

Monitoring nichtlinearer Rad/Schiene-Systeme mit der Karhunen-Loève-Transformation

Vom Promotionsausschuß der Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation

von
Philipp Glösmann

aus Hamburg

2007

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Edwin Kreuzer
2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Bodo Werner

Tag der mündlichen Prüfung: 6. August 2007

Berichte aus der Mechanik

Philipp Glösmann

**Monitoring nichtlinearer Rad/Schiene-Systeme
mit der Karhunen-Loève-Transformation**

Shaker Verlag
Aachen 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6773-5

ISSN 1616-0126

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Hilfe zahlreicher Personen und ohne die Unterstützung der **Bahn AG** sowie der **Hochbahn AG** nicht möglich gewesen. An dieser Stelle möchte ich mich dafür bedanken.

Zunächst gilt mein Dank meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. habil. Edwin Kreuzer, der diese Arbeit anregte und mich während meiner Assistentenzeit stets wohlwollend förderte. Herrn Professor Dr.-Ing. Uwe Weltin und Herr Professor Dr. rer. nat. Bodo Werner danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bzw. die Begutachtung meiner Arbeit.

Am Institut für Mechanik und Meerestechnik weihte mich Oberingenieur Dr.-Ing. Volker Schlegel in die Geheimnisse der praktischen Meßtechnik ein und half mir, mich in das Gebiet der Signalanalyse einzuarbeiten. Meine Kollegen Norbert Borngräber-Sander, Wolfgang Brennecke und Riza Demir unterstützten mich stets eifrig bei Auf-, Ab-, Umbau und Reparatur des Meßsystems. Marc-André Pick half mir bei der Auswahl und Installation des Meßprogramms und wenn der Meßrechner wieder einmal streikte. Mein studentischer Mitarbeiter Erkan Aksoy zauberte eine wichtige elektronische Schaltung herbei und war mir bei der Inbetriebnahme des Meßsystems eine große Hilfe. Andreas Gaull diskutierte mit mir bereitwillig die Frage der Konvergenz im Allgemeinen und die der Karhunen-Loève-Transformation im speziellen. Michael Göbel, Eva Heesen, Steffen Petersen und Cornelius Weiß danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut und dafür, daß sie mich auch in der Freizeit nicht an der Kletterwand des Alpenvereins haben hängen lassen.

Meine Untersuchungen bei der **Hochbahn AG** wurden mir durch die interne Überzeugungsarbeit von Herrn Thomas Pahl und Herrn Klaus Liedgens erst ermöglicht. Mein herzlicher Dank für die oft schnelle und unkomplizierte Unterstützung bei Einbau und Wartung des Meßsystems gilt Herrn Klaus Räsch, Herrn Walter Reinke sowie den Auszubildenden Sven und Janina. Stellvertretend für die beteiligten Mitarbeiter der Abteilung T.TZF93 der **Bahn AG** bedanke ich mich bei Herrn Dr. Detlev Ullrich für die gute Zusammenarbeit im Gemeinschaftsprojekt „Laufzustandsmonitoring von Eisenbahnfahrzeugen“.

Schließlich danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung der Forschungsprojekte.

Hamburg, im Oktober 2007

Philipp Glösmann

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Stand der Forschung	2
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit	5
2 Karhunen–Loève–Transformation	9
2.1 Mathematische Formulierung	9
2.2 Zustandsmonitoring mit der KL–Transformation	15
2.3 Zur Berechnung der Kovarianzmatrix	16
2.4 Eigenschaften der KL–Transformation	24
2.5 Verwandtschaft zwischen Karhunen–Loève– und Fourier–Transformation	31
2.6 Gleichzeitige Mehrkanalanalyse	36
2.7 Weitere Anwendungen der KL–Transformation	43
3 Meßaufbauten	51
3.1 Rad/Schiene–Simulationsprüfstand	51
3.2 Betriebsversuch mit dem ICE 2-S	52
3.3 Messungen im regulären Betrieb auf der Linie U2	53
4 Dynamik von Eisenbahnradsätzen	55
4.1 Rad/Schiene–Paarungen	55

4.2	Dynamisches Verhalten	58
4.3	Strukturschwingungen	60
5	Versuche und Meßergebnisse	63
5.1	Versuche am Rad/Schiene-Simulationsprüfstand	63
5.2	Betriebsversuch mit dem ICE 2-S	76
5.3	Versuche zum Fahrwegmonitoring	78
5.4	Zusammenfassung der Meßergebnisse	81
6	Laufzustandsmonitoring von Eisenbahnradsätzen	83
6.1	Beurteilung des Laufzustands	83
6.2	Monitoring mit der KL-Transformation	84
6.3	Analyse der Radsatzdynamik am Rad/Schiene-Simulationsprüfstand	86
6.4	Laufzustandsanalyse des ICE-Radsatzes	94
6.5	Zusammenfassung zum Laufzustandsmonitoring	96
7	Fahrwegmonitoring mit der KL-Transformation	97
7.1	Bewertung der Gleislage	98
7.2	Gleismeßverfahren bei der Hochbahn AG	100
7.3	Bestimmung der Meßposition	101
7.4	Formulierung zum Fahrwegmonitoring	104
7.5	Fahrweganalyse mit der KL-Transformation	107
7.6	Zusammenfassung zum Fahrwegmonitoring	116
8	Zusammenfassung	117
	Literaturverzeichnis	119
A	Hilbert-Raum	127
B	Statistik	128
B.1	Kennwerte der deskriptiven Statistik	128

B.2	Kennwerte der schließenden Statistik	128
B.3	Gesetz der großen Zahlen	129
C	Iterative Berechnung der Kovarianzmatrix	131
D	Krümmung und Winkelgeschwindigkeit	133
E	Entgleisungskriterium Y/Q	135