichen Nutzens in Form fahrbarer Züge als auch der dafür im Lebenszyklus aufzuwendenden Kosten, die Entscheidung unterstützt, ob z.B. eine Strecke ein- oder zweigleisig ausgelegt werden sollte oder z.B. welchen Abstand Überholungsbahnhöfe haben sollten. Ebenso kann die günstigste Streckenhöchstgeschwindigkeit im Spannungsfeld von Infrastrukturkosten und Trassenanzahl ermittelt werden.

Eine interessante Erkenntnis der Untersuchungen ist, dass sich das Optimum in Form minimaler spezifischer Kosten nicht an der Leistungsfähigkeitsgrenze der Eisenbahnstrecken (fahrbare Zugzahl bei befriedigender Betriebsqualität) einstellt, sondern deutlich darunter. Dies ist zurückzuführen auf die mit der Streckenbelegung überproportional ansteigenden Betriebserschwerungskosten im



Zuge von Instandhaltungsarbeiten. Während die spezifischen Kosten zwischen dem Optimalpunkt und der Leistungsfähigkeitsgrenze jedoch nur schwach ansteigen, nehmen sie unterhalb des Optimalpunkts bei abnehmender Zugzahl stark zu.

Anliegen der Arbeit war es, grundlegende Zusammenhänge zwischen betrieblicher Leistung und entstehenden Kosten aufzuzeigen. Aus Gründen der Modellkomplexität und in Übereinstimmung mit den verwendeten Quellen wurde deshalb im Kostenmodell eine statische Betrachtungsweise angewendet, d.h. der Zeitpunkt des Anfalls von Kosten und Nutzen sowie kalkulatorische Zinsen blieben unberücksichtigt. In aufbauenden Arbeiten zu diesem Thema könnten entsprechende Erweiterungen vorgenommen werden. Gleiches gilt für den Einbezug weiterer Kostenkomponenten, z.B. auf der Grundlage angenommener Standardtopografien wie Flachlandstrecke, Mittelgebirgsstrecke oder Bergstrecke.