

Tobias Herrmann

**Methode zur Detektion
von hohlgelaufenen Rädern
an Güterwagen**

Methode zur Detektion von hohlgelaufenen Rädern an Güterwagen

Vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Tobias Herrmann
aus Berlin

Von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Roland Baar
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Oldrich Polach

Tag der wissenschaftlichen Aussprache:
07.09.2017

Berlin 2017

D 83

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Tobias Herrmann

**Methode zur Detektion von hohlgelaufenen Rädern
an Güterwagen**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5589-4

ISSN 0945-0742

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

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Schienenfahrzeuge unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht entstanden. Ihm verdanke ich die Möglichkeit zur Promotion und bedanke mich recht herzlich für das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Zeit am Fachgebiet, für diese Dissertation und die kritischen Diskussionen während meiner Arbeit.

Sie haben mir die Möglichkeit gegeben, in vielen sehr interessanten Forschungsprojekten mitzuwirken, und ich hatte stets viel Freude daran. Vielen Dank für die sehr schöne Zeit bei Ihnen!

Prof. Dr.-Ing. Oldrich Polach danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und ebenfalls für die interessanten Gespräche am Fachgebiet und vor allem für Ihre Vorlesung während meiner Studienzzeit.

Prof. Dr.-Ing. Roland Baar danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Ein weiterer großer Dank geht an meinen Kollegen Christoph Gericke, mit dem ich gemeinsam am Forschungsprojekt CargoCBM gearbeitet habe, sowie an Henning Schelle, der mir das Simulationsmodell gegeben hat und mit dem ich gemeinsam im Forschungsprojekt SUSTRAIL arbeiten konnte. Die Zeit am Fachgebiet mit euch beiden hat mir sehr viel Freude bereitet und die gemeinsamen Dienstreisen haben so manche Entbehrung wettgemacht. Weiterhin geht ein sehr großer Dank an die Werkstattmitarbeiter Harald Jakatt und Dirk Itzeck, mit denen ich so manche spannende Messkampagne erfolgreich und problemlos durchführen konnte. Ich hatte so manche verrückte Idee für einen Versuch oder sogar einen Prototyp und mit euch beiden konnte ich dies stets umsetzen. In diesem Rahmen geht ein großer Dank auch an Sebastian Sohr, der im Jahr 2013 die Messkampagne für mich übernommen hat, da ich leider genau zu diesem Zeitpunkt länger ausgefallen bin. Weiterhin danke ich ebenfalls Gernoth Götz für die tolle und freundschaftliche Zusammenarbeit am Fachgebiet. Insbesondere unser letztes gemeinsames Projekt haben wir richtig gut über die Bühne gebracht.

Ein weiterer besonderer Dank geht an die Studenten Steffen Schröder und Philipp Münnich, welche interessante Aspekte in ihren Abschlussarbeiten für mich untersucht haben. Ein ganz großer Dank geht an meinen Studenten Adrian Mahlkow, der mich stets bei meinen Messkampagnen und Messeauftritten begleitet hat und mit dem ich so manche gute Lösung im lockeren Gespräch entwickeln konnte. Dein kritischer Blick auf meine Resultate hat mich dabei jedoch stets angespornt, meine Ergebnisse zu hinterfragen. Weiterhin danke ich recht herzlich Jenny Nowak, welche immer meine literarischen Ergüsse in englischer Sprache prüfen musste. Vielen Dank euch allen.

Da jede schriftliche Arbeit ebenfalls ein paar Augen mehr für die Fehlersuche benötigt, möchte ich recht herzlich allen meinen Korrekturlesern für den kritischen Blick danken. Mein Dank geht an Adrian Mahlkow, Daniel Jobstfinke, Gernoth Götz und Philipp Krause.

Zum Schluss möchte ich noch ganz herzlich meiner Familie Michael, Kerstin, Franziska, Thomas und Annabelle danken. Ihr habt mich stets unterstützt und mir auch mal in brenzligen Situationen geholfen. Ihr hattet stets ein offenes Ohr für meine Ideen und Lösungsvorschläge und habt mir auch neue Wege und Lösungsmöglichkeiten gezeigt. Vielen Dank euch allen und möge die gelbe Filzkugel es immer gut mit uns meinen!

Tobias Herrmann

Berlin, Februar 2017

Kurzfassung

Das Schadbild an Radsätzen, insbesondere in der Lauffläche der Radprofile, ist umfangreich und zum Teil sehr unterschiedlich. Ein hoher Materialabtrag in der Lauffläche kann zu einem hohlgelaufenen Radprofil führen, welches die Rad-Schiene-Paarung negativ beeinflusst und zu erhöhtem Verschleiß sowohl am Rad als auch an der Schiene führen kann. Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch hohlgelaufene Räder die Fahrsicherheit negativ beeinflusst wird.

Basierend auf dem abgeschlossenen Forschungsprojekt CargoCBM wird im Rahmen dieser Arbeit fortführend untersucht, inwiefern hohlgelaufene Räder einen Einfluss auf die laterale Fahrdynamik haben und ob eine Detektion des Einflusses möglich ist. Über diese Vorgehensweise soll anschließend eine Information zum Zustand der Radprofile gewonnen werden, welche für die Instandhaltung genutzt werden könnte.

Die Untersuchungen beinhalten zwei getrennte Vorgehensweisen. Zunächst werden verschiedene gemessene Radprofile analysiert und klassifiziert, um sie anschließend in einer Mehrkörpersystemsimulation anzuwenden. Im Rahmen der Simulationsrechnungen wird der Einfluss der verschlissenen Radprofile auf die nichtlineare kritische Fahrgeschwindigkeit sowie die Lateralodynamik bei unterschiedlichen Gleislagefehlern und Kraftschlussbeiwerten untersucht. Es wird dargestellt, wie sich der Wellenlauf jeweils ausprägt, überträgt und gegebenenfalls detektiert werden könnte.

Der zweite wichtige Aspekt im Rahmen dieser Untersuchungen sind die durchgeführten Messkampagnen. In deren Rahmen sind zunächst die Radsätze über einen längeren Zeitraum überwacht und zwei Messkampagnen in einem Abstand von einem Jahr und mit unterschiedlich verschlissenen Radprofilen am Messfahrzeug durchgeführt worden. Im Rahmen der Auswertung werden zunächst die umfangreichen Parameter bezüglich des Rad-Schiene-Kontakts entlang der Messstrecke dargestellt und Erwartungswerte bzw. Grenzwerte für die Wellenlauffrequenz der Radsätze bzw. deren Wellenlänge formuliert. Die anschließende Auswertung der Messergebnisse soll zeigen, ob es möglich ist, den Wellenlauf zu detektieren, ob sich eine Veränderung durch geänderte Radprofile ergibt, ob der definierte Erwartungswert bzw. der sich ergebende Grenzwert verletzt wird und welche Randbedingungen gegebenenfalls eingehalten werden müssen.

