



Matthias Landgraf, Dipl.-Ing.

# **Zustandsbeschreibung des Fahrwegs der Eisenbahn - Von der Messdatenanalyse zum Anlagenmanagement**

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit  
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft (TU Graz)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein  
Lehrstuhl und Prüfamt für Verkehrswegebau (TU München)

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

05.08.2016

Datum

Matthias Langner

Unterschrift

---

## Danksagung

Allen voran danke ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit, der es mir ermöglichte diese Dissertation am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft im Rahmen meiner Tätigkeit als Universitätsprojektassistent zu erstellen. Durch sein enormes Fachwissen sowie seine Fähigkeiten dieses zu vermitteln, konnte er der Arbeit immer wieder entscheidende Impulse geben. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein, dass er als Zweitgutachter und Prüfer dieser Arbeit zur Verfügung stand.

Ein spezieller Dank gebührt auch Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig. Ich durfte in den letzten Jahren durch zahlreiche Diskussionen sehr viel von Dir lernen und Du hast einen maßgeblichen Anteil daran, dass diese Arbeit nun vor mir liegt. Ich danke Dir für die freundschaftliche und konstruktive Zusammenarbeit.

Auch insbesondere mit Markus Enzi und Fabian Hansmann hat sich über die Jahre eine Bürofreundschaft entwickelt, die ich sehr schätze. Weit über das Berufliche hinaus gabt ihr mir immer wieder wertvolle Tipps und Anregungen. Ihr seid sicherlich einer der Gründe, weswegen mir die letzten fünf Jahre trotz der Anstrengungen derart viel Freude bereitet haben.

Ein besonderer Dank gilt auch Georg Neuper und Stefan Walter. Die interessanten und freundschaftlichen Gespräche mit euch eröffneten mir immer wieder neue Sichtweisen. Claudia Kaufmann danke ich für die unzähligen Male, in denen sie mir in organisatorischen Belangen mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Weiters möchte ich mich bei meinen KollegInnen Anna Frisee, Holger Bach, Manfred Bauer, Armin Berghold, Michael Fellingner, Johannes Neuhold, Martin Smoliner und Ivan Vidović sowie Prof. Klaus Rießberger und sämtlichen Projektpartnern bedanken. Ihr habt mich maßgeblich darin unterstützt, meine Forschungstätigkeit voranzutreiben. Es war wirklich schön, in den letzten Jahren mit euch zusammen zu arbeiten.

Die Möglichkeit zu studieren ist nicht selbstverständlich. Meinen Eltern werde ich für immer dankbar sein, dass sie mir mein Studium finanziell ermöglicht, aber mich dabei auch in allen anderen Belangen jederzeit unterstützt haben. Meiner Schwester Christina danke ich für ihre Anregungen und ihren geschwisterlichen Rat in allen Lebenssituationen.

Meiner Frau Marie danke von ganzem Herzen für ihre unermüdliche Unterstützung, ihre Liebe und Motivation. Ich möchte Dir vor allem für Dein Verständnis in jenen Zeiten danken, in denen mein Beruf und meine Forschung an erster Stelle standen.

---

---

## Kurzfassung

Anlagenmanagement für Eisenbahninfrastrukturunternehmen bedeutet, möglichst effizient mit immer knapper werdenden budgetären Ressourcen umzugehen. Dementsprechend essentiell gestaltet sich die Fragestellung nach dem Zustand der zu verwaltenden Anlagen.

Die hier entwickelte Methodik ermöglicht eine messdatengestützte und komponentenspezifische Zustandsbeschreibung des Eisenbahnfahrwegs. Aufgrund der Evaluierung der Komponenten *Schwelle* und *Schotter* kann eine notwendige Gleiserneuerungsmenge ermittelt werden. Die Komponentenbeurteilung des *Unterbaus* erlaubt darüber hinaus, bereits frühzeitig jenen Anteil der Reinvestitionsmaßnahmen abzuschätzen, welcher zusätzlich einer Unterbausanierung bedarf. Darauf basierend kann eine langfristige Planung des Mitteleinsatzes etabliert werden. Die erarbeitete Methodik ermöglicht dem Infrastrukturbetreiber die Evaluierung des Netzzustandes, wobei die Auswirkungen unterschiedlicher Investitionsstrategien analysiert werden können.

Verwendet werden dabei vorrangig Anlageninformationen und Messdaten, welche in einer an der TU Graz entwickelten Datenbank für rund 4000 Streckenkilometer der Österreichischen Bundesbahnen mit Zeitreihen seit 2001 vorliegen. Des Weiteren konnten auch vereinzelte Streckenabschnitte aus der Schweiz sowie den USA für Korrelationsanalysen herangezogen werden.

Die Erarbeitung der vorgestellten Methodik beinhaltet in einem ersten Schritt die Erarbeitung innovativer Messparameter. Diese werden aus verschiedenen Roh-Messsignalen sowie unterschiedlichen Messsystemen gewonnen, um die Charakteristika einzelner Signale besser fassen zu können. Jene Parameter werden einem eingehenden Validierungsprozess unterzogen. Anschließend wird diese Vielzahl an automatisiert messbaren Parametern fundiert zu je einer Zustandszahl für die Komponenten *Schwelle*, *Schotter* und *Unterbau* aggregiert.

