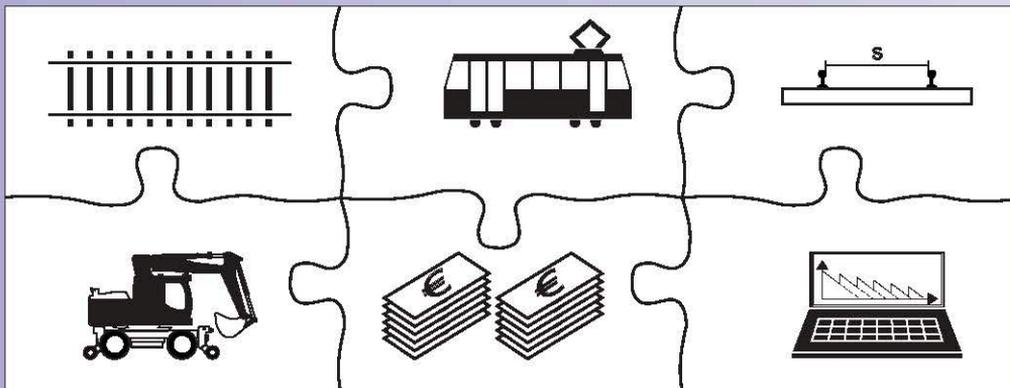


CHRISTIAN KOLLENBERG



Konzept für eine systematische Erhaltung der Gleisinfrastruktur von urbanen Schienenverkehrssystemen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Impressum:

Wissenschaftliche Arbeit Nr. 77 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Kollenberg, Christian „Konzept für eine systematische Erhaltung der Gleisinfrastruktur von urbanen Schienenverkehrssystemen“, Dissertation 13.07.2016

ISBN 978-3-87154-609-9

Copyright© 2017 bei DVV Media Group GmbH | Eurailpress, Heidenkampsweg 73-79, D-20097 Hamburg, Telefon +49 (0) 40 237 14 - 03. Telefax +49 (0) 40 237 14 - 236, E-Mail: eurailpress@dvvmedia.com

Alle Rechte der Verbreitung und Wiedergabe vorbehalten. Übersetzungen in eine andere Sprache, Nachdruck und Vervielfältigungen – in jeglicher Form und Technik, auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Verlags gestattet.

Eine Publikation der DVV Media Group

**Eurail
press**

WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Nr. 77

**Konzept für eine systematische Erhaltung
der Gleisinfrastruktur von urbanen
Schienenverkehrssystemen**

Christian Kollenberg

2017

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 16. Juni 2016

Disputation am: 13. Juli 2016

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Siefer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba

Vorwort

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) ist ein Teil der Daseinsvorsorge in der Bundesrepublik Deutschland. Meist ist es nicht möglich, kostendeckende Fahrpreise zu erheben. Um den Kostendeckungsgrad zu erhöhen, versuchen die Unternehmen einerseits durch eine höhere Kundenattraktivität die Einnahmen zu steigern, andererseits gleichzeitig durch Optimierungen in der Betriebsabwicklung und einen kostengünstigeren Fahrweg die Kosten des ÖPNV zu senken. Für urbane Schienenverkehrssysteme ist der Oberbau ein entscheidender Kostentreiber. Aus diesem Grund ist es sehr sinnvoll hier nach Kostensenkungspotenzialen zu suchen. Zu den urbanen Schienenverkehrssystemen gehören Straßenbahn-, Stadtbahn- und U-Bahn-Systeme. Sie sind dort geeignet, wo die Kapazitätsgrenze von Bussen überschritten wird.

Während es für die sogenannten Vollbahnen, das sind die Eisenbahnen, die nach dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG) betrieben werden, vielfältige Ansätze zur Beschreibung und Optimierung des Oberbaus gibt, sind die Vorgaben hierzu im Bereich der Bahnen nach dem Personenbeförderungsgesetz (PBefG) vielfältig und wenig allgemein verbindlich.