Die Untersuchungen werden mit einer Zusammenfassung sämtlicher Einflussgrößen und Randparameter sowie einem Vorschlag für eine Methode zur automatischen Detektion von hohlgelaufenen Rädern abgeschlossen.

Abstract

There are different possible kinds of failure modes at railway wheelsets, especially at the tread surface. One very common failure mode is the so called hollow wear. This wear depends on heavy material removals directly on the tread surface and leads to a negative influence to the wheel rail contact parameter, even a reduction of the safety cannot be excluded.

Based on the finished German research project CargoCBM, the present work discusses the possibility of the influence of hollow wear worn wheels to the lateral dynamics. Furthermore, it investigates the possibility to detect this influence automatically for a use in maintenance.

The analyses in the present work contain two types of different approaches. At first, different worn wheel profiles will be analysed and used in a multibody system simulation. With these simulations, the influence of the different worn profiles to the nonlinear critical velocity and the lateral dynamics with different track alignment errors and different adhesion coefficients will be investigated. Finally, it shall be shown, how the sinus running of the wagon is changed, transmitted into other parts of the wagon and how it could be detected.

The second part contains an extensive measurement campaign and its analyses. For this measurement, the wheelsets of the wagon are observed over a longer period. For the analyses first the parameter of the wheel rail contact regarding the test track will be shown at first and the expected value and the limit for the sinus running frequency or wavelength will be calculated. Then measurements of the test drive shall show, if the detection of the sinus running is possible, if a change in the wheel profile also changes the sinus running, if the expected value and limit will be violated and which boundary conditions could be complied.

The present work closes with a summary of the possible boundary conditions and presents a proposal for a method of an automatic detection of hollow wear worn wheels.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	VII
II	Abbildungsverzeichnis	X
III	Tabellenverzeichnis	XVIII
IV	Formelverzeichnis	XXI
1	Motivation und Aufbau der Arbeit	1
1.1	Lage des Schienengüterverkehrs in Europa	1
1.2	Forschungsprojekt CargoCBM	1
1.3	Ziele der Arbeit	2
1.4	Aufbau der Arbeit	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Güterwagen und Güterwagendrehgestell	3
2.2	Schiene und Radsatz	4
2.2.1	Schiene	5
2.2.2	Radsatz	8
2.3	Der Rad-Schiene-Kontakt	12
2.3.1	Kinematik des Rad-Schiene-Kontakts	13
2.3.2	Darstellung der Rad-Schiene-Kontaktpaarungen über die äquivalente Konizität	18
2.3.3	Normalkontaktmechanik	24
2.3.4	Tangentialkontaktmechanik	25
2.4	Lateraldynamik des Radsatzes	29
2.4.1	Theorie des Wellenlaufes	29
2.4.2	Wellenlauf eines freien Radsatzes	30
2.4.3	Wellenlauf eines längsstarr gebundenen Radsatzes	32
2.4.4	Grenzen der kinematischen Betrachtung des Wellenlaufes	32
2.5	Verschleiß am Radprofil	34
3	Grundannahmen und bekannte Methoden	41
3.1	Theoretische Grundannahmen	41
3.2	Bekannte Methoden	43
4	Numerische Bestimmung der Wellenlauffrequenz	45
4.1	Auswahl und Analyse von Radprofilen aus der Datenbank des FG Schienenfahrzeuge	45
4.2	Beschreibung Simulationsmodell	51
4.3	Simulationsszenarien	53
4.3.1	Bestimmung der nichtlinearen kritischen Fahrgeschwindigkeit	55
4.3.2	Laterale Fahrdynamik	55

4.4	Vorbereitende Analyse und Beschreibung des Auswerteverfahrens für die Simulationsrechnungen.....	58
4.5	Resultate und Auswertung der Simulationsrechnungen	66
4.5.1	Auswertung der nichtlinearen kritischen Fahrgeschwindigkeit	66
4.5.2	Auswertung der Fahrdynamik bei Gleisanregung über gemessene Gleislagefehler	69
4.5.3	Auswertung der Fahrdynamik bei Gleisanregung über synthetische Gleislagefehler	112
4.5.4	Verhalten der Wellenauflauffrequenz bei niedrigerem Kraftschlussbeiwert	142
4.6	Zusammenfassung und Fazit der Simulationsergebnisse	148
5	Messkampagnen zur Ermittlung des Wellenlaufes.....	152
5.1	Beschreibung der Messkampagne	152
5.2	Analyse der Radprofile bei Vattenfall Europe Mining.....	157
5.3	Analyse der Messstrecke bei Vattenfall Europe Mining	167
5.4	Zusammenwirken von gemessenen Schienen- und Radprofilen sowie der Spurweite.....	170
5.5	Auswertung der Messfahrten	179
5.5.1	Analyse und Auswertung der Messfahrten 2013.....	182
5.5.2	Analyse und Auswertung der Messfahrten 2014.....	192
5.5.3	Analyse der Rückfahrten 2013 und 2014	205
5.5.4	Abschnittsauswertung und Vergleich für 2013 und 2014.....	210
5.6	Zusammenfassung und Fazit der Messergebnisse.....	214
6	Methodik zur Detektion von hohlgelaufenen Rädern	218
7	Zusammenfassung und Ausblick	220
7.1	Zusammenfassung.....	220
7.2	Ausblick	222
8	Literaturangaben.....	223
9	Anhang	228
9.1	Darstellung der Radparameter in Kombination mit der Schiene 60E1	228
9.2	Darstellung der berechneten nichtlinearen kritischen Geschwindigkeit des Kesselwagens auf der Schiene 60E1	245
9.3	Darstellung der Radprofilentwicklung bei VEM	253
9.4	Darstellung der Profilverleißentwicklung bei VEM	257
9.5	Messfahrt 1-2013	261
9.6	Messfahrt 2-2013	263
9.7	Messfahrt 4-2013	265
9.8	Messfahrt 5-2013	267
9.9	Messfahrt 1-2014	269
9.10	Messfahrt 2-2014	272
9.11	Messfahrt 3-2014	276

9.12	Messfahrt 4-2014	279
9.13	Rückfahrten 2013 und 2014	283
9.14	Abschnittsauswertung Messfahrt 1-2013.....	285
9.15	Abschnittsauswertung Messfahrt 4-2014.....	287

II Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: DARSTELLUNG EINES SCHAKENFAHRWERKS (LINKS) UND Y25-DREHGESTELLS (RECHTS)	3
ABBILDUNG 2: DARSTELLUNG DES GLEISAUFBAUS NACH [1]	5
ABBILDUNG 3: BEZEICHNUNGEN AN DER SCHIENE [21]	6
ABBILDUNG 4: DARSTELLUNG DER SCHIENENPROFILE 49E1 (A), 54E1 (B), 60E1 (C) UND 60E2 (D) [20]	7
ABBILDUNG 5: BEZEICHNUNGEN AM RADSATZ [21]	9
ABBILDUNG 6: BEZEICHNUNGEN AM RAD [21]	10
ABBILDUNG 7: DARSTELLUNG DER GRENZMAßBEZEICHNUNGEN NACH [16, 21]	11
ABBILDUNG 8: DARSTELLUNG DER GRENZMAßE FÜR EINE RAD-SCHIENE-PAARUNG [21]	12
ABBILDUNG 9: KOORDINATENSYSTEM NACH [32]	13
ABBILDUNG 10: DARSTELLUNG DER ROTATIONSBEZEICHNUNGEN BEI EINEM ROLLENDEN RADSATZ	13
ABBILDUNG 11: KONISCHER RADSATZ AUF SCHNEIDENLAGERUNG NACH [23]	14
ABBILDUNG 12: KONTAKTPUNKTDARSTELLUNG FÜR KONISCHE RADPROFILE (OBEN) UND DAS S1002- RADPROFIL (UNTEN)	16
ABBILDUNG 13: ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION FÜR EIN KONISCHES RADPROFIL UND S1002-RADPROFIL ..	17
ABBILDUNG 14: KONTAKTWINKELDIFFERENZFUNKTION FÜR EIN KONISCHES RADPROFIL UND S1002- RADPROFIL	17
ABBILDUNG 15: VERLAUF DER ÄQUIVALENTEN KONIZITÄT FÜR EIN S1002-RADPROFIL UND DER WIRKSAMEN KONIZITÄT FÜR EIN KONISCHES RADPROFIL	18
ABBILDUNG 16: STEPHENSONS WELLENLAUF NACH [23, 52]	19
ABBILDUNG 17: DARSTELLUNG DER ÄQUIVALENTEN KONIZITÄT FÜR VERSCHIEDENE RADAUFSTANDSKRÄFTE	22
ABBILDUNG 18: DARSTELLUNG DER ÄQUIVALENTEN KONIZITÄT FÜR VERSCHIEDENE SPURWEITEN	22
ABBILDUNG 19: EINFLUSS DER SPURWEITE AUF DIE ÄQUIVALENTE KONIZITÄT (3 MM QUERVERSCHIEBUNG) .	23
ABBILDUNG 20: DARSTELLUNG DER ÄQUIVALENTEN KONIZITÄT BEI VERSCHIEDENEN RAD-SCHIENE- PARAMETERN	23
ABBILDUNG 21: VERGLEICH DER ÄQUIVALENTEN KONIZITÄT BEI VERSCHIEDENEN RADDURCHMESSERN	24
ABBILDUNG 22: DARSTELLUNG DER WIRKENDEN FORMSCHLUSSKRÄFTE	25
ABBILDUNG 23: DARSTELLUNG DER KRAFTSCHLUSS-SCHLUPF-FUNKTION [49]	27
ABBILDUNG 24: DARSTELLUNG DER STABILEN (A), GRENZSTABILEN (B) UND INSTABILEN (C) RADSATZWENDEBEWEGUNG NACH [58]	33
ABBILDUNG 25: HOPF-VERZWEIGUNGSDIAGRAMM [59]	33
ABBILDUNG 26: VERGLEICH ZWISCHEN SPURKRANZ- UND LAUFLÄCHENVERSCHLEIß SOWIE ÜBERWALZUNG AN GEMESSENEN RADPROFILEN	36
ABBILDUNG 27: MESSUNG DER HOHLLAUFTIEFE NACH [62]	37
ABBILDUNG 28: PROZENTUALE VERTEILUNG VON HOHLGELAUFENEN RADSÄTZEN JE HOHLLAUFTIEFE H NACH [68]	38
ABBILDUNG 29: VERGLEICH DER WELLENLAUFFREQUENZEN NACH KLINGEL (BLAU) UND HEUMANN (ROT) FÜR EINE S1002-SCHIENE-60E1-PAARUNG	43
ABBILDUNG 30: ROLLRADIENDIFFERENZ DER RADSÄTZE S1002, SHL100609-037-039, SHL100509-105-107, SHL100609-125-127, SHL100609-165-167 UND DES TRAXX-RADSATZES JEWEILS MIT DER SCHIENE 60E1	49
ABBILDUNG 31: VISUELLE DARSTELLUNG DES SIMULATIONSMODELLS IN SIMPACK	51
ABBILDUNG 32: DARSTELLUNG DER UMGESETZTEN GLEISLAGEFEHLER ENTLANG DER STRECKE	57
ABBILDUNG 33: VERGLEICH DES ABKLINGVERHALTENS NACH STRECKENSEITIGER ANREGUNG	59
ABBILDUNG 34: VERGLEICH DER NORMIERTEN WELLENLAUFFREQUENZEN NACH STRECKENSEITIGER EINZELANREGUNG (FREQUENZSPEKTRUM DER RADSATZWENDEBEWEGUNG)	60
ABBILDUNG 35: FREQUENZSPEKTREN DES RADSATZWENDEWINKELS BEI EINER FAHRT MIT UNTERSCHIEDLICHER GESCHWINDIGKEIT UND PERMANENTEN GLEISLAGEFEHLERN	62
ABBILDUNG 36: NORMIERTE FREQUENZSPEKTREN DES RADSATZWENDEWINKELS UND DER RADSATZQUERBESCHLEUNIGUNG	63
ABBILDUNG 37: NORMIERTE FREQUENZSPEKTREN DES DREHGESTELLWENDEWINKELS UND DER DREHGESTELLQUERBESCHLEUNIGUNG	63
ABBILDUNG 38: VERGLEICH DES NORMIERTEN RADSATZWENDEWINKELFREQUENZSPEKTRUMS FÜR EINEN STANDARDRADSATZ UND EINEN RADSATZ MIT HOHLLAUF	64