Darüber hinaus wird im Rahmen der Arbeit aufgezeigt, welchen Nutzen die vorgestellte Methodik für das Anlagenmanagement eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers bringen kann. Einerseits im Rahmen einer netzweiten, gebiets-, strecken- oder querschnittspezifischen Zustandsbeschreibung, welche die vergangene sowie zukünftige Entwicklung des Streckennetzes beschreibt. Andererseits wird es ermöglicht, komponentenspezifische Instandhaltungsmaßnahmen sowie benötigte Erneuerungsmengen zu definieren.

---

---

## Abstract

Cost pressure forces infrastructure managers to work sustainably and efficiently. Therefore, track engineers face increasing difficulty to carry out necessary measures owing to budget restrictions. Consequently, they should be supported in prioritising. This requires an objective tool enabling proper condition monitoring as well as component-specific, preventive maintenance and renewal planning. Hence, the right measures are to be executed at the right time.

This dissertation deals with a description of the railway track condition. A bottom-up approach provides an in-depth assessment of track using a variety of measurement signals and an aggregated component-specific assessment. Since the approach is based on well positioned measurement signals, it is valid for monitoring specific track sections as well as whole networks. Innovative analyses of various measurement signals form a sound basis to grasp their characteristics enabling a component specific condition evaluation of railway track. The use of historical measurement data allows for an analysis of track behaviour over time. A thorough validation process, including on-site inspections and excavations, shows that the presented approach is able to evaluate the actual condition of railway track.

The assessment of the specific components condition can be used for timely maintenance as well as renewal planning. Based on correlation analyses, the component specific evaluations are aggregated into one holistic quality figure. This enables asset managers to monitor the asset condition network-wide as well as to predict future budget demands.

---

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
2	Der Eisenbahnfahrweg – Grundlagen und Dokumentation.....	5
2.1	Die Komponenten des Fahrwegs .....	5
2.2	Dokumentation und Speicherung der Anlageninformationen .....	6
2.3	Oberbautypen im Streckennetz .....	9
3	Zustandserfassung des Fahrwegs .....	14
3.1	Der Gleismesswagen .....	16
3.1.1	Die Gleislage .....	17
3.1.2	Die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage .....	21
3.1.3	Die Standardabweichung der modifizierten Spurweite (SigModS) .....	26
3.2	Das Georadar .....	28
3.2.1	Messmethodik des Georadars .....	28
3.2.2	Zustandsbeschreibung mittels Georadar .....	31
3.2.3	Detailuntersuchung der Georadarevaluierungen.....	32
3.3	Weitere Methoden zur Zustandserfassung des Fahrwegs .....	37
3.3.1	Bodenmechanische Drucksondierung.....	37
3.3.2	Einsenkungsmesswagen .....	38
4	Validierungsprozess der eingeführten Analysemethoden.....	41
4.1	Netzweiter Validierungsprozess und Trendanalysen .....	41
4.1.1	Der Einfluss unterschiedlicher Schwellentypen.....	41
4.1.2	Globales Verhalten über die Gleisnutzungsdauer .....	44
4.1.3	Ein- und Ausbauqualität.....	48
4.1.4	Der Einfluss von Wasser im Gleiskörper .....	54
4.2	Abschnittsspezifische Validierungen der einzelnen Messmethoden .....	56
4.2.1	Der zeitliche Verlauf von Georadarevaluierungen .....	56
4.2.2	Der Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen .....	62
4.2.3	Evaluierungen des Georadars und der Fraktalanalyse versus Drucksondierung.....	65

---

---

4.2.4	Fraktalanalyse und das visuelle In-Situ Verhalten .....	70
4.2.5	Die relative Einsenkungsmessung trifft die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage .....	73
4.2.6	Analyse von Lastplattendruckversuchen .....	76
5	Stochastische Korrelationsanalysen .....	79
5.1	Korrelationskoeffizienten und deren Signifikanz .....	79
5.1.1	Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman .....	80
5.1.2	Signifikanzniveau einer Korrelation .....	81
5.2	Das Georadar und der Gleismesswagen .....	83
5.2.1	Georadar vs. herkömmliche Gleislageanalyse ( $\sigma_H$ ) .....	83
5.2.2	Georadar vs. Fraktalanalyse .....	85
5.3	Die einzelnen Parameter Fraktalanalyse .....	87
5.4	SigModS vs. Fraktalanalyse .....	89
6	Aggregation zur Beschreibung des Fahrwegzustands .....	91
6.1	Etablierte Qualitätsziffern .....	91
6.2	Komponentenspezifische Zustandsbeschreibung .....	93
6.2.1	Schwellenzustand .....	94
6.2.2	Schotterzustand .....	96
6.2.3	Unterbauzustand .....	99
6.2.4	Sensitivitätsanalyse der komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung .....	102
6.3	Aggregation Qualitätsziffer Fahrweg .....	106
6.3.1	Vergleich der komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung .....	106
6.3.2	Aggregationsalgorithmus .....	107
6.3.3	Die Qualitätsziffer Fahrweg .....	110
7	Vom Zustand zum Anlagenmanagement .....	113
7.1	Netzweite Zustandsbeschreibung .....	114
7.1.1	Klasseneinteilung auf Basis altersspezifischer Werteverteilung .....	115
7.1.2	Zustandsklassifizierung .....	116
7.1.3	Mittelwert .....	119
7.2	Budgetrelevante Aspekte .....	120

---

---

	7.2.1	Abschätzung Erneuerungsmengen .....	120
	7.2.2	Aufteilung auf Regionen/Strecken .....	123
8		Zusammenfassung und Ausblick .....	125
9		Literaturverzeichnis .....	128

---