



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



DISSERTATION

zum Thema

EINFLUSSFAKTOREN UND WIRKUNGSMECHANISMEN ZUR LEBENSZYKLUSPLANUNG VON STRASSENBAHN- INFRASTRUKTUR

Betreut von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert OSTERMANN
Technische Universität Wien,
Institut für Verkehrswissenschaften

Begutachtet von

Prof. Dr.-Ing. Thomas B. SIEFER
Technische Universität Braunschweig
Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb

sowie

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus OSSBERGER
Wiener Linien GmbH & CO KG

verfasst von

Dipl.-Ing. Johannes KEHRER, Bsc.

Kurzfassung

Betreiber von Straßenbahnnetzen, deren Aufwendungen zu großen Teilen von der öffentlichen Hand getragen werden, geraten zusehends unter finanziellen Druck. Um für Bau und Erhaltung von Infrastruktur einen möglichst effizienten Mitteleinsatz zu gewährleisten, ist der gesamte Lebenszyklus einer Anlage und die währenddessen anfallenden Lebenszykluskosten (LCC) zu berücksichtigen. Diese Betrachtung gilt als zuverlässige Grundlage für den Vergleich unterschiedlicher Handlungsalternativen, beispielsweise in der Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung.

In der vorliegenden Arbeit wird ein gesamtheitliches Modell zur Ermittlung technisch-wirtschaftlich optimaler Instandhaltungs- und Erneuerungszyklen für den Straßenbahn-Fahrweg auf Abschnittsebene entwickelt. Die Datenbasis dafür bilden umfassende, seitens der *Wiener Linien* zur Verfügung gestellte Infrastruktur-, Betriebs- und Zustandsdaten des Wiener Straßenbahnnetzes. Instandhaltungs- bzw. Erneuerungstätigkeitszyklen werden unter Berücksichtigung der Betriebserschwerisse sinnvoll gruppiert und somit ein strategischer Ansatz zur vorausschauenden Instandhaltung von Straßenbahnfahrwegen ermöglicht.

Durch Literaturrecherche ermittelte Einflussparameter auf den Schienenverschleiß werden auf ihre Verfügbarkeit für das Wiener Netz untersucht. Um ein automatisiertes Prognosemodell zu erstellen, ist es unerlässlich, netzweit verfügbare und zentral erfasste Datensätze heranzuziehen. Bei fortschreitender Datenverfügbarkeit soll das Modell um zusätzliche Parameter erweitert werden, sowie auf Basis neuer Messdaten laufend kalibriert werden können.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, werden nach eingehender Aufbereitung der verfügbaren Messdaten, Methoden des maschinellen Lernens (engl.: *Machine learning*) herangezogen, die auf Basis der Eingangsdaten automatisiert Zusammenhänge abbilden und daraus Prognosewerte ermitteln können. Auf Basis der Erfordernisse ausgewählte Methoden werden auf ihre Anwendbarkeit im gegebenen Fall untersucht und in iterativen Prozessen optimiert. Neben der Verschleißentwicklung als Kern des Modells werden im Vorfeld die Schienenprofilformen für alle Elemente bestimmt sowie Instandhaltungstätigkeiten detektiert.

Komplexe, nichtlineare Modelle wie *neuronale Netze* oder die *Random Forest Regression* weisen bei der Prognose des Zustands im Wertebereich der vorwiegend verfügbaren Zustandsdaten die höchsten Genauigkeiten auf, zeigen jedoch Schwächen bei der Prognose von Werten im Bereich der Grenzzustände. Für die derzeitige Datenlage werden daher zusätzlich lineare Prognosemodelle für die Ermittlung der technischen Liegedauer herangezogen.

Auf Basis der prognostizierten Zustandsentwicklung und unter Berücksichtigung der mittels Annuitätenmethode abgebildeten LCC-Entwicklung werden elementgenau die technisch-wirtschaftlich optimalen Eingriffszeitpunkte ermittelt. Unter Berücksichtigung betrieblicher Rahmenbedingungen wird in einem weiteren Schritt die optimale Erneuerungsstrategie über beliebig lange Abschnitte berechnet.

Das Ergebnis stellt daher eine abschnittsweise, LCC-optimierte Ermittlung der technisch-wirtschaftlich optimalen Erneuerungszeitpunkte von Fahrweegelementen dar.

Abstract

Operators of urban tram networks are in general mainly funded by public authorities. In order to guarantee an efficient handling of public funds for construction and maintenance of track infrastructure, the entire lifecycle has to be taken into account. Lifecycle costs (LCC) serve as an appropriate parameter for comparing different strategic approaches regarding the planning of renewal or maintenance measures of tracks.

The present work provides a holistic model to determine the optimal maintenance and renewal strategy for a given element of tramway track infrastructure. The database for the model was supplied by Vienna's tram operator Wiener Linien and includes infrastructure, operation and track measurement data. The optimized lifecycles of the individual track elements in any given section are grouped based on operational constraints in order to reach the global LCC-optimum for the respected section, thus enabling a strategic approach to the predictive maintenance for tramway track infrastructure.