ABBILDUNG 39: VERGLEICH ZWISCHEN DEM FREQUENZSPEKTRUM UND DEM FREQUENZSPEKTRUM MIT ZUSÄTZLICHER FILTERUNG MITTELS GLEITENDEN QUADRATISCHEN MITTELWERTS	66
ABBILDUNG 40: FREQUENZSPEKTRUM DER TRAXX-RÄDER, RADSATZ 1 NACH EINZELANREGUNG	70
ABBILDUNG 41: TRAXX-RÄDER, RADSATZ 1, FREQUENZSPEKTRUM (80 KM/H).....	71
ABBILDUNG 42: KONTAKTPUNKTSITUATION AUF DER LAUFLÄCHE DER TRAXX-RÄDER UND DEN RÄDERN MIT S1002 RADPROFIL (80 KM/H).....	72
ABBILDUNG 43: MISCHKONFIGURATION 1, WENDEWINKEL (80 KM/H)	89
ABBILDUNG 44: MISCHKONFIGURATION 1, QUERBESCHLEUNIGUNG (80 KM/H)	90
ABBILDUNG 45: MISCHKONFIGURATION 2, WENDEWINKEL (80 KM/H)	91
ABBILDUNG 46: MISCHKONFIGURATION 2, QUERBESCHLEUNIGUNG (80 KM/H)	91
ABBILDUNG 47: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (GEMESSENE GLEISLAGEFEHLER, ERSTER ABSCHNITT)	95
ABBILDUNG 48: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (GEMESSENE GLEISLAGEFEHLER, ZWEITER ABSCHNITT)	96
ABBILDUNG 49: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (GEMESSENE GLEISLAGEFEHLER, DRITTER ABSCHNITT).....	97
ABBILDUNG 50: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (GEMESSENE GLEISLAGEFEHLER, SRMS-FILTERUNG, ERSTER ABSCHNITT).....	110
ABBILDUNG 51: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (GEMESSENE GLEISLAGEFEHLER, SRMS-FILTERUNG, ZWEITER ABSCHNITT)	111
ABBILDUNG 52: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (GEMESSENE GLEISLAGEFEHLER, SRMS-FILTERUNG, DRITTER ABSCHNITT)	112
ABBILDUNG 53: SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE DER UMGESetzten GLEISLAGEFEHLER BEI 40 KM/H	113
ABBILDUNG 54: FREQUENZSPEKTRUMSVERGLEICH DES S1002-RADSATZWENDEWINKELS BEI ZWEI UNTERSCHIEDLICHEN ARTEN DER GLEISLAGEFEHLER	125
ABBILDUNG 55: FREQUENZSPEKTRUMSVERGLEICH DER S1002-RADSATZQUERBESCHLEUNIGUNG BEI ZWEI UNTERSCHIEDLICHEN ARTEN DER GLEISLAGEFEHLER	126
ABBILDUNG 56: VERGLEICH DER KONTAKTPUNKTE FÜR EINEN S1002-RADSATZ BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN (BEI 80 KM/H)	127
ABBILDUNG 57: VERGLEICH DER SCHLUPFKRÄFTE FÜR EINEN S1002-RADSATZ BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN (BEI 80 KM/H)	128
ABBILDUNG 58: VERGLEICH DES RADSATZWENDEWINKELS FÜR DEN RADSATZ MHL120609-021-023 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	129
ABBILDUNG 59: VERGLEICH DER RADSATZQUERBESCHLEUNIGUNG FÜR DEN RADSATZ MHL120609-021-023 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	129
ABBILDUNG 60: VERGLEICH DES RADSATZWENDEWINKELS FÜR DEN RADSATZ MHL230609-077-079 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	131
ABBILDUNG 61: VERGLEICH DER RADSATZQUERBESCHLEUNIGUNG FÜR DEN RADSATZ MHL230609-077-079 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	131
ABBILDUNG 62: VERGLEICH DES RADSATZWENDEWINKELS FÜR DEN RADSATZ MHL260609-034-036 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	132
ABBILDUNG 63: VERGLEICH DER RADSATZQUERBESCHLEUNIGUNG FÜR DEN RADSATZ MHL260609-034-036 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	133
ABBILDUNG 64: VERGLEICH DES RADSATZWENDEWINKELS FÜR DEN RADSATZ SHL100609-125-127 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	134
ABBILDUNG 65: VERGLEICH DER RADSATZQUERBESCHLEUNIGUNG FÜR DEN RADSATZ SHL100609-125-127 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	135

ABBILDUNG 66: VERGLEICH DES RADSATZWENDEWINKELS FÜR DEN RADSATZ SHL100609-165-167 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	136
ABBILDUNG 67: VERGLEICH DER RADSATZQUERBESCHLEUNIGUNG FÜR DEN RADSATZ SHL100609-165-167 BEI UNTERSCHIEDLICHEN GLEISLAGEFEHLERN	136
ABBILDUNG 68: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (SYNTHETISCHE GLEISLAGEFEHLER PSD, ERSTER ABSCHNITT)	138
ABBILDUNG 69: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (SYNTHETISCHE GLEISLAGEFEHLER PSD, ZWEITER ABSCHNITT)	139
ABBILDUNG 70: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (SYNTHETISCHE GLEISLAGEFEHLER PSD, DRITTER ABSCHNITT)	140
ABBILDUNG 71: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (SYNTHETISCHE GLEISLAGEFEHLER PSD, SRMS-FILTERUNG, ERSTER ABSCHNITT)	141
ABBILDUNG 72: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (SYNTHETISCHE GLEISLAGEFEHLER PSD, SRMS-FILTERUNG, ZWEITER ABSCHNITT)	141
ABBILDUNG 73: DARSTELLUNG DER WELLENLAUFFREQUENZEN ÜBER DIE GESCHWINDIGKEIT FÜR DEN RADSATZ 1 UND IM VERGLEICH ZUR HEUMANN- UND KLINGELFREQUENZ, WENDEWINKEL (SYNTHETISCHE GLEISLAGEFEHLER PSD, SRMS-FILTERUNG, DRITTER ABSCHNITT)	142
ABBILDUNG 74: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES RADSATZES 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 – RADSATZ S1002	143
ABBILDUNG 75: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES DREHGESTELLS 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 – RADSATZ S1002	143
ABBILDUNG 76: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES RADSATZES 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 UND NACH ZUSÄTZLICHER SRMS-FILTERUNG – RADSATZ S1002	144
ABBILDUNG 77: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES DREHGESTELLS 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 UND NACH ZUSÄTZLICHER SRMS-FILTERUNG – RADSATZ S1002	145
ABBILDUNG 78: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES RADSATZES 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 – RADSATZ SHL100609-125-127	146
ABBILDUNG 79: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES DREHGESTELLS 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 – RADSATZ SHL100609-125-127	146
ABBILDUNG 80: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES RADSATZES 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 UND NACH ZUSÄTZLICHER SRMS-FILTERUNG – RADSATZ SHL100609-125-127	147
ABBILDUNG 81: VERGLEICH DES WENDEWINKELS UND DER QUERBESCHLEUNIGUNG DES DREHGESTELLS 1 BEI REDUZIERTEM KRAFTSCHLUSSBEIWERT (REIBWERT) 0,1 UND NACH ZUSÄTZLICHER SRMS-FILTERUNG – RADSATZ SHL100609-125-127	147
ABBILDUNG 82: MESSFAHRZEUG VEM 84-5997	153
ABBILDUNG 83: POSITIONSBZEICHNUNG AM MESSFAHRZEUG NACH [85, 86]	153
ABBILDUNG 84: POSITIONIERUNG DES MESSSYSTEMS [87]	154
ABBILDUNG 85: MESSUNG DES RADPROFILS MIT MINIPROF	154
ABBILDUNG 86: BEFESTIGUNGSPUNKTE DER BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN UND SEILZUGAUFNEHMER	155
ABBILDUNG 87: DARSTELLUNG DER MESSSTRECKE (OBEN), STÜTZPUNKT WELZOW-SÜD (UNTEN)	156
ABBILDUNG 88: SCHIENENPROFILMESSGERÄT MINIPROF RAIL [87]	156
ABBILDUNG 89: RADPROFILENTWICKLUNG RADSATZ 1	159
ABBILDUNG 90: PROFILVERSCHLEIßENTWICKLUNG RADSATZ 1	160
ABBILDUNG 91: BERECHNUNG DER RESIDUALS NACH [87]	161
ABBILDUNG 92: ENTWICKLUNG DER PROFILVERSCHLEIßTIEFEN FÜR RADSATZ 1 UND RADSATZ 2	163
ABBILDUNG 93: ENTWICKLUNG DER PROFILVERSCHLEIßTIEFEN FÜR RADSATZ 3 UND RADSATZ 4	164