In der Arbeit wird aufgezeigt, welche Richtlinien sich aus welchen Gesetzen ableiten lassen und warum die Anforderungen für Bahnen gemäß AEG andere sind als für urbane Schienenverkehrssysteme gemäß PBefG. Die Untersuchungen erfolgen anhand verschiedener Kriterien wie Höchstgeschwindigkeit, Radsatzlast, maximale Zuglänge, Mindestbogenradius, Energieversorgung, Abstandhaltung oder Art des Bahnkörpers. Es folgt die Analyse der Gleisinfrastruktur der urbanen Schienenverkehrssysteme. Dabei wird ermittelt, welche Oberbauarten vorhanden sind und welche Oberbauarten beim Neubau von Strecken oder bei der Instandsetzung von Streckenabschnitten zur Anwendung kommen. Bei der Ermittlung der Nutzungshäufigkeit der Gleisinfrastruktur wird nach Schienenfahrzeugen und ggf. auch Straßenfahrzeugen unterschieden. Neben der Anzahl an Fahrten je Zeitintervall werden zusätzlich die Fahrzeugtypen berücksichtigt. Außerdem wurden bei einigen Verkehrsunternehmen die Instandhaltungsmaßnahmen nach den Teilbereichen Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung getrennt erhoben. Durch mehrere Inspektionen desselben Streckenabschnitts zu unterschiedlichen Zeitpunkten konnte die Veränderung des Zustands ermittelt werden.

Hieraus werden wichtige Kriterien zur Ermittlung des Verschleißverhaltens abgeleitet. Auf dieser breiten Basis und beispielhaften Detailuntersuchungen bei einzelnen Verkehrsbetrieben gründen die Konzepte für eine Modellierung. Anschließend werden Strategien zur Lebenszykluskosten(LCC)-basierten Instandhaltung beschrieben. Durch die Kombination der Strategien der LCC-basierten Instandhaltung und der Nutzungsdauerprognose mittels Verschleißmodell steht ein Konzept zur systematischen Erhaltung der Gleisinfrastruktur zur Verfügung. Damit ist es den Verkehrsunternehmen möglich, die Entscheidungsgrundlagen für die meist erheblichen Investitionen im Gleisinfrastrukturbereich abzusichern.

Kurzfassung

Christian Kollenberg: „Konzept für eine systematische Erhaltung der Gleisinfrasturktur von urbanen Schienenverkehrssystemen“

Stichwörter: Straßenbahn, Stadtbahn, U-Bahn, Nutzungsdauer, Infrastruktur, Lebenszykluskosten

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst urbane Schienenverkehrssysteme in Deutschland beschrieben und in ihrer Entwicklung dargestellt. Zu den urbanen Schienenverkehrssystemen gehören Straßenbahn-, Stadtbahn- und U-Bahn-Systeme. Die Eigenschaften und Ausprägungen dieser Systeme werden mit denen des Eisenbahnbereichs verglichen und die Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufgezeigt. Es folgt die Analyse der Gleisinfrasturktur der urbanen Schienenverkehrssysteme. Dabei wird ermittelt, welche Oberbauarten vorhanden sind und welche Oberbauarten beim Neubau von Strecken oder bei der Instandsetzung von Streckenabschnitten zur Anwendung kommen. Anschließend wird eine Auswahl von Oberbauarten getroffen, die bei den weiterführenden Untersuchungen berücksichtigt wird.

Der zweite Schritt der Datenerfassung ist die Ermittlung der Nutzungshäufigkeit der Gleisinfrasturktur durch Schienenfahrzeuge und ggf. auch durch Straßenfahrzeuge. Neben der Anzahl an Fahrten je Zeitintervall werden zusätzlich die Fahrzeugtypen berücksichtigt. Die Fahrzeugflotten der urbanen Schienenverkehrssysteme sind teilweise homogen und teilweise inhomogen. Auch die Zugbildung von Einzelfahrzeugen muss berücksichtigt werden.