Relevant input parameters for rail wear and condition degradation taken from topic-specific literature are assessed for their availability of comprehensive data for the given network. In order to program an automatized forecast model, it is essential for the datasets to be network wide and centrally accessible. With a growing database, it should be possible for additional parameters to be integrated into the model and for it to be automatically and continuously calibrated on the basis of the newly obtained measurement data.

To meet these requirements, different techniques of machine learning are applied to a preprocessed dataset. The techniques are selected based on their ability to identify and map correlations of the given parameters in order to determine forecast values. Methods selected on the basis of the requirements are examined for their applicability in the given case and optimized in iterative processes. In addition to the prediction of rail wear as the decisive condition parameter, the rail profile shape of the track elements as well as maintenance measures are identified by machine learning.

Complex, non-linear models such as artificial neural networks or random forest regression show the highest forecast accuracy within the range of actual measurement data. However, their forecasting power reached by extrapolation is very limited when it comes to predicting the wear limit, due to the lack of input data in that range. For the current dataset, linear forecast models are therefore additionally applied for extrapolation.

Based on the predicted development of the condition and the annuities of LCC, the technically and economically optimal intervention times are determined for every element individually. In a further step, the optimal renewal strategy is calculated for sections of any length in consideration of operational constraints.

The result is an automated model for the section-based and LCC-optimized determination of intervention limits for tramway track infrastructure.

Inhalt

Kurzfassung	
Abstract	
Inhalt	I
1. Einführung	1
1.1. Zielsetzung	1
1.2. Vorgehensweise	2
2. Grundlagen der Instandhaltung für den Straßenbahn-Fahrweg	4
2.1. Grundsätze der Instandhaltung	4
2.2. Konstruktive Gestaltung des Straßenbahn-Fahrwegs	6
2.3. Instandhaltung des Straßenbahn-Fahrwegs	8
2.4. Gesetzlicher und normativer Rahmen	9
2.5. Fahrweg-Instandhaltung am Beispiel der Wiener Linien	10
2.6. Zustandserhebung im Wiener Straßenbahnnetz	12
3. Grundlagen der Zustands- und Liegedauerprognose für den Straßenbahn-Fahrweg	14
3.1. Gläserner Fahrweg	15
3.2. Prognosetool Schönwälder	16
3.3. Magic Wear Rate	17
3.4. Modell Zaussinger	18
3.5. Versagensmechanismen von Rillenschienen	20
3.6. Vergleich verfügbarer Werkzeuge	21
3.7. Wahl geeigneter Methoden.....	23
4. Einflüsse auf die Zustandsentwicklung des Fahrwegs	27
4.1. Arten des Schienenverschleiß	27
4.2. Einflussgrößen auf den Verschleiß	31
4.3. Analyse der Datenverfügbarkeit	34
4.4. Verfügbarkeit von Zustands- und Anlagendaten	38
5. Analyse und Aufbereitung der Zustandsdaten	41
5.1. Zielparameter Zustandsprognose	41
5.2. Datenerhebung und -verfügbarkeit	41
5.3. Aufbereiten der Zustandsdaten	42
5.4. Synchronisierung von Messsignalen	46
5.5. Plausibilisierung der Messdaten	49
5.6. Filtern von Messdaten	51

5.7. Netzweite Synchronisierung und Filterung	53
6. Erkennung von Schienenprofilen	56
6.1. Gewählte Methodik	57
6.2. Mathematische Modellierung	58
6.3. Eingangsdaten und Prognosegenauigkeit	64
6.4. Implementierung	68
7. Detektieren von Instandhaltungstätigkeiten	71
7.1. Gewählte Methodik	71
7.2. Eingangsdaten	71
7.3. Mathematische Modellierung	74
7.4. Auswertung und Implementierung	75
8. Zustandsprognose	78
8.1. Bildung von Fahrwegelementen	78
8.2. Grundlegende Herangehensweise	79
8.3. Analyse der Eingangsdaten	80
8.4. Modellierung der Zustandsprognose	82
8.5. Wahl der Modell- und Eingangsparameter	90
8.6. Evaluierung der Prognosemodelle	94
8.7. Anwendungsgrenzen der Zustandsprognose	99
9. Optimierung der Lebenszykluskosten für Fahrwegabschnitte	102
9.1. Grundlegende Herangehensweise	102
9.2. Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Nutzungsdauer	102
9.3. Investitionskosten	104
9.4. Instandhaltungskosten	105
9.5. Betriebserschwerungskosten	112
9.6. LCC-Optimierung auf Abschnittsebene	115
10. Zusammenfassung und Ausblick	121
10.1. Zusammenfassung	121
10.2. Ausblick	123
Abkürzungen	124
Literaturverzeichnis	125
Abbildungsverzeichnis	128
Tabellenverzeichnis	130