ABBILDUNG 94: GEMESSENE SPURWEITE DER MESSSTRECKE (2014)	168
ABBILDUNG 95: BERECHNETE ÄQUIVALENTE KONIZITÄTEN DER MESSSTRECKE	169
ABBILDUNG 96: DARSTELLUNG DER THEORETISCHEN KLINGEL- BZW. HEUMANNFREQENZ BEI 40 KM/H ENTLANG DER MESSSTRECKE.....	170
ABBILDUNG 97: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT DER RADSÄTZE 1 UND 2 IM JAHR 2013 UND 2014 FÜR DIE MESSSTRECKE.....	171
ABBILDUNG 98: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT DER RADSÄTZE 3 UND 4 IM JAHR 2013 UND 2014 FÜR DIE MESSSTRECKE.....	172
ABBILDUNG 99: VERGLEICH DER RADSÄTZE 1 UND 2 2014 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FAHRRICHTUNG	173
ABBILDUNG 100: VERGLEICH DER RADSÄTZE 3 UND 4 2014 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FAHRRICHTUNG	173
ABBILDUNG 101: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT (HARMONISCH) FÜR DEN RADSATZ 1 AUS DEM JAHR 2014 MIT DER MESSSTELLE 12	174
ABBILDUNG 102: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT (HARMONISCH) FÜR DEN RADSATZ 1 AUS DEM JAHR 2014 MIT SCHIENE 60E1 UND 1441 MM SPURWEITE	176
ABBILDUNG 103: KONTAKTSITUATION BADEWANNE, RADSATZ 1-2014, MESSSTELLE 12	177
ABBILDUNG 104: KONTAKTSITUATION KLEINERE BADEWANNEKURVE	177
ABBILDUNG 105: ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DER RADSÄTZE 1-2014 UND 3-2014 MIT DER MESSSTELLE 12	177
ABBILDUNG 106: VERGLEICH DER ANALYTISCH BERECHNETEN KLINGELFREQENZ FÜR DIE STANDARDPAARUNG UND DER ERWARTETEN WELLENLAUFFREQENZ NACH KLINGEL FÜR DEN RADSATZ 1 BEI 40 KM/H ENTLANG DER MESSSTRECKE	178
ABBILDUNG 107: VERGLEICH DER WELLENLÄNGE DES THEORETISCHEN WELLENLAUFES (2014).....	179
ABBILDUNG 108: VERGLEICH DER FFT UND PSD DES ZEITSIGNALS VOM DREHGESTELL 1 VORN	180
ABBILDUNG 109: BERECHNETE KLINGELFREQENZ FÜR 40 KM/H UND 60 KM/H.....	181
ABBILDUNG 110: VERGLEICH DER SPEKTRALEN LEISTUNGSDICHTE (ROHDATEN) MIT DEM GEGLÄTTETEN/GEFILTERTEN DATENSATZ.....	182
ABBILDUNG 111: GESCHWINDIGKEITSVERLAUF AUF DEM TESTABSCHNITT MESSFAHRT 1-2013, MESSFAHRT 2- 2013, MESSFAHRT 4-2013, MESSFAHRT 5-2013 (VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS).....	184
ABBILDUNG 112: PSD DER MESSFAHRT 1-2013; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS)	185
ABBILDUNG 113: PSD DER MESSFAHRT 2-2013; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS)	187
ABBILDUNG 114: PSD DER MESSFAHRT 4-2013; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS)	189
ABBILDUNG 115: PSD DER MESSFAHRT 5-2013; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS)	190
ABBILDUNG 116: GESCHWINDIGKEITSVERLAUF AUF DEM TESTABSCHNITT MESSFAHRT 1-2014, MESSFAHRT 2- 2014, MESSFAHRT 3-2014, MESSFAHRT 4-2014 (OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS)	193
ABBILDUNG 117: PSD DER MESSFAHRT 1-2014; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN, WAGENKASTEN VORN, MITTE, UNTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN); WAGENKASTENQUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ), SEILZUGAUFNEHMER DG1 (BLAU), SEILZUGAUFNEHMER DG2 (ROT)	196
ABBILDUNG 118: PSD DER MESSFAHRT 2-2014; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN, WAGENKASTEN VORN, MITTE, UNTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN); WAGENKASTENQUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ), SEILZUGAUFNEHMER DG1 (BLAU), SEILZUGAUFNEHMER DG2 (ROT)	198
ABBILDUNG 119: PSD DER MESSFAHRT 3-2014; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN, WAGENKASTEN VORN, MITTE, UNTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN); WAGENKASTENQUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ), SEILZUGAUFNEHMER DG1 (BLAU), SEILZUGAUFNEHMER DG2 (ROT)	201
ABBILDUNG 120: PSD DER MESSFAHRT 4-2014; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN, WAGENKASTEN VORN, MITTE, UNTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN); WAGENKASTENQUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ), SEILZUGAUFNEHMER DG1 (BLAU), SEILZUGAUFNEHMER DG2 (ROT)	204