Die Instandhaltungsmaßnahmen werden möglichst kleinteilig erfasst, um sie einzelnen Streckenabschnitten zuordnen zu können. Die Instandhaltungsmaßnahmen werden nach den Teilbereichen Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung getrennt erhoben. Durch Inspektionen wird der Zustand der Infrastruktur ermittelt. Dies kann z. B. durch Messungen aber auch durch visuelle Prüfungen geschehen. Durch mehrere Inspektionen desselben Streckenabschnitts zu unterschiedlichen Zeitpunkten lässt sich die Veränderung des Zustands ermitteln.

Auf der Grundlage der ermittelten Daten der Oberbauarten, der Nutzungshäufigkeit und der Instandhaltungsmaßnahmen wird ein Verschleißmodell zur Nutzungsdauerprognose der Gleisinfrasturktur entwickelt. Dieses erlaubt es, in Abhängigkeit von dem Zeitintervall der vorhandenen Daten, das Verhalten der Gleisinfrasturktur zu prognostizieren. Wartungs-, Instandsetzungs- und Verbesserungsmaßnahmen werden berücksichtigt. Zum Teil wurden die Daten von den Verkehrsunternehmen, die urbane Schienenverkehrssysteme betreiben, zur Verfügung gestellt, zum Teil sind diese Daten aus öffentlich zugänglichen Quellen gewonnen worden.

Anschließend werden Strategien zur Lebenszykluskosten-basierten Instandhaltung beschrieben. Durch die Kombination dieser Strategien und der Nutzungsdauerprognose mittels Verschleißmodell steht ein Konzept zur systematischen Erhaltung der Gleisinfrasturktur zur Verfügung. Durch eine weitergehende detaillierte Datenerfassung können die Aussagekraft und der Prognosezeitraum des in der Arbeit entwickelten Konzepts verbessert werden. Damit ist es den Verkehrsunternehmen möglich, die Entscheidungsgrundlagen für die meist erheblichen Investitionen im Gleisinfrasturkturbereich abzusichern.

Abstract

Christian Kollenberg: „Concept for a systematic preservation of rail track infrastructure of urban rail traffic systems“

Keywords: tram, light rail, underground, useful life, infrastructure, life-cycle cost

This thesis „Concept for a systematic preservation of rail track infrastructure of urban rail traffic systems“ (German: „Konzept für eine systematische Erhaltung der Gleisinfrastruktur von urbanen Schienenverkehrssystemen“) characterises the urban rail traffic systems in Germany and their historical development. Tram systems, light rail systems and underground rail systems belong to the group of urban rail transport systems. The properties and characteristics of these systems are compared to those of railway systems and the commonalities and the differences are highlighted. The infrastructure of the urban rail traffic systems is analyzed. It is determined which types of track superstructure are used for building new route sections or for repairing existing route sections. A selection is made, which track superstructure types should be researched in detail.

The second step of data acquisition is to determine the frequency of train runs and if necessary the frequency of cars and trucks. In addition to the number of rail and road vehicles the vehicle type must be considered. The vehicle fleets of urban rail traffic systems are partly homogeneous and partly inhomogeneous. The marshaling of individual vehicles must be taken into account.

The maintenance tasks are recorded precisely, to be able to assign them to the route sections. The process of maintenance could be separated into four parts: inspection, service, repair and enhancement. Inspections show the infrastructure conditions. Measurements can be taken or visual checks. It is possible to describe the development of the infrastructure conditions by comparing the measured values of the same location for different times.

Based on the obtained superstructure data, the intensity of use and the maintenance work a wearing model will be developed. This model should be used to estimate the service time of the rail track of urban rail traffic systems. Also maintenance, repair and improvement measures will be considered. Some of the data was provided by the transportation companies, other data was determined from public sources.