ABBILDUNG 121: GESCHWINDIGKEITSVERLAUF DER RÜCKFAHRTEN 2013 (LINKS) UND 2014 (RECHTS)	206
ABBILDUNG 122: PSD DER BESCHLEUNIGUNGSSSENSOREN RÜCKFAHRT 1-2013 (OBEN LINKS), RÜCKFAHRT 1-2014 (OBEN RECHTS), RÜCKFAHRT 2-2014 (UNTEN LINKS), RÜCKFAHRT 3-2014 (UNTEN RECHTS)	207
ABBILDUNG 123: PSD SEILZUGAUFNEHMER RÜCKFAHRT 2013	208
ABBILDUNG 124: PSD SEILZUGAUFNEHMER RÜCKFAHRTEN 2014	209
ABBILDUNG 125: PSD DER MESSFAHRT 1-2013, ABSCHNITTS-AUSWERTUNG; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS).....	211
ABBILDUNG 126: PSD DER MESSFAHRT 4-2014, ABSCHNITTS-AUSWERTUNG; QUERBESCHLEUNIGUNG (SCHWARZ) UND SEILZUGAUFNEHMER (BLAU) FÜR DG1 VORN BIS DG2 HINTEN (VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS).....	213
ABBILDUNG 127: CARGOCBM-METHODIK ZUR AUTOMATISCHEN DETEKTION VON HOHLGELAUFENEN RADSÄTZEN AN GÜTERWAGEN NACH [91, 92].....	218
ABBILDUNG 128: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES S1002 MIT DER SCHIENE 60E1.....	228
ABBILDUNG 129: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES OHL080609-009-011 MIT DER SCHIENE 60E1	229
ABBILDUNG 130: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES OHL080609-013-015 MIT DER SCHIENE 60E1	230
ABBILDUNG 131: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES LHL220609-033-035 MIT DER SCHIENE 60E1	231
ABBILDUNG 132: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES LHL220609-041-043 MIT DER SCHIENE 60E1	232
ABBILDUNG 133: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES LHL220609-049-051 MIT DER SCHIENE 60E1	233
ABBILDUNG 134: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES LHL230609-069-071 MIT DER SCHIENE 60E1	234
ABBILDUNG 135: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES MHL120609-021-023 MIT DER SCHIENE 60E1.....	235
ABBILDUNG 136: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES MHL230509-077-079 MIT DER SCHIENE 60E1.....	236
ABBILDUNG 137: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES MHL260509-034-036 MIT DER SCHIENE 60E1.....	237
ABBILDUNG 138: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES SHL100609-037-039 MIT DER SCHIENE 60E1	238
ABBILDUNG 139: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES SHL100609-105-107 MIT DER SCHIENE 60E1	239
ABBILDUNG 140: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES SHL100609-125-127 MIT DER SCHIENE 60E1	240
ABBILDUNG 141: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES SHL100609-165-167 MIT DER SCHIENE 60E1	241
ABBILDUNG 142: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES SHL110609-025-027 MIT DER SCHIENE 60E1	242
ABBILDUNG 143: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES RADSATZES SHL270509-013-015 MIT DER SCHIENE 60E1	243
ABBILDUNG 144: ÄQUIVALENTE KONIZITÄT UND ROLLRADIENDIFFERENZFUNKTION DES TRAXX-RADSATZES MIT DER SCHIENE 60E1.....	244
ABBILDUNG 145: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ S1002	245
ABBILDUNG 146: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ OHL080609-009-011	245
ABBILDUNG 147: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ OHL080609-013-015	246

ABBILDUNG 148: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ LHL220609-033-035	246
ABBILDUNG 149: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ LHL220609-041-043	247
ABBILDUNG 150: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ LHL220609-049-051	247
ABBILDUNG 151: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ LHL230609-069-071	248
ABBILDUNG 152: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ MHL120609-021-023	248
ABBILDUNG 153: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ MHL230609-034-036	249
ABBILDUNG 154: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ MHL230609-077-079	249
ABBILDUNG 155: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ SHL100609-037-039	250
ABBILDUNG 156: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ SHL100609-105-107	250
ABBILDUNG 157: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ SHL100609-125-127	251
ABBILDUNG 158: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ SHL100609-165-167	251
ABBILDUNG 159: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ SHL110609-025-027	252
ABBILDUNG 160: BERECHNETE NICHTLINEARE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT DES KESSELWAGENS MIT DEM RADSATZ SHL270509-013-015	252
ABBILDUNG 161: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 1 LINKS	253
ABBILDUNG 162: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 1 RECHTS	253
ABBILDUNG 163: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 2 LINKS	254
ABBILDUNG 164: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 2 RECHTS	254
ABBILDUNG 165: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 3 LINKS	255
ABBILDUNG 166: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 3 RECHTS	255
ABBILDUNG 167: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 4 LINKS	256
ABBILDUNG 168: RADPROFIENTWICKLUNG RADSATZ 4 RECHTS	256
ABBILDUNG 169: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 1 LINKS	257
ABBILDUNG 170: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 1 RECHTS	257
ABBILDUNG 171: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 2 LINKS	258
ABBILDUNG 172: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 2 RECHTS	258
ABBILDUNG 173: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 3 LINKS	259
ABBILDUNG 174: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 3 RECHTS	259
ABBILDUNG 175: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 4 LINKS	260
ABBILDUNG 176: PROFILVERSCHLEIBENTWICKLUNG RADSATZ 4 RECHTS	260
ABBILDUNG 177: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 1-2013	261
ABBILDUNG 178: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 1-2013	261
ABBILDUNG 179: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 1-2013	262
ABBILDUNG 180: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 1-2013	262
ABBILDUNG 181: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 2-2013	263
ABBILDUNG 182: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 2-2013	263

ABBILDUNG 183: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 2-2013	264
ABBILDUNG 184: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 2-2013	264
ABBILDUNG 185: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 4-2013	265
ABBILDUNG 186: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 4-2013	265
ABBILDUNG 187: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 4-2013	266
ABBILDUNG 188: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 4-2013	266
ABBILDUNG 189: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 5-2013	267
ABBILDUNG 190: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 5-2013	267
ABBILDUNG 191: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 5-2013	268
ABBILDUNG 192: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 5-2013	268
ABBILDUNG 193: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 1-2014	269
ABBILDUNG 194: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 1-2014	269
ABBILDUNG 195: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 1-2014	270
ABBILDUNG 196: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 1-2014	270
ABBILDUNG 197: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK VORN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 1-2014	271
ABBILDUNG 198: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK MITTE, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 1-2014	271
ABBILDUNG 199: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK HINTEN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 1-2014	272
ABBILDUNG 200: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 2-2014	272
ABBILDUNG 201: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 2-2014	273
ABBILDUNG 202: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 2-2014	273
ABBILDUNG 203: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 2-2014	274
ABBILDUNG 204: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK VORN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 2-2014	274
ABBILDUNG 205: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK MITTE, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 2-2014	275
ABBILDUNG 206: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK HINTEN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 2-2014	275
ABBILDUNG 207: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 3-2014	276
ABBILDUNG 208: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 3-2014	276
ABBILDUNG 209: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 3-2014	277

ABBILDUNG 210: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 3-2014	277
ABBILDUNG 211: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK VORN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 3-2014	278
ABBILDUNG 212: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK MITTE, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 3-2014	278
ABBILDUNG 213: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK HINTEN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 3-2014	279
ABBILDUNG 214: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 4-2014	279
ABBILDUNG 215: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1 MESSFAHRT 4-2014	280
ABBILDUNG 216: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 4-2014	280
ABBILDUNG 217: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 4-2014	281
ABBILDUNG 218: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK VORN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 4-2014	281
ABBILDUNG 219: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK MITTE, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 4-2014	282
ABBILDUNG 220: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG WK HINTEN, SEILZUGAUFNEHMER DG1 UND SEILZUGAUFNEHMER DG2 MESSFAHRT 4-2014	282
ABBILDUNG 221: PSD DER RÜCKFAHRT 1-2013 (QUERBESCHLEUNIGUNG)	283
ABBILDUNG 222: PSD DER RÜCKFAHRT 1-2014 (QUERBESCHLEUNIGUNG)	283
ABBILDUNG 223: PSD DER RÜCKFAHRT 2-2014 (QUERBESCHLEUNIGUNG)	284
ABBILDUNG 224: PSD DER RÜCKFAHRT 3-2014 (QUERBESCHLEUNIGUNG)	284
ABBILDUNG 225: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 1-2013.....	285
ABBILDUNG 226: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 1-2013.....	285
ABBILDUNG 227: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 1-2013.....	286
ABBILDUNG 228: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 1-2013.....	286
ABBILDUNG 229: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 4-2014.....	287
ABBILDUNG 230: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG1 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG1, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 4-2014.....	287
ABBILDUNG 231: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 VORN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 4-2014.....	288
ABBILDUNG 232: PSD QUERBESCHLEUNIGUNG DG2 HINTEN UND SEILZUGAUFNEHMER DG2, ABSCHNITTSAUSWERTUNG MESSFAHRT 4-2014.....	288

III Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: GRENZABMABE EINES EISENBAHNRADES NACH [16].....	11
TABELLE 2: PLANUNGSGRENZWERTE FÜR DIE ÄQUIVALENTE KONIZITÄT λ_e NACH [17].....	19
TABELLE 3: AUFLISTUNG DER VERWENDETEN RADSÄTZE MIT ENTSPRECHENDEN RADPROFILIEN INKLUSIVE HOHLAUFTEUFE [MM].....	47
TABELLE 4: DARSTELLUNG DER RADPROFILABMESSUNGEN.....	48
TABELLE 5: AUFLISTUNG UND VERGLEICH DER RADPROFILCHARAKTERISTIKA.....	50
TABELLE 6: KENNDATEN DER WAGENMODELLIERUNG NACH [79].....	52
TABELLE 7: EIGENWERTE DES KESSELWAGENS NACH [79].....	53
TABELLE 8: ERLÄUTERUNG DER ANGEWANDTEN MISCHKONFIGURATION.....	54
TABELLE 9: FREQUENZ DER MAXIMALEN AMPLITUDEN DER WELLENLAUFFREQUENZ NACH EINZELANREGUNG.....	60
TABELLE 10: AUFLISTUNG UND VERGLEICH DER KRITISCHEN GESCHWINDIGKEIT.....	67
TABELLE 11: ZUSAMMENFASSUNG DER RADPROFILEIGENSCHAFTEN IM VERGLEICH ZUR NICHTLINEAREN KRITISCHEN FAHRGESCHWINDIGKEIT.....	69
TABELLE 12: ZUSAMMENFASSUNG DES KREUZVERGLEICHES.....	73
TABELLE 13: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 1 (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	74
TABELLE 14: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 2 (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	75
TABELLE 15: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 3 (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	76
TABELLE 16: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 4 (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	77
TABELLE 17: KREUZVERGLEICH DREHGESTELLWENDEWINKEL MIT RADSATZWENDEWINKEL (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	80
TABELLE 18: KREUZVERGLEICH DREHGESTELLWENDEWINKEL MIT RADSATZWENDEWINKEL (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	81
TABELLE 19: KREUZVERGLEICH DER WENDEWINKEL BEIDER DREHGESTELLE (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	82
TABELLE 20: KREUZVERGLEICH DREHGESTELL-1-WENDEWINKEL MIT QUERBESCHLEUNIGUNGEN AM DREHGESTELL 1 (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	83
TABELLE 21: KREUZVERGLEICH DREHGESTELL-2-WENDEWINKEL MIT QUERBESCHLEUNIGUNGEN (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	84
TABELLE 22: KREUZVERGLEICH WAGENKASTENWENDEWINKEL MIT ENTSPRECHENDEM DREHGESTELLWENDEWINKEL (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	85
TABELLE 23: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL MIT QUERBESCHLEUNIGUNG AM WAGENKASTEN (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	86
TABELLE 24: KREUZVERGLEICH ZWISCHEN DER QUERBESCHLEUNIGUNG AM WAGENKASTEN UND DEM ENTSPRECHENDEN DREHGESTELLWENDEWINKEL (TEIL 1, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	87
TABELLE 25: KREUZVERGLEICH ZWISCHEN DER QUERBESCHLEUNIGUNG AM WAGENKASTEN UND DEM ENTSPRECHENDEN DREHGESTELLWENDEWINKEL (TEIL 2, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	88
TABELLE 26: VERGLEICH DER RADSATZWENDEWINKEL ZWISCHEN DEM RADSATZ AUS DER MISCHKONFIGURATION 1 UND DEM ENTSPRECHENDEN RADSATZ AUS DER EINHEITLICHEN KONFIGURATION (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	92
TABELLE 27: VERGLEICH DER RADSATZWENDEWINKEL ZWISCHEN DEM RADSATZ AUS DER MISCHKONFIGURATION 2 UND DEM ENTSPRECHENDEN RADSATZ AUS EINHEITLICHEN KONFIGURATION (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	92
TABELLE 28: VERGLEICH DER DREHGESTELLABHÄNGIGKEIT BEI MISCHKONFIGURATION DER RADSÄTZE (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	93