Then strategies for life-cycle-costing-based maintenance are described. With the combination of the wearing model and the strategies for life-cycle-costing-based maintenance a concept for a systematic preservation of rail track infrastructure of urban rail traffic systems is available. A further detailed data collection could improve the significance and the forecast period of the concept. The transportation companies will get the possibility to secure the basis for decisions on the most substantial investments in track infrastructure.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|---|-------------|
| I | Abbildungsverzeichnis | IV |
| II | Tabellenverzeichnis | VI |
| III | Abkürzungsverzeichnis | VII |
| IV | Glossar | VIII |
| V | Formelzeichen | IX |
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Urbane Schienenverkehrssysteme in Deutschland | 5 |
| 2.1 | Rechtliche Rahmenbedingungen | 5 |
| 2.2 | Definition: urbane Schienenverkehrssysteme | 6 |
| 2.3 | Gegenüberstellung: EBO-Bereich und BOStrab-Bereich..... | 6 |
| 2.3.1 | Höchstgeschwindigkeit | 7 |
| 2.3.2 | Radsatzlast | 7 |
| 2.3.3 | Maximale Zuglänge | 7 |
| 2.3.4 | Mindestbogenradius | 8 |
| 2.3.5 | Energieversorgung | 8 |
| 2.3.6 | Abstandhaltung | 9 |
| 2.3.7 | Art des Bahnkörpers | 9 |
| 2.4 | Entwicklung der urbanen Schienenverkehrssysteme..... | 9 |
| 2.5 | Vergleich der urbanen Schienenverkehrssysteme | 11 |
| 2.5.1 | Spurweite und Stromsystem..... | 12 |
| 2.5.2 | Fahrzeuganzahlen und Streckennetzlängen | 14 |
| 2.5.3 | Verkehrsleistung | 15 |
| 2.6 | Entwicklung der Fahrgastnachfrage | 16 |
| 2.7 | Datenerhebung | 17 |
| 3 | Gleisinfrasturktur urbaner Schienenverkehrssysteme | 19 |
| 3.1 | Definition: Gleisinfrasturktur | 19 |
| 3.2 | Anforderungen an die Gleisinfrasturktur..... | 19 |
| 3.3 | Oberbauarten..... | 20 |
| 3.3.1 | Literatur- und Internetrecherche | 20 |
| 3.3.2 | Datenbestand der Verkehrsunternehmen | 21 |
| 3.3.3 | Relevante Oberbauarten | 28 |
| 3.4 | Weitere Quellen für Infrastrukturdaten | 29 |
| 3.4.1 | Geoinformationssystem OpenStreetMap | 30 |
| 3.4.2 | Programm Google Earth..... | 37 |
| 3.4.3 | Vermessungsämter der Länder | 38 |
| 4 | Nutzung der Gleisinfrasturktur urbaner Schienenverkehrssysteme | 41 |
| 4.1 | Nutzung durch Schienenfahrzeuge | 41 |
| 4.1.1 | Klassifizierung der Fahrzeuge | 41 |
| 4.1.2 | Einsatzhäufigkeit der Fahrzeugtypen/-klassen..... | 41 |
| 4.2 | Nutzung durch Straßenfahrzeuge | 42 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.1 | Fahrzeugklassen | 42 |
| 4.2.2 | Befahrungsrichtung..... | 42 |
| 4.3 | Datenermittlung | 43 |
| 4.3.1 | Daten der Verkehrsunternehmen | 43 |
| 4.3.2 | Fahrbahnauskunftssystem DB Vertrieb GmbH | 43 |
| 4.3.3 | Fahrplanbücher..... | 44 |
| 5 | Instandhaltungsstrategien der Gleisinfrastruktur urbaner Schienenverkehrssysteme | 47 |
| 5.1 | Wartung | 48 |
| 5.1.1 | Reinigung der Gleisanlage und der Weichen..... | 49 |
| 5.1.2 | Vegetationskontrolle und Vegetationspflege | 50 |
| 5.1.3 | Schleifen der Schienen..... | 51 |
| 5.1.4 | Schmierer der Schienen und der Spurkränze | 52 |
| 5.2 | Inspektion | 52 |
| 5.3 | Instandsetzung | 53 |
| 5.3.1 | Schienenbearbeitung (Schleifen und Auftragsschweißen)..... | 53 |
| 5.3.2 | Schienenwechsel..... | 53 |
| 5.3.3 | Wechsel der Schienenbefestigung und der Schwellen | 54 |
| 5.3.4 | Bettungsaustausch und Bettungsreinigung | 54 |
| 5.3.5 | Stopf- und Richtarbeiten..... | 54 |
| 5.3.6 | Erneuerung der Eindeckung und der Fugen | 54 |
| 5.3.7 | Erneuerung des Untergusses..... | 55 |
| 5.4 | Verbesserung | 55 |
| 5.5 | Technische Aufsichtsbehörde | 55 |
| 6 | Nutzungsdauerprognose für die Gleisinfrastruktur urbaner Schienenverkehrssysteme | 57 |
| 6.1 | Beschreibung des Verschleißmodells | 57 |
| 6.1.1 | Betriebsbelastung | 58 |
| 6.1.2 | Oberbauart..... | 64 |
| 6.1.3 | Trassierung..... | 64 |
| 6.1.4 | Berücksichtigung der Instandhaltungsmaßnahmen | 65 |
| 6.1.5 | Nutzungsdauer | 66 |
| 6.2 | Definition des Verschleißmodells | 67 |
| 6.2.1 | Betriebsbelastung: Schienenfahrzeuge..... | 67 |
| 6.2.2 | Oberbauart..... | 70 |
| 6.2.3 | Trassierung..... | 70 |
| 6.2.4 | Instandhaltungsmaßnahmen | 71 |
| 6.2.5 | Berechnung der Nutzungsdauer..... | 71 |
| 6.3 | Anwendungsbeispiele..... | 71 |
| 6.4 | Grenzen der Prognose | 74 |
| 6.5 | Handlungsempfehlungen..... | 75 |
| 7 | Lebenszykluskosten-basierte Instandhaltung der Gleisinfrastruktur urbaner Schienenverkehrssysteme | 77 |
| 7.1 | Grundlagen der Lebenszykluskostenrechnung | 77 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7.1.1 | Kalkulatorischer Zinssatz..... | 77 |
| 7.1.2 | Barwert einer Zahlung | 78 |
| 7.1.3 | Berechnung der Lebenszykluskosten..... | 79 |
| 7.1.4 | Berechnung der Annuitäten..... | 79 |
| 7.2 | Kostendaten der Verkehrsunternehmen..... | 79 |
| 7.3 | Ermittlung der Infrastrukturkosten | 80 |
| 7.3.1 | Kosten der Neubauprojekte..... | 80 |
| 7.3.2 | Streckennetzweite Betrachtung der Instandhaltungskosten | 82 |
| 7.3.3 | Vergleich der Lebenszykluskosten | 87 |
| 7.4 | Möglichkeit zur Anwendung der Lebenszykluskosten-Berechnung und deren Grenzen..... | 92 |
| 8 | Zusammenfassung | 93 |
| 9 | Literatur- und Quellenverzeichnis | 95 |
| 10 | Anhang | 107 |

I Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-01: Grundlegende Gesetze und Verordnungen des Eisenbahn-, Straßenbahn- und Omnibusbereichs | 5 |
| Abbildung 2-02: Entwicklung der Anzahl der urbanen Schienenverkehrssysteme ^[18] | 10 |
| Abbildung 2-03: Urbane Schienenverkehrssysteme in Deutschland ^[22] | 12 |
| Abbildung 2-04: Spurweiten und Stromsysteme der urbanen Schienenverkehrssysteme in Deutschland ^[22] | 13 |
| Abbildung 2-05: Kumulierte Verteilungsfunktion der Fahrzeuganzahl und Streckennetzlänge ^{[9][25][26]} | 14 |
| Abbildung 2-06: Kumulierte Verteilungsfunktion der Verkehrsleistung ^[26] | 15 |
| Abbildung 2-07: Verkehrsaufkommen Liniennahverkehr in Deutschland im Jahr 2015 ^[29] | 16 |
| Abbildung 2-08: Relative Änderung des Verkehrsaufkommens, 2015 zu 2014 ^[29] | 16 |
| Abbildung 2-09: Kennzahlen ausgewählter urbaner Schienenverkehrssysteme ^[31] | 17 |
| Abbildung 3-01: Prinzipskizze des Ablaufs der Zusammenarbeit mit den Verkehrsunternehmen ^[30] | 21 |
| Abbildung 3-02: Querschnitt eingedeckter Oberbau ^[35] | 23 |
| Abbildung 3-03: Querschnitt offener Oberbau ^[35] | 23 |
| Abbildung 3-04: Querschnitt Grünes Gleis ^[35] | 24 |
| Abbildung 3-05: Strukturierte Einteilung der Oberbauarten, Stufe 1 | 24 |
| Abbildung 3-06: Querschnitt Schotteroberbau ^[35] | 25 |
| Abbildung 3-07: Querschnitt Feste Fahrbahn ^[35] | 25 |
| Abbildung 3-08: Strukturierte Einteilung der Oberbauarten, Stufe 2 | 26 |
| Abbildung 3-09: Strukturierte Einteilung der Oberbauarten, Stufe 3 | 27 |
| Abbildung 3-10: Ausschnitt aus dem Fragebogen zu den Oberbauarten ^[31] | 28 |
| Abbildung 3-11: Für die Nutzungsdauerprognose relevante Oberbauarten | 29 |
| Abbildung 3-12: Hierarchisches Datenmodell OpenStreetMap | 31 |
| Abbildung 3-13: OpenStreetMap - Beispiel für einen Knoten ^[36] | 32 |
| Abbildung 3-14: OpenStreetMap - Beispiel für einen Polygonzug ^[36] | 33 |
| Abbildung 3-15: OpenStreetMap - Beispiel für eine Relation ^[36] | 34 |
| Abbildung 3-16: Detailliertes Datenmodell OpenStreetMap | 35 |
| Abbildung 3-17: Gegenüberstellung der in OpenStreetMap vorhandenen Gleisinfrastruktur im Bereich Hannover mit dem Attribut „tram“ (links) und „light_rail“ (rechts) ^[38] | 36 |
| Abbildung 3-18: Luftbilder aus Google Earth, links Mai 2006 ^[40] , rechts Juli 2015 ^[39] | 37 |
| Abbildung 3-19: Radienbestimmung aus den OpenStreetMap-Daten, visualisiert in Google Earth ^[39] | 38 |
| Abbildung 4-01: Nutzung der Gleisinfrastruktur durch Schienenfahrzeuge, Klasseneinteilung | 42 |
| Abbildung 4-02: Nutzung der Gleisinfrastruktur durch Straßenfahrzeuge, Klasseneinteilung | 43 |
| Abbildung 4-03: Auszug aus einem Fahrplanbuch mit Kennzeichnung der Fahrzeugtypen ^[42] | 45 |
| Abbildung 5-01: Teilbereiche der Instandhaltung ^[44] | 47 |
| Abbildung 5-02: Querschnitt eingedeckter Oberbau mit Eindeckung aus Großpflaster ^[35] | 49 |
| Abbildung 5-03: Querschnitt offener Oberbau mit Schwellen in Schotterbettung ^[35] | 49 |
| Abbildung 5-04: Zweibege-Reinigungsfahrzeuge ^[48] | 50 |
| Abbildung 5-05: Weichenzungen-Bereich einer Rillenschienenweiche | 50 |
| Abbildung 5-06: Schleiffahrzeug der Fa. Windhoff und Detailansicht der Rutschersteine ^[49] | 51 |
| Abbildung 6-01: Eingangs- und Ausgangsdaten des Verschleißmodells | 57 |
| Abbildung 6-02: Differenzierung der Schienenfahrzeuge | 58 |
| Abbildung 6-03: Hochflur-Drehgestell für U-Bahn-Fahrzeuge der Baureihe C der Münchner U-Bahn ^[52] | 60 |
| Abbildung 6-04: Niederflurdrehgestell, Fa. Heiterblick ^[54] | 61 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 6-05: Klasseneinteilung der Schienenfahrzeuge, Beispiel Braunschweig | 62 |
| Abbildung 6-06: Klasseneinteilung der Schienenfahrzeuge, Beispiel Hannover | 62 |
| Abbildung 6-07: Differenzierung der Straßenfahrzeuge..... | 63 |
| Abbildung 6-08: Auszug aus der Verkehrsmengenkarte für Niedersachsen, Stand 2010 ^[55] | 63 |
| Abbildung 6-09: Eingangsdaten des Verschleißmodells zum Teilbereich Trassierung | 64 |
| Abbildung 6-10: Eingangsdaten des Verschleißmodells zum Teilbereich Instandhaltung | 66 |
| Abbildung 6-11: Vorgehen zur Bestimmung der Betriebsbelastung eines Schienenfahrzeugs..... | 68 |
| Abbildung 6-12: Beispielhafter Zusammenhang zwischen Nutzungsdauer und Krümmung | 72 |
| Abbildung 6-13: Einfluss der Betriebsbelastung, Straßenfahrzeuge | 73 |
| Abbildung 6-14: Einfluss der Betriebsbelastung, Schienenfahrzeuge | 74 |
| Abbildung 7-01: Entwicklung des relativen Barwerts einer Zahlung über 60 Jahre..... | 78 |
| Abbildung 7-02: Baukosten von Infrastruktur urbaner Schienenverkehrssysteme (ohne U-Bahn- Systeme) ^[60] | 81 |
| Abbildung 7-03: Verteilung der Lebenszykluskosten auf die Hauptphasen des Lebenszyklus ^[68] | 84 |
| Abbildung 7-04: Jährliche Betriebs- und Instandhaltungskosten (berechnete Werte) der Gleisinfrastuktur ausgewählter urbaner Schienenverkehrssysteme ^[31] | 85 |
| Abbildung 7-05: Jährliche Betriebs- und Instandhaltungskosten (berechnete und veröffentlichte Werte) der Gleisinfrastuktur ausgewählter urbaner Schienenverkehrssysteme ^[31] | 86 |
| Abbildung 7-06: Gewählte Komponenten für den Vergleich der Oberbauarten..... | 87 |
| Abbildung 7-07: Vergleich der Lebenszykluskosten: Eingedeckter Oberbau, Offener Oberbau, Grünes Gleis | 89 |
| Abbildung 7-08: Lebenszykluskosten-Vergleich: Schientypen..... | 91 |

II Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 2-01: Gegenüberstellung ausgewählter Anforderungen an die Fahrzeuge und die Fahrwege des EBO- und des BOStrab-Bereichs..... | 6 |
| Tabelle 7-01: Entwicklung des relativen Barwerts einer Zahlung über 60 Jahre | 79 |
| Tabelle 7-02: Auszug aus den Anschaffungs- und Herstellkosten der Geraer Verkehrsbetrieb GmbH ^[67] | 83 |
| Tabelle 7-03: Instandhaltungsintervalle der Maßnahmen ^[69] | 88 |
| Tabelle 7-04: Vergleich der Baukosten im EBO-Bereich und im BOStrab-Bereich ^[64] | 90 |
| Tabelle 7-05: Lebenszykluskosten verschiedener Schienenarten ^[59] | 90 |

III Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|--|
| AEG | Allgemeines Eisenbahngesetz ^[5] |
| BMVI | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur |
| BOKraft | Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr ^[6] |
| BOStrab | Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung) ^[4] |
| EBO | Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung ^[7] |
| FF | Feste Fahrbahn |
| GG | Grünes Gleis |
| GIS | Geoinformationssystem |
| IVE | Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig |
| LCC | Lebenszykluskostenrechnung, die Abkürzung bezieht sich auf die englische Übersetzung des Begriffs: Life-Cycle-Costing |
| MIV | Motorisierter Individualverkehr |
| ÖPNV | Öffentlicher Personennahverkehr |
| PBefG | Personenbeförderungsgesetz ^[8] |
| ROG | Raumordnungsgesetz |
| SO | Schotteroberbau |
| SOK | Schienenoberkante |
| StVZO | Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung |
| TAB | Technische Aufsichtsbehörde |
| TU BS | Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig |

IV Glossar

| Begriff | Definition |
|--------------------------------|--|
| BOStrab-Bereich | Dem BOStrab-Bereich sind Straßenbahnen, Stadtbahnen und U-Bahnen zugeordnet, die nach dem Regelwerk der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab) ^[4] betrieben werden. |
| EBO-Bereich | Zum EBO-Bereich gehören Güterzüge, Personenzüge des Fernverkehrs und des Nahverkehrs, die die Infrastruktur gemäß der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) ^[7] nutzen. |
| Sexagesimalsystem | Ein Stellenwertsystem zum Wert 60. Hier hängt die Wertigkeit von der Stelle ab. Zur Zeitmessung z. B. wird eine Stunde in 60 Minuten aufgeteilt und eine Minute wiederum in 60 Sekunden. Dieses Prinzip wird auch bei der Angabe von geografischen Koordinaten verwendet (Länge und Breite). Hier wird ein Grad in 60 Winkel- oder Bogenminuten unterteilt. Eine Winkel- oder Bogenminute wird wiederum in 60 Winkel- oder Bogensekunden aufgeteilt. |
| Urbanes Schienenverkehrssystem | Die urbanen Schienenverkehrssysteme umfassen den BOStrab-Bereich. Nicht berücksichtigt werden innerstädtische Fahrten von Fahrzeugen und Zügen aus dem EBO-Bereich. |

V Formelzeichen

| Formelzeichen | Einheit | Bedeutung |
|---------------|---------|---|
| A | € | Annuität, jährliche Zahlung derselben Höhe |
| B_{Ges} | t / a | Betriebsbelastung im Betrachtungszeitraum |
| B_{Max} | t | Maximale Belastung eines Streckenabschnitts |
| B_{Si} | t | Betriebsbelastung durch ein Schienenfahrzeug |
| BW | € | Barwert einer Zahlung |
| f_N | - | Faktor zur Berücksichtigung der Neigung |
| f_R | - | Faktor zur Berücksichtigung des Bogenradius |
| f_{T1} | - | Faktor zur Berücksichtigung der Fahrwerkstechnik der Schienenfahrzeuge |
| f_{T2} | - | Faktor zur Berücksichtigung der Radsatzlast (linearer Anteil) |
| f_{T3} | - | Faktor zur Berücksichtigung der Radsatzlast (potenzieller Anteil) |
| i_i | % | Inflationsrate |
| i_k | % | Zinssatz für die Kapitalverzinsung |
| i_{kalk} | % | Kalkulatorischer Zinssatz |
| L | € | Lebenszykluskosten |
| m_F | t | Masse des Schienenfahrzeugs inkl. Fahrgäste und deren Gepäck |
| m_L | t | Leermasse des Schienenfahrzeugs |
| m_P | t | Masse der Fahrgäste und ggf. deren Gepäck |
| n_A | - | Anzahl der Radsätze oder Radpaare eines Schienenfahrzeugs |
| n_F | - | Anzahl der Fahrten eines Schienenfahrzeugs pro Jahr inkl. Betriebs- und Sonderfahrten |
| n_P | - | Anzahl der Fahrten eines Schienenfahrzeugs pro Jahr laut Fahrplan |
| N_D | a | Nutzungsdauer eines Streckenabschnitts |
| N_{Max} | a | Maximale Nutzungsdauer eines Streckenabschnitts |
| q^i | - | Zinsfaktor der Inflationsrate |
| q_k | - | Zinsfaktor der Kapitalverzinsung |
| q_{kalk} | - | Zinsfaktor des kalkulatorischen Zinssatzes |
| R | t | Durchschnittliche Radsatzlast eines Schienenfahrzeugs, bei Fahrzeugen ohne Radsätzen wird hier das Gewicht je Radpaar erfasst |
| R_{Ref} | t | Referenzgröße der Radsatzlast (10 t) |
| z_B | % | Faktor zur Berücksichtigung des Anteils der Betriebsfahrten |
| z_S | % | Faktor zur Berücksichtigung des Anteils der Sonderfahrten |