TABELLE 29: AUSWERTUNG DER HOHLLAUFDETEKTION UND VERGLEICH MIT DER ÄQUIVALENTEN KONIZITÄT UND HOHLLAUFTIEFE	98
TABELLE 30: ZUSAMMENFASSUNG DER KREUZVERGLEICHE FÜR ALLE RADSÄTZE, DREHGESTELL 1 UND 2, WAGENKASTEN (GEMESSENE GLEISLAGEFehler, SRMS-FILTERUNG)	100
TABELLE 31: KREUZVERGLEICH RADSATZWENDEWINKEL (WW) UND QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) NACH SRMS-FILTERUNG (RADSATZ 1, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	101
TABELLE 32: KREUZVERGLEICH RADSATZWENDEWINKEL (WW) UND QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) NACH SRMS-FILTERUNG (RADSATZ 2, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	102
TABELLE 33: KREUZVERGLEICH RADSATZWENDEWINKEL (WW) UND QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) NACH SRMS-FILTERUNG (RADSATZ 3, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	103
TABELLE 34: KREUZVERGLEICH RADSATZWENDEWINKEL (WW) UND QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) NACH SRMS-FILTERUNG (RADSATZ 4, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	104
TABELLE 35: KREUZVERGLEICH DREHGESTELLWENDEWINKEL (WW) UND QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) NACH SRMS-FILTERUNG (DREHGESTELL 1, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	105
TABELLE 36: KREUZVERGLEICH DREHGESTELLWENDEWINKEL (WW) UND QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) NACH SRMS-FILTERUNG (DREHGESTELL 2, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	106
TABELLE 37: KREUZVERGLEICH WAGENKASTENWENDEWINKEL (WW) UND QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) NACH SRMS-FILTERUNG (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	107
TABELLE 38: KREUZVERGLEICH ZWISCHEN DER QUERBESCHLEUNIGUNG AM WAGENKASTEN UND DEM ENTSPRECHENDEN DREHGESTELLWENDEWINKEL (TEIL 1, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	108
TABELLE 39: KREUZVERGLEICH ZWISCHEN DER QUERBESCHLEUNIGUNG AM WAGENKASTEN UND DEM ENTSPRECHENDEN DREHGESTELLWENDEWINKEL (TEIL 2, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	109
TABELLE 40: ZUSAMMENFASSUNG DER KREUZVERGLEICHE FÜR ALLE RADSÄTZE, DREHGESTELL 1 UND 2, WAGENKASTEN (SYNTHETISCHE GLEISLAGEFehler).....	114
TABELLE 41: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 1 FÜR GLEISANREGUNG ÜBER PSD (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	115
TABELLE 42: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 2 FÜR GLEISANREGUNG ÜBER PSD (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	116
TABELLE 43: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 3 FÜR GLEISANREGUNG ÜBER PSD (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	117
TABELLE 44: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM RADSATZ 4 FÜR GLEISANREGUNG ÜBER PSD (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ).....	118
TABELLE 45: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM DREHGESTELL 1 FÜR GLEISANREGUNG ÜBER PSD (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	119
TABELLE 46: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM DREHGESTELL 2 FÜR GLEISANREGUNG ÜBER PSD (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	120
TABELLE 47: KREUZVERGLEICH WENDEWINKEL (WW) MIT QUERBESCHLEUNIGUNG (AY) AM WAGENKASTEN FÜR GLEISANREGUNG ÜBER PSD (ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	121
TABELLE 48: KREUZVERGLEICH ZWISCHEN DER QUERBESCHLEUNIGUNG AM WAGENKASTEN UND DEM ENTSPRECHENDEN DREHGESTELLWENDEWINKEL (TEIL 1, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	122
TABELLE 49: KREUZVERGLEICH ZWISCHEN DER QUERBESCHLEUNIGUNG AM WAGENKASTEN UND DEM ENTSPRECHENDEN DREHGESTELLWENDEWINKEL (TEIL 2, ANGABE DER MAXIMALEN FREQUENZPEAKS IN HZ)	123
TABELLE 50: VERGLEICH DER WELLENLAUFFREQUENZEN [HZ] (S1002, RADSATZ 1) JE NACH ART DER GLEISLAGEFehler	126
TABELLE 51: ZUORDNUNG DER MESSSTELLE ZUM DISTANZABSCHNITT DER MESSSTRECKE 2014	157
TABELLE 52: ZUSAMMENFASSUNG DER MESSTERMINE UND DER ENTSPRECHENDEN LAUFLEISTUNGEN FÜR DEN SATTELBODENENTLADER	158
TABELLE 53: ZUSAMMENFASSUNG DER VERSCHLEIßRATEN [MM/1000 KM] JE RADSATZPOSITION	166
TABELLE 54: ZUSAMMENFASSUNG DER ERFASSTEN RADPARAMETER.....	166

TABELLE 55: AUFLISTUNG DER RADSATZ-MESSSTELLEN-PAARUNGEN MIT EINER BADEWANNENKURVE IN DER ÄQUIVALENTEN KONIZITÄT	175
TABELLE 56: AUFLISTUNG DER GESCHWINDIGKEITSABHÄNGIGEN PARAMETER DER MESSFAHRTEN	183
TABELLE 57: ZUSAMMENFASSUNG DER GESCHWINDIGKEITSPARAMETER FÜR DIE MESSFAHRTEN 2014	193

IV Formelverzeichnis

<i>Lateinische Symbole</i>	
a	Halbmesser Kontaktellipse
b	Halbmesser Kontaktellipse
$c_{11}, c_{22}, c_{23}, c_{33}$	Kalkerkoeffizienten
e_0	Halbe Stützweite
f_0	Klingelfrequenz
f_{0H}	Heumannfrequenz
$k(A)$	Beschreibungsfunktion
l	Halber Radsatzstand
qR	Spurkranzflankenmaß
r_0	Radradius in Nominallage
r_l/r	Linker/rechter Rad-/Rollradius im Kontaktpunkt
s_B	Bohrschlupf
s_x	Längsschlupf
s_y	Querschlupf
t	Zeit
v	Fahrgeschwindigkeit
v_G	Quergleitgeschwindigkeit
v_{ref}	Referenzgeschwindigkeit
$w_{x/y}$	Longitudinale, laterale Relativgeschwindigkeit
y_{RS}	Seitlicher Radsatzversatz
x, y, z	Richtungskordinate
A	Angenommene Querverschiebungsamplitude/ Amplitude der Wellenbewegung
AR	Abstand der inneren Stirnflächen
BR	Radreifen-/Radkranzbreite
$E(\Delta^2)$	Erwartungswert des quadratischen Fehlers
F_y	Laterale Radsatzkraft, laterale Geometrieseiten- kraft
G	Schubmodul
$K(A)$	Beschreibungsfunktion
L	Wellenlänge des Wellen-/Sinuslaufes
$L_{1,2,3}$	Flexibilitätsparameter
M_z	Bohrmoment
N	Normalkraft im Radaufstandspunkt
Q	Radaufstandskraft
R	Radius der Kreisbahn für konische Radsätze
Sd	Spurkranzdicke
Sh	Spurkranzhöhe
SR	Spurmaß
$T_{x/y}$	Tangentiale Kraft im Kontaktpunkt

<i>Griechische Symbole</i>	
γ	Tangentenneigung in Kontaktebene
γ_0	Kegelneigung in Nominallage; Neigung der Lauffläche; Konizität der Lauffläche (Tangentenneigung)
$\gamma_{l/r}$	Linke/rechte Tangentenneigung, Neigung der Lauffläche im linken/rechten Radaufstandspunkt
Δr	Rollradiendifferenz
$\Delta\gamma$	Kontaktwinkeldifferenz
ϵ	Kontaktwinkelparameter
ϵ_e	Äquivalenter Kontaktwinkelparameter
λ	Wirksame Konizität
λ_e	Äquivalente Konizität
σ	Wankwinkelparameter
σ_e	Äquivalenter Wankwinkelparameter
τ	Substitutionsvariable
$\tau_{x/y}$	Longitudinale, laterale Tangentialspannung im Kontaktpunkt
Ω	Wegkreisfrequenz
φ, ω, ψ	Winkel um x-, y-, z-Koordinate
$\dot{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit um x-Koordinate
<i>Mathematische Symbole</i>	
∂	Symbol der partiellen Ableitung
<i>Abkürzungen</i>	
EBA	Eisenbahnbundesamt
EBO	Eisenbahnbetriebsordnung
FFT	Fast-Fourier-Transformation
PJM	PJ Messtechnik GmbH
PSD	Spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density)
SRMS	Gleitender Quadratwurzelmittelwert
VEM	Vattenfall Europe Mining
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen