

# **Methode zur Bewertung von Gleislageabweichungen auf Basis von Fahrzeugreaktionen**

**Dissertation**

zur Erlangung der Würde eines  
Doctor technicae (Dr. techn.)

vorgelegt

**an der Fakultät für Maschinenbau und  
Wirtschaftsingenieurwesen  
der Technischen Universität Graz**

von

**Dipl.–Ing. Bernd Luber**

8045 Graz, Am Arlandgrund 53  
geboren am 1. Juli 1978 in Leoben

Graz, im Herbst 2011

Begutachtung:

Univ.–Prof. i.R. Dr. techn. Wolfgang Hirschberg, Technische Universität Graz  
em. Univ.–Prof. Dr. techn. Klaus Rießberger, Technische Universität Graz

# Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen des Projekts „A5\_S02 Gleiszustandsbewertung“ am Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug, Forschungsgesellschaft mbH (ViF) entstanden und daher möchte ich mich beim „Kplus Kompetenzzentren–Programm“ des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr und Technologie (BMVIT), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), dem Land Steiermark und der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG) für ihre finanzielle Unterstützung bedanken. Ebenfalls danke ich den unterstützenden Firmen und Projektpartnern Siemens AG Österreich, voestalpine Schienen GmbH sowie der Technischen Universität Graz.

Die vorliegende Arbeit dient in Anlehnung an den Studienplan dem Nachweis der Befähigung zur selbstständigen Bewältigung wissenschaftlicher Fragestellungen. Für die Absolvierung dieser Aufgabe standen mir jedoch sehr viele Menschen zur Seite, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn em. Univ.–Prof. Dr. techn. Wolfgang Hirschberg (Institut für Fahrzeugtechnik, TU Graz), der mich nicht nur mit wertvollen Beiträgen u. a. hinsichtlich bewährter und neuer Bewertungsmethoden von Fahrbahnunebenheiten in Kombination mit der Fahrzeugdynamik im automotiven Bereich unterstützt hat, sondern mit seiner Forderung nach wissenschaftlich hohem Niveau die Qualität der Arbeit noch deutlich gesteigert hat.

Es ist mir eine große Freude, dass Herr em. Univ.–Prof. Dr. techn. Klaus Rießberger (Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz) als Experte des Systems Eisenbahn die Zweitbegutachtung meiner Arbeit übernommen hat. Er hat bereits als wissenschaftlicher Projektpartner und als wissenschaftlicher Leiter des Bereichs 'Rail Systems' am ViF wesentliche Beiträge für die entstandene Arbeit eingebracht, wobei ich hier speziell den Überblick über den Stand der Technik hervorheben und mich bei ihm bedanken möchte.

Ein großes Dankeschön möchte ich Herrn DI Dr. Andreas Haigermoser und Herrn DI Dr. Gerald Grabner (beide Siemens AG Österreich) aussprechen und mich besonders für die hervorragende Zusammenarbeit und sehr intensiven fachlichen Diskussionen bedanken. Sie konnten stets meine Top–Motivation für das Thema aufrecht erhalten, indem sie mir immer wieder die große Bedeutung dieser Thematik für das Bahnsystem in Europa vor Augen führten.

Mein Dank gilt auch allen Kollegen des ViF, die mir ebenfalls durch fachliche Diskussionen sehr geholfen haben. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle meinen Kollegen Herrn DI (FH) Josef Fuchs, der mich in den letzten Jahren hervorragend unterstützt und durch seine Kreativität einen wertvollen Beitrag für diese Arbeit geleistet hat. Zusätzlich möchte ich mich bei unserem ehemaligen wissenschaftlichen Area-Leiter Herrn Univ.-Doz. Dr. techn. Arno Eichberger für die Durchsicht der Arbeit und für das konstruktive Feedback bedanken, wodurch die Qualität der Arbeit wiederum gesteigert werden konnte.

Vielen herzlichen Dank an meine Schwägerin Mag. Petra Dumbell und an meine Mama Dipl.-Päd. Maria Jungwirth für die zahlreichen Stunden des Korrekturlesens meiner Arbeit. Für mich war nicht nur das Feedback hinsichtlich der Korrekturen sehr hilfreich, sondern auch die Auffassung der Inhalte als Nicht-Fachspezialisten, denn dieser Aspekt soll auch in einer wissenschaftlichen Arbeit niemals vergessen werden.

Ich habe für die Erstellung der vorliegenden Arbeit in den letzten Jahren nicht nur viele Urlaubstage herangezogen, sondern mich auch in sehr vielen Freizeitstunden und an Wochenenden mit dieser Thematik beschäftigt. Dies war nur möglich, da ich hier die volle Unterstützung meiner drei wertvollsten Menschen in meinem Leben hatte. Wie gerne erinnere ich mich an die Zeit, in der ich gemeinsam mit meiner Tochter Sandra die Dissertations-Grafiken am Computer angesehen habe, oder an die Frage meines damals 3-jährigen Sohnes Rafael bei der Erstellung einer Grafik: „Papa, warum sind da bei der Taurus beide Pantografen oben?“. Auch wenn in der vorliegenden Arbeit die wissenschaftliche Leistung im Vordergrund steht, so möchte ich an dieser Stelle der Danksagung die unschätzbare Leistung meiner Frau Selina ganz besonders hervorheben. Nur durch ihre Unterstützung war mir die Erstellung der Dissertation neben meinem Beruf und meiner Familie überhaupt möglich!

Dafür bin ich unendlich dankbar und somit möchte ich diese Arbeit meiner Familie widmen,

für Selina, Rafael und Sandra.

# 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.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## Kurzfassung

Sowohl bei der fahrtechnischen Zulassung von Schienenfahrzeugen als auch bei der Fahrweg-Instandhaltung müssen Abweichungen der Gleislage von der Soll-Lage bewertet und klassifiziert werden. Die für beide Anwendungsfälle in der Europäischen Norm definierte Methode zur Bestimmung der Qualität von Gleislagen ist hierfür nicht zufriedenstellend, da die durch Abweichungen resultierende Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion bei der Beurteilung nicht berücksichtigt wird. Diese erhöhte Interaktion kann sowohl eine Verringerung des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit als auch eine Erhöhung der Instandhaltungskosten des Gesamtsystems zur Folge haben.

Die in dieser Arbeit entwickelte *Track Geometry Assessment* (TGA) Methode berücksichtigt erstmals genau diese Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion durch die Beschreibung des dynamischen Verhaltens mit Hilfe von sogenannten *empirischen Übertragungsfunktionen*, welche auf Basis einer nicht-parametrischen System-Identifikationsmethode berechnet wurden. Die Anwendung der TGA-Methode liefert als Ergebnis sogenannte *Ausnutzungsgrade* hinsichtlich Fahrwegbeanspruchung und Fahrsicherheit, welche als maßgebende Größen für die Bewertung und Klassifizierung der Gleislageabweichungen herangezogen werden können.

Die Analyse der Ergebnisse zeigt die Überlegenheit der TGA-Methode gegenüber den aktuellen Bewertungsmethoden aus den Europäischen Normen. Daraus ergibt sich ein großes Potenzial für eine gemeinsam verwendbare und akzeptable Methode für die Fahrzeughersteller und Infrastrukturbetreiber. Mit dieser Arbeit wurde daher ein wissenschaftlicher Beitrag für die Interoperabilität, d. h. für die Eignung des transeuropäischen Eisenbahnsystems für den sicheren und durchgehenden Zugverkehr geleistet.

## Abstract

Testing of the running characteristics of railway vehicles as well as the maintenance process of European Infrastructures require an assessment and classification of track geometry irregularities. In both cases the track geometry quality assessment methods defined in European Standards are unsatisfactory. The reason is that the vehicle track interaction caused by the deviations is not taken into account by these defined methods. The increased interaction could lead to a reduction in ride comfort and driving safety as well as an increase in maintenance costs of the overall system.

In this dissertation, an alternative approach, the so-called *Track Geometry Assessment* (TGA) method is elaborated. This method takes vehicle/track interaction into account through the inclusion of the dynamic behavior by using *empirical transfer functions*. The empirical transfer functions are calculated on the basis of a non-parametric system-identification method. The application of the TGA method provides *load factors* regarding dynamic track loading and running safety. These factors can be used as the relevant quantities for the assessment and classification of track geometry irregularities.

The analysis of the results shows the consistent superiority of the TGA method over the current European Standard methods. This yields a great potential for both vehicle manufacturers and infrastructure managers to use a single common assessment method. The development of the Track Geometry Assessment method makes a scientific contribution to the advancement of railway interoperability, this means the ability of a rail system to allow the safe and uninterrupted movement of trains in Europe.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielstellung der Arbeit . . . . .	2
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Gleislageabweichungen im System Fahrzeug–Fahrweg</b>	<b>4</b>
2.1	Allgemeines . . . . .	4
2.2	Beschreibung der geometrischen Gleislage . . . . .	5
2.3	Die Gleislageabweichungen als Fahrzeug–Anregungssignale . . . . .	8
2.3.1	Deterministische Signalanteile von Gleislageabweichungen . . . . .	9
2.3.2	Stochastische Signalanteile von Gleislageabweichungen . . . . .	11
2.3.3	Gleislageabweichungen aus der Sicht von Fahrweg und Fahrzeug	13
2.4	Beschreibung von Fahrzeugreaktionen . . . . .	17
2.5	Modellierung von Gleislageabweichungen in der Fahrzeug/Fahrweg–Simulation . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Überblick über aktuelle Gleislage–Bewertungsmethoden</b>	<b>21</b>
3.1	Aufgaben einer Bewertung von geometrischen Gleislageabweichungen . . . . .	21
3.2	Europäische Normen und Richtlinien . . . . .	22
3.2.1	EN 13848–5 . . . . .	22
3.2.2	EN 14363 . . . . .	24
3.2.3	HS INS TSI . . . . .	27
3.3	Kritik an den derzeitigen Europäischen Normen . . . . .	27
3.3.1	Zusammenhang der Beurteilungsgrößen . . . . .	28
3.3.2	Grundsätzliche Überlegungen . . . . .	30
3.4	Geometrische Bewertungsmethoden . . . . .	34
3.4.1	Statistische Beschreibung . . . . .	34
3.4.1.1	Standardabweichung . . . . .	34
3.4.1.2	Spektrales Leistungsdichtespektrum . . . . .	36
3.4.2	Frequenzspezifische Analyse . . . . .	38
3.4.2.1	Short Time Fourier Transformation . . . . .	38
3.4.2.2	Wavelet Analyse . . . . .	40
3.4.3	Weitere geometrische Methoden . . . . .	42
3.4.3.1	Verwindung . . . . .	42
3.4.3.2	„Track Quality Indices“ . . . . .	44
3.5	Fahrzeug–dynamische Bewertungsmethoden . . . . .	45

3.5.1	MDZ-a Ziffer . . . . .	46
3.5.2	WGB-Methode . . . . .	47
3.5.3	VRA-Methode . . . . .	48
3.5.4	Weitere Methoden zur Fahrzeug/Fahrweg-Interaktionsvorhersage	49
<b>4</b>	<b>Neue Methode zur Gleislagebewertung</b>	<b>51</b>
4.1	Anforderungen an eine neue Bewertungsmethode . . . . .	51
4.2	Grundlage der neuen Bewertungsmethode . . . . .	52
4.3	Überblick über die entwickelte „Track Geometry Assessment“ (TGA) Methode . . . . .	53
4.4	MKS-Fahrzeugmodelle für die Entwicklung der Methode . . . . .	55
4.5	Überlegungen zur Berechnung der Übertragungsfunktionen . . . . .	57
4.5.1	Nichtlineare Systemgleichungen . . . . .	57
4.5.2	Linearisierung der Bewegungsgleichungen . . . . .	58
4.5.3	Berechnung der Übertragungsfunktion aus den Systemmatrizen des linearen zeitinvarianten Systems . . . . .	60
4.6	Berechnung der empirischen Übertragungsfunktionen . . . . .	62
4.6.1	MKS-Simulationen mit dem nichtlinearen Fahrzeugmodell . . . . .	62
4.6.2	Schätzung der empirischen Übertragungsfunktion . . . . .	64
4.6.3	Berechnung der fahrzeugspezifischen empirischen Übertragungsfunktionen . . . . .	65
4.6.4	Auswirkungen der Linearisierungsschritte auf die Übertragungsfunktionen . . . . .	67
4.6.5	Schlussfolgerungen aus der Berechnung der Übertragungsfunktionen . . . . .	69
4.7	Sensitivitätsanalyse der Übertragungsfunktionen . . . . .	70
4.7.1	Einfluss der Geschwindigkeit . . . . .	71
4.7.2	Einfluss verschiedener Fahrzeugtypen . . . . .	71
4.7.3	Einfluss der Anregungsamplitude . . . . .	76
4.7.4	Einfluss der Trassierung . . . . .	77
4.7.5	Einfluss der Berührgeometrie . . . . .	80
4.7.6	Schlussfolgerungen aus der Sensitivitätsanalyse . . . . .	83
4.8	Schätzung der Fahrzeugreaktionskräfte . . . . .	84
4.9	Auswertung der Fahrzeugreaktionskräfte . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Gleislagebewertungsmethode</b>	<b>89</b>
5.1	Überblick über den Prozess der Ergebnisanalyse . . . . .	89
5.2	Methodik der Ergebnisanalyse . . . . .	91
5.3	Vertikaldynamik . . . . .	93
5.3.1	Vertikale Radaufstandskraft als MISO-Reaktion . . . . .	94
5.3.2	Schätzung mit Übertragungsfunktionen verschiedener Fahrzeugtypen . . . . .	96
5.4	Lateraldynamik . . . . .	98
5.4.1	Summe der Führungskräfte als MISO-Reaktion . . . . .	98



5.4.2	Auswertung und Analyse im Bogen . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Anwendung und Diskussion der Gleislagebewertungsmethode</b>	<b>103</b>
6.1	Beispiel einer Bewertung und Klassifizierung . . . . .	103
6.2	Diskussion der TGA-Methodenergebnisse an zwei ausgesuchten Streckenabschnitten . . . . .	109
6.3	Einsatzmöglichkeiten der TGA-Methode . . . . .	111
6.3.1	Fahrtechnische Zulassung . . . . .	112
6.3.2	Instandhaltung . . . . .	113
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
	<b>Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit</b>	<b>120</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>122</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>127</b>
	<b>Abkürzungen, Symbole und Formelzeichen</b>	<b>130</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahn in Europa gegenüber anderen Verkehrsträgern ist es notwendig, einen offenen Binnenmarkt für Schienenverkehrsdienste und –ausrüstungen zu errichten. Die Voraussetzungen dafür sind sowohl der freie Zugang zur Infrastruktur als auch eine schrittweise Angleichung der technischen Systeme zur Sicherstellung ihrer Interoperabilität. Die EU–Kommission hat dazu Richtlinien mit den dazugehörigen technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSIs) veröffentlicht. Diese Vereinheitlichung von vorhanden Regelwerken soll einen sicheren Betrieb, d. h. ein möglichst störungsfreies Zusammenwirken der Fahrzeuge mit der Infrastruktur ermöglichen.

Ein ungünstiges Zusammenspiel der Teilsysteme Fahrzeug und Fahrweg spiegelt sich in Form einer erhöhten Interaktion (z. B. höhere dynamische Rad/Schiene–Kräfte, Beschleunigungen der Systemkomponenten) wider. Diese Fahrzeug/Fahrweg–Interaktion wird im Wesentlichen durch zwangsläufige Abweichungen der Gleislage von der Soll–Lage bestimmt. Für eine Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich Aufwand und Kosten spielen diese Gleislageabweichungen bzw. die sich daraus ergebende Qualität der Gleislage in Bezug auf die zu erwartende Interaktion eine bedeutende Rolle.

Bei der Prüfung der fahrtechnischen Zulassung von Schienenfahrzeugen müssen die Versuchsbedingungen möglichst genau spezifiziert werden. Eine wichtige Versuchsbedingung ist die Qualität der Versuchsgleise. Für einen späteren nationalen oder grenzüberschreitenden Einsatz des Fahrzeugs im Europäischen Binnenverkehr müssen die Referenzzustände des Gleises vergleichbar sein. Nur so können die Infrastrukturbetreiber geeignete Maßnahmen ergreifen und damit die Einhaltung der Grenzen der Fahrsicherheit, der Fahrwegbeanspruchung und des Fahrverhaltens sicherstellen. Diese Bedingung erfordert wiederum, dass die Größen für die Bestimmung der Qualität von Gleislagen eine gute Korrelation zu der sich daraus ergebenden Fahrzeug/Fahrweg–Interaktion aufweisen.

Die Erfahrung der Infrastrukturbetreiber und auch der Fahrzeughersteller zeigt jedoch, dass bei der Bestimmung der Gleislagequalität entsprechend den Europäischen Normen dieser Zusammenhang nicht eindeutig ist. Daraus ergibt sich die entscheidende Frage, welcher in dieser Arbeit nachgegangen wird: „Wie können Abweichungen der Gleislage klassifiziert und bewertet werden, sodass die dadurch bestimmte Gleislagequalität einen hilfreichen Beitrag für die Interoperabilität liefern kann?“

## 1.2 Zielstellung der Arbeit

In dieser Arbeit soll eine Methode zur Beurteilung der geometrischen Gleislageabweichungen entwickelt werden, die eine deutlich bessere Korrelation zwischen den Beurteilungsgrößen der Gleislageabweichungen und den Beurteilungsgrößen der daraus resultierenden Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion zeigt als jene der derzeit gültigen Europäischen Normen. Die Größen zur Beurteilung sollen bei der zu entwickelnden Methode auf Fahrzeugreaktionsgrößen basieren, welche sowohl einen Bezug zur Fahrwegbeanspruchung als auch zur Fahrsicherheit aufweisen. Dieser Bezug ermöglicht letztendlich eine Klassifizierung und Bewertung auf bereits in der Europäischen Norm festgelegten Grenzwerten der Beurteilungsgrößen.

Zur Berücksichtigung der Fahrzeugreaktionen ist bei der Entwicklung der Methode das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg in Betracht zu ziehen. Dieses komplexe System soll im ersten Schritt mit Hilfe eines physikalischen Ersatzmodells abgebildet werden. Als Eingangsgrößen für dieses Modell sind die geometrischen Abweichungen der Gleislage als Systemanregungen zu berücksichtigen. Zusätzlich sollen die Trassierung, der Fahrzeugtyp mit seinen nichtlinearen Eigenschaften und die Fahrzeuggeschwindigkeit abgebildet werden. Die Fahrzeugreaktionskräfte an den Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Gleis bilden die Ausgangsgrößen des Modells und sind für die Klassifizierung und Bewertung heranzuziehen.

In Bezug auf eine internationale Akzeptanz der zu entwickelnden Methode sind jedoch noch weitere Anforderungen ins Auge zu fassen:

- Die Methode soll nicht auf einem spezifischen Fahrzeug, sondern auf Fahrzeugklassen (z. B. Reisezugwagen oder Lokomotive) basieren.
- Die Berechnung der Gleislagequalität soll in kurzer Zeit möglich sein – im Idealfall in Echtzeit.
- Die Methode soll einfach implementierbar sein und keine spezifische Zusatz-Software benötigen.

Die wissenschaftliche Herausforderung bei der Entwicklung der Methodik besteht nun darin, das zur Erfüllung dieser Zusatzanforderungen notwendige physikalische Ersatzmodell entsprechend zu vereinfachen. Dabei ist es wichtig, ein Optimum zwischen der Einfachheit der Methodik und einer ausreichenden Modelltiefe zu finden, wobei die Erfüllung der Basisanforderung nach einer besseren Korrelation als mit den bisherigen Methoden der Europäischen Normen gegeben sein muss.

Letztendlich soll in dieser Arbeit das Potenzial der entwickelten Methode durch einen Vergleich mit den aktuellen Methoden aus den Europäischen Normen für die fahrtechnische Zulassung aufgezeigt werden. Zusätzlich sollen auch Beispiele für die Anwendung der Methode zur Unterstützung im Instandhaltungsprozess dargestellt werden.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Der in Abb. 1.1 dargestellte Überblick zeigt den im Folgenden näher erläuterten Aufbau dieser Arbeit.

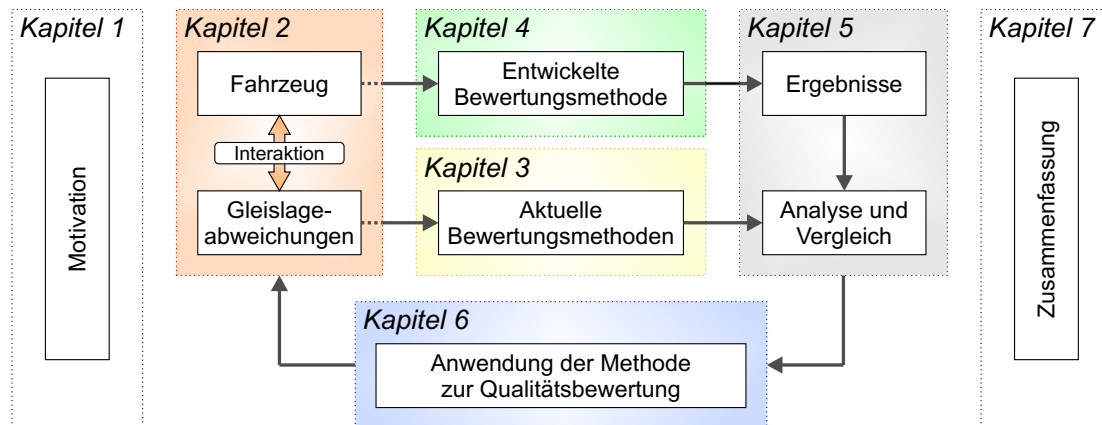


Abbildung 1.1 Überblick über den Aufbau dieser Arbeit

In Kapitel 2 wird erläutert, welche Rolle die Gleislage bzw. deren Abweichungen im System Fahrzeug–Fahrweg spielen. Es sind die Charakteristika der Gleislageabweichungen und die durch das Zusammenspiel mit dem Fahrzeug resultierenden Reaktionsgrößen beschrieben. Für die Beurteilung der Gleislageabweichungen benötigt man Methoden, welche die daraus zu erwartenden Fahrzeugreaktionen entsprechend berücksichtigen. In Kapitel 3 werden die Aufgaben einer Bewertung von Gleislageabweichungen angeführt und aktuelle Methoden aus Europäischen Normen beschrieben und diskutiert. Zusätzlich sind weitere Methoden aus der Literatur dargestellt, die auf rein geometrischen Beurteilungsgrößen basieren, und auch jene, die zumindest teilweise das Fahrzeug in die Beurteilung miteinbeziehen.

In Kapitel 4 wird die in dieser Arbeit entwickelte *Track Geometry Assessment* (TGA) Methode im Detail vorgestellt. Zuerst sind die Herausforderungen an eine neue Bewertungsmethode dargestellt, welche sich auf Grund der Einbeziehung der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrweg ergeben. Den Kern der entwickelten Methode bilden sogenannte *empirische Übertragungsfunktionen*, wobei die Berechnung dieser Funktionen und eine Sensitivitätsanalyse verschiedener Einflüsse dargestellt und analysiert werden. In diesem Kapitel ist der Algorithmus zur Berechnung der Beurteilungsgrößen der entwickelten Bewertungsmethode ausführlich beschrieben.

Die Ergebnisse der TGA–Methode werden in Kapitel 5 dargestellt, analysiert und mit jenen aus den aktuellen Bewertungsmethoden verglichen. Beispiele und Vorschläge für die praktische Anwendung der TGA–Methode, sowie Beurteilungsgrößen für verschiedene Anwendungsfälle sind in Kapitel 6 angeführt. Abschließend wird in Kapitel 7 eine Zusammenfassung und ein Ausblick über zukünftige Weiterentwicklungen gegeben.

## 2 Gleislageabweichungen im System Fahrzeug–Fahrweg

### 2.1 Allgemeines

Im Fahrzeug/Fahrweg-System spielt das Gleis eine wesentliche Rolle (siehe Abb. 2.1). Es muss im System zahlreiche Aufgaben übernehmen:

- Das Gleis muss das Fahrzeug tragen und die vertikalen, horizontalen und longitudinalen Kräfte aufnehmen.
- Die aufgenommenen Kräfte müssen über die Schienen, die Schwellen und das Schotterbett auf den Untergrund abgetragen werden.
- Das Gleis muss das Fahrzeug sowohl in der Geraden als auch im Bogen möglichst entgleisungssicher führen.

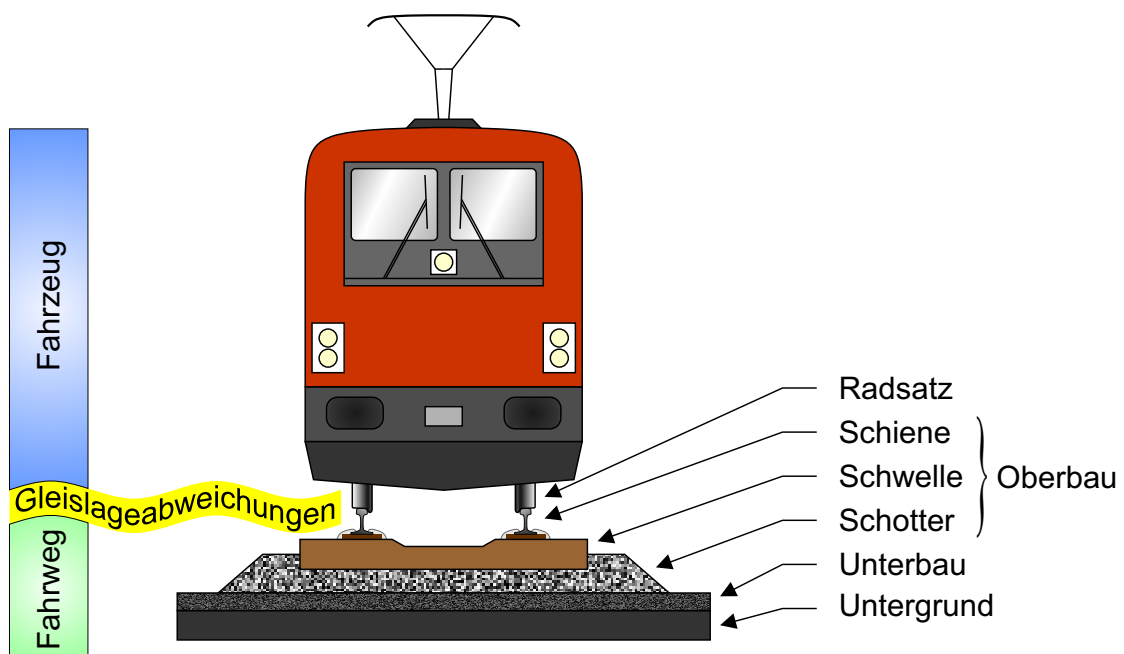


Abbildung 2.1 Fahrzeug und Fahrweg als gemeinsames dynamisches System

Das Gleis besteht konstruktiv in der Regel aus zwei Schienensträngen, der Schienenbefestigung und den Schwellen. Die Schwellen sind aus Holz, Stahl oder Beton und ihrerseits wiederum auf Schotter gebettet. Das Gleis und der Schotter bilden als Gesamtsystem den sogenannten *Oberbau*. Mit dem Unterbau werden die Unebenheiten des Geländes (Untergrund) ausgeglichen, wozu z. B. Dämme und Brücken gehören. Der räumliche Verlauf der Bahnstrecke wird als Trassierung bezeichnet, welche aus den Trassierungselementen Gerade, Bogen und Übergangsbogen besteht.

Die Gleislage wird somit aus der räumlichen Lage der beiden Schienen bestimmt. Im realen Betrieb treten Veränderungen des Gleises auf, die durch Verschleiß, Veränderungen im Oberbau, Schienenstöße und Herstellungsungenauigkeiten entstehen. Dadurch ergeben sich wiederum geometrische Abweichungen in Bezug auf die Soll–Gleislage in Abhängigkeit der Belastung. Diese Abweichungen regen das Fahrzeug/Fahrweg–System zu Schwingungen an und wirken sich somit sowohl auf das Fahrzeug als auch auf den Fahrweg aus. Die Auswirkungen auf das Fahrzeug spielen eine wichtige Rolle in Bezug auf den Komfort und die Festigkeit als auch für die Fahrzeugsicherheit. Am Fahrweg können diese zusätzlichen Fahrwegbeanspruchungen u. a. erhöhten Verschleiß, Schädigungen und Verschiebungen von Komponenten des Oberbaus hervorrufen.

Zur Beurteilung dieser Kriterien ist es notwendig, die Gleislageabweichungen zu kennen. Diese werden mit Hilfe von Gleismessfahrzeugen aufgenommen und ausgewertet. Die mit dem Messwagen aufgenommenen geometrischen Gleislageabweichungen dienen in dieser Arbeit als Grundlage für die Bewertungsmethode.

## 2.2 Beschreibung der geometrischen Gleislage

Das Verfahren zur Messung der geometrischen Gleislage mit Gleismessfahrzeugen ist in der Europäischen Norm EN 13848–2 festgelegt [48]. Die aufgezeichneten Daten der geometrischen Ist–Gleislage werden am Gleismessfahrzeug simultan mit der Nenngleislage verglichen und die Abweichungen entsprechend der Europäischen Norm EN 13848–1 ausgegeben [45].

Das in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an die Norm verwendete Koordinatensystem (KOS) ist in Abb. 2.2 dargestellt. Dieses relative (mit dem Fahrzeug mitbewegte), rechtwinkelige, rechtsdrehende, im Gleis zentrierte KOS folgt entlang der Bogenlänge  $s$  der geometrischen Nenngleislage (Raumkurve der Soll–Gleislage). Das KOS  $\{O^*; x^*, y^*, z^*\}$  ist dabei so ausgerichtet, dass die  $x^*$ –Achse entlang der Ausdehnung des Gleises in Fahrtrichtung dargestellt wird, die  $y^*$ –Achse parallel zur Lafoberfläche nach rechts zeigt und die  $z^*$ –Achse rechtwinkelig zur Lafoberfläche nach unten gerichtet ist. Die Lafoberfläche ist jene gekrümmte Fläche, die durch die längsgerichtete Verschiebung einer Geraden senkrecht zur Mittellinie des Gleises und tangential zu beiden Schienenlaufflächen definiert wird [48]. Der Schnitt dieser Fläche an einer bestimmten Bezugs–Bogenlänge  $s_0$  ergibt die sogenannte Schienenoberkante (SOK).

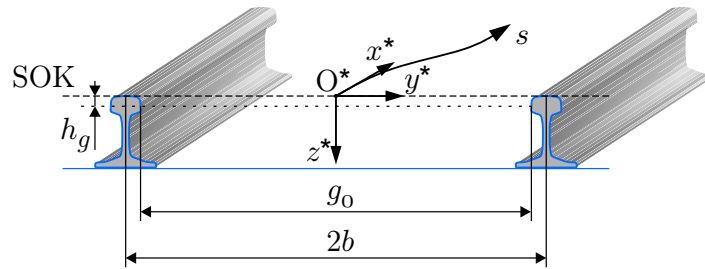


Abbildung 2.2 Das Gleis im verwendeten Koordinatensystem

Der Nennabstand zwischen den beiden Schienen ist über die *Nennspurweite*  $g_0(s)$  definiert. Die Spurweite  $g(s)$  ist der kleinste horizontale Abstand der Schienen, gemessen im vertikalen Abstand  $h_g$  von 14 mm unter der SOK. Daraus ergibt sich je nach Schienenprofil der Schienenabstand  $2b$  und somit der Referenzabstand  $b$  vom Ursprung des KOS und der jeweiligen linken bzw. rechten Schiene.

Die Gleislageabweichungen werden auch als *Gleislagefehler* bzw. als *relative Gleislage* bezeichnet und vom Gleismessfahrzeug als relative Abweichungen der linken und rechten Schiene angegeben (siehe Abb. 2.3a). Diese Darstellung wird meist als *Schienenkoordinaten* bezeichnet. Obwohl die Abweichungen eine Funktion der Bogenlänge  $s$  sind werden sie in dieser Arbeit in Anlehnung an die Norm als Parameter bzw. Gleisgeometrieparameter bezeichnet. Die vier in Schienenkoordinaten dargestellten Gleisgeometrieparameter sind

- der *Längshöhenfehler*  $z_L(s)$  der linken Schiene,
- der *Längshöhenfehler*  $z_R(s)$  der rechten Schiene,
- der *Richtungsfehler*  $y_L(s)$  der linken Schiene, sowie
- der *Richtungsfehler*  $y_R(s)$  der rechten Schiene.

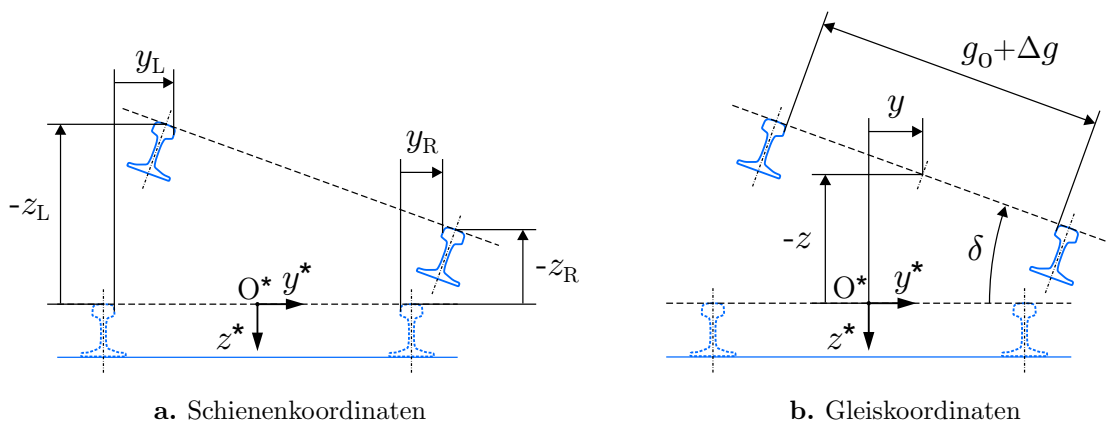


Abbildung 2.3 Gleisgeometrie in Schienen- und Gleiskoordinaten

Der Längshöhenfehler ergibt sich aus der Abweichung der jeweiligen Schiene in Bezug auf ihre Schienenoberkante in  $z$ -Richtung. Der Richtungsfehler berechnet sich aus der Abweichung der jeweiligen Schiene in  $y$ -Richtung, wobei der Bezugspunkt im Abstand  $h_g$  unter der SOK liegt.

In dieser Arbeit wird neben der Darstellung in Schienenkoordinaten auch die Darstellung in *Gleiskoordinaten* benötigt (siehe Abb. 2.3b). Hier werden die Abweichungen relativ zur Gleismitte angegeben. Die vier in Gleiskoordinaten dargestellten Gleisgeometrieparameter sind

- der *Längshöhenfehler*  $z(s)$  der Gleismitte (engl. *Longitudinal level*),
- der *Richtungsfehler*  $y(s)$  der Gleismitte (engl. *Alignment*),
- der *Querhöhenfehler*  $\delta(s)$  der linken und rechten Schiene zueinander (engl. *Cross level*), sowie
- der *Spurweitenfehler*  $\Delta g(s)$  (engl. *Gauge*).

Diese Gleisgeometrieparameter werden entsprechend den SI-Einheiten in Meter angegeben, wobei der Querhöhenfehler meist als Winkel in Radiant angegeben wird. Ein positiver Winkel des Querhöhenfehlers bedeutet eine Rechtsdrehung in Bezug auf die  $x$ -Achse (Fahrtrichtung). Die im Folgenden gezeigte vereinfachte Umrechnung in den jeweiligen anderen Koordinatendarstellungen ist nur unter Vernachlässigung der Neigung der beiden Schienen zueinander und deren Profilverschleiß möglich. Für die Umrechnung von Schienenkoordinaten in Gleiskoordinaten gilt

$$z(s) = \frac{z_L(s) + z_R(s)}{2}, \quad (2.1)$$

$$y(s) = \frac{y_L(s) + y_R(s)}{2}, \quad (2.2)$$

$$\delta(s) = \arctan \frac{z_R(s) - z_L(s)}{2b + (y_R(s) - y_L(s))}, \quad (2.3)$$

$$\Delta g(s) = y_L(s) - y_R(s). \quad (2.4)$$

Der Spurweitenfehler  $\Delta g(s)$  ist die Differenz zwischen der Nennspurweite  $g_0$  und der gemessenen Spurweite  $g(s)$ . Die Umrechnung von Gleiskoordinaten in Schienenkoordinaten erfolgt mit

$$z_L(s) = z(s) - \frac{2b + \Delta g(s)}{2} \sin \delta(s), \quad (2.5)$$

$$z_R(s) = z(s) + \frac{2b + \Delta g(s)}{2} \sin \delta(s), \quad (2.6)$$

$$y_L(s) = y(s) - \frac{\Delta g(s)}{2}, \quad (2.7)$$

$$y_R(s) = y(s) + \frac{\Delta g(s)}{2}. \quad (2.8)$$



In Abb. 2.4 ist der räumliche Laufoberflächen–Verlauf einer realen Gleislage für einen ausgewählten Streckenabschnitt entlang des Weges  $s$  dargestellt. Es sind sowohl die Abweichungen der Gleislage der Schienenmitte als auch der linken und rechten Schiene mit einer schwarzen durchgezogenen Linie visualisiert. Die blau strichlierten Linien zeigen die Nennlage der linken und rechten Schiene. Für eine übersichtliche Darstellung wurden alle Größen entsprechend skaliert bzw. die Längshöhenlageabweichungen  $y$  im Verhältnis zum Nennabstand der Schienen  $b$  dargestellt.

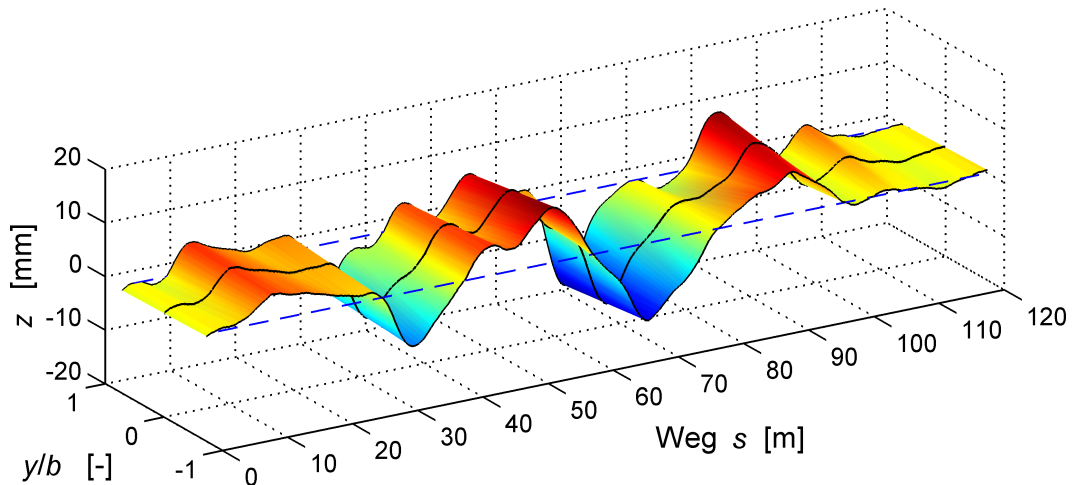


Abbildung 2.4 Räumlicher Verlauf von Gleislageabweichungen

### 2.3 Die Gleislageabweichungen als Fahrzeug–Anregungssignale

Die Gleislageabweichungen sind aus systemtechnischer Sicht noch keine Anregung für das Fahrzeug/Fahrweg–System, sondern wirken als solche erst bei Überfahrt eines Fahrzeugs mit der Geschwindigkeit  $v$ . In diesem Fall können die Gleislageabweichungen als wegabhängige Anregungsfunktionen  $\zeta(s)$  bzw. zeitabhängige Anregungsfunktionen  $\zeta(t)$  betrachtet werden. Da die Gleislageabweichungen als wegabhängige Funktionen gegeben sind können diese mit

$$\zeta(t) = \zeta\left(\frac{s}{v}\right) \quad (2.9)$$

bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  umgerechnet werden. Bei einem instationären Geschwindigkeitsverlauf ergibt sich die zeitabhängige Anregungsfunktion  $\zeta(t)$  aus

$$\zeta(t) = \zeta(s(t)) \quad \text{mit} \quad (2.10)$$

$$s(t) = s(t_0) + \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau . \quad (2.11)$$

Für die Beschreibung und Analyse von Gleislageabweichungen bzw. Anregungsfunktionen ist es hilfreich, diese entsprechend ihrer Signal–Eigenschaften zu klassifizieren. In Abb. 2.5 ist eine Gliederung von Signalen im Überblick dargestellt. Die Gleislage als Anregungs–Signal kann somit als Überlagerung von *deterministischen* und *stochastischen* Signalanteilen betrachtet werden. Diese Anteile werden in den folgenden Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 genauer analysiert. Die Gleislageabweichungen werden in Abschnitt 2.3.3 in Anlehnung an [17] aus fahrzeug- und fahrwegtechnischer Sicht diskutiert.

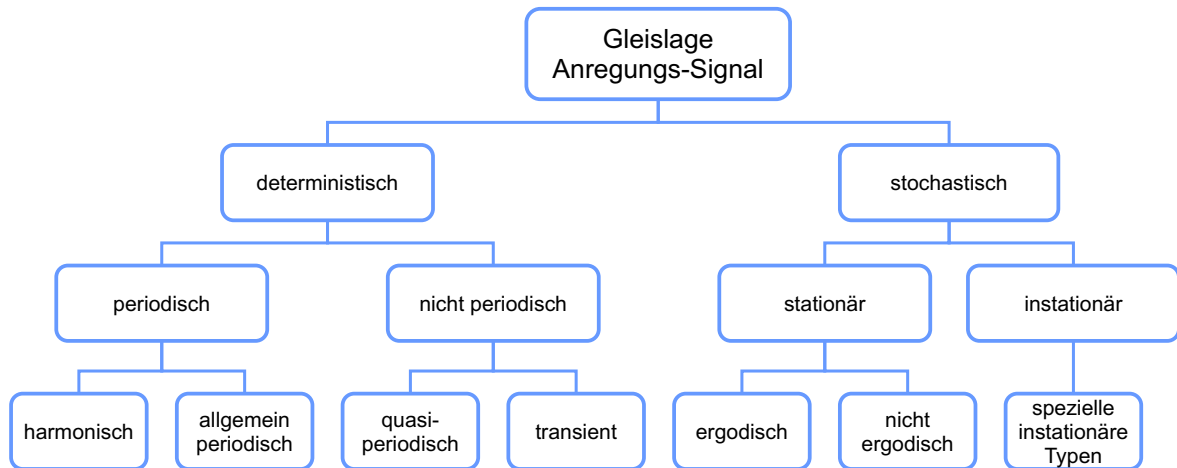


Abbildung 2.5 Gliederung von Signalen

### 2.3.1 Deterministische Signalanteile von Gleislageabweichungen

Deterministische Signale sind mit analytischen Funktionen beschreibbar, d. h. zu jeder Zeit bzw. an jedem Ort eindeutig mathematisch bestimmt. Diese Klasse lässt sich wiederum in *periodische* und *nicht-periodische* Signale unterteilen.

Periodische Signale bestehen aus einem beliebig geformten Vorgang, der sich endlos und vollständig nach einer bestimmten *Zeitperiode*  $\Delta t_P$  bzw. *Wegperiode*  $\Delta s_P$  wiederholt. Die Periodizitätsbedingung für eine zeitabhängige Anregungsfunktion lautet

$$\zeta(t) = \zeta(t + k\Delta t_P) \quad \text{für } k = \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots; K \quad \text{und} \quad \Delta t_P = \text{const.} \quad (2.12)$$

Es kann des Weiteren gezeigt werden, dass sich ein periodisches Signal aus endlich oder unendlich vielen harmonischen Signalen zusammensetzen lässt (Fourier–Synthese) [50]. Ein *harmonisches* zeitabhängiges Anregungssignal ist ein Sonderfall eines periodischen Signals und lässt sich mathematisch als eine um  $\Delta t_{\varphi 0}$  verschobene Cosinusfunktion beschreiben mit

$$\zeta(t) = \hat{\zeta} \cos \left( \frac{2\pi}{\Delta t_P} t - \frac{2\pi}{\Delta t_P} \Delta t_{\varphi 0} \right), \quad (2.13)$$

wobei  $\hat{\zeta}$  die Amplitude und  $\Delta t_{\varphi 0}$  die Nullphasenverschiebungszeit der Cosinusfunktion ist. Ein *allgemein-periodisches* zeitabhängiges Anregungssignal  $\zeta(t)$  kann somit im Allgemeinen über die Summe von unendlich vielen harmonischen ortsabhängigen Gleislageabweichungs–Anteilen gekoppelt mit einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  angenähert werden mit

$$\tilde{\zeta}(t) = \frac{\zeta_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{\zeta}_n \cos \left( n \frac{2\pi}{\Delta s_P} vt - \frac{2\pi}{\Delta s_P} \Delta s_{\varphi 0, n} \right), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2.14)$$

wobei  $\zeta_0$  der Gleichanteil des harmonischen Signals und  $\Delta s_{\varphi 0, n}$  der Nullphasenverschiebungsweg des jeweiligen Gleislage–Abweichungsanteils ist.

Jene deterministischen und stationären Signale, welche die Periodizitätsbedingung nicht erfüllen, werden als nicht–periodische Signale bezeichnet. Dazu zählen auch *quasi-periodische* Signale. Diese unterscheiden sich von den periodischen Signalen dadurch, dass der Abstand der diskreten Spektrallinien nicht äquidistant ist. Ein quasi–periodisches Signal entsteht also durch eine lineare Überlagerung von harmonischen Signalen, deren Frequenzen jedoch nicht im ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen. Eine wichtige Untergruppe der nicht–periodischen Signale sind sogenannte *transiente* Signale. Sie sind auch analytisch beschreibbar, weisen aber keine Wiederholung von Signalanteilen auf.

Deterministische Anteile in den Gleislageabweichungen können verschiedene, meist konstruktive Ursachen haben. Transiente Signalanteile (in der Literatur auch *deterministische Einzelfehler* genannt) ergeben sich bei konstruktiven Geometrieänderungen (z. B. bei Weichenüberfahrten) oder auch bei Steifigkeitsänderungen des Oberbaus (z. B. Brückenüberfahrt oder Überfahrt von verschiedenen Oberbautypen), sowie bei hohlliegenden Schwellen. Signalanteile, welche sich in einem bestimmten Beobachtungsabschnitt öfters wiederholen, sind streng genommen auch transiente Vorgänge, da sie zeitlich bzw. örtlich begrenzt sind. Klassifiziert nach ihrer quasi–Wegperiode  $\Delta s_P$  im Beobachtungsabschnitt sind dies in Anlehnung an [28]

- kurze Wellen von 0 bis 3 m,
- mittlere Wellen von 3 bis 25 m,
- lange Wellen von 25 bis 70 m und
- sehr lange Wellen über 70 m.

Kurze Wellen ergeben sich aus Oberflächenfehlern von Schienen, durch Abnutzung oder auch durch Fertigungsprozesse bei fester Fahrbahn. Beispiele hierfür sind Schlupfwellen (0,03 bis 0,3 m) und Schienenriffel (0,02 bis 0,1 m). Diese Fehlerformen zeigen in der Langzeitveränderung eine Tendenz in Richtung längere Wellenlängen. Die Beseitigung dieser Fehler in der Instandhaltung ist nur durch Schleifen oder Stoßbiegerichten möglich. Die mittleren Wellen haben unterschiedliche Gleissetzungen als Ursache wie z. B. nahezu periodische Hohllagen von Schwellen. Bei der Instandhaltung können durch eine Verdichtung der Bettung unter den Schwellen (das sogenannte *Stopfen*) mittlere

bis zu sehr langwellige Fehler weitgehend behoben werden. Lange Wellen entstehen u. a. durch Trassierungsfehler, schlechte Instandhaltung, Nachgeben eines Gleisunterbaus oder auch durch regelmäßige Schienenstöße. Sehr lange Wellen ergeben sich aus Entwurfseigenheiten oder Entwurfsfehlern.

### 2.3.2 Stochastische Signalanteile von Gleislageabweichungen

Stochastische Signale sind nicht mit analytischen Funktionen beschreibbar, da sie in ihren Signalwerten zufällig schwanken. Zur Beschreibung eines stochastischen Signals wird dieses als *Realisierung* (oder *Musterfunktion*) eines *Zufallsprozesses*  $\zeta(t, w)$  betrachtet. Somit ist nicht nur eine Abhängigkeit von der Zeit  $t$ , sondern auch eine Abhängigkeit vom Zufall  $w$  gegeben. Der Zufallsprozess ist eine *Schar* (*Ensemble*) von Zufallsvariablen  $\{\zeta_t(t)\}$ . Die einzelnen Zufallsvariablen  $\zeta_t^{(i)}(t)$  können jeweils durch ihre *Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion*  $W_v$  charakterisiert werden mit

$$W_v(\zeta, t) = P \left( \zeta_t^{(i)}(t) \leq \zeta \right) , \quad (2.15)$$

wobei  $i$  der Index der jeweiligen Zufallsvariable ist. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung ein Maß für die *Wahrscheinlichkeit*  $P$  ist und die Zufallsvariable einen Wert kleiner oder gleich einen speziellen Wert  $\zeta$  zum Zeitpunkt  $t$  annimmt. Für eine vollständige Charakterisierung des Zufallsprozesses müssten alle Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zufallsvariablen spezifiziert werden. Erfüllt der Zufallsprozess Bedingungen wie *Stationarität* oder *Ergodizität*, so kann die Charakterisierung wesentlich vereinfacht werden.

Ein Zufallsprozess ist dann *stationär*, wenn alle Wahrscheinlichkeitsfunktionen unabhängig von der Verschiebung des zeitlichen Ursprungs sind. Dies bedeutet auch, dass die statistischen Kenngrößen zur Charakterisierung der Verteilungsfunktionen sich nicht mit der Zeit verändern. Diese Bedingung hat jedoch zur Folge, dass nur zeitlich unbegrenzte Signale stationär sein können. Für viele Betrachtungen ist es jedoch hinreichend, wenn der Begrenzungsabschnitt zwar nicht unendlich ausgedehnt, jedoch wesentlich größer als der Beobachtungsabschnitt ist. In diesem Fall spricht man von einem *quasistationären* Signal. Wenn mindestens eine, jedoch nicht alle statistischen Kenngrößen zeitinvariant sind, so wird dieses Signal als *schwach stationär* bezeichnet.

Ein *ergodischer* Zufallsprozess ist dann gegeben, wenn die Schar–Mittelwerte identisch mit den Zeit–Mittelwerten sind. Dies bedeutet, dass aus einer einzelnen Realisierung die Zeit–Mittelwerte berechnet werden können und auf Basis deren der Zufallsprozess vollständig charakterisiert werden kann. Durch Messreihen lässt sich nachweisen, dass die stochastischen Anteile der Gleislageabweichungen im Begrenzungsabschnitt ergodische Zufallsprozesse sind. Damit können diese Gleislageabweichungen (beliebige  $i$ -te Realisierung) unter Annahme einer Normal– bzw. Gauss–Verteilung sehr einfach mit

den zwei Parametern Mittelwert  $m_{\zeta_t}$  und Varianz  $\sigma_{\zeta_t}^2$  beschrieben werden. Die *Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion*  $P(a < \zeta_t^{(i)} \leq b)$  ergibt sich somit aus der *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion*  $p(\zeta)$  mit

$$P(a < \zeta_t^{(i)} \leq b) = \int_a^b p_{\zeta_t}(\zeta) d\zeta \quad \text{mit} \quad (2.16)$$

$$p_{\zeta_t}(\zeta) = \frac{1}{\sigma_{\zeta_t} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\zeta - m_{\zeta_t}}{\sigma_{\zeta_t}} \right)^2}, \quad (2.17)$$

$$m_{\zeta_t} = E\{\zeta_t\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \zeta_t^{(i)}(t) dt, \quad (2.18)$$

$$\sigma_{\zeta_t}^2 = E\{\zeta_t^2(t)\} - m_{\zeta_t}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\zeta_t^{(i)}(t)]^2 dt - m_{\zeta_t}^2, \quad (2.19)$$

wobei dies für Werte der Zufallsvariable  $\zeta_t$  im Intervall  $a < \zeta \leq b$  gilt.

Eine weitere wichtige Kenngröße für stationäre Signale ist die *zentrale Autokorrelationsfunktion*  $C_{\zeta_t \zeta_t}(\tau)$ . Sie ist ein Maß für die statistische Abhängigkeit einer Zufallsvariable zu verschiedenen Zeitpunkten mit der Zeitdifferenz  $\tau$ . Für ergodische Signale kann diese Funktion mit

$$C_{\zeta_t \zeta_t}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\zeta_t^{(i)}(t + \tau)]^2 dt - m_{\zeta_t}^2 \quad (2.20)$$

berechnet werden. Diese Funktion ist symmetrisch und ergibt für  $\tau = 0$  die Varianz  $\sigma_{\zeta_t}^2$  des Prozesses.

Für die Beschreibung von stationären stochastischen Signalanteilen von Gleislageabweichungen werden neben dem Mittelwert und der Varianz des Signals in der Literatur auch Parameter zur näherungsweise Beschreibung der *spektralen Leistungsdichte*  $S_{\zeta_t \zeta_t}(\omega)$  (oder auch *Leistungsdichtespektrum*) angegeben. Die spektrale Leistungsdichte ist definiert als Fourier–Transformation der Autokorrelationsfunktion des Signals und lässt sich beschreiben mit

$$S_{\zeta_t \zeta_t}(\omega) = \mathcal{F} \{C_{\zeta_t \zeta_t}(\tau)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{\zeta_t \zeta_t}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (2.21)$$

wobei  $\omega$  die Zeitkreisfrequenz des Signals ist. Auf Grund der Tatsache, dass die Autokorrelationsfunktion stets eine reelle, gerade Funktion ist, ist die spektrale Leistungsdichte auch eine reelle, gerade Funktion. Dies hat zur Folge, dass die Phaseninformation in der spektralen Leistungsdichte nicht vorhanden ist. Für die Umkehrung ergibt sich die inverse Fourier–Transformation der spektralen Leistungsdichte

$$C_{\zeta_t \zeta_t}(\tau) = \mathcal{F}^{-1} \{S_{\zeta_t \zeta_t}(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\zeta_t \zeta_t}(\omega) e^{+j\omega\tau} d\omega, \quad (2.22)$$

wobei sich daraus die Bestimmung der Varianz über die spektrale Leistungsdichte mit

$$\sigma_{\zeta_t}^2 = C_{\zeta_t \zeta_t}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\zeta_t \zeta_t}(\omega) d\omega \quad (2.23)$$

ableiten lässt. Für die praktische Berechnung der spektralen Leistungsdichte aus einem gemessenen Gleislageabweichungs–Signal wird die Fourier–Transformierte von  $\zeta_t^{(i)}(t)$  verwendet mit

$$S_{\zeta_t \zeta_t}(\omega) = \frac{1}{T} \left| \mathcal{F} \left\{ \zeta_t^{(i)}(t) \right\} \right|^2 \quad \text{und} \quad (2.24)$$

$$\mathcal{F} \left\{ \zeta_t^{(i)}(t) \right\} = \int_0^T \zeta_t^{(i)}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (2.25)$$

wobei  $T$  die genügend lange Dauer der Messung bedeutet. Da die spektrale Leistungsdichte eine gerade Funktion ist, werden in der Praxis für die Approximation die Parameter für die einseitige Spektraldichte  $\phi_{\zeta_t \zeta_t}(\omega)$  angegeben. Diese wird berechnet mit

$$\phi_{\zeta_t}(\omega) = \begin{cases} 2S_{\zeta_t \zeta_t}(\omega), & \text{für } \omega \geq 0 \text{ und} \\ 0, & \text{für } \omega < 0. \end{cases} \quad (2.26)$$

### 2.3.3 Gleislageabweichungen aus der Sicht von Fahrweg und Fahrzeug

Die fahrwegtechnische Beschreibung von Gleislageabweichungen erfolgt meist nur auf Basis von stochastischen Anteilen. Hierfür werden die Abweichungen der Gleislage innerhalb der Betrachtungsabschnitte als ergodische Signale angenommen. Ein Nachweis der Ergodizität für ein Gleis ist schwierig, solange es nur eine Realisierung gibt. Für eine weitgehende Erfüllung der Ergodizitäts–Anforderungen ist es notwendig, zumindest gewisse Bedingungen wie z. B. Trassierung oder Gleisbauart im Betrachtungsabschnitt so konstant wie möglich zu halten. Mit dieser Ergodizitäts–Annahme können die Kriterien für die Instandhaltung mittels Beschreibung und Begrenzung der statistischen Kenngrößen definiert werden. Hierfür beschreiben die Europäischen Normen [49] die Qualität der Gleislageabweichungen mit Hilfe der Kennwerte wie

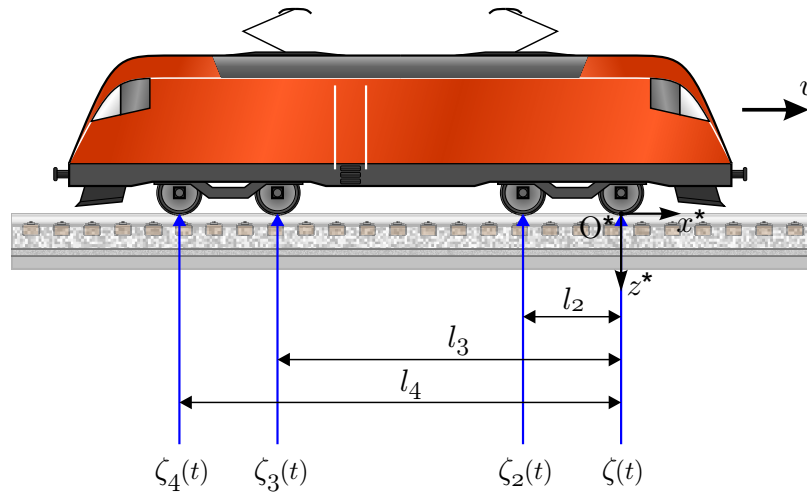
- Extremwerte von Einzelfehlern,
- Standardabweichung über eine definierte Länge, typisch 200 m und
- Mittelwert.

Diese Sichtweise ermöglicht somit eine einfach Beschreibung und Begrenzung der Gleislageabweichungen mit geringem Aufwand. Die Rückwirkungen der Fahrzeug/Fahrweg–Interaktion ist jedoch auch aus Sicht des Fahrwegs von großer Bedeutung und deswegen wäre eine erweiterte Betrachtung der Gleislageabweichungen und somit eine Berücksichtigung der deterministischen Anteile sehr hilfreich.

Aus fahrzeugspezifischer Sicht wirken die Gleislageabweichungen  $\zeta(s)$  gekoppelt über die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  entsprechend Glg. (2.9) als Anregungs–Signale  $\zeta(t)$ . Eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  im Betrachtungsabschnitt ist als Bedingung dann notwendig, wenn Stationarität gefordert wird (z. B. bei Periodizität oder Ergodizität).

Die Gleislageabweichungen wirken als Anregung auf das Fahrzeug nicht nur an einem Ort  $s$ , sondern an allen Radsätzen (siehe Abb. 2.6). Für die Betrachtung einer stationären Anregung müssen

- die Fahrzeug–Geschwindigkeit  $v$  konstant sein, sowie
- die relativen Abstände  $l_i$  zwischen dem ersten und den weiteren Radsätzen ebenfalls konstant sein.



**Abbildung 2.6** Zeitlich bzw. örtlich verschobene Fahrzeug–Anregungssignale  $\zeta_i(t)$

Aus diesen Überlegungen ergibt sich der Anregungsvektor  $\zeta(t)$  für die jeweilige Gleislageabweichung und für ein  $r$ -achsiges Fahrzeug aus

$$\zeta(t) = \begin{bmatrix} \zeta(t) \\ \zeta_2(t) \\ \vdots \\ \zeta_i(t) \\ \vdots \\ \zeta_r(t) \end{bmatrix}, \quad \zeta_i(t) = \zeta(t - t_i), \quad t_i = l_i/v, \quad i = 2, \dots, r. \quad (2.27)$$

Die Anregungs–Signale des dynamischen Systems können entsprechend Glg. (2.14) als Summe von einzelnen harmonischen Anregungs–Schwingungen betrachtet werden. Diese sind im Zeitbereich jeweils charakterisiert durch ihre *Amplitude*  $\hat{\zeta}_n$  und ihren *Phasenwinkel*  $\varphi_n$ , sowie durch ihre *Erregerfrequenz*  $f_n$  bzw. *Erregerkreisfrequenz*  $\omega_n$  und im

Wegbereich durch ihre Wegfrequenz  $f_{L,n}$  (auch Ortsfrequenz oder Wellenzahl genannt) bzw. Wegkreisfrequenz  $\Omega_n$ . Die Zusammenhänge sind gegeben mit

$$f_n = f_{L,n}v, \quad f_{L,n} = \frac{1}{L_n}, \quad (2.28)$$

$$\omega_n = \Omega_n v, \quad \Omega_n = \frac{2\pi}{L_n}, \quad (2.29)$$

wobei  $L_n$  die Wellenlänge bzw. Wegperiode der jeweiligen harmonischen Teilschwingung ist.

Die Ermittlung dieser harmonischen Anregungs–Schwingungen erfolgt mittels Fourier–Transformation mit

$$\hat{\zeta}_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^T \zeta(t) e^{-j\omega_n t} dt, \quad \omega_n = n \frac{2\pi}{T}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2.30)$$

$$\hat{\zeta}_n = |\hat{\zeta}_n|, \quad \varphi_n = \arg \hat{\zeta}_n, \quad (2.31)$$

wobei  $\hat{\zeta}_n$  die komplexe Darstellung der  $n$ -ten Teilschwingung und  $T$  die (genügend lange) Dauer der Messung ist.

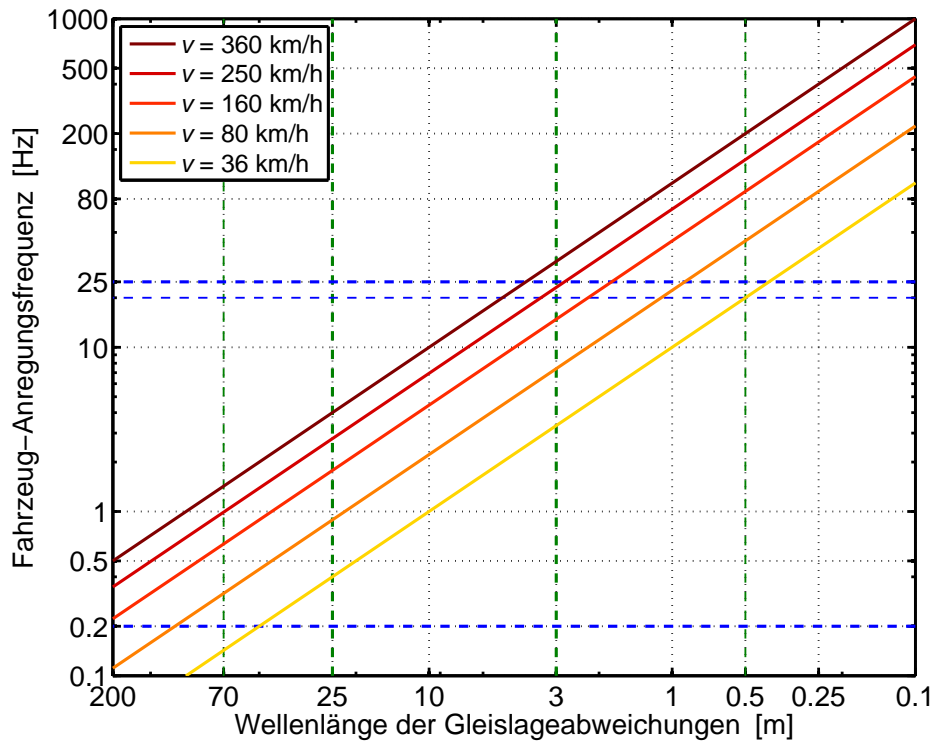
Die obere und untere Grenze der Anregungsfrequenzen ergeben sich aus der Kombination der Grenzen der Anregungswellenlängen der Gleislageabweichungen und der zu betrachtenden Fahrzeuggeschwindigkeit (siehe Abb. 2.7). Gleislagefehler beinhalten nach [11] Wellenlängen von 0,1 bis 200 m. Fehler mit kleineren Wellenlängen werden den Schienenoberflächenfehlern und größere Wellenlängen werden der Trassierung zugeordnet. Die Messung dieser geometrischen Gleislageabweichungen wird in der dazugehörigen Norm EN 13848–2 mit einer Mindestabtastung von 0,5 m vorgeschrieben [48]. Die Filterung der Messsignale erfolgt je nach Wellenlängenbereich

- $D1$  zwischen  $3 \text{ m} < L \leq 25 \text{ m}$ ,
- $D2$  zwischen  $25 \text{ m} < L \leq 70 \text{ m}$  und
- $D3$  zwischen  $70 \text{ m} < L \leq 150 \text{ m}$  bzw. 200 m.

Der Wellenlängenbereich  $D3$  ist entsprechend der Norm für die Bewertung der geometrischen Gleislageabweichungen EN 13848–2 nur für Komfort–Fragestellungen relevant und es werden deshalb für diesen keine Sicherheitsgrenzwerte angegeben. Bedingt durch die u. a. in [23] beschriebenen Grenzen der verschiedenen Messfahrzeuge stehen in dieser Arbeit Gleislageabweichungen mit einer Bandbreite zwischen 3 und 25 m (bzw. teilweise bis 70 m) zur Verfügung. Die Auflösung der gemessenen Gleislageabweichungen beträgt 25 cm.

Ob die Bandbreite der gemessenen Gleislageabweichungen ausreichend ist hängt sehr stark von der Fragestellung ab. In [21] wird der interessierende Frequenzbereich für Schienenfahrzeuge zwischen 0,2 und 25 Hz angegeben. Dies hat zur Folge, dass bei





**Abbildung 2.7** Darstellung der Fahrzeug–Anregungsfrequenzen  $f$  in Abhängigkeit von den Wellenlängen  $L$  der Gleislageabweichungen und den Fahrzeuggeschwindigkeiten  $v$

der Betrachtung von Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 36 und 360 km/h die Wellenlängeninformationen der Gleislageabweichungen zwischen 0,4 und 500 m vorliegen müssten. In diesem Fall müsste man die fehlenden Informationen bei Bedarf durch Synthetisierung von Gleislageabweichungen ergänzen oder ersetzen.

Für Fragestellungen des Komforts ist die Beschreibung von Gleislageabweichungen als stochastisches ergodisches Signal meist ausreichend, da die Zielgröße *Varianz der Beschleunigungen* ebenfalls eine stochastische Größe ist. Bei Fragestellungen hinsichtlich Fahrwegbeanspruchung, Fahrsicherheit und Schwingungsverhalten ist das Zielkriterium oftmals ein Maximalwert der zu erwarteten Fahrzeugreaktion. Aus diesem Grund wird von den Gleislageabweichungen auch die Phaseninformation für die Betrachtung im Zeit– bzw. Wegbereich benötigt, welche in einer rein stochastischen Signal–Betrachtung nicht mehr enthalten ist.

## 2.4 Beschreibung von Fahrzeugreaktionen

Die Abweichungen der Gleislage werden als Eingangsgröße für das dynamische System Fahrzeug–Fahrweg betrachtet. Diese zeitlichen Systemanregungen führen zu kontinuierlichen Zustandsänderungen. Wie das System auf diese Anregungen reagiert hängt nicht nur von den Gleislageabweichungen, sondern neben der Fahrzeuggeschwindigkeit auch von der Klasse und vom Typ des Schienenfahrzeugs ab.

Durch die Vielzahl von Variationen verschiedener Schienenfahrzeuge wird der Fokus in dieser Arbeit auf die *Klassen*

- Lokomotive,
- Reisezugwagen und
- Güterwagen gelegt,

wobei die jeweiligen Ausführungen der Fahrzeuge innerhalb einer Klasse als *Fahrzeugtyp* bezeichnet werden.

Ein schematischer Aufbau eines Schienenfahrzeugs mit seinen wichtigsten Baugruppen ist in Abb. 2.8 dargestellt. Der Radsatz mit den Radsatzlagern bildet die sogenann-

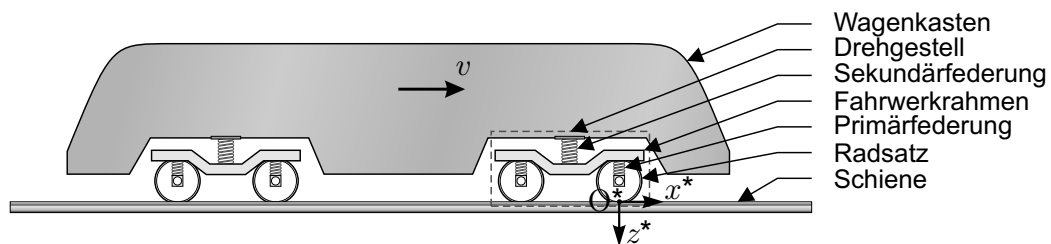


Abbildung 2.8 Schematischer Aufbau eines Schienenfahrzeugs

te *ungefederte* Ebene. Der Fahrwerkrahmen wird über die Primärfederung auf den Radsatzlagern abgestützt. Der Fahrwerkrahmen mit seinen Komponenten wird als *primärfedernde* Ebene bezeichnet. Die Sekundärfederstufe verbindet den Wagenkasten, welcher als *sekundärfedernde* Ebene bezeichnet wird, mit dem Fahrwerkrahmen. Die Baugruppe *Drehgestell* ist in der Abbildung mit einer strichlierten Umrahmung eingezeichnet. Weitere bedeutende Baugruppen wie z. B. Wagenkastenanlenkung, Antriebs- und Bremsenrichtungen, sowie die Radsatzführung sind in Abb. 2.8 nicht dargestellt.

Das Zusammenwirken der einzelnen Baugruppen bzw. des gesamten Fahrzeugs mit dem Fahrweg wird als *Fahrverhalten* bezeichnet. Unter diesem Begriff werden

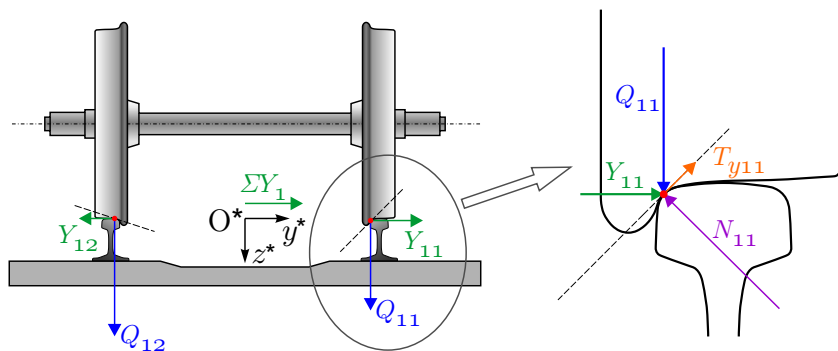
- die Fahrsicherheit,
- die Fahrwegbeanspruchung und
- das Schwingungsverhalten zusammengefasst.

Zur Beschreibung und Beurteilung der Fahrzeugreaktionen hinsichtlich Fahrverhalten werden nach [46] im Allgemeinen die Beurteilungsgrößen

- Kräfte zwischen Rad und Schiene
  - Führungskraft  $Y$ ,
  - Radaufstandskraft  $Q$ ,
  - Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  eines Radsatzes,
  - Quotient  $Y/Q$  aus Führungskraft und Radaufstandskraft,
- Kräfte am Fahrwerk
  - Summe der Radsatzlagerquerkräfte  $\Sigma Y_{\text{RSL}}$ ,
- Beschleunigungen
  - am Radsatz  $\ddot{y}$  für Fahrzeuge ohne Drehgestelle,
  - am Drehgestell  $\ddot{y}^+$  und
  - im Wagenkasten  $\ddot{y}^*$  und  $\ddot{z}^*$

herangezogen. Die maßgebenden Größen zur Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung sind die Führungskraft  $Y$  und die Radaufstandskraft  $Q$ . Als sicherheitsrelevante Größen werden die aus diesen Rad/Schiene–Kräften abgeleitete Größen  $\Sigma Y$  (Sicherheit des Gleises gegen Verschieben) und  $Y/Q$  (Sicherheit gegen Entgleisen durch Aufklettern des Radsatzes) eingestuft.

Die Bezeichnung der Rad/Schiene–Kräfte  $Y_{jk}$  und  $Q_{jk}$  erfolgt so, dass der erste Index  $j$  die Nummer des Radsatzes und der zweite Index  $k$  mit  $k = 1$  das rechte Rad und  $k = 2$  das linke Rad bezeichnet. Diese dynamischen Rad/Schiene–Kräfte sind in Abb. 2.9 für den ersten Radsatz und für eine in dieser Arbeit relevanten Einpunktberührung zwischen Rad und Schiene dargestellt. Das Fahrzeugkoordinatensystem wurde



**Abbildung 2.9** Dynamische Rad/Schiene–Kontakt Kräfte des ersten Radsatzes bei Einpunktberührung

in dieser Arbeit so gewählt, dass es mit dem Gleiskoordinatensystem (siehe Abb. 2.2) an der Position des Mittelpunktes des ersten Radsatzes bezogen auf die Schienenoberkante übereinstimmt. Die strichlierte Linie im Rad/Schiene–Kontaktpunkt stellt die Normalkontaktebene für eine Einpunktberührung dar. In der vergrößerten Darstellung zwischen dem rechten Rad und der rechten Schiene ist zusätzlich die Normalkraft  $N_{11}$  und die Querreibkraft  $T_{y11}$  eingezeichnet.

Die Ermittlung der Fahrzeugreaktionen als Ausgangsgrößen hinsichtlich der Gleislageabweichungen als Eingangsgrößen kann durch direkte Messung (notwendig bei der fahrtechnischen Zulassung) oder durch Simulation des dynamischen Systems Fahrzeug–Fahrweg erfolgen. Die Modelltiefe bei der Simulation hängt stark von der Fragestellung ab. Werden die zuvor beschriebenen Beurteilungsgrößen für das Fahrverhalten benötigt, so müssen diese im Zeitbereich ermittelt werden. Die obere Grenzfrequenz für diese Größen liegt entsprechend der EN 14363 bei 20 Hz. Auf Grund des interessierenden Frequenzbereichs und der konstruktiven Eigenschaften von Schienenfahrzeugen ergibt sich die Methode der *Mehrkörpersysteme* (MKS) als die im vorliegenden Fall geeignetste Simulationsmethode. Diese ermöglicht für den zu betrachtenden Frequenzbereich eine hohe Modellierungstiefe durch Einbindung von nichtlinearen Elementen und Berücksichtigung des Fahrwegs (wie z. B. Trassierung und Gleislage) bei gleichzeitig kurzer Berechnungszeit.

## 2.5 Modellierung von Gleislageabweichungen in der Fahrzeug/Fahrweg–Simulation

Zur Modellierung und Simulation der Fahrzeug/Fahrweg–Interaktion wird das MKS–Programm SIMPACK verwendet [44], welches Vorteile bezüglich der Modellierung des Rad/Schiene–Kontakts bietet. Die Gleislageabweichungen können sowohl als wegabhängige Größen als auch als Leistungsdichtespektren in Form von Polynomkoeffizienten vorgegeben werden. Des Weiteren erfolgt die Berücksichtigung der in Abschnitt 2.3.3 dargestellten örtlichen bzw. über die Fahrzeuggeschwindigkeit zeitlich verschobenen Anregungssignale durch Angabe der geometrischen Abstände der Radsätze.

Die Vorgabe der wegabhängigen Gleislageabweichungen kann in beiden der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Koordinatensystemen erfolgen. Die Interpolation der Anregungssignale wird intern mit *B–Splines* durchgeführt [6], wobei sowohl die Spline–Koeffizienten als auch die Ableitungen der Anregungssignale automatisch berechnet werden. Zur Vermeidung von Unstetigkeiten am Beginn und am Ende einer Simulationsstrecke kann eine Glättungslänge für die Gleislageabweichungen definiert werden, wobei hierfür intern ein Polynom 5. Ordnung verwendet wird.

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, können bei Betrachtung der Gleislageabweichungen als stochastisches Signal diese mit Hilfe von Leistungsdichtespektren beschrieben werden. Die Polynomkoeffizienten zur Beschreibung des jeweiligen Leistungsdichtespektrums können entweder frei gewählt werden oder aus einem vorgefertigten Satz für einen

„hohen“ bzw. „niedrigen“ Störpegel nach [51] ausgewählt werden. Die Synthetisierung von wegabhängigen stochastischen Gleislageabweichungen (*farbiges Rauschen*) wird üblicherweise mit *Formfiltern* durchgeführt [42]. Für die Generierung der Störpegel nach [51] wird für die Längshöhen- und Richtungsfehler ein Formfilter zweiter Ordnung und für die Querhöhenfehler ein Formfilter dritter Ordnung verwendet. Dabei werden bereits vorgefertigte digitale weiße Rauschsignale als Eingangsgröße herangezogen, mit dem Formfilter gewichtet und die Ergebnisse in Tabellenform abgelegt. Die Interpolation der in Tabellenform abgelegten synthetischen Gleislageabweichungen erfolgt wie zuvor beschrieben mittels B-Splines. Es ergeben sich daraus Vorteile für die Simulation wie eine schnellere Rechenzeit, eine mögliche variable Schrittweite des Integrators und eine Reproduzierbarkeit der Simulationsergebnisse.

Für die Abbildung von gemessenen Gleislageabweichungen in der Simulation ist es hilfreich zu wissen, ob diese im belasteten oder unbelasteten Gleis aufgenommen wurden. Üblicherweise werden die Gleislageabweichungen im belasteten Gleis mit einem Messfahrzeug aufgenommen. In diesem Fall kann je nach Fragestellung ein starres Oberbaummodell verwendet werden, da die Vorlast bereits in den Gleislagedaten weitgehend enthalten ist. Bei Messungen an einem unbelasteten Gleis ist es für eine möglichst gute Abbildung notwendig, die dynamischen Eigenschaften des Oberbaus mit abzubilden, sofern die benötigten Daten für die Parametrierung eines Oberbaumodells zur Verfügung stehen.

Im Vergleich zu fahrdynamischen Messungen von Fahrzeugreaktionen in Bezug auf Gleislageabweichungen bietet die Simulation ebenfalls die Möglichkeit, nur bestimmte Gleislageabweichungsparameter vorzugeben. Damit lässt sich auch das Fahrzeugverhalten spezifisch für jeden Gleislageabweichungsparameter bestimmen und für diese Arbeit benötigte zusätzliche Informationen und Erkenntnisse ableiten.

## 3 Überblick über aktuelle Gleislage–Bewertungsmethoden

### 3.1 Aufgaben einer Bewertung von geometrischen Gleislageabweichungen

Die geometrischen Abweichungen der Gleislage regen das dynamische Fahrzeug–Fahrweg System zu Schwingungen an. Die Auswirkungen dieser Schwingungen sind u. a.

- erhöhte dynamische Rad/Schiene–Kräfte,
- höhere Fahrwegbeanspruchungen,
- Beschleunigungen der Fahrzeugkomponenten,
- mögliche Fahrzeuginstabilitäten bis hin zu
- einer Verringerung der Entgleisungssicherheit.

Die wesentliche Aufgabe bei der Bewertung der Qualität von Gleislagen hinsichtlich geometrischer Abweichungen besteht nun darin, dieses Potenzial der möglichen Auswirkungen abzuschätzen. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse und Maßnahmen hängen sehr stark vom Fokus der Betrachtung ab.

Aus der Sicht der Instandhaltung sollen Maßnahmen dahin abgeleitet werden können, dass dadurch eine geringere Fahrzeug/Fahrweg–Interaktion für möglichst alle auf der jeweiligen Strecke verkehrenden Fahrzeugtypen erreicht werden kann. Dies bedeutet, dass die Bewertungsmethode konkrete Qualitätsergebnisse für „konstante“ Fahrwegbedingungen (für eine gegebene zu beurteilende Stelle im Netz) und „variable“ Fahrwegbedingungen (für unterschiedliche Fahrzeugtypen und Fahrzeuggeschwindigkeiten) liefern sollte.

Für die fahrtechnische Zulassung von Schienenfahrzeugen sind Aussagen hinsichtlich des Fahrzeug/Fahrweg–Verhaltens bei verschiedensten Formen von Gleislageabweichungen zu treffen. Zum einen soll die Qualität der „variablen“ Teststrecke (verschiedene Prüfabschnitte) bei der Prüfung eines „konstanten“ Fahrzeugs (das zu untersuchende Fahrzeug einer bestimmten Fahrzeugklasse) einen Zusammenhang mit der zu erwarteten Fahrzeug/Fahrweg–Interaktion aufweisen. Zum anderen ist es für eine internationale Zulassung auch notwendig, die Qualität der Teststrecken vergleichbar

zu machen. Dies bedeutet, dass bei zwei Prüfabschnitten mit gleicher Qualitätsbewertung auch ähnlich hohe Fahrzeugreaktionen für die jeweilige Fahrzeugklasse und Prüfungsgeschwindigkeit zu erwarten sein sollen.

Aus beiden Sichtweisen lässt sich somit eine gemeinsame zentrale Forderung an eine Bewertungsmethode ableiten. Die Beurteilungsgrößen der Bewertungsmethode von geometrischen Gleislageabweichungen müssen eine gute Korrelation mit den Beurteilungsgrößen der Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion aufweisen. In den folgenden Abschnitten soll gezeigt werden, inwiefern die derzeit verwendeten Europäischen Normen für die Instandhaltung und für die fahrtechnische Zulassung diese Basisbedingungen erfüllen. Darüber hinaus werden aktuelle Bewertungsmethoden von Betreibern und von verschiedenen Forschungsabteilungen zur Bestimmung der Gleislagequalität gezeigt, einige die die Gleislageabweichungen rein auf Basis geometrischer Daten bewerten und andere, die bereits die Dynamik von Fahrzeug und Fahrweg in verschiedener Weise berücksichtigen.

## 3.2 Europäische Normen und Richtlinien

Die Parameter zur Beschreibung von geometrischen Gleislageabweichungen werden in der Europäischen Norm EN 13848-1 beschrieben [45]. Diese Abweichungen werden mit Messfahrzeugen entsprechend der EN 13848-2 aufgezeichnet und ausgewertet [48]. Die Methode zur Bestimmung der Qualität der Gleislage basiert auf normativen sowie empfohlenen Grenzwerten, welche in der EN 13848-5 definiert sind [49]. In Anlehnung an die EU-Richtlinien zur Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems gelten für Strecken der Hochgeschwindigkeitsstruktur die Anforderungen aus den *Technischen Spezifikationen zur Interoperabilität – Teilsystem Infrastruktur* (HS INS TSI) [1]. In dieser HS INS TSI ist die Bewertungsmethode an jene der EN 13848-5 angelehnt.

Die Gleislagequalität von Versuchsgleisen bei der fahrtechnischen Zulassung von Schienenfahrzeugen wird in der Europäischen Norm EN 14363 im Anhang C beschrieben. Als beurteilende Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen werden wiederum jene aus der EN 13848-1 herangezogen. Die Versuchsgleise sollen dabei eine gewisse Verteilung von Auswertungsabschnitten mit unterschiedlicher Gleislagequalität aufweisen. Die Definition der Gleislage von Versuchsgleisen basiert im Wesentlichen auf dem UIC-Merkblatt 518 aus Anhang D [58].

### 3.2.1 EN 13848-5

Die Europäische Norm EN 13848-5 *Bahnanwendungen – Oberbau – Qualität der Gleisgeometrie – Teil 5: Geometrische Qualitätsstufen* beinhaltet die Festlegung der minimalen Qualität der Gleisgeometrie zum sicheren Betrieb der Züge. Die Klassifizierung der geometrischen Gleislagequalität für den jeweiligen Beschreibungsparameter erfolgt

entsprechend dreier Hauptniveaus, welche bei Überschreitung Maßnahmen nach sich ziehen. Diese drei zu betrachtenden Hauptniveaus sind

- die **Sicherheitsgrenze** (*IAL ... Immediate Action Limit*), die bei Überschreitung Maßnahmen zur Minimierung des Risikos der Entgleisung oder anderer Gefahren erfordert, wobei solche Maßnahmen ein Sperren des Gleises, eine Reduzierung der Geschwindigkeit oder eine Korrektur der Gleisgeometrie sein können;
- die **Eingriffsgrenze** (*IL ... Intervention Limit*), die bei Überschreitung eine korrigierende Instandhaltungsmaßnahme erfordert, damit die Sicherheitsgrenze nicht vor der nächsten Inspektion erreicht werden kann; sowie
- die **Aufmerksamkeitsgrenze** (*AL ... Alert Limit*), die bei Überschreitung zu einer Analyse des geometrischen Gleiszustandes führt, welche bei den regulär geplanten Instandhaltungsarbeiten berücksichtigt wird.

Im normativen Teil sind nur Sicherheitsgrenzwerte (IALs) für Einzelfehler der Längshöhenlage und der Richtungslage, sowie für die mittlere Spurweitenabweichung enthalten. Die Größen dieser Sicherheitsgrenzwerte sind aus Erfahrung und aus theoretischen Betrachtungen der Rad/Schiene-Wechselwirkungen abgeleitet, da physikalische Versuche mit verschiedenen Fahrzeugen bis zum Entgleisen in der Praxis nicht durchführbar sind. Als Einzelfehler werden Abweichungen vom Mittelwert zur Spitze herangezogen, wobei der Mittelwert über die 2-fache maximal zu betrachtende Wellenlänge nahe Null ist und daher laut Norm auch Null-Spitzenwerte verwendet werden können. Ein besonderes Augenmerk wird in dieser Arbeit auf die Längshöhenlage und auf die Richtungslage gelegt, hierfür sind die Sicherheitsgrenzwerte für den Wellenlängenbereich *D1* (3 bis 25 m) in Tab. 3.1 dargestellt. Entsprechend einer Anmerkung in der Norm kann bei

**Tabelle 3.1** EN 13848-5 Grenzwerte für die Längshöhenlage  $z$  und die Richtungslage  $y$  für den Wellenlängenbereich *D1* in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit  $v$

Geschwindigkeit	Längshöhenlage	Richtungslage
$v$	$z_{\max, IAL, D1}$	$y_{\max, IAL, D1}$
km/h	mm	mm
$v \leq 80$	28	22
$80 < v \leq 120$	26	17
$120 < v \leq 160$	23	14
$160 < v \leq 230$	20	12
$230 < v \leq 300$	16	10



Geschwindigkeiten von  $v \leq 40$  km/h der Sicherheitsgrenzwert für die Längshöhenlage auf 31 mm und für die Richtungslage auf 25 mm erhöht werden. Für den Wellenlängenbereich  $D2$  werden in der Norm zusätzlich Sicherheitsgrenzwerte für die Längshöhe und die Richtungslage ab  $v = 160$  km/h angegeben.

Ergänzend wird im Anhang A dieser Norm darauf hingewiesen, dass sowohl die Form und Reihenfolge von Einzelfehlern, als auch besondere Kombinationen von Gleisgeometrie-Parametern einen starken Einfluss auf die Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion haben können. Ein Vorschlag für die Formbewertung oder kombinierte Bewertung wird jedoch nicht angegeben.

Die Grenzwerte für die Aufmerksamkeits- und Eingriffsgrenze sind nur informativ, also nicht bindend, und dienen entsprechend dem Anhang B dieser Norm als Vorschlag für einen Leitfaden. Neben Einzelfehler-Grenzwerten werden für die Längshöhe und Richtungslage auch Grenzwertbereiche für die Standardabweichung im Wellenlängenbereich  $D1$  angegeben. Die vorgeschlagene Länge des Fensters zur Berechnung der Standardabweichung beträgt 200 m.

#### 3.2.2 EN 14363

Die Europäische Norm EN 14363 *Bahnanwendungen – Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche* gibt den Stand der Technik bezüglich Versuchsdurchführung und Auswertung der stationären Versuche und Streckenversuche wieder. Bei den Streckenversuchen wird davon ausgegangen, dass sich das Versuchsgleis in einem bestimmten Referenzzustand befindet. Als Versuchsgleis wird ein ausgewählter Teil des Fahrwegs verwendet. Die detaillierte Beschreibung der Anforderungen für das Versuchsgleis hinsichtlich Gleislage ist im Anhang C dieser Norm enthalten.

Eine Voraussetzung für die Behandlung der Messsignale und die Beurteilung der Gleislage ist die Einteilung des Versuchsgleises in sogenannte *Auswertungsabschnitte*. Ein Auswertungsabschnitt ist somit ein Teil des Versuchsgleises mit bestimmter Gleistrasierung wie

- gerades Gleis und Gleisbogen mit sehr großem Radius (*Prüfbereich 1*),
- Gleisbogen mit großem Radius (*Prüfbereich 2*),
- Gleisbogen mit kleinem Radius mit  $400 \text{ m} \leq R \leq 600 \text{ m}$  (*Prüfbereich 3*) und
- Gleisbogen mit sehr kleinem Radius mit  $250 \text{ m} \leq R \leq 400 \text{ m}$  (*Prüfbereich 4*);

und einer bestimmten Länge  $L_{AA}$ . Die Länge eines Auswertungsabschnittes ist in der Tab. 8 und Tab. 9 in der Norm angegeben und hängt vom Prüfbereich und von der Fahrzeuggeschwindigkeit ab.

Für die Bestimmung des Qualitätsniveaus der Auswertungsabschnitte werden die Gleislageabweichungen des Versuchsgleises entsprechend der Norm EN 13848–1 aufgezeichnet. Der betrachtete Wellenlängenbereich entspricht dem Bereich *D1* ( $3\text{ m} < L \leq 25\text{ m}$ ) aus der EN 13848–2. Für Geschwindigkeiten über 200 km/h sind laut Norm zwar größere Wellenlängen auch zu berücksichtigen, jedoch wird die obere Grenze nicht angegeben, da sie bisher noch nicht festgelegt wurde.

Die Beurteilungsgrößen der Gleislageabweichungen sind entsprechend dem Anhang C der Norm für die Längshöhenlage und die Richtungslage

- der absolute Größtwert  $z_{\max}$  und  $y_{\max}$ , sowie
- die Standardabweichung  $z_{\sigma}$  und  $y_{\sigma}$ .

Die Auswertung der Gleislageabweichungen erfolgt getrennt für die linke und rechte Schiene. Für die Beurteilung der Gleislagequalität ist bei den Standardabweichungen der größere Wert der beiden Schienen zu verwenden, wobei im Bogen mit einem Radius von  $R \leq 600\text{ m}$  nur die bogenäußere Schiene heranzuziehen ist.

Die Klassifizierung der Beurteilungsgrößen erfolgt nach den Beurteilungskriterien

- **Qualitätsniveau QN 1**,  
welches bei Überschreitung die Beobachtung eines Gleisabschnittes oder eine Instandhaltungsmaßnahme im Rahmen der normalen Arbeitsplanung auslöst;
- **Qualitätsniveau QN 2**,  
welches bei Überschreitung eine kurzfristige Instandhaltungsmaßnahme erfordert;
- **Qualitätsniveau QN 3**,  
welches bei Überschreitung Gleisabschnitte kennzeichnet, bei denen die übliche Gleislagequalität nicht vorhanden ist.

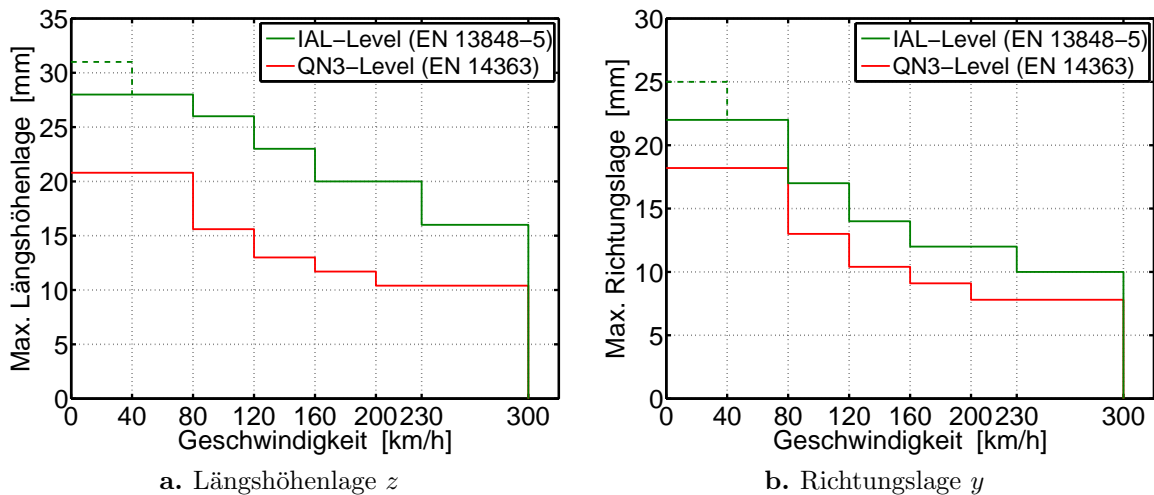
Zur Überprüfung, ob das Versuchsgleis als „repräsentativ“ beurteilt werden kann, sollen die Standardabweichungen der Abschnitte für jeden Prüfabschnitt eine bestimmte Verteilung aufweisen. Entsprechend dieser Verteilung sollen 50 % der Abschnitte unter QN 1, 40 % der Abschnitte zwischen QN 1 und QN 2, sowie 10 % der Abschnitte über QN 2 liegen.

Für die Auswahl der Auswertungsabschnitte für die fahrtechnische Prüfung sind jedoch nicht die Standardabweichungen, sondern die Maximalwerte von Bedeutung. In der Tab. 3.2 sind die Grenzwerte für die absoluten Größtwerte der Längshöhenlage und der Richtungslage in Abhängigkeit von der örtlich zulässigen Geschwindigkeit für das Qualitätsniveau QN 3 angegeben. Wird innerhalb eines Auswertungsabschnittes ein Einzelfehler gemessen, welcher das QN 3 Qualitätsniveau überschreitet, so wird dieser Abschnitt für die Auswertung der fahrtechnischen Prüfung nicht mehr herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass ein QN 3 Qualitätsniveau nicht den ungünstigsten, noch zulässigen Instandhaltungszustand eines Gleises darstellt. Dies bedeutet, dass das Fahrverhalten eines Fahrzeugs nicht für Extremfälle von Gleislagen überprüft wird, welche im Betrieb noch „zulässig“ (nach EN 13848–5) auftreten können.

**Tabelle 3.2** EN 14363 Qualitätsniveau QN 3; Grenzwerte von Einzelfehlern (Mittelwert–Spitze) der Längshöhenlage  $z$  und Richtungslage  $y$  in Abhängigkeit von der örtlich zulässigen Geschwindigkeit  $v$

Geschwindigkeit $v$ km/h	Längshöhenlage $z_{\max, \text{QN3}}$ mm	Richtungslage $y_{\max, \text{QN3}}$ mm
$v \leq 80$	20,8	18,2
$80 < v \leq 120$	15,6	13,0
$120 < v \leq 160$	13,0	10,4
$160 < v \leq 230$	11,7	9,1
$230 < v \leq 300$	10,4	7,8

Die Differenz dieser beiden Normen ist in Abb. 3.1 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt. Die jeweils rote Kurve entspricht den in Tab. 3.2 gelisteten Grenzwerten der Einzelfehler für das QN 3 Qualitätsniveau der EN 14363 und die grüne Kurve entspricht den in Tab. 3.1 gelisteten Grenzwerten der Einzelfehler für die Sicherheitsgrenze IAL der EN 13848–5.



**Abbildung 3.1** Vergleich der Einzelfehler-Grenzwerte in EN 14363 (QN 3) und EN 13848–5 (IAL)

Die Infrastrukturbetreiber dürfen die Grenzwerte der EN 13848–5 auch herabsetzen, um so diese Differenz zu verringern und wiederum die Sicherheit im Betrieb zu erhöhen. Aus diesem Grund wurden z. B. bei den ÖBB die Grenzwerte der Sicherheitsgrenze IAL für den Instandhaltungsplan verringert, sie liegen jedoch immer noch höher als jene des QN 3 Qualitätsniveaus der EN 14363 [16].

### 3.2.3 HS INS TSI

Die Richtlinie 96/48/EG mit den dazugehörigen technischen Spezifikationen für die Interoperabilität hat zum Ziel, das derzeitige Problem der mangelnden Interoperabilität im europäischen Eisenbahnsystem zu lösen [1]. Für das Teilsystem Infrastruktur wurde dazu die *Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems* veröffentlicht.

Vom Infrastrukturbetreiber wird für jede Hochgeschwindigkeitsstrecke gefordert, dass er über einen Instandhaltungsplan verfügt. Dieser Instandhaltungsplan muss u. a. Angaben über einen Satz von Grenzwerten in Bezug auf die Gleislagequalität enthalten. Die Methode zur Bewertung der Gleislagequalität ist an jene der EN 13848–5 angelehnt. Die drei Schwellen (in der EN 13848–5 als Hauptniveaus bezeichnet) sind

- die **Soforteingriffsschwelle** (*IAL ... Immediate Action Limit*),
- die **Eingriffsschwelle** (*IL ... Intervention Limit*) und
- der **Auslösewert** (*AL ... Alert Limit*).

Geeignete Grenzwerte für diese Schwellen muss der Infrastrukturbetreiber selbst festlegen, da in der TSI nur Grenzwerte für Einzelfehler der Spurweite und Verwindungsgrenzwerte enthalten sind. Zusätzlich wird gefordert, dass der Infrastrukturbetreiber Grenzwerte für die Gleislagequalität berücksichtigt, die als Grundlage für die Abnahme der Fahrzeuge dienen. Die Anforderungen für die Abnahme sind wiederum in der *TSI Fahrzeuge des Hochgeschwindigkeitsbahnsystems* festgelegt. Diese verweist auf die Qualitätsniveaus der EN 14363, wobei angemerkt wird, dass die zuvor beschriebene Differenz zwischen den Normen ein *offener Punkt* in der TSI ist.

Zusätzlich wird vom Infrastrukturbetreiber gefordert, dass die Auswirkungen von kombiniert auftretenden Einzelfehlern berücksichtigt werden sollen. Hierfür wird jedoch, wie bereits bei der EN 13848–5 angemerkt, auch in der TSI keine Methode vorgeschlagen.

## 3.3 Kritik an den derzeitigen Europäischen Normen

Der Zusammenhang der Beurteilungsgrößen einer Bewertungsmethode von geometrischen Gleislageabweichungen und der Beurteilungsgrößen der Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion ist eine gemeinsame zentrale Forderung der Betreiber (Instandhaltung) und Fahrzeughersteller (fahrtechnische Zulassung). Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, werden bei den derzeitigen Europäischen Normen Maximalwerte und Standardabweichungen als Beurteilungsgrößen herangezogen. Im Folgenden soll der geforderte Zusammenhang untersucht und die Ergebnisse anhand von grundsätzlichen Überlegungen diskutiert werden.

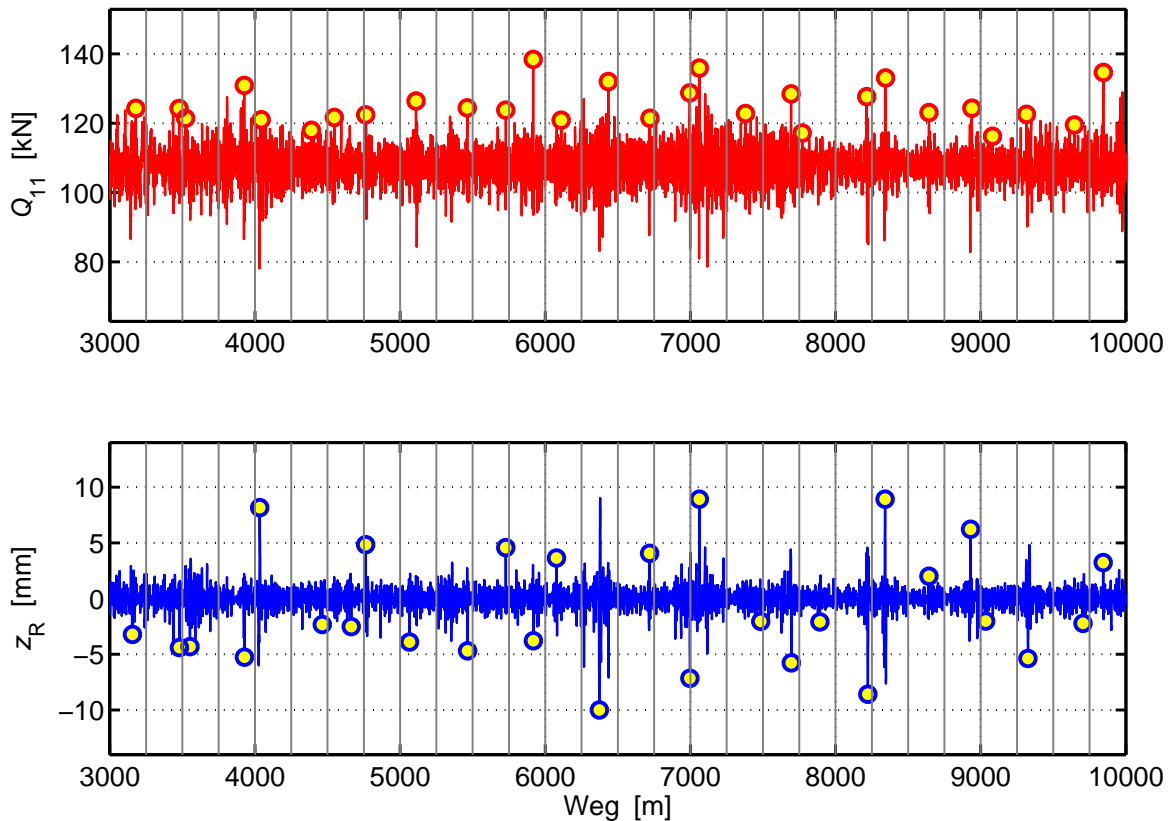
### 3.3.1 Zusammenhang der Beurteilungsgrößen

Zur Untersuchung des Zusammenhangs der Beurteilungsgrößen wurde in dieser Arbeit eine Fahrzeug-Simulation mit gemessenen Gleislageabweichungen durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Als Simulationsumgebung wurde, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, das MKS-Programm SIMPACK verwendet. Als Fahrzeugmodell stand ein nichtlineares Lok-Modell zur Verfügung (siehe Abschnitt 4.4), wobei die Fahrzeuggeschwindigkeit in der Simulation 160 km/h betrug. Der simulierte Streckenabschnitt war eine Gerade mit einer Länge von 12 km, wobei die geometrischen Gleislageabweichungen auf Basis von Messdaten vorgegeben wurden.

Die Ergebnisse dieser Simulation wurden in Anlehnung an die EN 14363 wie Messergebnisse eines fahrtechnischen Zulassungsversuchs behandelt. Hierfür wurde die Strecke in 250 m lange Abschnitte unterteilt und sowohl die geometrischen Gleislageabweichungen als auch die Fahrzeugreaktionen ausgewertet. Die Daten der geometrischen Gleislageabweichungen wurden mit einem Bandpass Butterworth-Filter 4. Ordnung im Wellenlängenbereich zwischen 3 und 25 m gefiltert. Anschließend wurden in jedem Auswertungsabschnitt die Maximalwerte der Längshöhenlage der rechten Schiene  $z_R$  für die weitere Analyse berechnet. Als Fahrzeugreaktionsgröße für die vertikale Richtung wurde die Radaufstandskraft des rechten Rades am ersten Radsatz  $Q_{11}$  herangezogen. Diese Reaktionskraft wurde mit 20 Hz tiefpassgefiltert und daraus ebenfalls der Maximalwert für jeden Auswertungsabschnitt berechnet.

In Abb. 3.2 sind die Verläufe der Radaufstandskraft  $Q_{11}$  (rot) und der Längshöhenlage  $z_R$  (blau) dargestellt, sowie die Maximalwerte für jeden Auswertungsabschnitt mit einem kleinen gelben Kreis gekennzeichnet. Hier ist zu bemerken, dass die Maximalwerte der Radaufstandskraft  $Q_{11}$  in Anlehnung an die EN 14363 vom absoluten Anteil zu berechnen sind, sodass die Minimalwerte der dynamischen Radaufstandskraft betragsmäßig durchaus höher sein können als die Maximalwerte des dynamischen Anteils. Für eine nähere Untersuchung wird der Auswertungsabschnitt zwischen 5000 und 5250 m ausgewählt (siehe Abb. 3.3). Es ist deutlich erkennbar, dass die Position des Maximalwerts der geometrischen Gleislageabweichung im gezeigten Auswertungsabschnitt völlig von der Position des Maximalwerts der Fahrzeugreaktion abweicht. Des Weiteren ist zu erkennen, dass an der Position des Maximalwerts der Fahrzeugreaktion die Amplitude der Abweichung der Gleislage nur 2 mm im Vergleich zum Abschnittsmaximalwert von 4 mm beträgt. Legt man das Augenmerk auf den (betragsmäßig größeren) Minimalwert der dynamischen Radaufstandskraft (kleiner grüner Kreis) an der Stelle  $s = 5115$  m, so beträgt die Amplitude der Abweichung der Gleislage hier ebenfalls nur rund 2,3 mm.

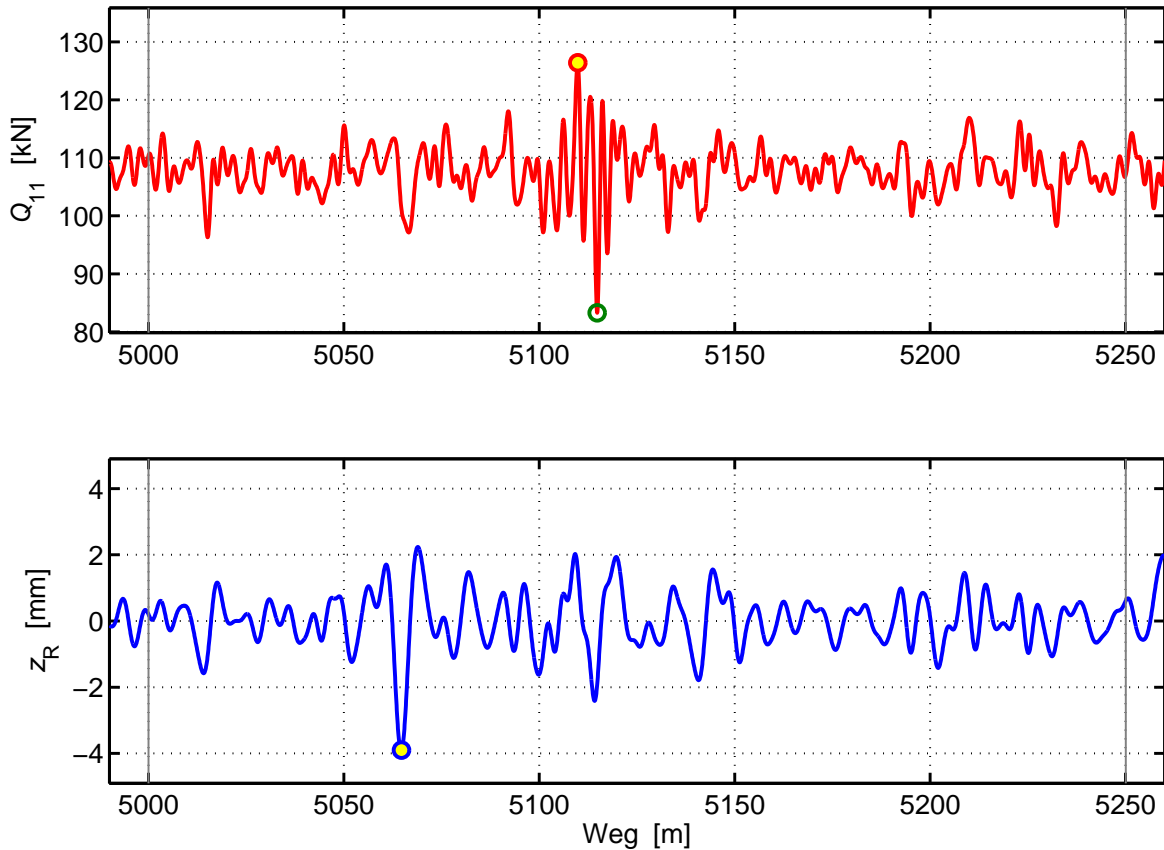
Die Analyse aller Maximalwert-Kombinationen der Auswertungsabschnitte kann mit Hilfe eines Punktwolken-Diagramms durchgeführt werden. Hierfür sind in Abb. 3.4 die Maximalwerte der Längshöhenlage  $z_R$  gegenüber den jeweiligen Maximalwerten der dynamischen Radaufstandskraft  $Q_{11,\max,\text{dyn}}$  für alle Auswertungsabschnitte aufgetragen. Eine gute (lineare) Korrelation zwischen der Beurteilungsgröße der Gleislage und



**Abbildung 3.2** Verlauf der Radaufstandskraft  $Q_{11}$  (oben, rot) und der Längshöhenlage  $z_R$  (unten, blau) mit den Maximalwerten der 250 m langen Auswertungsabschnitte

der Beurteilungsgröße der Fahrzeugreaktion würde bedeuten, dass alle Punkte auf einer Geraden liegen. In der Abbildung ist jedoch zu sehen, dass die Streuung groß ist und in diesem Fall so gut wie kein Zusammenhang erkennbar ist. Um das zu verdeutlichen sollen im folgenden Beispiel zwei Auswertungsabschnitte mit einer maximalen Längshöhenlage-Abweichung von ca. 8 mm analysiert werden. In einem Auswertungsabschnitt ergab die Simulation eine maximale dynamische Radaufstandskraft von 13 kN und im anderen Abschnitt 41 kN. Dies bedeutet im gezeigten Fall eine Abweichung der Fahrzeugreaktion von über 300 % bei zwei gleich großen Maximalwerten der Gleislageabweichung.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass der Zusammenhang zwischen den in den aktuellen Europäischen Normen verwendeten Beurteilungsgrößen von Gleislageabweichungen nicht im ausreichenden Maße gegeben ist. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Erfahrungen von Betreibern und Fahrzeugherstellern. Für eine mögliche Begründung dieser starken Abweichungen soll im folgenden Abschnitt ein vereinfachtes Fahrzeug/Fahrweg-System näher betrachtet werden.



**Abbildung 3.3** Analyse eines 250 m langen Auswertungsabschnittes hinsichtlich Position und Größe des Maximalwerts der Radaufstandskraft  $Q_{11}$  (oben, rot) und der Längshöhenlage  $z_R$  (unten, blau)

### 3.3.2 Grundsätzliche Überlegungen

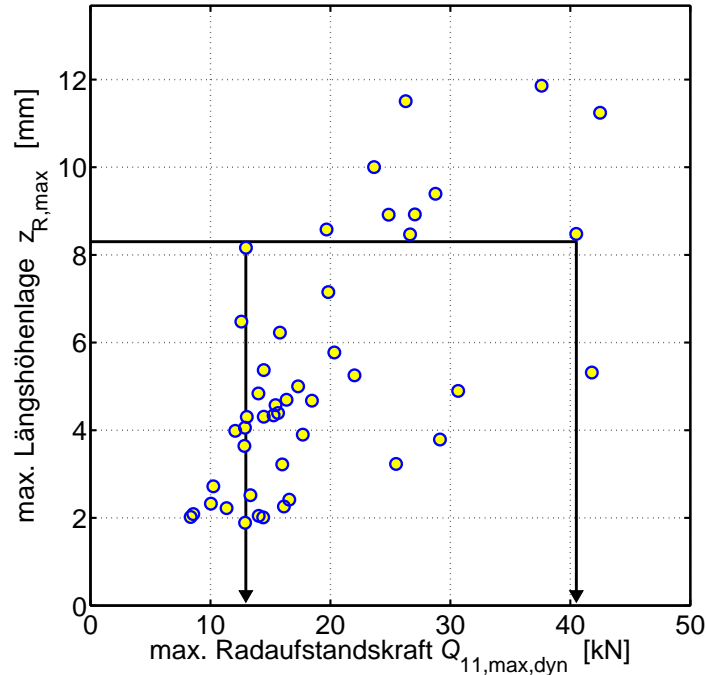
Der unzureichende Zusammenhang zwischen den in den aktuellen Normen verwendeten Maximalwerten der Gleislageabweichungen und den maximalen Fahrzeugreaktionskräften soll in Anlehnung an [15] auf Basis von theoretischen Überlegungen nochmals verdeutlicht werden. Hierfür wird das Fahrzeug/Fahrweg-System auf eine einfache bewegte Masse auf unebenem Fahrweg reduziert. Die horizontale Geschwindigkeit der Masse soll konstant sein und die Unebenheit des Fahrwegs durch eine sinusförmige vertikale Gleislageabweichung abgebildet werden. Diese Abweichung bildet die Eingangsgröße des Systems und die Radaufstandskraft  $Q$  wird als Ausgangsgröße betrachtet.

Die zeitliche Anregung des Systems und deren 2. Ableitung können mit

$$z(t) = \hat{z} \sin(\omega t), \quad (3.1)$$

$$\ddot{z}(t) = -\omega^2 \hat{z} \sin(\omega t) = -\omega^2 z(t) \quad (3.2)$$

beschrieben werden, wobei sich die Zeit-Kreisfrequenz  $\omega$  aus der konstanten horizontalen Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und der Wellenlänge der harmonischen vertikalen Gleis-



**Abbildung 3.4** Vergleich der Maximalwerte der Längshöhe  $z_{R,max}$  und der Radaufstandskraft  $Q_{11,max,dyn}$  aller Abschnitte

lageabweichung  $L$  berechnet mit

$$\omega = \frac{2\pi v}{L} . \quad (3.3)$$

Der Zusammenhang zwischen der maximalen Amplitude der Ausgangsgröße (Radaufstandskraft  $Q$ ) und der maximalen Amplitude einer sinusförmigen Eingangsgröße (Längshöhenlage  $z$ ) ergibt sich somit über die *wirksame* Masse  $m$  zu

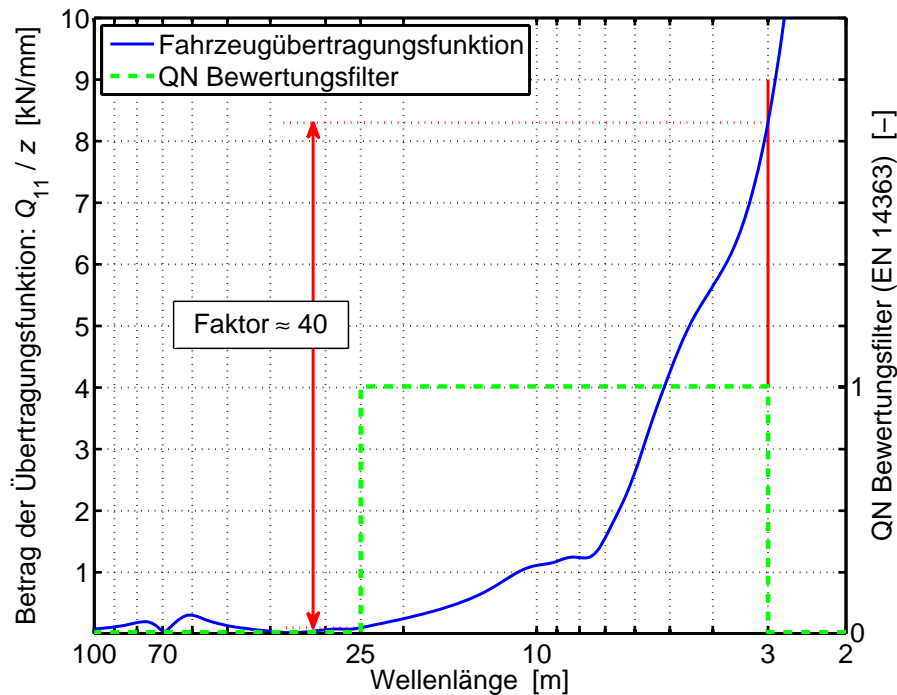
$$Q(t) = m\ddot{z}(t) , \quad (3.4)$$

$$\left| \frac{\hat{Q}}{\hat{z}} \right| = m \left( \frac{2\pi v}{L} \right)^2 . \quad (3.5)$$

Auf Basis dieser Überlegungen kann der Zusammenhang im Frequenzbereich dadurch beschrieben werden, dass die Fahrzeugreaktion in vertikaler Richtung näherungsweise indirekt proportional zum Quadrat der Wellenlänge der Gleislageabweichung ist. Eine leichte Abschwächung dieses Effekts ergibt sich dadurch, dass die wirksame Masse für diese Überlegungen eine Abhängigkeit von der Wellenlänge bzw. Frequenz aufweist. Im niedrigen Frequenzbereich (große Wellenlängen) regen die Gleislageabweichungen das gesamte Fahrzeug an, woraus sich die wirksame Masse aus der Gesamtmasse von Wagenkasten, Drehgestell und Radsätzen ergibt. Im mittleren Frequenzbereich wird der Wagenkasten nur mehr schwach angeregt und es dominieren die Massen des Drehgestells und des Radsatzes. Im hohen Frequenzbereich entspricht die wirksame Masse im Wesentlichen nur mehr der Radsatzmasse.



Für ein linearisiertes Modell eines in Abschnitt 4.4 beschriebenen Reisezugwagens ist das vertikale Übertragungsverhalten  $Q_{11}/z$  in Abb. 3.5 in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $L$  der Längshöhenlage  $z$  für eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 160$  km/h als blaue Kurve dargestellt. Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, werden für die Berechnung der Qualitätsniveaus die Gleislageabweichungen mit einem Bandpassfilter zwischen 3 und 25 m gefiltert und die Maximal-Amplituden bewertet (grüne Kurve). Dies bedeutet, dass in den aktuellen Normen die Wellenlängenanteile der Gleislageabweichungen nicht berücksichtigt werden. Betrachtet man nun zwei rein sinusförmige Gleislageabweichungen mit einer Wellenlänge von 3 m bzw. 25 m, so würden diese in den aktuellen Normen jeweils mit dem Faktor 1 bewertet werden. Die Fahrzeugreaktionen auf Basis der zuvor gezeigten Überlegungen ergeben einen Maximal-Amplitudenunterschied auf Grund des Quadrats der Wellenlängenverhältnisse mit dem Faktor 69. Wie in der Abbildung gezeigt, wird der Effekt beim Fahrzeugmodell durch die Federstufen zwar leicht abgeschwächt, es ergibt sich jedoch trotzdem noch ein Unterschied mit einem Faktor 40.

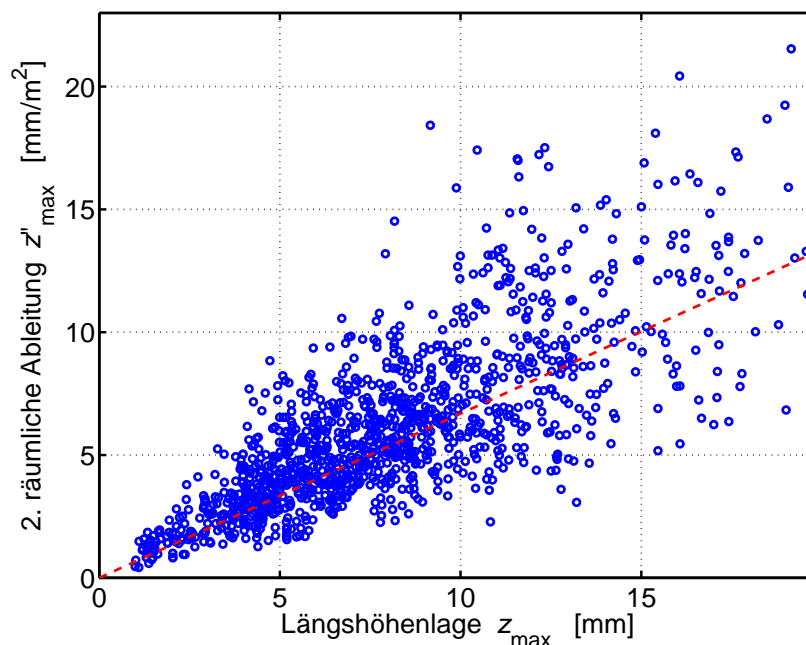


**Abbildung 3.5** Vergleich des Zusammenhangs der Radaufstandskraft  $Q_{11}$  zur Längshöhenlage  $z$  des Lok-Modells und der QN-Bewertungsfunktion der Gleislageabweichungen nach EN 14363

Ähnliche Überlegungen wie im Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich ergeben den Zusammenhang im Wegbereich mit

$$Q(s) = mv^2 \frac{d^2 z}{ds^2}, \quad (3.6)$$

wobei  $m$  wiederum die wirksame Masse,  $s$  die Wegstrecke und  $v$  die Fahrzeuggeschwindigkeit ist. Die Maximal-Amplituden der Fahrzeugreaktion in vertikaler Richtung hängen somit näherungsweise mit den Maximal-Amplituden der 2. räumlichen Ableitung der vertikalen Gleislageabweichungen zusammen. Daraus kann für die aktuelle Bewertung nach der Norm geschlossen werden, dass zumindest ein ausreichender Zusammenhang zwischen den Maximal-Amplituden der Gleislageabweichungen und deren 2. räumlicher Ableitung gegeben sein sollte. Dies wurde ebenfalls in [15] untersucht, indem diese Größen innerhalb von 500 m Abschnitten von realen Gleislageabweichungen berechnet wurden. In Abb. 3.6 ist das Ergebnis dieser Untersuchung dargestellt. Es ist zwar ein schwacher linearer Zusammenhang erkennbar, jedoch ist die große Streuung der Werte von der linearen Regressionsgeraden (strichlierte rote Linie) deutlich ersichtlich.



**Abbildung 3.6** Zusammenhang der Maximalwerte der Längshöhenlage und der 2. räumlichen Ableitung der Längshöhenlage für jeweils 500 m lange Auswertungsabschnitte (in Anlehnung an [15])

Die grundsätzlichen Überlegungen und Untersuchungen an einem vereinfachten Fahrzeug/Fahrweg-System haben gezeigt, dass die Vernachlässigung des dynamischen Systems bei der Bewertung von Gleislageabweichungen zu großen Streuungen der Beurteilungsgrößen führt. Da die aktuellen Bewertungsmethoden aus den Europäischen Normen sowohl für die Betreiber als auch für die Fahrzeughersteller nicht zufriedenstellend sind, werden zusätzlich je nach Anforderungen noch weitere Methoden verwendet bzw. weiterentwickelt. In [57] wird aus Sicht der Fahrzeughersteller angemerkt, dass hinsichtlich der Maximalwerte die Fahrzeugreaktionen stark von der Form der Gleislageabweichungen abhängen, sowie hinsichtlich Standardabweichungen speziell die Wellenlänge der Störungen in Verbindung mit der Fahrgeschwindigkeit und

der Berührgeometrie von wesentlicher Bedeutung sind. Aus diesen Gründen werden europäische Forschungsvorhaben initiiert, um eine an Fahrzeugreaktionen orientierte Definition der Gleislageabweichungen zu erarbeiten. Eine Auswahl verschiedener aktueller Methoden aus der Literatur soll daher in den folgenden Abschnitten aufgezeigt und deren methodische Grundansätze diskutiert werden.

## 3.4 Geometrische Bewertungsmethoden

In dieser Arbeit werden unter dem Begriff *geometrische Bewertungsmethoden* jene Methoden zusammengefasst, die nur auf geometrischen Gleislageabweichungen ohne Mitbeziehung des Fahrzeug/Fahrwegs-Systems basieren. Dazu zählen sowohl Beschreibungen der in Abschnitt 2.3.2 gezeigten statistischen Anteile der Gleislageabweichungen als auch die Beschreibung im Frequenzbereich zur Analyse der in Abschnitt 2.3.1 gezeigten deterministischen Anteile der Gleislageabweichungen.

### 3.4.1 Statistische Beschreibung

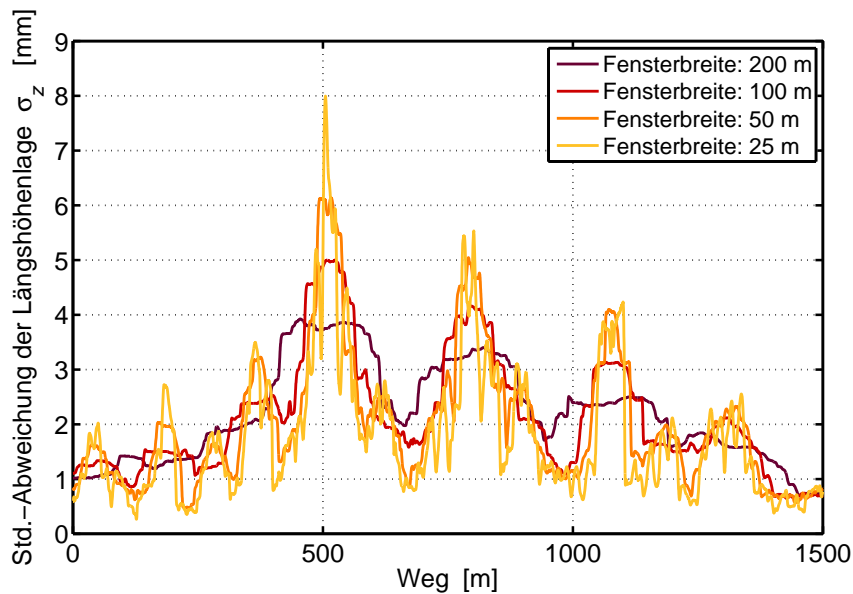
Zur Beschreibung von statistischen Eigenschaften von Gleislageabweichungen können, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, u. a. Kenngrößen wie Mittelwert, Standardabweichung oder auch Approximationsparameter von Leistungsdichtespektren herangezogen werden. Im Folgenden werden Bewertungsmethoden vorgestellt, die auf diesen Kenngrößen basieren.

#### 3.4.1.1 Standardabweichung

Bei den fahrtechnischen Zulassungsversuchen wird die Standardabweichung  $\sigma$  herangezogen, um die grundsätzlichen Anforderungen an die Gleislage der Versuchsstrecke zu überprüfen. Hierfür müssen die Qualitätsniveaus der Auswertungsabschnitte auf Basis der Standardabweichungen, wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt, einer bestimmten Verteilung unterliegen. Auf Basis dieser Schwellen können durch weitere Unterteilungen verschiedene Qualitätsklassen der Gleislageabweichungen erstellt werden (siehe [46] – Bild C.1).

In der Norm für die Instandhaltung (EN 13848–5) ist angemerkt, dass mit den Maximalwerten (hinsichtlich der Sicherheitsgrenzwerte) sowohl die Fahrzeuggleiswechselwirkung als auch das Risiko unerwarteter Ereignisse berücksichtigt werden. Die Grenzwerte für die Standardabweichung sind hingegen nur informativ und auch nur für die Aufmerksamkeitsgrenze im Anhang dieser Norm definiert. Die Betreiber können die angegebenen Grenzwerte der Standardabweichung für den Wellenlängenbereich  $D1$  innerhalb der vorgeschlagenen Fensterbreite von 200 m als Leitfaden für die Instandhaltungspolitik nutzen.

Bei der Instandhaltung ist die örtliche Information von zu behebenden Gleislageabweichungen von großer Bedeutung. Bei der vorgeschlagenen Fensterbreite von 200 m ist jedoch eine große örtliche Unschärfe in den Ergebnissen feststellbar. Zur Erhöhung der örtlichen Informationen können die Fensterbreiten verkleinert werden. Zu beachten ist dabei, dass dadurch einerseits weniger Datenpunkte je Fenster zur Verfügung stehen und andererseits die großen Wellenlängeninformationen eingeschränkt werden. Die Berechnung der Standardabweichung mit einem gleitenden Fenster unterschiedlicher Breite ist in Abb. 3.7 dargestellt. Bei dieser Analyse der gemessenen Längshöhenlage  $z$  eines 1,5 km langen Abschnitts zeigt sich deutlich, dass die örtliche Auflösung bei kleinerem Fenster steigt.



**Abbildung 3.7** Verlauf der gefensterten Standardabweichungen einer (ungefilterten) Längshöhenlage  $z$

Eine auf Standardabweichungen basierende Bewertungsmethode ist das in den Niederlanden angewandte *BMS-Verfahren* [7]. Die Standardabweichungen der Gleislageparameter werden über eine jeweilige Abschnittslänge von 200 m im Wellenlängenbereich zwischen 0 und 25 m berechnet. Zusätzlich wird für die Längshöhenlage- und Richtungslageabweichungen noch der Wellenlängenbereich zwischen 25 und 70 m in Betracht gezogen. Für die Klassifizierung der Ergebnisse werden sogenannte *Qualitätsindices* QI berechnet mit

$$QI = 10 \left( \frac{QI_{80}}{10} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma_{80}}} . \quad (3.7)$$

Das Ergebnis orientiert sich an dem niederländischen Schulsystem, wobei eine Standardabweichung von 0 einen Qualitätsindex von 10 ergibt. Der Instandhaltungsplan sieht vor, dass 20 % des Netzes pro Jahr gestopft werden, sodass sich daraus eine

Grenze in der Verteilung der Standardabweichungen von 80 % ergibt, die mit  $\sigma_{80}$  bezeichnet wird. Der dazugehörige Wert des Qualitätsindex  $QI_{80}$  wird per Definition mit 6 festgelegt und entspricht dem *break-even point* der Instandhaltung.

Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass der große Vorteil der Verwendung von Standardabweichungen zur Beurteilung von Gleislageabweichungen in der einfachen Berechnung liegt. Unter der Annahme, dass der Mittelwert durch die Bandpass-Filterung nahe bei Null liegt und die Verteilung im jeweiligen Auswertungsfenster einer Gauss-Verteilung entspricht, können die statistischen Eigenschaften der Gleislageabweichungen mit der Berechnung der Standardabweichung weitgehend beschrieben werden. Es können jedoch keine Aussagen über einzelne harmonische Anteile der Gleislageabweichungen getroffen werden, die speziell für die Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion von entscheidender Bedeutung sein können.

### 3.4.1.2 Spektrales Leistungsdichtespektrum

Eine weitere Möglichkeit zur Analyse von stationären stochastischen Signalanteilen von Gleislageabweichungen bietet das Leistungsdichtespektrum (*engl. PSD – Power Spectral Density*). Das PSD kann als Varianzdichtefunktion in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgefasst werden. Wie in Abschnitt 2.3.2 gezeigt, kann durch Integration über alle Wellenlängen wiederum die Varianz des Signals berechnet werden, wobei ebenfalls die Varianz für eine beliebige Wellenlängen-Bandbreite bestimmt werden kann. Dies kann z. B. bei der Analyse von spezifischen Wellenlängen-Untersuchungen sehr hilfreich sein.

Das Haupteinsatzgebiet des Leistungsdichtespektrums liegt in der Synthese von Gleislageabweichungen für die Fahrzeugauslegung. Hierfür wurden zahlreiche Messfahrten in europäischen Netzen durchgeführt und für die jeweiligen Gleislage-Beschreibungsparameter Leistungsdichtespektren berechnet [11]. Auf Basis solcher Messungen können die PSD-Ergebnisse mit Hilfe von Ansatzfunktionen durch wenige Parameter beschrieben und mit verschiedenen Methoden zur praktischen Verarbeitung zur Generierung von Rauschprozessen synthetisiert werden [19]. Der Nachteil bei der Synthetisierung von Gleislageabweichungen auf Basis dieser PSD-Funktionen liegt jedoch darin, dass keine Phaseninformationen enthalten sind und so nur Analysen von Fahrzeugreaktionen im Frequenzbereich sinnvoll sind. Als Beispiel sei hier die Komfort-Simulation von Schienenfahrzeugen angemerkt, bei denen u. a. die Wagenkastenbeschleunigungen im Frequenzbereich bewertet werden.

Wie in [54] angegeben, gibt es mehrere mögliche Ansatzfunktionen zur Beschreibung der PSD-Ergebnisse. Eine Ansatzfunktion für eine einseitige PSD-Approximation von Gleislagen wird in [52] vorgeschlagen und ist eine Beschreibung mit kubischen Hyperbeln mit nur zwei Parametern durch

$$\phi_{\zeta}(L) = \frac{a}{\left(b + \frac{1}{L}\right)^3}. \quad (3.8)$$

Der Parameter  $a$  ist ein Maß für die Größe der Unebenheitsamplituden und bedeutet eine Veränderung der Dichten bei allen Wellenlängen um den gleichen Faktor. Eine Vergrößerung des Parameters  $b$  bewirkt einen flacheren Verlauf der kubischen Hyperbeln und einen höheren Anteil an kurzen Wellenlängen im Spektrum. Die Werte der beiden Parameter  $a$  und  $b$  für eine *gute*, *mittlere* und *schlechte* Gleislage aller Gleislage-Beschreibungsparameter können u. a. aus [11] bzw. [28] entnommen werden.

Die am häufigsten verwendeten Ansatzfunktionen in Abhängigkeit der Wegkreisfrequenz  $\Omega$  sind in [51] angegeben mit

$$\phi_{\zeta}(\Omega) = \frac{a\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad \text{für die Längshöhe und Richtung, sowie} \quad (3.9)$$

$$\phi_{\zeta}(\Omega) = \frac{a\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \frac{\Omega^2}{b(\Omega^2 + \Omega_s^2)} \quad \text{für die Querhöhe.} \quad (3.10)$$

Die Parameter  $a$  und  $b$ , sowie die Parameter der Eckfrequenzen (Knickstellen der Kurven)  $\Omega_c$ ,  $\Omega_r$  und  $\Omega_s$  sind ebenfalls aus [51] für einen *niedrigen* (*ORE low*) und *hohen* (*ORE high*) Störpegel zu entnehmen. In diesem Bericht wird für den Spurweitenfehler keine Ansatzfunktion angegeben.

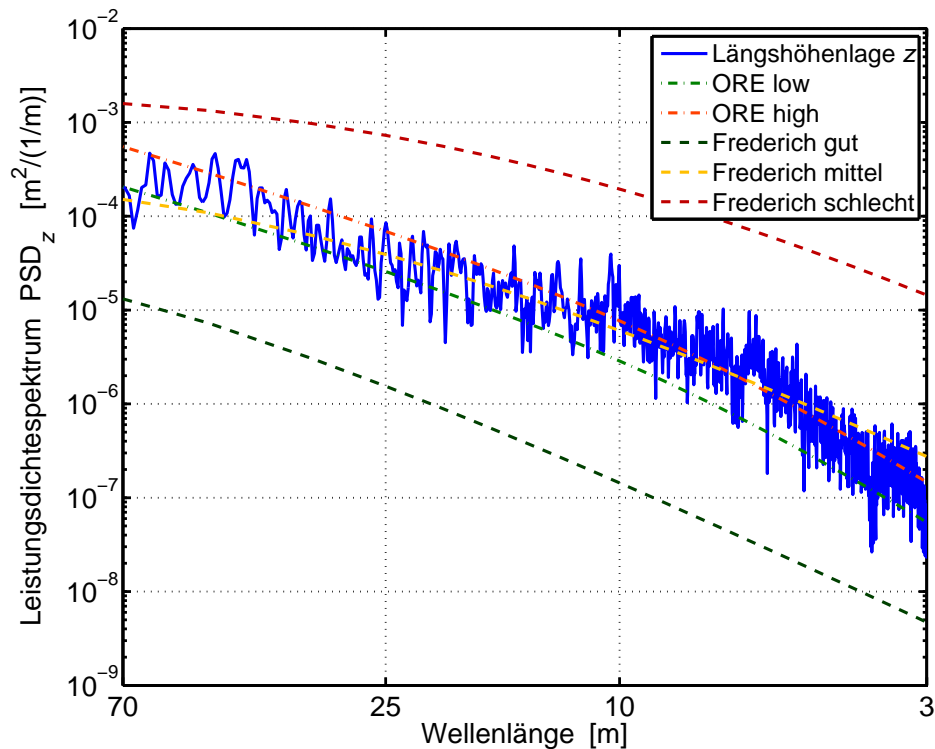
Im Wellenlängenbereich zwischen 0,1 und 40 m können nach [54] die Spektren im doppelt-logarithmischen Maßstab auch mit einer Geraden mit folgender Ansatzfunktion angenähert werden

$$\phi_{\zeta}(L) = \frac{c}{\left(\frac{1}{L}\right)^d}. \quad (3.11)$$

Die Parameter  $c$  und  $d$  dieser Ansatzfunktion können für ein *gutes* und *schlechtes* Gleis aus [54] entnommen werden.

In Abb. 3.8 ist das einseitige Leistungsdichtespektrum einer gemessenen Längshöhenlage  $z$  mit den aus [11] und [51] angegebenen Klassengrenzen dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Abschnitt der untersuchten Längshöhenlage in etwa einer *mittleren* Gleislagequalität nach [11] entspricht. Eine Zuordnung nach [51] ist nicht eindeutig, da gewisse Wellenlängenbereiche über dem hohen Störpegel und andere Wellenlängenbereiche wiederum unterhalb des niedrigen Störpegels liegen.

Der Vorteil bei der Bewertung von Gleislageabweichungen auf PSD-Basis liegt darin, dass zumindest für die Synthetisierung bereits verschiedene Ansatzfunktionen mit den dazugehörigen Parametern definiert wurden und international eingesetzt werden. Wie jedoch das Beispiel in Abb. 3.8 zeigt, liegt die Schwierigkeit bei der Analyse darin, die Gleislagequalität für einen bestimmten Abschnitt zu bestimmen, vor allem wenn gewisse Bereiche die unterschiedlichen Klassengrenzen über- bzw. unterschreiten. Eine weitere Problematik liegt darin, dass sich die statistischen Parameter und somit das PSD über die Strecke ändert, sodass es sinnvoll wäre, wie in [54] gezeigt, ein gefenster-tes PSD mit ausreichender Datenpunktzahl zu verwenden, um so ein *PSD-Gebirge*



**Abbildung 3.8** Leistungsdichtespektrum der Längshöhe  $z$  mit verschiedenen Bewertungsgrenzen

zu erhalten. Es sind daraus zwar die statistischen Veränderungen entlang der Strecke erkennbar, die schwierige Interpretation und Zuordnung zu verschiedenen Qualitätsklassen bleibt jedoch erhalten.

### 3.4.2 Frequenzspezifische Analyse

Für die Analyse und Beschreibung von deterministischen Anteilen der Gleislageabweichungen (siehe Abschnitt 2.3.1) eignen sich besonders Methoden im Frequenzbereich. Die periodischen Anteile der Gleislageabweichungen können mittels *Fourier-Transformation* gut analysiert werden. Spezielle Muster von Gleislageabweichungen können wiederum mit Hilfe der Wavelet-Transformation detektiert und beschrieben werden.

#### 3.4.2.1 Short Time Fourier Transformation

Auf Grund der Tatsache, dass die Daten des zu analysierenden Abschnitts von Gleislageabweichungen in diskreter und endlicher Form vorliegen, wird für die Frequenzanalyse der harmonischen Anteile die *diskrete Fourier-Transformation* (DFT) verwendet. Das Ergebnis ist ein komplexes Amplituden-Spektrum  $\hat{\zeta}[k]$ , welches für ein

Gleislageabweichungs-Signal  $\zeta[n]$  mit einer Länge von  $N$ -Werten berechnet wird mit

$$\hat{\zeta}[k] = \mathcal{DFT} \{ \zeta[n] \} = \sum_{n=0}^{N-1} \zeta[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.12)$$

Wurde das Gleislageabweichungs-Signal mit einem äquidistanten Sampling-Abstand von  $\Delta s$  abgetastet, so ergibt sich für den  $k$ -ten Spektralwert die dazugehörige Wellenlänge  $L_k$  mit

$$L_k = \frac{k}{N} \Delta s. \quad (3.13)$$

Mit Hilfe der DFT können somit die harmonischen Anteile mit den dazugehörigen Wellenlängen für eine Strecke bestimmt und analysiert werden. Der Nachteil ist jedoch, dass die örtliche Zuordnung dieser Frequenzinformationen nicht gegeben ist. Zur Erhöhung der Ortsinformation eignet sich hierfür die gefensterte Fourier-Transformation (engl. *Short-Time-Fourier-Transformation (STFT)*).

Bei der STFT wird jeweils nur ein begrenzter Abschnitt eines Gleislageabweichungs-Signals betrachtet und in den Frequenz-Bereich transformiert. Durch die Verschiebung des Fensters entlang des kompletten Signals bekommt man so mehrere Frequenz-Spektren, die sich jeweils einem gewissen örtlichen Bereich zuordnen lassen. Daraus können wiederum harmonische Signalanteile von Gleislageabweichungen detektiert werden, welche z. B. nur in bestimmten Abschnitten auftreten.

Bei der Analyse von bestimmten Frequenz-Anteilen ist zu beachten, dass diese durch den sogenannten *Leck-Effekt* (engl. *leakage effect*) verfälscht sein können. Dieser Effekt wirkt sich dann am stärksten aus, wenn die Fensterbreite nicht gleich der Periodendauer des Signals ist und als Fenster-Funktion ein Rechteckfenster verwendet wird. Der Einfluss der Fenster-Funktion kann durch eine geeignete Wahl einer vom Rechteck abweichenden Funktion verringert werden, wobei jedoch zu beachten ist, dass dadurch wiederum nur die gewichteten Amplituden des Signals analysiert werden. Für Gleislageabweichungs-Signale eignet sich entsprechend [17] das sogenannte *von Hann-Fenster*. Die Fensterlänge  $W[n]$  entspricht dem zu transformierenden Signalausschnitt der Länge  $N$  und ist definiert mit

$$W[n] = 0,5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.14)$$

Der Nachteil der STFT liegt in der sogenannten *Unschärferelation*. Dies bedeutet, dass durch eine schmalere Fensterbreite zwar eine Erhöhung der Ortsinformation erreicht wird, jedoch durch die geringere Anzahl an Datenpunkten die Frequenzauflösung geringer wird. Zusätzlich ist zu beachten, dass die großen Wellenlängen ebenfalls durch die Fensterbreite begrenzt werden.



### 3.4.2.2 Wavelet Analyse

Die Wavelet-Transformation (WT) verwendet wie die Fourier-Transformation ebenfalls orthogonale Basisfunktionen. Diese Basisfunktionen sind jedoch nicht verschobene Cosinusfunktionen, sondern sogenannte *Wavelets*. Die Wavelets sind grundsätzlich beliebige mathematische Funktionen, die jedoch gewisse Eigenschaften (z. B. kompakter Träger, mittelwertfrei) besitzen müssen [4]. Neben dem einfachsten *Haar-Wavelet* (Rechteckfunktion) wurde in der Literatur eine Vielzahl weiterer Wavelets definiert (z. B. Daubechies, Morlet, Gaussian, Mexican hat).

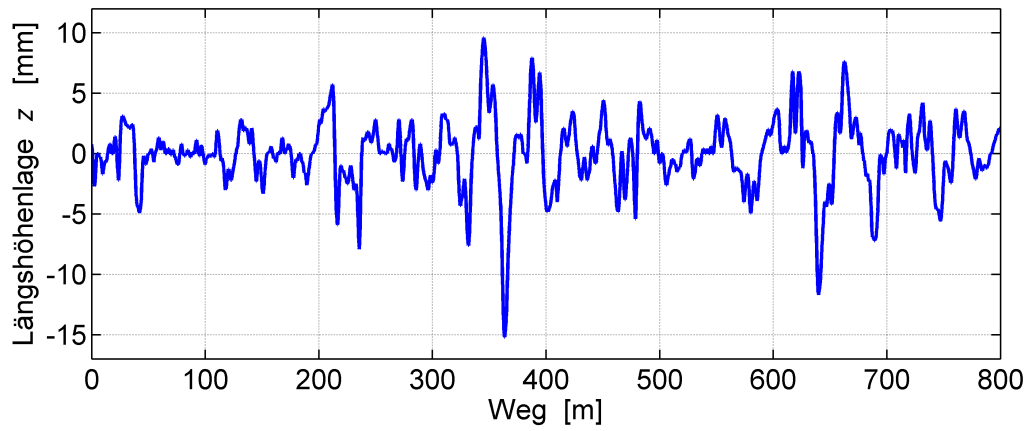
Die Transformation selbst kann als Korrelation des Signals mit gestauchten bzw. gestreckten und verschobenen Wavelets  $\Psi$  angesehen werden und die sich daraus ergebenden Wavelet-Koeffizienten  $K$  können als Korrelationskoeffizienten interpretiert werden. Das Stauchen bzw. Strecken des Wavelets ergibt unterschiedliche Frequenzinformationen, wobei man hier nicht mehr von Frequenzen, sondern von sogenannten *Skalen* (engl. *scales*) spricht. Die örtliche Zuordnung wird durch eine Verschiebung der Wavelets erreicht. Die Berechnung der Wavelet-Koeffizienten ist allgemein definiert mit

$$K(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(t) \Psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right) dt, \quad (3.15)$$

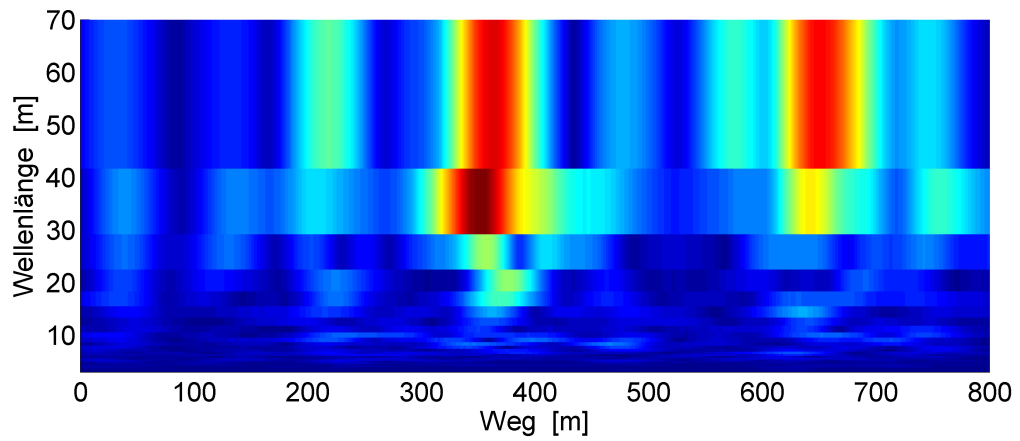
wobei  $a$  ein Skalierungsfaktor und  $\tau$  die örtliche Verschiebung des Wavelets ist.

Der größte Vorteil gegenüber der STFT liegt darin, dass die Fensterbreite (Skalierung der Wavelets) variabel ist. Dies bedeutet, dass für große Wellenlängen große Fenster und für kleine Wellenlängen kleine Fenster angewendet werden können. Daraus ergibt sich ein optimaler Kompromiss zwischen Frequenz- und Ortsauflösung. Der Nachteil der WT ist jedoch, dass sich die Skalen nicht direkt zu einer Frequenz zuordnen lassen. Es können jedoch durch Berechnung der Grundfrequenz des Wavelets sogenannte *Pseudo-Wellenlängen* für die jeweiligen Skalen berechnet werden. Damit wird zwar ein Bezug zur Wellenlängeninformation hergestellt, es ist jedoch zu beachten, dass je nach Form des Basiswavelets jede Skala neben der dominierenden Pseudo-Wellenlänge noch zusätzliche Wellenlängenanteile beinhaltet.

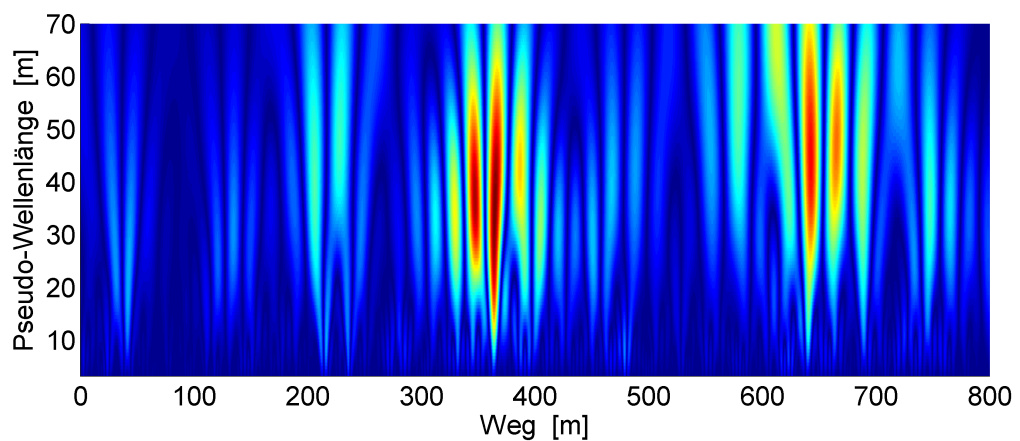
Ein Vergleich der Ergebnisse der WT und der STFT für die Signal-Analyse der Längshöhenlageabweichungen eines 800 m langen Abschnitts ist in Abb. 3.9 dargestellt. Bei der WT wurde für die Berechnung ein Morlet-Wavelet verwendet. Die Fensterbreite bei der STFT wurde mit 100 m gewählt und als Verschiebungsschrittweite wurde die Samplingschrittweite (25 cm) des Signals verwendet. Der Unterschied in der Frequenz- bzw. Ortsauflösung ist hier deutlich erkennbar. Die dominierenden Signalanteile an der Stelle  $s = 640$  m werden mit Hilfe der WT (Abb. 3.9c) wesentlich besser lokalisiert und höher aufgelöst als mit der STFT (Abb. 3.9b).



a. Längshöhenlage  $z$



b. STFT (Short-Time-Fourier-Transformation)



c. WT (Wavelet-Transformation)

**Abbildung 3.9** Analyse der Längshöhenlage  $z$  eines 800 m langen Abschnitts mit STFT und WT

Die WT eignet sich besonders zur Analyse von nicht-stationären Anteilen von Gleislageabweichungen. Es können hiermit spezielle Unstetigkeiten wie z. B. Einzelstörungen, Weichenüberfahrten oder auch hohlliegende Schwellen detektiert werden (siehe [12, 41]). Ein weiteres Anwendungsgebiet liegt, wie z. B. in [39] beschrieben, in der Erkennung von geometrischen Mustern in der Schienenoberfläche. Durch Verwendung geeigneter Wavelets können spezielle Formen von Gleislageabweichungen detektiert bzw. analysiert werden. Je nach Fehlerform können die Wavelets an die Problemstellung angepasst und eingesetzt werden. In [53] wurde die Anwendung der WT zur Synthetisierung von Gleislageabweichungen für die Fahrzeug-Simulation untersucht, wodurch gewisse Nachteile der Synthetisierung auf Basis von PSD-Approximationen umgangen werden können.

Eine Anwendung zur Beurteilung der Qualität von Gleislagen für längere Strecken ist jedoch schwierig, da die Ergebnisse einerseits keiner eindeutigen Frequenz zugeordnet werden können und andererseits vom Wavelet selbst abhängen. Daraus ergibt sich die Problematik, dass die Angabe von Klassengrenzen ebenfalls eine exakte Definition für eine eindeutige Interpretation erfordert und dadurch sehr komplex sein würde.

### 3.4.3 Weitere geometrische Methoden

Im Folgenden werden nun weitere geometrische Methoden vorgestellt, welche auf Basis von bestimmten Eigenschaften von Gleislageabweichungs-Signalen eine Qualitätsbewertung ermöglichen sollen. Hierzu zählen u. a. die Bewertung der Verwindung und auch Methoden zur objektiven Qualitätsbewertung, welche in aktuellen Forschungsarbeiten entwickelt werden.

#### 3.4.3.1 Verwindung

Die Gleisverwindung wird auf Basis der beiden Längshöhenlagen der linken und rechten Schiene ermittelt. Sie ist definiert als algebraische Differenz zwischen zwei Querhöhenfehlern, welche einen festgelegten Abstand (Verwindebasis  $l$ ) besitzen. Die Verwindung wird üblicherweise in mm/m ausgedrückt. Entsprechend der EN 13848-1 ist diese Größe bei der Vermessung von Gleislageabweichungen aufzuzeichnen bzw. aus den Überhöhungsmessungen zu berechnen. Die Auswertung muss in Anlehnung an diese Norm die Maximalwerte und auch die Standardabweichung der Verwindung (üblicherweise über 200 m) beinhalten.

Die Berechnung der Verwindung auf Basis von Überhöhungsmessungen erfolgt mit

$$T_{\delta}(s) = \frac{\delta(s) - \delta(s - l)}{l} \quad \text{in mm/m} , \quad (3.16)$$

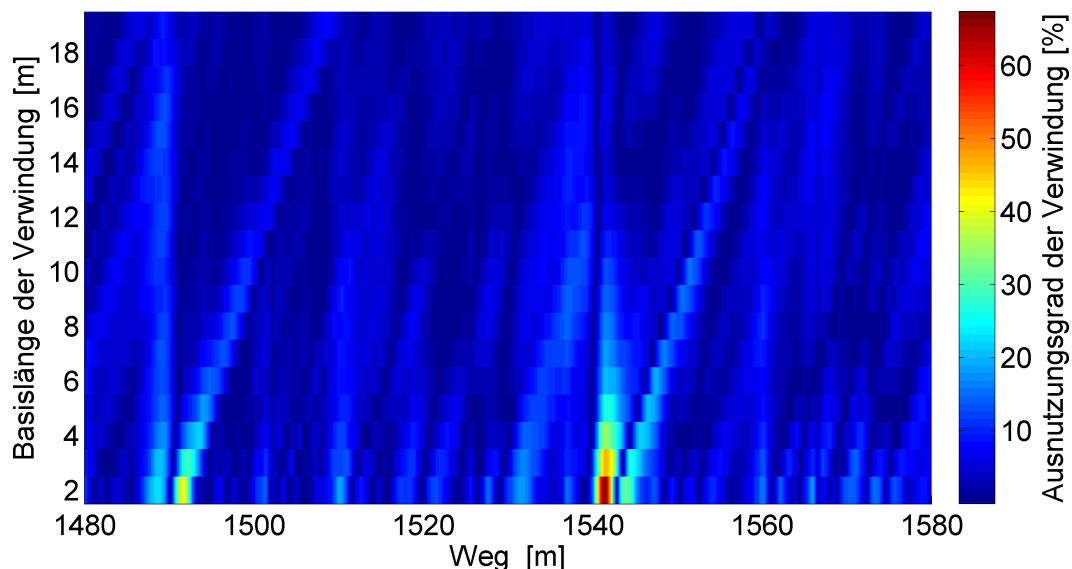
wobei  $s$  die Wegkoordinate ist und der Querhöhenfehler  $\delta$  in mm anzugeben ist.

Bei der Beurteilung der Gleislagequalität bei den fahrtechnischen Zulassungsversuchen (EN 14363) wird die Verwindung nicht herangezogen. Für die Instandhaltung sind jedoch Grenzwerte in der EN 13848-5 (ebenso wie in der HS INS TSI) angegeben. Die Grenzwerte für die Einzelfehler der Verwindung (Null-Spitzenwert) ergeben sich für eine Trassierung mit dem Radius  $R$  und einer maximalen Überhöhung der Schienen im Bogen  $u \leq (R - 100)/2$  (in mm) aus der Funktion der Verwindebasis  $l$  entsprechend [49, 1] mit

$$T_{\text{lim}}(l) = \frac{20}{l} + 3 \text{ in mm/m, } 1,3 \text{ m} \leq l \leq 20 \text{ m,} \quad (3.17)$$

wobei  $T_{\text{lim}}$  der Verwindungsgrenzwert ist und der maximale Verwindungsgrenzwert  $T_{\text{lim,max}}$  für Strecken mit Geschwindigkeiten  $v \leq 200$  km/h bei 7 mm/m und für  $v > 200$  km/h bei 5 mm/m liegt. Der Infrastrukturbetreiber kann im Instandhaltungsplan zwar die Verwindebasis selbst definieren, jedoch muss in jedem Fall die Auswertung für eine Verwindebasis von 3 m durchgeführt werden. Für diese Verwindebasis sind in der EN 13848-5 Grenzwerte für die Aufmerksamkeitsgrenze AL und die Eingriffsgrenze IL angegeben.

Als Beispiel zur Analyse der Verwindung wird in dieser Arbeit die in Abb. 3.10 gezeigte Darstellungsform vorgeschlagen. Es wurde die Verwindung für unterschiedliche Basislängen eines 100 m langen Abschnitts berechnet und die Werte im Verhältnis zu den Verwindungsgrenzwerten für  $v \leq 200$  km/h dargestellt. Es ergibt sich somit ein sogenannter *Ausnutzungsgrad* der Verwindung, auf dessen Basis die jeweiligen Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden können.



**Abbildung 3.10** Verlauf der Verwindung entlang eines 100 m Abschnitts im Verhältnis zum Grenzwerte der jeweiligen Bezugsbasis

### 3.4.3.2 „Track Quality Indices“

Speziell für die Instandhaltung wird seitens der Betreiber versucht, Indices für objektive Beurteilungen der geometrischen Gleislageabweichungen zu finden, um darauf basierend entsprechende Maßnahmen ableiten zu können. Für diese objektive Beurteilung wurden z. B. bei der Federal Railroad Administration (FRA) in den USA für ihre spezifischen Gleislage-Qualitätsklassen Forschungsarbeiten durchgeführt. Hierfür sollen zum einen ein *Objective Track Quality Index* (FRA-TQI) und zum anderen eine Untersuchung zum Einsatz der *Fraktalen Analyse* zur Gleislagebeurteilung kurz erläutert werden.

Der FRA-TQI wird berechnet aus dem Verhältnis der Bogenlänge  $L_S$  des jeweiligen gemessenen Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameters zur Bogenlänge  $L_0$  der Soll-Gleislage mit

$$\text{TQI} = \left( \frac{L_S}{L_0} - 1 \right) * 10^6 . \quad (3.18)$$

Die Bogenlänge  $L_S$  ergibt sich wiederum aus

$$L_S = \sum_{i=1}^N \sqrt{\Delta\zeta_i^2 + \Delta s_i^2} , \quad (3.19)$$

wobei  $\Delta s_i$  die Abtast-Schrittweite und  $\Delta\zeta_i$  die Differenz zweier aufeinanderfolgender Amplituden des jeweiligen Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameters ist. Auf Basis von aus zahlreichen Messungen berechneten Verteilungsparametern (Gamma- und Weibullverteilung) können die TQI-Ergebnisse den FRA Gleislage-Qualitätsklassen zugeordnet und Maßnahmen abgeleitet werden [60, 25].

Zur Erkennung von chaotischen und zufälligen Mustern in geometrischen Gleislageabweichungen und deren zeitlicher Entwicklung wurde der Einsatz der Fraktalen Analyse bei der FRA untersucht [40]. Mit Hilfe der Fraktalen Analyse können drei Basis-Parameter und daraus wiederum drei abgeleitete Parameter berechnet werden, die Aussagen über einzelne Zustände von Gleiskomponenten, sowie deren zeitliche Entwicklung enthalten [9].

Ein Überblick über weitere Indices für Gleislage-Qualitätsbeschreibungen ist in [55] zu finden. Dort wird ebenfalls eine neue Methode zur objektiven Beurteilung von Gleislageabweichungen vorgeschlagen, welche jeweils einen eigenen Index für verschiedene Gleiskomponenten beinhaltet. Dies bedeutet, dass nicht ein Index alleine den Zustand des Gleises beschreibt, sondern es für die Schiene, die Schwelle, die Schienenbefestigung und für den Schotter eigene Indices entsprechend diesen Untersuchungen geben sollte.

Neben den Indices für die jeweiligen Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameter gibt es auch welche, die bestimmte geometrische Größen von mehreren Beschreibungsparametern miteinander kombinieren. Als Beispiele seien hier der Q-Index von *Swedish National Railway* [38] und der J-Index von *Polish Railway* [2] angegeben, welche sich

aus verschiedenen Kombinationen von Standardabweichungen berechnen. Der Q-Index ergibt sich aus

$$Q = 150 - \frac{100}{3} \left( \frac{\sigma_z}{\sigma_{z_{lim}}} + 2 \frac{\sigma_{y\delta g}}{\sigma_{y\delta g_{lim}}} \right), \quad (3.20)$$

wobei  $\sigma_z$  die mittlere Standardabweichung der Höhenlageabweichungen der linken und rechten Schiene und  $\sigma_{y\delta g}$  die mittlere Standardabweichung aus den Abweichungen der Richtungslage, der Spurweite und der gegenseitigen Höhenlage ist. Der J-Index ergibt sich ebenfalls aus der Kombination von

$$J = \frac{\sigma_y + \sigma_g + \sigma_w + 0,5\sigma_z}{3,5}, \quad (3.21)$$

wobei  $\sigma_y$  die Standardabweichung der Richtungslage,  $\sigma_g$  die Standardabweichung der Spurweite und  $\sigma_w$  die Standardabweichung der Verwindung ist.

Die bisher gezeigten Methoden berücksichtigen nur rein geometrische Beurteilungsgrößen für die Bewertung von Gleislageabweichungen. Der Vorteil ist, dass diese Größen einfach und schnell auf Basis der gemessenen Gleislageabweichungen bestimmt werden können. Für eine Beurteilung hinsichtlich der zu erwartenden Fahrzeugreaktionen ist es, wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, jedoch naheliegend, dass die Fahrzeugdynamik in der Methode berücksichtigt werden sollte.

### 3.5 Fahrzeug-dynamische Bewertungsmethoden

Das Ziel von Bewertungsverfahren, welche die Fahrzeugdynamik berücksichtigen, ist die Abschätzung der Interaktion zwischen verschiedenen Fahrzeugen mit den zu beurteilenden Gleislageabweichungen. Die Ideallösung hierfür wären Fahrzeug-Reaktionsmessungen mit der kompletten Fahrzeug-Flotte unter realen Bedingungen des jeweiligen Streckenabschnittes. Auf Grundlage dieser gemessenen Basis-Größen (z. B. Rad/Schiene-Kontaktkräfte) und den daraus abgeleiteten Größen (z. B. Y/Q-Kraft als Entgleisungskriterium) könnten spezifische Maßnahmen bei der Instandhaltung gesetzt werden. In der Praxis würde das bedeuten, dass alle Fahrzeuge mit Messradsätzen und weiteren Sensoren im laufenden Betrieb bestückt sein müssten und dies daher aus Kostengründen nicht durchführbar ist.

Eine Vereinfachung dieser Idealvorstellung ist die synchrone Messung von Gleislageabweichungen und Fahrzeugreaktionen mit einem Messfahrzeug. Solche Messungen werden zwar durchgeführt, sind jedoch durch die Notwendigkeit von Messradsätzen an den Gleismessfahrzeugen sehr kostenintensiv. Um dennoch die Fahrzeugreaktionen auf Grund der aktuellen Gleislageabweichungen zu erfassen, können die Messungen getrennt durchgeführt und nachträglich synchronisiert werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass die Gleismessfahrzeuge die Achslagerbeschleunigungen an Stelle der Rad/Schiene-Kräfte messen. Auf Basis der zuletzt genannten Variante werden z. B. im

Zuge von Forschungsarbeiten in [5] diese Beschleunigungen mit verschiedenen Methoden wie PSD oder Wavelet-Transformation analysiert, um daraus wiederum auf die Eigenschaften der Gleislage rückschließen zu können.

Die Abschätzung der durch Gleislageabweichungen verursachten dynamischen Fahrzeugreaktionen kann jedoch auch mit Hilfe von nichtlinearen MKS-Simulationen kostengünstig durchgeführt werden (siehe Abschnitt 2.5). Ein weiterer Vorteil ist hierbei die Möglichkeit zur Untersuchung verschiedener Einflussparameter, um daraus die effizientesten Maßnahmen (z. B. Geschwindigkeitsreduktion oder Korrektur der Gleislageabweichungen) ableiten zu können. Der große Nachteil ist jedoch, dass den Betreibern meist nur wenige validierte Fahrzeugmodelle mit ausreichender Modelltiefe zur Verfügung stehen. Die Simulationsdauer steigt bei der Simulation zahlreicher Szenarien mit unterschiedlichen Parametern wie Geschwindigkeit, Beladung usw. stark an. Zusätzlich gibt es zahlreiche unbekannte Parameter wie z. B. in Bezug auf das Oberbaummodell oder den Rad/Schiene-Kontakt (Rad/Schiene-Profile, Reibungskoeffizienten, ...).

Eine effiziente Lösung zur Qualitätsbewertung von Gleislageabweichungen benötigt daher einen möglichst einfachen und schnellen algebraischen Algorithmus. Das Ergebnis sollen Größen zur Beurteilung sein, welche eine gute Korrelation zur Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion aufweisen. Im Folgenden sollen ausgewählte Methoden vorgestellt werden, die diese Forderung (zumindest zum Teil) berücksichtigen.

### 3.5.1 MDZ-a Ziffer

Bei den *Österreichischen Bundesbahnen* (ÖBB) wird zur Bestimmung der aktuellen Qualität der Gleise u. a. die MDZ-a Ziffer herangezogen, welche auf dem sogenannten *ADA-II Verfahren* beruht [20, 10]. Der zentrale Punkt dieses Verfahrens ist die Analyse der Bewegung des Wagenkastenschwerpunkts innerhalb der Analyselänge  $L_A$ . Das Modell des Fahrzeugs ist ein stark vereinfachtes starres Modell, wobei die Höhe des Wagenkastenschwerpunkts mit 1,5 m angenommen wird. In Abb. 3.11 ist der Schwerpunktverlauf (engl. *COG* – *center of gravity*) für zwei aufeinanderfolgende Messpunkte und somit für zwei Wagenkastenpositionen (WK-Pos) dargestellt. Dieser ändert sich in horizontaler Richtung um den Abstand  $\Delta y'$  und in vertikaler Richtung um  $\Delta z'$ .

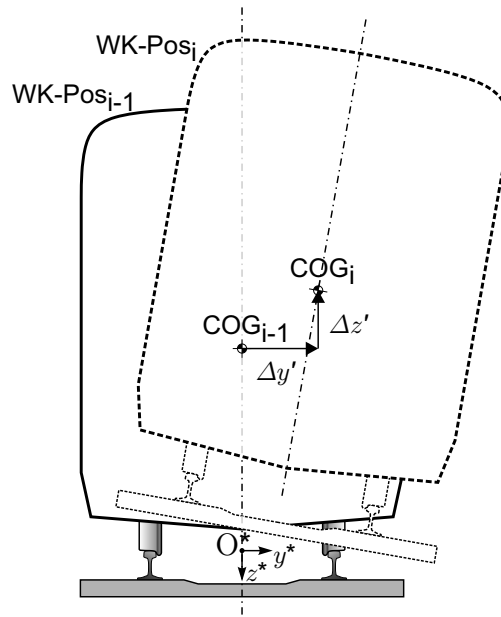
Die empirische MDZ-a Ziffer berechnet sich auf Basis dieser Überlegungen mit

$$\text{MDZ}_a = c \cdot \frac{1}{L_A} \cdot v^{0,65} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{L_A}{\Delta s}} \sqrt{(\Delta y')^2 + (\Delta z')^2}, \quad (3.22)$$

$$\Delta y' = \Delta y, \quad (3.23)$$

$$\Delta z' = \Delta z + \Delta d, \quad (3.24)$$

wobei  $\Delta y$  der Richtungsfehler,  $\Delta z$  der Längshöhenfehler,  $\Delta d$  der Querhöhenfehler (in m),  $L_A$  die Analyselänge,  $\Delta s$  die Abtastschrittweite zwischen zwei Messpunkten,  $v$  die zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit und  $c$  ein Korrekturfaktor ist. Die Minderung



**Abbildung 3.11** Bewegungsverlauf des Wagenkastenschwerpunkts (COG) von zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten zur Berechnung der Qualität der Gleise mittels MDZ-a Ziffer

der Wirkung der Federn und Dämpfer in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wird durch den Exponenten von 0,65 berücksichtigt.

Mit Hilfe dieses Beurteilungsverfahrens ist es somit möglich, die unterschiedlichen Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen miteinander zu kombinieren. Die MDZ-a Ziffer wird zur Beobachtung von zeitlichen Gleislageveränderungen verwendet, um daraus wiederum entsprechende Maßnahmen für die Instandhaltungsplanung ableiten zu können.

### 3.5.2 WGB-Methode

Die *Deutsche Bahn* (DB) entwickelte ein patentiertes Verfahren zur *Wirkungsbezogenen Gleislagebeurteilung* (WGB) [59, 8]. Dabei werden auf Basis von geometrischen Gleislageabweichungen verschiedene charakteristische Parameter von Einzelfehlern abgeleitet und daraus mittels einer Bewertungsfunktion die zu erwartenden Maximalwerte verschiedener Fahrzeugreaktionen berechnet.

Die Eingangsgrößen des Verfahrens sind die Abweichungen der Längshöhenlage  $z$ , der Richtungslage  $y$  und der gegenseitigen Höhenlage  $gh$ , sowie verschiedene Einflussparameter wie Fahrzeugtyp, Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und die Trassierung (Krümmungsradius  $kr$ ). Die geometrischen Gleislageabweichungen werden in sogenannte *Einzelereignisse* unterteilt und daraus die charakteristischen Größen wie Extremwert



(Ew) und Steigung (St) berechnet. Die für die Beurteilung herangezogenen Ausgangsgrößen sind prognostizierte Maximalwerte von Fahrzeugreaktionsgrößen  $V_j$  mit

- $V_1 = \sum Y$  ... Summe der horizontalen Radkräfte (Systembeanspruchung),
- $V_2 = Y/Q$  ... Verhältnis der horizontalen/vertikalen Radkraft (Sicherheit),
- $V_3 = Q_{\min}$  ... minimale Radaufstandskraft (Sicherheit),
- $V_4 = Q_{\max}$  ... maximale Radaufstandskraft (Systembeanspruchung),
- $V_5 = \ddot{y}^*$  ... horizontale Wagenkastenbeschleunigung (Fahrkomfort),
- $V_6 = \ddot{z}^*$  ... vertikale Wagenkastenbeschleunigung (Fahrkomfort).

Die Berechnung dieser Größen wird mit folgender Bewertungsfunktion durchgeführt

$$V_j = a_j + (b_j \cdot y_{\text{St}} + c_j \cdot y_{\text{Ew}} + d_j \cdot z_{\text{St}} + e_j \cdot z_{\text{Ew}} + f_j \cdot gh_{\text{St}} + g_j \cdot gh_{\text{Ew}}) \cdot v + h_j \cdot v^2 \cdot kr + i_j \cdot v + j_j \cdot kr, \quad (3.25)$$

wobei die Koeffizienten  $a_j$  bis  $j_j$  mit Hilfe verschiedener Simulationsrechnungen für die jeweiligen Fahrzeugtypen mittels Regressionsanalyse vorab berechnet wurden und bei der Anwendung der Methode zur Verfügung stehen.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Einzelfehler der Gleislageabweichungen *räumlich kombiniert* betrachtet werden können. Dadurch ergeben sich verbesserte Schätzungen von Fahrzeugreaktionen zur Ableitung von Instandhaltungsmaßnahmen. Darüber hinaus ist es möglich, die Gleislageabweichungen auf Grund von geschätzten Fahrzeugreaktionen miteinander zu vergleichen, um daraus wiederum eine Basis für die gegenseitige Anerkennung bei der fahrtechnischen Prüfung auf europäischer Ebene zu schaffen.

### 3.5.3 VRA-Methode

In [7] wird die sogenannte *VRA-Methode* (*vehicle response analysis*) vorgeschlagen. Ähnlich wie bei der WGB-Methode werden auch hier verschiedene Fahrzeugreaktionsgrößen berechnet, welche auf Grund der zu bewertenden Gleislageabweichungen zu erwarten sind. Die Eingangsgrößen für diese Methode bilden die vier Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen Höhenlage  $z$ , Richtungslage  $y$ , Querhöhe  $\delta$  und Spurweite  $g$ . Die berechneten Ausgangsgrößen sind Rad/Schiene-Kräfte und Wagenkastenbeschleunigungen für verschiedene Fahrzeugtypen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Im Gegensatz zur WGB-Methode erfolgt die Beschreibung der Fahrzeugmodelle nicht mit Regressionskoeffizienten, sondern mittels Übertragungsfunktionen. Hierfür werden für drei verschiedene einfache lineare Fahrzeugmodelle (Lokomotive, Reisezugwagen und Güterwagen) bei fünf unterschiedlichen Geschwindigkeiten (40–160 mph) die Übertragungsfunktionen für diese 15 Szenarien zur Verfügung gestellt. Aus der Kombination von vier Eingangsgrößen (Gleislage-Beschreibungsparameter)

und vier Ausgangsgrößen (zwei Rad/Schiene-Kräfte  $Q$  und  $Y$ , sowie zwei Beschleunigungsgrößen im Wagenkasten  $a_y$  und  $a_z$ ) ergeben sich insgesamt 240 Übertragungsfunktionen.

Der Algorithmus ist so realisiert, dass er direkt online am Messwagen ausgeführt werden kann. Die Gleislageabweichungen werden für jeweils 600 m Abschnitte mittels DFT in den Frequenzbereich transformiert und dort mit den jeweiligen Übertragungsfunktionen multipliziert. Für jede Ausgangsgröße werden die Anteile aller Eingangsgrößen addiert und mit der inversen DFT in den Zeitbereich rücktransformiert. Anschließend werden für 200 m Abschnitte die Standardabweichungen der Größen berechnet und mit den NS-spezifischen level-1 und level-2 Grenzwerten verglichen und daraus Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet.

Die Untersuchungsergebnisse dieser Methode haben entsprechend [7] gezeigt, dass noch eine große Streuung zwischen den gemessenen und berechneten Standardabweichungen der Größen besteht, jedoch eine deutliche Verbesserung für den Instandhaltungsprozess durch eine Weiterentwicklung der Methode erwartet wird.

Ein ähnlicher Ansatz wurde bei der DB im sogenannten *SR-Verfahren* (*Störungs- und Reaktionsverfahren*) angewendet [27]. Es werden im Messwagen die Fahrzeugreaktionen für lineare Fahrzeugmodelle berechnet und daraus eine mögliche zukünftige zeitliche Entwicklung der Gleislageabweichungen abgeschätzt. Die Ergebnisse und Vergleiche mit gemessenen Fahrzeugreaktionen zeigten hier wie die VRA-Methode speziell in lateraler Richtung deutliche Abweichungen.

#### 3.5.4 Weitere Methoden zur Fahrzeug/Fahrweg-Interaktionsvorhersage

Im Rahmen der Dissertation [22] wurde die Eignung eines sogenannten *Black-Box* Modells zur Berechnung von Fahrzeugreaktionen untersucht. Hierfür wurde ein neuronales Netz zur Beschreibung eines Fahrzeugs verwendet. Die Problematik beim Lernprozess bestand jedoch darin, dass die zur Verfügung stehenden Gleislagendaten mit den dazugehörigen Fahrzeugreaktionsdaten nicht synchron waren und daher der Lernprozess des neuronalen Netzes erschwert wurde. Für den Einsatz dieser Methode bei der Instandhaltung müssten zahlreiche Fahrzeuge zur Parametrierung zur Verfügung stehen und sowohl die Gleislageabweichungen als auch die synchronen Fahrzeugreaktionen für unterschiedliche Geschwindigkeiten und sehr lange Strecken aufgenommen werden, wobei dieser Aufwand nicht praktikabel erscheint. Die Verwendung von MKS-Simulationen zur Datengenerierung von Fahrzeugreaktionen mit gemessenen Gleislageabweichungen könnte diesen Aufwand jedoch deutlich reduzieren.

In Forschungsarbeiten an der KTH Stockholm wurden Untersuchungen von Fahrzeugreaktionsanalysen mit einem dynamischen Vertikal-Modell durchgeführt [3, 26]. Dieses Modell besteht aus einem Einmassenschwinger als Fahrzeugmodell, einem linearisierten Rad/Schiene-Kontakt und einem 2-stufigen Oberbaummodell. Darauf basierend wurden

die durch Abweichungen der Längshöhenlage verursachten vertikalen Rad/Schiene-Kräfte abgeschätzt. Die Berechnung kann sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich mit Hilfe von abgeleiteten digitalen Filtern durchgeführt werden. Der Fokus der Untersuchungen lag speziell auf kleinen Wellenlängen zur Bewertung von Rad/Schiene-Rauigkeiten. Die Ergebnisse zeigen, dass speziell die kurzen Wellenlängen der Störungen zwischen 0,5 und 2 m große Amplituden in der Fahrzeugreaktion hervorrufen können und daher die Messsysteme von Regelinspektionen diese auch erfassen sollten.

In [29] wird im Zuge von Forschungsarbeiten eine Methodik vorgestellt, bei welcher der Zusammenhang von Maximalwerten von zwei kombinierten Gleislageabweichungsparametern und den sich daraus ergebenden Fahrzeugreaktionen in einer sogenannten *track geometry interaction map* (TGIM) dargestellt wird. Zur Erstellung dieser TGIM wurden MKS-Simulationen mit verschiedenen Fahrzeugmodellen auf synthetischen Gleislageabweichungen (Längshöhenlage  $z$  und Richtungslage  $y$ ) durchgeführt. Die Maximalwerte dieser beiden Gleislageabweichungen wurden in Form einer Punktwolke gegeneinander aufgetragen und die Kombinationen von *gleichen* Fahrzeugreaktionen als ISO-Kurven eingezeichnet. Aus diesen TGIM wurden wiederum Parameter für Näherungsfunktionen der ISO-Kurven abgeleitet und mit den Grenzwerten aktueller Bewertungsmethoden verglichen. In weiteren Forschungsarbeiten wird ähnlich der WGB-Methode versucht, mehrere Gleislageabweichungsparameter zu kombinieren und daraus eine *mehrdimensionale* TGIM abzuleiten.

# 4 Neue Methode zur Gleislagebewertung

## 4.1 Anforderungen an eine neue Bewertungsmethode

Die Überlegungen und Untersuchungen in Abschnitt 3.3 haben gezeigt, dass die derzeitigen Europäischen Normen bereits die grundsätzliche Forderung nach einem starken Zusammenhang zwischen den Beurteilungsgrößen der geometrischen Gleislageabweichungen und den daraus resultierenden Fahrzeugreaktionen nicht erfüllen. Eine neue Bewertungsmethode soll daher diesen Anforderungen unbedingt gerecht werden. Für eine internationale Akzeptanz der Methode bei Fahrzeughersteller und Betreiber, sowie dem Ziel, dass diese einen wichtigen Beitrag zur Harmonisierung des Europäischen Bahnsystems leisten soll, sollen auch weitere im Folgenden angeführten Anforderungen erfüllt werden.

Eine Methode zur Bewertung von geometrischen Gleislageabweichungen soll entsprechend diesen Anforderungen

- kurze Berechnungszeiten ermöglichen;
- die einzelnen Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen kombiniert bewerten,
- jedoch die Möglichkeit bieten, Rückschlüsse über den Einfluss der einzelnen Beschreibungsparameter bei erhöhten Fahrzeugreaktionen ziehen zu können;
- neutral gegenüber dem Fahrzeugkollektiv sein,
- jedoch die Möglichkeit bieten, Maßnahmen (wie z. B. Geschwindigkeitsreduktion oder spezifische Sperrung von Fahrzeugklassen) ableiten zu können;
- die geometrischen Gleislageabweichungen unabhängig von den verschiedensten realen Bedingungen (wie z. B. Oberbaueigenschaften, Rad/Schiene-Profile, ...) bewerten,
- jedoch die Trassierung als Einflussparameter berücksichtigen; sowie
- Klassengrenzen der Beurteilungsgrößen ermöglichen, die einen direkten Zusammenhang mit den zulässigen Grenzen von Fahrzeugreaktionsgrößen aufweisen.

Aus der Analyse der in Abschnitt 3.4 und Abschnitt 3.5 gezeigten Methoden lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass diese die genannten Anforderungen nur teilweise erfüllen können. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, diese Anforderungen mit der neuen Methode weitgehend zu erfüllen.

## 4.2 Grundlage der neuen Bewertungsmethode

Als Basis für die in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsmethode wurde die in Abschnitt 3.5.3 vorgestellte *Vehicle Response Analysis* (VRA) Methode ausgewählt. Auf Grund von theoretischen Überlegungen scheint diese Methode einerseits bereits wichtige Anforderungen zu erfüllen und andererseits ein hohes Potenzial für eine Weiterentwicklung zu besitzen. Bei der eingehenden Analyse von [7] ergaben sich mehrere offene Fragestellungen und Anforderungen, woraus die Ziele für eine Weiterentwicklung abgeleitet wurden.

Es stellt sich bei der VRA-Methode die zentrale Frage, wie die Übertragungsfunktionen berechnet wurden. Auf Basis welcher Fahrzeugtypen wurden die linearen Koeffizienten berechnet bzw. wie wurde der Referenzzustand der Linearisierung von möglichen nichtlinearen Fahrzeugmodellen gewählt? Wie wurden die Übertragungsfunktionen für eine Spurweitenänderung als Eingangsgröße ermittelt? Eine dynamische Änderung der Spurweite würde eine dynamische Änderung der geometrischen Rad/Schiene-Kontaktverhältnisse mit sich ziehen, sodass sich daraus völlig andere Koeffizienten für die Linearisierung des Rad/Schiene-Kontakts ergeben würden. Darüber hinaus fehlt die Angabe der Fensterfunktion, welche, wie in Abschnitt 3.4.2.1 beschrieben, für die STFT benötigt wird und erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse, speziell bei der Berechnung der Standardabweichung, verursachen kann. Eine weitere wichtige Frage ist, ob auch die Phaseninformationen der Übertragungsfunktionen in der Methodik verwendet wurden. Entsprechend der Literatur wurden nur Standardabweichungen berechnet, welche diese Phaseninformationen nicht benötigen. Für eine Berechnung der örtlichen Maximalwerte ist diese Information jedoch unbedingt erforderlich. Da die berechneten Ergebnisse der VRA-Methode nicht ausreichend mit den Messungen übereinstimmten, wurde zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen ein auf Messungen basierender Algorithmus vorgeschlagen. Dieser beschriebene Algorithmus hätte auf Basis von theoretischen Überlegungen jedoch wiederum den Nachteil, dass daraus keine Phaseninformationen ermittelt werden könnten.

Auf Grund dieser offenen Fragestellungen kann die Annahme getroffen werden, dass die VRA-Methode folgende Anforderungen ohne eine Weiterentwicklung nicht erfüllt. Die Methode ist Fahrzeug-Typ-abhängig und es können nur Aussagen für einen speziellen repräsentativen Typ einer Fahrzeug-Klasse getroffen werden. Es gibt auf Grund der fehlenden Phaseninformation keine Möglichkeit, Rückschlüsse auf einzelne örtliche Ereignisse bzw. auf den Einfluss der jeweiligen Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameter zu ziehen. Die Trassierung wurde in der Methode nicht berücksichtigt. Die Grenzwerte zur Klassifizierung der Gleislagequalität basieren auf Standardabweichungen, wobei hierfür jedoch für die Fahrzeugreaktionskräfte in der EN 14363 keine Grenzwerte angegeben werden.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen ergaben sich bei der Weiterentwicklung folgende Ziele und zwar, dass die neue Methode

- bei der Berechnung der Übertragungsfunktionen die Referenzzustände von nicht-linearen Fahrzeugen berücksichtigt, welche sich aus den Anregungen mit realen Gleislageabweichungen ergeben;
- bei der Berechnung der Übertragungsfunktionen die Phaseninformation berücksichtigt, sodass die Ausgangsgrößen in den Zeitbereich rücktransformiert und daraus die örtlichen Maximalwerte und auch die Zuordnung der Sensitivität der Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameter bei hohen Fahrzeug/Fahrweg-Interaktionen bestimmt werden können;
- eine Berechnung von Übertragungsfunktionen für Fahrzeugklassen zulässt, sodass Neutralität gegenüber dem Fahrzeug-Kollektiv gewährleistet werden kann;
- die Trassierung berücksichtigt;
- eine Möglichkeit zur Beurteilung der Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion bietet, die die Grenzwerte der EN 14363 als Beurteilungsbasis berücksichtigt.

Bei der Weiterentwicklung war es auch notwendig, den Einfluss verschiedener Parameter zu untersuchen, um so die optimale Anzahl von Übertragungsfunktionen hinsichtlich Berechnungsaufwand und Fehlerabweichung zu ermitteln. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode wird *Track Geometry Assessment* (TGA) Methode genannt und im Folgenden detailliert beschrieben und analysiert.

### 4.3 Überblick über die entwickelte „Track Geometry Assessment“ (TGA) Methode

Die entwickelte TGA-Methode bewertet die Gleislageabweichungen basierend auf einer Schätzung der Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion. Das dynamische Verhalten zwischen den Gleislageabweichungen und den verschiedenen Fahrzeugen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten wird mit Hilfe von Übertragungsfunktionen berücksichtigt. Die Berechnung dieser Übertragungsfunktionen stellt einen wesentlichen Kern dieser Arbeit dar. Die geschätzten Fahrzeugreaktionen werden nach der EN 14363 ausgewertet und daraus ein sogenannter *Ausnutzungsgrad* berechnet, welcher als Maß für die Qualität der geometrischen Gleislageabweichungen herangezogen werden kann.

In Abb. 4.1 ist ein Überblick über die Methode dargestellt. Die Methode besteht aus zwei Phasen, einer sogenannten *Vorbereitungsphase* und einer *Anwendungsphase*. Die Vorbereitungsphase dient zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen, welche der Anwendungsphase zur Verfügung gestellt werden. Die eigentliche Beurteilung der Gleislageabweichungen findet in der Anwendungsphase statt, in welcher zuerst die Fahrzeugreaktionen geschätzt und anschließend bewertet werden.

In der Vorbereitungsphase werden für jeden Beschreibungsparameter von gemessenen Gleislageabweichungen die dazugehörigen Fahrzeugreaktionen (*V . . . vehicle response*) mit Hilfe von MKS-Simulationen mit nichtlinearen Fahrzeugmodellen berechnet. Als

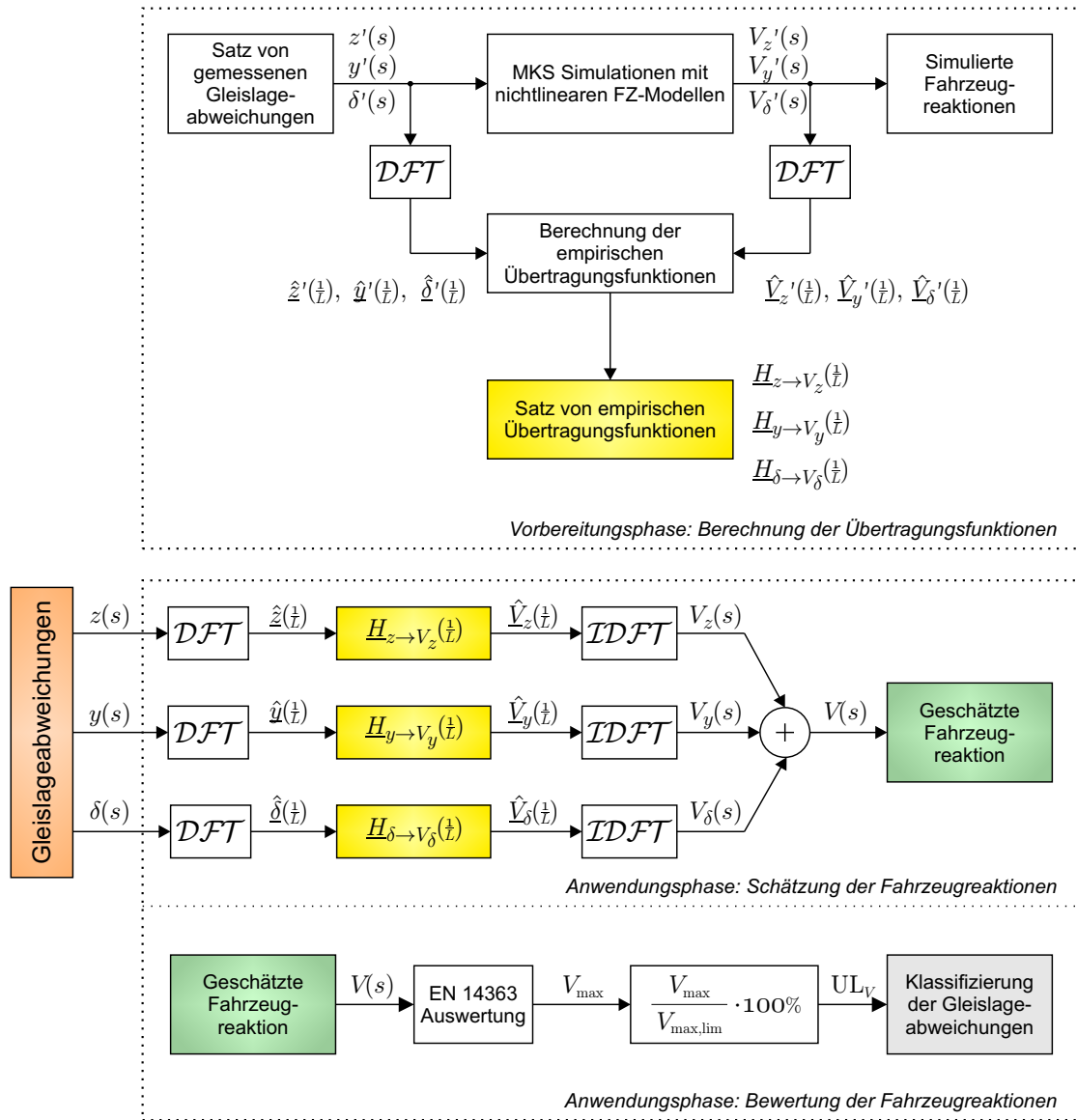


Abbildung 4.1 Überblick über die entwickelte TGA-Methode

Eingangsgröße wird für jedes Simulations-Szenario nur eine einzelne Störgröße (Gleislagebeschreibungsparameter  $z'(s)$ ,  $y'(s)$  oder  $\delta'(s)$ ) aufgebracht. Als Ausgangsgröße ergibt sich somit jeweils für die horizontale und vertikale Richtung eine berechnete Fahrzeugreaktionsgröße ( $V'_z(s)$ ,  $V'_y(s)$  bzw.  $V'_\delta(s)$ ). Aus den beiden, mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation (DFT) berechneten, komplexen Frequenzspektren der Ein- und Ausgangsgrößen können über eine Systemidentifikation die sogenannten *empirischen Übertragungsfunktionen* bestimmt werden. Als Ergebnis dieser Berechnungen mit verschiedenen Fahrzeugen und Simulations-Szenarien steht der Anwendungsphase ein Satz von komplexen empirischen Übertragungsfunktionen ( $H_{z \rightarrow V_z}$ ,  $H_{y \rightarrow V_y}$  und  $H_{\delta \rightarrow V_\delta}$ ) zur Verfügung. Die Details für diesen Teil der Methode werden in Abschnitt 4.6 erläu-

tert und die Sensitivität der empirischen Übertragungsfunktionen in Abschnitt 4.7 für verschiedene Einflüsse analysiert.

Die Schätzung der durch die zu bewertenden Gleislageabweichungen hervorgerufenen Fahrzeugreaktionen findet im ersten Teil der Anwendungsphase statt. Hierfür werden die Gleislageabweichungen mittels DFT in den Frequenzbereich transformiert, mit den dazugehörigen empirischen Übertragungsfunktionen gewichtet und mittels inverser diskreter Fouriertransformation (IDFT) wiederum in den Wegbereich zurücktransformiert. Die Anteile der Fahrzeugreaktionen werden nun im Wegbereich superponiert und ergeben die Fahrzeugantwort  $V(s)$  als Reaktion auf die Kombination aller Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameter. Als repräsentative Fahrzeugreaktionsgrößen  $V$  werden für die Vertikaldynamik die Radaufstandskraft  $Q$  und für die Lateraldynamik die Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  herangezogen. Dieser erste Teil der Anwendungsphase wird in Abschnitt 4.8 detailliert vorgestellt.

Die eigentliche Bewertung der Gleislageabweichungen findet im zweiten Teil der Anwendungsphase statt. Die im ersten Teil geschätzten Fahrzeugreaktionen im Wegbereich werden entsprechend der EN 14363 ausgewertet. Für die jeweiligen Auswertungsabschnitte werden die Maximalwerte der Fahrzeugreaktionen bestimmt und im Verhältnis zu den in der EN 14363 definierten Grenzwerten gesetzt. Dieses Verhältnis entspricht dem sogenannten *Ausnutzungsgrad* (*UL . . . utilization level*) der maßgebenden Größen der Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion. Für die Bewertung und Klassifizierung der Gleislageabweichungen kann nun dieser Ausnutzungsgrad herangezogen werden. In Abschnitt 4.9 wird der zweite Teil der Anwendungsphase im Detail dargestellt.

Der Algorithmus der Methode wurde sowohl für die Vorbereitungsphase als auch für die Anwendungsphase mit Hilfe der Software Matlab umgesetzt [43]. Diese Software wurde auch für die Auswertung und Analyse der Ergebnisse verwendet. Es wurden auch die aktuellen Bewertungsmethoden aus den Europäischen Normen in Matlab realisiert, um so einen direkten Vergleich durchführen zu können.

## 4.4 MKS-Fahrzeugmodelle für die Entwicklung der Methode

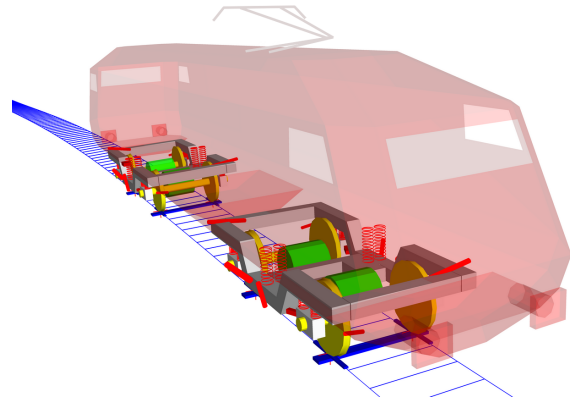
Für die Entwicklung der Methode wurden von Siemens AG Österreich zwei Fahrzeug-Modelle für die MKS-Umgebung SIMPACK zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 4.2). Das erste Modell entspricht einem Reisezugwagen mit der Drehgestellbezeichnung *SF400RJ* des von den Österreichischen Bundesbahnen betriebenen Hochgeschwindigkeitszuges *ÖBB railjet*. Das zweite Modell ist eine Elektrolokomotive der Baureihe *Siemens ES64U4*, welche in Österreich als *Reihe 1216 (Taurus III)* geführt wird. Die wichtigsten Eckdaten sind in der Tab. 4.1 aufgelistet.

Beide Modelle besitzen eine, für die Entwicklung der Methode, ausreichend hohe Modelltiefe. Diese Modelltiefe wird u. a. durch Abbildung von geometrischen Nichtlinearitäten wie z. B. Anschläge und auch durch Abbildung von funktionalen Nichtlinearitäten





a. Reisezugwagen mit SF400RJ Drehgestell



b. Lokomotive der Reihe 1216

**Abbildung 4.2** MKS-Modelle für die Entwicklung der TGA-Methode**Tabelle 4.1** Eckdaten der verwendeten MKS-Fahrzeugmodelle

	Reisezugwagen	Lokomotive
Kurzbezeichnung (in dieser Arbeit)	RZW <sub>SF400RJ</sub>	LOK <sub>1216</sub>
Länge x Breite x Höhe [m]	26,5 x 2,8 x 4	19,6 x 2,8 x 4
Drehzapfenabstand [m]	19	9,9
Achsstand je Fahrwerk [m]	2,5	3
Raddurchmesser (neu) [mm]	920	1150
Sekundärfederung	Luftfeder	Flexicoilfeder
Achsen je Fahrwerk	2	2
Fahrwerke je Wagen	2	2
max. Einsatzgeschwindigkeit [km/h]	230	230
max. Radsatzlast [t]	17	21,8

wie z. B. nichtlineare Kennlinien erreicht. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass für die Ergebnisse der Methode die hohe Modelltiefe von großer Bedeutung ist, da nur so der Referenzzustand des Systems bei Gleislageabweichungen optimal berücksichtigt werden kann.

Neben der hohen Fahrzeug-Modelltiefe spielt auch der Rad/Schiene-Kontakt eine wesentliche Rolle. Die in den Modellen verwendete Rad/Schiene-Profilpaarung ist vom Typ S1002/UIC60 und wird, wie auch das Rad/Schiene-Kontaktelement, von SIMPACK zur Verfügung gestellt. Der Oberbau wurde, sofern nicht anders angegeben, bei der Methodenentwicklung als starr angenommen, da die Gleislageabweichungen im belasteten Gleis gemessen worden waren. Dies wurde in der Simulation, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, dementsprechend berücksichtigt.

## 4.5 Überlegungen zur Berechnung der Übertragungsfunktionen

Für eine einfache Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Ausgangsgröße (Fahrzeugreaktion) und Eingangsgröße (Gleislageabweichungen) eines linearen und zeitinvarianten (LZI) Fahrzeug/Fahrweg-Systems können sogenannte *Übertragungsfunktionen* herangezogen werden. Auf Grund der mit hoher Modelltiefe vorliegenden MKS-Modelle ergeben sich im Allgemeinen jedoch nichtlineare Systemgleichungen. In den folgenden Abschnitten soll daher die Überführung der nichtlinearen Systemgleichungen (Deskriptorform) in ein LZI-System (Zustandsform) schematisch dargestellt werden, wobei speziell die Linearisierung der geometrischen Rad/Schiene-Profilfunktionen hervorgehoben wird.

### 4.5.1 Nichtlineare Systemgleichungen

Allgemeine Mehrkörpersysteme können nach [56] vollständig beschrieben werden mit einem gekoppelten Differentialgleichungssystem der Form

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}_{\dot{\mathbf{p}}}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, t), \quad (4.1)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, t)\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{f}_{\mathbf{k}}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, t) = \mathbf{f}_{\mathbf{q}}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{w}, t), \quad (4.2)$$

$$\dot{\mathbf{w}} = \mathbf{f}_{\dot{\mathbf{w}}}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{w}, t), \quad (4.3)$$

mit

$\mathbf{p}$  ... Lagevektor (dim.  $f \times 1$ ),

$\mathbf{v}$  ... Geschwindigkeitsvektor (dim.  $g \times 1$ ),

$\mathbf{w}$  ... Vektor der Lageintegrale der Kraftgrößen (dim.  $h \times 1$ ),

$\mathbf{M}$  ... Massenmatrix (dim.  $g \times g$ ),

$\mathbf{f}_{\dot{\mathbf{p}}}$  ... Vektorfunktion der nichtholonomen Bindungen (dim.  $f \times 1$ ),

$\mathbf{f}_{\mathbf{k}}$  ... Vektorfunktion der verallgemeinerten Kreiselkräfte (dim.  $g \times 1$ ),

$\mathbf{f}_{\mathbf{q}}$  ... Vektorfunktion der verallgemeinerten eingepprägten Kräfte (dim.  $g \times 1$ ),

$\mathbf{f}_{\dot{\mathbf{w}}}$  ... Vektorfunktion der proportional-integralen PI-Kräfte (dim.  $h \times 1$ ).

Für ein System von  $k$  starren Körpern und  $q$  Bindungen ergeben sich  $f = 6p - q$  Freiheitsgrade der Lage eines holonomen Systems. Durch  $r$  nichtholonome Bindungen reduziert sich das System auf die Zahl  $g = f - r$  der Freiheitsgrade der Geschwindigkeit. Die  $h$  proportional-integralen PI-Kräfte werden durch die Lage und Lageintegrale des Systems bestimmt. Ein Beispiel hierfür im Schienenfahrzeugbereich sind Sekundärdämpfer, welche bei der physikalischen Modellbildung mit einem Maxwell-Element abgebildet werden.

Die nichtlinearen Systemgleichungen in Deskriptorform lassen sich auch im Zustandsraum darstellen. Dazu wird der sogenannte Zustandsvektor  $\mathbf{x}(t)$  eingeführt, welcher

die  $f$  Lagegrößen, die  $g$  Geschwindigkeitsgrößen und die  $h$  Kraftgrößen zusammenfasst zu

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(t) \\ \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{w}(t) \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

woraus sich die Dimension  $n \times 1$  des Zustandsvektors ergibt mit  $n = f + g + h$ . Die Stör- und Stellgrößen des Systems werden als Eingangsgrößen betrachtet und zu einem Eingangsvektor  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$  (dim.  $r \times 1$ ) zusammengefasst. Daraus ergibt sich die Darstellung der nichtlinearen Systemgleichungen in Zustandsform mit

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}_{\dot{\mathbf{x}}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (4.5)$$

wobei  $\mathbf{f}_{\dot{\mathbf{x}}}$  eine  $n \times 1$ -Vektorfunktion und  $\mathbf{x}_0$  der  $n \times 1$ -Vektor der Anfangsbedingungen ist.

## 4.5.2 Linearisierung der Bewegungsgleichungen

Die mathematische Modellbildung, d. h. das Aufstellen der Bewegungsgleichungen, wird von der MKS-Software übernommen. In der Vorbereitungsphase der Methode wird davon ausgegangen, dass MKS-Modelle für die Abbildung des realen Fahrzeugs bereits mit einer ausreichend hohen Modelltiefe vorliegen. Für die Überführung in ein LZI-System ist daher die Linearisierung des Endsystems notwendig. Diese Aufgabe kann ebenfalls von der MKS-Software übernommen werden, wobei eine manuelle Linearisierung von Systemkomponenten von großem Vorteil sein kann, da dadurch auch Vorwissen über den dynamischen Zustandsbereich für den gewünschten Anwendungsfall miteinbezogen werden kann.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass das zu linearisierende System hinreichend schwach nichtlinear ist. Die kinematischen Nichtlinearitäten können daher z. B. mit  $\sin(\varphi) \rightarrow \varphi$  und  $\cos(\varphi) \rightarrow 1$  ersetzt werden. Für die Krafterelemente wird als Standard eine Taylor-Reihenentwicklung bis zum ersten Term durchgeführt mit

$$F = F_0 + \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x=x_0} (x - x_0), \quad (4.6)$$

wobei  $x_0$  der Entwicklungspunkt der Funktion ist.

Eine bedeutende Rolle bei der Linearisierung eines Schienenfahrzeugs spielen die nichtlinearen geometrischen Rad/Schiene-Profilfunktionen, welche sich aus der Kombination des Radprofils und des Schienenprofils, sowie aus der Einbauneigung der Schienen und der Spurweite ergeben. Auf Grund der starken Nichtlinearitäten (Kontaktpunktsprünge) dieser Funktionen ist eine mathematische Linearisierung mit Hilfe der Taylor-Reihenentwicklung nicht zielführend und es wird daher eine sogenannte *Quasi-Linearisierung* durchgeführt. Die drei zu linearisierenden Rad/Schiene-Profilfunktionen in Abhängigkeit von der Radsatzquerverschiebung  $y_{RS}$  sind

- die Rollradiendifferenz-Funktion  $\Delta r(y_{RS})$ ,
- die Wankwinkel-Funktion  $\alpha(y_{RS})$ , sowie
- die Kontaktwinkel-Funktion  $\gamma(y_{RS})$ .

Ziel bei der Linearisierung dieser Funktionen ist es, dass das dynamische Verhalten des linearisierten Systems weitgehend mit dem des nichtlinearen übereinstimmt. In der Praxis werden hierfür die Methoden der

- harmonischen Linearisierung,
- äquivalenten Linearisierung und
- stochastischen Linearisierung angewandt.

Bei der harmonischen Linearisierung wird der Erwartungswert des Fehlers zwischen der nichtlinearen Funktion  $z = f(y_{RS})$  und der linearen Funktion  $z = a_0 + a_1 y_{RS}$  minimiert. Mit dem Ansatz, dass die Radsatzquerverschiebung eine harmonische Bewegung beschreibt mit  $y_{RS} = \hat{y}_{RS} \sin \varphi$  ergibt sich die Beschreibungsfunktion der linearen Parameter in Abhängigkeit von der Amplitude  $\hat{y}_{RS}$  zu

$$a_1(\hat{y}_{RS}) = \frac{1}{\pi \hat{y}_{RS}} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \varphi f(\hat{y}_{RS} \sin \varphi) d\varphi. \quad (4.7)$$

Aus der Rollradiendifferenz-Funktion  $\Delta r(y_{RS})$  ergibt sich mit diesem Ansatz die sogenannte *äquivalente* oder *wirksame* Konizität  $\lambda_e(\hat{y}_{RS})$ . Des Weiteren ergibt sich aus der Wankwinkel-Funktion  $\alpha(y_{RS})$  der äquivalente Koeffizient  $\sigma_e$  (äquivalenter Laufparameter) und aus der Kontaktwinkel-Funktion  $\gamma(y_{RS})$  der äquivalente Koeffizient  $\varepsilon_e$ . Wird statt des harmonischen Ansatzes eine stochastische Verteilung der Radsatz-Querverschiebungen angenommen, so wird dies als stochastische Linearisierung bezeichnet.

Bei der äquivalenten Linearisierung wird die kinematische Differentialgleichung eines starren Radsatzes auf einer Geraden betrachtet mit

$$y''_{RS} + f(y_{RS}) = 0, \quad (4.8)$$

wobei die unabhängige Variable der Weg  $s$  entlang der Strecke ist. Durch Anwendung der Potentialfunktion kann die Wellenlänge des periodischen Wellenlaufs  $L(\hat{y}_{RS})$  berechnet werden. Für einen Radsatz mit einem kegelförmigen Profil (Winkel der Konizität  $\gamma_e$ ) auf zwei als Kante gedachten Schienen ergibt sich entsprechend der sogenannten *Klingel-Formel* der Zusammenhang zwischen der Konizität und der daraus folgenden Wellenlänge  $L$  mit

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{e_0 r_0}{\tan \gamma_e}} \quad \text{und} \quad \lambda_e = 2 \tan \gamma_e, \quad (4.9)$$

wobei  $e_0$  der halbe Abstand zwischen den Messkreisebenen (Berührungspunkten) bei zentrischer Stellung des Radsatzes im Gleis und  $r_0$  der Rollkreisradius bei zentrischer Stellung

ist. Durch Gleichsetzung der Wellenlänge aus der Klingel-Formel und aus dem periodischen Wellenlauf kann daraus die äquivalente Konizität  $\lambda_e$  berechnet werden. Die zuletzt genannte Linearisierungsmethode wird in der Norm prEN 15302 beschrieben und in Anlehnung an deren Anwendung bei der Deutschen Bahn auch *DB-Linearisierung* genannt [47].

Im MKS-Programm SIMPACK werden für die Darstellung der linearisierten Rad/Schiene-Profilpaarung Kreisprofile verwendet. Aus den linearen Parametern können der Krümmungsradius des Radprofils  $R_{\text{Rad}}$ , der Krümmungsradius des Schienenprofils  $R_{\text{Schiene}}$  und die Tangentenneigung im Radaufstandspunkt bei zentrischer Stellung  $\delta_0$  berechnet werden mit

$$\tan \delta_0 = \frac{\sigma_e}{1 + \frac{r_0}{e_0} \sigma_e}, \quad R_{\text{Rad}} = \frac{e_0}{\sin \delta_0} \frac{\lambda_e}{\varepsilon_e - \sigma_e}, \quad R_{\text{Schiene}} = \frac{e_0}{\sin \delta_0} \frac{\lambda_e - \sigma_e}{\varepsilon_e}. \quad (4.10)$$

### 4.5.3 Berechnung der Übertragungsfunktion aus den Systemmatrizen des linearen zeitinvarianten Systems

Nach dem Schritt der Linearisierung der Bewegungsgleichungen erhält man die linearen Zustandsgleichungen

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (4.11)$$

wobei  $\mathbf{A}(t)$  die  $n \times n$ -Systemmatrix und  $\mathbf{B}(t)$  die  $n \times r$ -Eingangsmatrix ist. Sind diese beiden Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  konstant, so ist das System linear und zeitinvariant. Bei mechanischen Systemen wird für die Bildung der Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  stets die inverse Massenmatrix  $\mathbf{M}^{-1}$  benötigt. Da die Massenmatrix  $\mathbf{M}$  in Mehrkörpersystemen positiv definit ist, existiert ihre Inverse eindeutig [18].

Das Eigenverhalten des linearisierten Systems kann mit Glg. (4.11) für die Beurteilung der freien Schwingungen herangezogen werden. Für die Analyse und Berechnung des Übertragungsverhaltens werden neben den Zustandsgrößen noch weitere Größen benötigt, wobei die gesamten Ausgangsgrößen im Ausgangsvektor  $\mathbf{y}(t)$  (dim.  $m \times 1$ ) zusammengefasst werden. Das lineare zeitinvariante System wird somit im Zeitbereich beschrieben mit

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (4.12)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t), \quad (4.13)$$

wobei  $\mathbf{C}$  als Ausgangsmatrix (dim.  $m \times n$ ) und  $\mathbf{D}$  als Durchgangsmatrix (dim.  $m \times r$ ) bezeichnet wird. Die Bedingung für ein lineares und zeitinvariantes (LZI) System ist, dass neben den Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  auch die Matrizen  $\mathbf{C}$  und  $\mathbf{D}$  konstant sind und daher weder von der Zeit  $t$  noch von der Störung des Systems  $\mathbf{u}$  abhängig sind.

In dieser Arbeit werden die Gleislageanregungen als Eingangs- bzw. Störgrößen des Systems definiert, woraus sich der Eingangsvektor  $\mathbf{u}$  ergibt mit

$$\mathbf{u}^T(t) = \left[ \zeta_z(t) \quad \zeta_y(t) \quad \zeta_\delta(t) \quad \dot{\zeta}_z(t) \quad \dot{\zeta}_y(t) \quad \dot{\zeta}_\delta(t) \quad \ddot{\zeta}_z(t) \quad \ddot{\zeta}_y(t) \quad \ddot{\zeta}_\delta(t) \right]. \quad (4.14)$$

Die zu betrachtenden Ausgangsgrößen des Systems sind die Radaufstandskraft  $Q$  (für die Vertikaldynamik) und die Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  (für die Lateraldynamik), woraus sich der Ausgangsvektor  $\mathbf{y}(t)$  ergibt mit

$$\mathbf{y}^T(t) = \left[ Q_{11}(t) \quad \Sigma Y_1(t) \right]. \quad (4.15)$$

Der Zustandsvektor  $\mathbf{x}(t)$  hat z. B. für den in dieser Arbeit verwendeten Reisezugwagen die Dimension  $n = 96$ , wobei sich diese aus  $f = 44$  geometrischen Freiheitsgraden und  $h = 8$  zusätzlichen Zuständen von Kraftelementen (Dämpfer) ergibt.

Für die Berechnung der gewünschten Übertragungsfunktionen werden die Differentialgleichungen in den Laplace-Bereich transformiert und an der Stelle  $s = j\omega$  ausgewertet. Es ergeben sich für den eingeschwungenen Zustand die komplexen Systemantworten der Zustandsgrößen  $\hat{\mathbf{x}}(j\omega)$  und der Ausgangsgrößen  $\hat{\mathbf{y}}(j\omega)$  bei einer komplexen harmonischen Anregung  $\hat{\mathbf{u}}(j\omega)$  mit

$$\hat{\mathbf{x}}(j\omega) = (j\omega \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \hat{\mathbf{u}}(j\omega), \quad (4.16)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(j\omega) = (\mathbf{C} (j\omega \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}_u) \hat{\mathbf{u}}(j\omega), \quad (4.17)$$

wobei  $\mathbf{I}$  die Einheitsmatrix (dim.  $n \times n$ ) ist. Daraus ergibt sich die komplexe  $m \times r$ -Übertragungsfunktionsmatrix mit

$$\hat{\mathbf{H}}(j\omega) = \mathbf{C} (j\omega \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}_u. \quad (4.18)$$

Aus dieser kann nun jede gewünschte komplexe Übertragungsfunktion  $\hat{H}_{u_i \rightarrow y_k}(j\omega)$  berechnet werden, wobei dies dem folgenden Ausdruck entspricht

$$\hat{H}_{u_i \rightarrow y_k}(j\omega) = \frac{\hat{y}_k(j\omega)}{\hat{u}_i(j\omega)}. \quad (4.19)$$

Zur Berechnung des gesamten Übertragungsverhaltens eines Gleislageabweichungsparameters  $\zeta_i$  auf die entsprechende Fahrzeugreaktionsgröße  $V_k$  müssen neben der 0. Ableitung der Gleislageanregung auch die 1. und 2. Ableitung nach der Zeit berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die gesamte Übertragungsfunktion mit

$$\hat{H}_{\zeta_i, \text{ges} \rightarrow V_k}(j\omega) = \hat{H}_{\zeta_i \rightarrow V_k}(j\omega) + j\omega \hat{H}_{\dot{\zeta}_i \rightarrow V_k}(j\omega) + (j\omega)^2 \hat{H}_{\ddot{\zeta}_i \rightarrow V_k}(j\omega). \quad (4.20)$$

Der Vorteil bei der Berechnung der Übertragungsfunktionen aus den Systemmatrizen ist, dass diese in analytischer Form vorliegen. Die Beschreibung der Übertragungsfunktionen kann daher sehr einfach durch Angabe der Zähler- und Nennerpolynomkoeffizienten erfolgen. Aus diesen können bei Bedarf wiederum Zeitbereichsfilter abgeleitet

werden. Auf Grund der großen Anzahl an Freiheitsgraden und der somit hohen Ordnung der Polynome ist zu beachten, dass die erstellten Zeitbereichsfilter meist instabil sind und daher weitere Vereinfachungen zur Reduzierung der Beschreibung benötigt werden.

Das größte Problem ist jedoch die Wahl eines geeigneten Referenzzustandes, bei welchem das System linearisiert werden soll. Die Untersuchungen bei der Wahl der automatischen Linearisierung in der MKS-Software haben gezeigt, dass die Ergebnisse für diesen Anwendungsfall völlig unzureichend sind. Daher mussten sämtliche Kennlinien manuell linearisiert werden, wobei hierfür diese durch geeignete lineare Parameter ersetzt wurden bzw. Anschläge teilweise vollständig vom Fahrzeug entfernt wurden. Diese Vorgehensweise brachte zwar eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse hinsichtlich der Übertragungsfunktionen, für den Anwender bleibt jedoch immer noch die Frage offen, in welchen Zustandsbereichen sich das System bei realen gemessenen Gleislagen befindet bzw. ob der Referenzzustand optimal gewählt wurde.

Auf Basis dieser Überlegungen wurde eine weitere Methode zur Berechnung der Übertragungsfunktionen untersucht, welche die zuvor beschriebene Problematik weitgehend entschärft. Diese sogenannte *Berechnung der empirischen Übertragungsfunktionen* wird im nächsten Abschnitt für die Anwendung im Fahrzeug/Fahrweg-System im Detail beschrieben.

## 4.6 Berechnung der empirischen Übertragungsfunktionen

In Abschnitt 4.2 wurde festgehalten, dass die Methode zur Berechnung der Übertragungsfunktionen einen geeigneten Referenzzustand des Fahrzeug/Fahrweg-Systems entsprechend realer Gleislageabweichungen berücksichtigt. Hierfür werden MKS-Simulationen mit den nichtlinearen Fahrzeugmodellen und gemessenen Gleislageabweichungen als Systemanregungen durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen werden, wie im folgenden Abschnitt dargestellt, die komplexen Frequenzspektren der Ein- und Ausgangsgrößen für die verschiedenen Simulations-Szenarien berechnet. Daraus können wiederum, wie in Abschnitt 4.6.2 erläutert, die empirischen Übertragungsfunktionen für jedes Szenario abgeleitet werden und durch Mittelung der Ergebnisse aller Szenarien, wie in Abschnitt 4.6.3 gezeigt, die repräsentativen empirischen Übertragungsfunktionen für verschiedene Fahrzeugtypen berechnet werden.

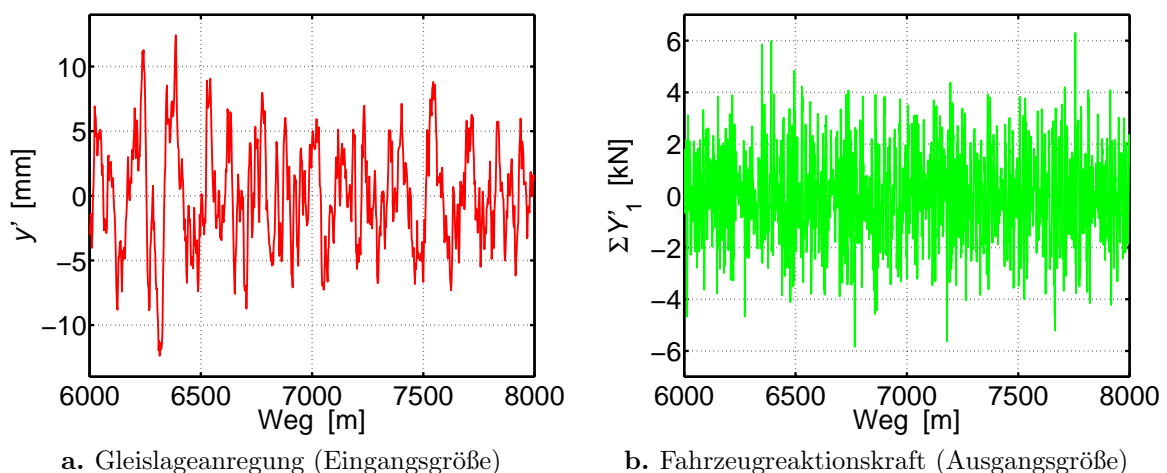
### 4.6.1 MKS-Simulationen mit dem nichtlinearen Fahrzeugmodell

Die MKS-Simulation bietet im Vergleich zu fahrdynamischen Messungen eine ausgezeichnete Möglichkeit, die Fahrzeugreaktion für eine Systemanregung einer einzelnen Gleislageabweichung zu berechnen. Da bei den Simulationen jeweils nur eine Eingangs-

sowie nur eine Ausgangsgröße betrachtet wird, wird dieses System als *SISO-System* (*single input single output*) bezeichnet. Bei fahrdynamischen Messungen wirken jedoch, neben den teilweise unbekannt realen Bedingungen, immer alle Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen kombiniert auf das Fahrzeug, weshalb hier nur die Betrachtung eines *MISO-Systems* (*multiple input single output*) möglich ist.

Die Methodik zur Berechnung der empirischen Übertragungsfunktionen zur Bewertung von Gleislageabweichungen soll anhand von MKS-Simulationen mit folgenden Versuchsbedingungen dargestellt werden. Für die Ermittlung der Fahrzeugreaktionen standen fünf Abschnitte von gemessenen Gleislageabweichungen europäischer Strecken mit jeweils einer Länge zwischen 8 und 12 km zur Verfügung; diese werden hier mit *Gleislageabweichungen Nr. 1–5* bezeichnet. Die verwendeten Fahrzeugmodelle wurden in Abschnitt 4.4 beschrieben und die Simulationen, falls nicht anderes angegeben, mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 160$  km/h durchgeführt. Eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit ist u. a. notwendig, um so den linearen Zusammenhang zwischen dem Zeitbereich und dem Wegbereich sicherzustellen.

Als Ergebnis dieser Simulationen erhält man die SISO-Anteile der gewünschten Fahrzeugreaktionen  $V'_k(s)$  als Funktion des jeweiligen Gleislageanregungs-Beschreibungsparameters  $\zeta'_i(s)$  in Abhängigkeit von der Wegstrecke  $s$ . Für die spätere Analyse des Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße müssen diese die gleiche Wegfrequenz  $f_L$  bzw. Samplingschrittweite  $\Delta s$  besitzen und werden daher entsprechend der höheren Frequenz der beiden Signale interpoliert. In Abb. 4.3 ist der Verlauf der Richtungslage  $y'(s)$  und der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y'_1(s)$  für einen 2 km langen Abschnitt dargestellt, wobei diese beiden Größen auch in den folgenden Abschnitten für die weitere Beschreibung der Berechnung der empirischen Übertragungsfunktion verwendet werden.



**Abbildung 4.3** Ein- und Ausgangsgrößen der MKS-Simulation für die Schätzung der empirischen Übertragungsfunktion



## 4.6.2 Schätzung der empirischen Übertragungsfunktion

Für die Schätzung der Übertragungsfunktion basierend auf den SISO-Simulationsergebnissen wird in dieser Arbeit die sogenannte *empirical transfer function estimate* (ETFE) Methodik angewandt (Details zur ETFE siehe [30]). Die ETFE zählt zu den nicht-parametrischen System-Identifikationsmethoden, da hierfür keine definierte Modellstruktur mit einer finiten Anzahl zu bestimmender Parameter angenommen wird. Daher wird auch der Begriff *empirisch* in Anlehnung an [24] für die Schätzung der Übertragungsfunktionen übernommen. Obwohl die Simulationen selbst mit dem nicht-linearen System durchgeführt wurden, wird hier die Annahme getroffen, dass das System bezüglich des Referenzzustandes hinreichend schwach nichtlinear und zeitinvariant ist. Diese Annahme ermöglicht sowohl die Anwendung der ETFE zur Bestimmung der Übertragungsfunktion als auch in späterer Folge die Anwendung des Superpositionsprinzips für die Betrachtung des MISO-Systems.

Bevor die Eingangs- und Ausgangsdaten in den Frequenzbereich transformiert werden, müssen diese, wie in Abschnitt 3.4.2.1 beschrieben, mit einer Fensterfunktion gewichtet werden. Hierfür erweist sich ein sogenanntes *Tukey-Fenster*  $W(\tilde{n})$  als vorteilhaft, welches berechnet wird mit

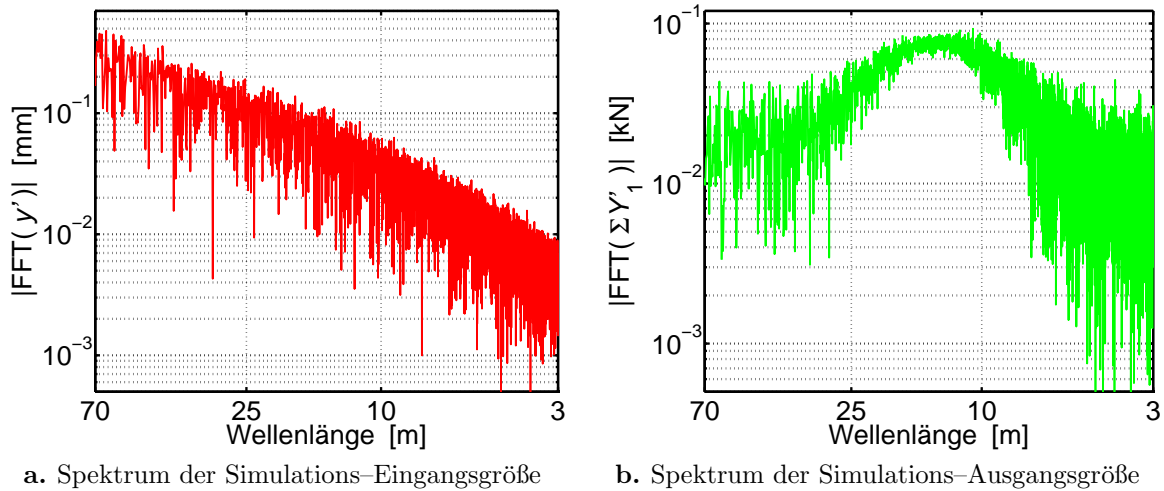
$$W(\tilde{n}) = \begin{cases} 0,5 \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\alpha} \left( x - \frac{\alpha}{2} \right) \right) \right), & \text{wenn } 0 \leq \tilde{n} \leq \frac{\alpha}{2}, \\ 1,0, & \text{wenn } \frac{\alpha}{2} \leq \tilde{n} < 1 - \frac{\alpha}{2}, \\ 0,5 \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\alpha} \left( x - 1 + \frac{\alpha}{2} \right) \right) \right), & \text{wenn } 1 - \frac{\alpha}{2} \leq \tilde{n} \leq 1, \end{cases} \quad (4.21)$$

wobei  $\tilde{n}$  ein äquidistanter Weg-Vektor zwischen 0 und 1 ist und die Dimension  $N \times 1$  besitzt und  $N$  wiederum der Anzahl der Datenpunkte des jeweiligen Signals entspricht. Der Koeffizient  $\alpha$  gibt das Verhältnis des Übergangsbereichs zur Signallänge an und kann zwischen 0 und 1 gewählt werden. Diese Fensterfunktion bietet einen guten Kompromiss zwischen einem Rechteckfenster (entspricht  $\alpha = 0$ ) und einem Hann-Fenster (entspricht  $\alpha = 1$ ). Da für die Beurteilung der Gleislageabweichungen die örtliche Amplitudentreue eine wichtige Rolle spielt, wird ein sehr kleiner Koeffizient von  $\alpha = 0,05$  gewählt.

Die beiden Signale werden nach der Fensterung mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation (DFT) entsprechend Glg. (3.12) in den Frequenzbereich transformiert. Der Betrag der beiden komplexen Eingangs- und Ausgangsspektren (Richtungslage  $\hat{y}' \left( \frac{1}{L} \right)$  und Summe der Führungskräfte  $\underline{\hat{Y}}_1' \left( \frac{1}{L} \right)$ ) ist in Abb. 4.4 dargestellt.

Die Schätzung der Übertragungsfunktion erfolgt durch Division der jeweiligen komplexen Spektralanteile der Ein- und Ausgangsgrößen mit

$$\underline{\hat{H}}'_{\text{raw}, u_i \rightarrow y_k} \left( \frac{1}{L_n} \right) = \frac{\hat{y}_k \left( \frac{1}{L_n} \right)}{\hat{u}_i \left( \frac{1}{L_n} \right)} \quad n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}. \quad (4.22)$$



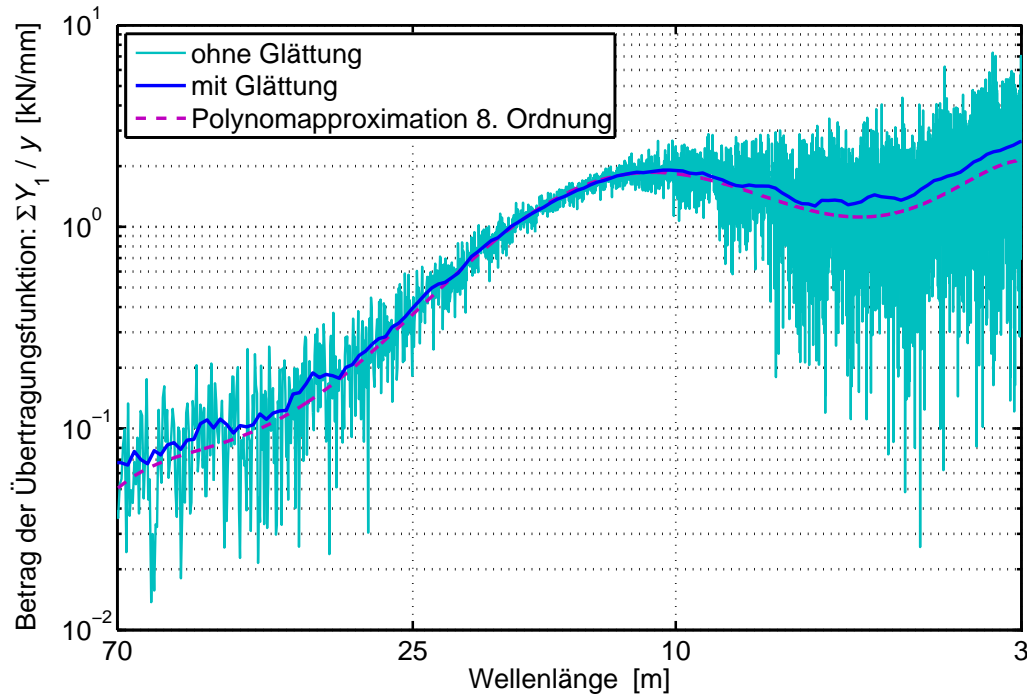
**Abbildung 4.4** Spektren der Ein- und Ausgangsgrößen für die Schätzung der empirischen Übertragungsfunktion

Da einerseits regellose Gleislageabweichungen als Anregung und andererseits das Fahrzeug/Fahrweg-System selbst Nichtlinearitäten aufweisen, ist im geschätzten Übertragungsfunktionsspektrum ein deutlicher *Rauschanteil* feststellbar. Zur Glättung des Signals wird eine gleitende Mittelung zur Minderung des Rauschanteils durchgeführt.

Der Betrag der Übertragungsfunktionen des verrauschten Signals  $\left| \hat{H}'_{\text{raw}, y \rightarrow \Sigma Y_1} \left( \frac{1}{L_n} \right) \right|$  und des geglätteten Signals  $\left| \hat{H}'_{y \rightarrow \Sigma Y_1} \left( \frac{1}{L_n} \right) \right|$  ist in Abb. 4.5 dargestellt. Zusätzlich lässt sich für den Betrag des verrauschten Signals eine Polynomapproximation mit hinreichend großer Ordnung als weitere Möglichkeit zur Datenreduktion durchführen, welche ebenfalls in der Abbildung dargestellt ist. Die Polynomkoeffizienten wurden dabei für das dekadisch doppeltlogarithmische Wegfrequenzsignal im Wellenlängenbereich zwischen  $3 \leq L \leq 70$  m bestimmt. Problematisch stellt sich die Polynomapproximation für die Phase des Signals dar, da dieses zahlreiche Nulldurchgänge aufweisen kann und dadurch eine deutlich höhere Ordnung für eine sinnvolle Annäherung notwendig wäre. Aus diesem Grund wird für die entwickelte TGA-Methode nur das geglättete Übertragungsfunktions-Signal verwendet.

### 4.6.3 Berechnung der fahrzeugspezifischen empirischen Übertragungsfunktionen

Die bisher gezeigten Schritte zur Berechnung der Übertragungsfunktion wurden auf Basis eines einzelnen Streckenabschnittes (Gleislageabweichungen Nr.1) durchgeführt. Für eine möglichst gute Erfassung der realen Zustände der Fahrzeuge bei unterschiedlichen Eingangsspektren wurden diese Schritte mit weiteren Gleislageabweichungen (Nr.



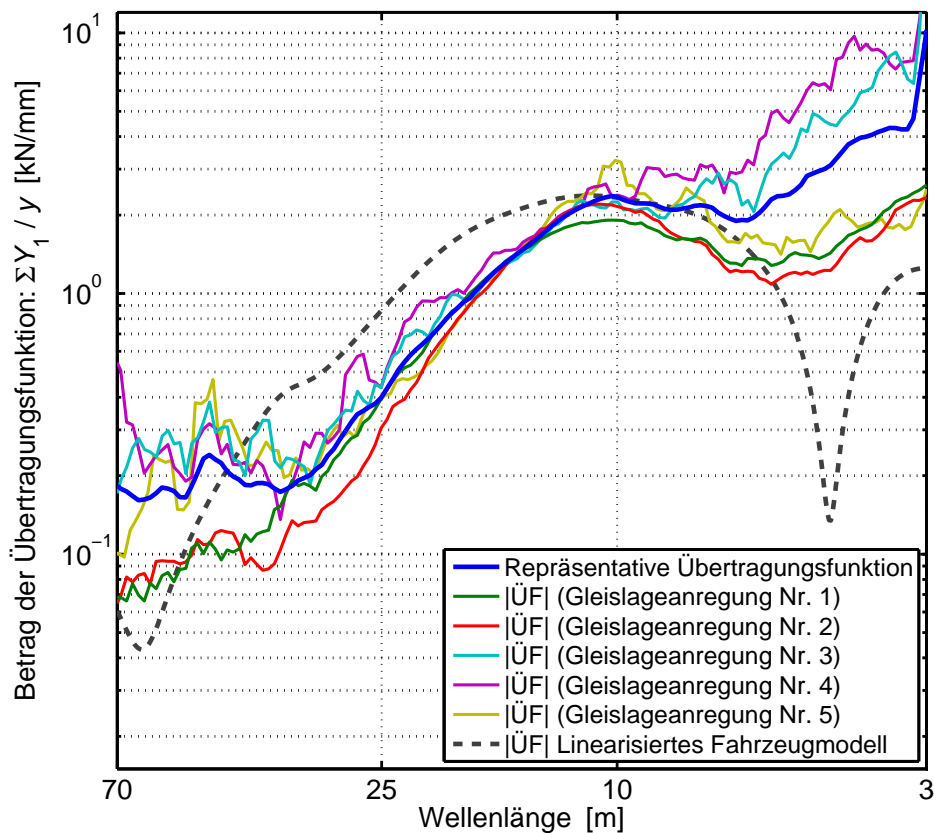
**Abbildung 4.5** Betrag der empirischen Übertragungsfunktion  $\Sigma Y_1/y$  mit Glättung und polynomapproximiert

2–5) wiederholt und jeweils die gewünschten Übertragungsfunktionen berechnet. Für die Ermittlung der sogenannten *fahrzeugspezifischen empirischen Übertragungsfunktionen* werden die streckenspezifischen Übertragungsfunktionen der Anzahl  $M$  wiederum gemittelt. Die Mittelung findet für den Betrag und für die Phase getrennt statt mit

$$\left| \hat{H}_{u_i \rightarrow y_k} \left( \frac{1}{L_n} \right) \right| = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left| \hat{H}'_{m, u_i \rightarrow y_k} \left( \frac{1}{L_n} \right) \right| \quad \text{mit } n = 1, 2, \dots, N_f, \quad (4.23)$$

$$\arg \left( \hat{H}_{u_i \rightarrow y_k} \left( \frac{1}{L_n} \right) \right) = \arg \left( \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{H}'_{m, u_i \rightarrow y_k} \left( \frac{1}{L_n} \right) \right), \quad (4.24)$$

wobei  $N_f$  die Anzahl der diskreten Spektrallinien nach der Glättung ist. In Abb. 4.6 sind die streckenspezifischen Übertragungsfunktionen (dünne farbige Linien), sowie die daraus berechnete repräsentative empirische Übertragungsfunktion für ein spezifisches Fahrzeug (dicke blaue Linie) der Eingangsgröße  $y$  und der Ausgangsgröße  $\Sigma Y_1$  dargestellt. Bei größeren Wellenlängen ( $25 \text{ m} \leq L \leq 70 \text{ m}$ ) ist eine starke Variation der Übertragungsfunktionen ersichtlich, woraus auf eine größere Variation der Zustandsgrößen geschlossen werden kann. Diese starke Variation ist auch im kleineren Wellenlängenbereich ab ca.  $L \leq 10 \text{ m}$  erkennbar. Der Anstieg, sehr nahe bei der kleinsten betrachteten Wellenlänge von  $L = 3 \text{ m}$ , ist dadurch zu erklären, dass manche Gleislagendaten (Nr. 3 und 4) bereits sehr stark bei dieser Eckwellenlänge bandpassgefiltert wurden und sich dies bei der Übertragungsfunktionsberechnung (Division durch kleinere Werte) in einem stärkeren Amplitudenanstieg auswirkt.



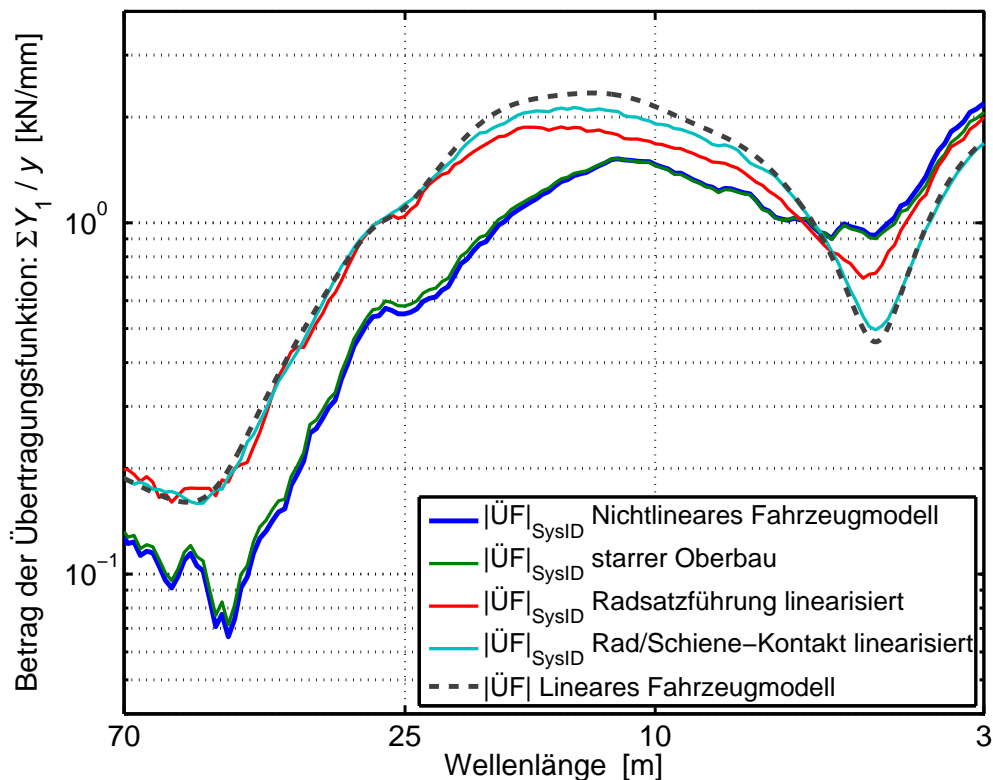
**Abbildung 4.6** Betrag der Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1 / y$  – berechnet aus der System-Identifikation bzw. aus den Zustandsraum-Matrizen

Zusätzlich ist in Abb. 4.6 der Betrag der Übertragungsfunktion des manuell linearisierten Fahrzeugs (strichlierte schwarze Linie) eingezeichnet. Hier zeigt sich fast im kompletten Wellenlängenbereich eine starke Abweichung zu den empirischen Übertragungsfunktionen. Im Bereich kleiner Wellenlängen ist der Verlauf ähnlich dem unteren Streuungsband der ungeglätteten empirischen Übertragungsfunktionen in Abb. 4.5. Daraus lässt sich ableiten, dass zumindest dort der Referenzzustand der Linearisierung teilweise im Bereich der Variationsbreite der Zustände des nichtlinearen Fahrzeugs liegt. Für die Analyse dieser Abweichungen wurden Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen der Linearisierungsschritte auf die Übertragungsfunktionen durchgeführt und im folgenden Abschnitt dargestellt.

#### 4.6.4 Auswirkungen der Linearisierungsschritte auf die Übertragungsfunktionen

Die Problematik bei der Linearisierung des Systems liegt, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, in der geeigneten Wahl des Referenzzustandes. Aus Abb. 4.6 ist ersichtlich, dass auch mit Hilfe der manuellen Linearisierung noch ein deutlicher Unterschied zwischen

der aus dem linearisierten System berechneten Übertragungsfunktion und der empirischen Übertragungsfunktion festzustellen ist. Dieser starke Einfluss der Nichtlinearitäten des Systems, speziell auf das laterale Übertragungsverhalten, wurde detaillierter analysiert. Hierfür wurden mehrere MKS-Simulationen mit dem nichtlinearen Reisezugwagenmodell bei einer konstanten Geschwindigkeit von  $v = 120$  km/h durchgeführt, wobei in mehreren Schritten das Modell zunehmend linearisiert wurde. Aus diesen Ergebnissen wurden jeweils die streckenspezifischen empirischen Übertragungsfunktionen des lateralen Übertragungsverhaltens berechnet und deren Betrag in Abb. 4.7 dargestellt.



**Abbildung 4.7** Betrag der Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1/y$  – in Abhängigkeit der Linearisierungsstufen

Ausgangspunkt der Untersuchungen war die empirische Übertragungsfunktion des vollständig nichtlinearen Fahrzeugmodells, welche in der Abbildung als dicke blaue Linie gekennzeichnet ist. Für diese Simulation wurde für eine erweiterte Analyse ein elastisches (mitgeführtes) Oberbaumodell verwendet, welches als Standardmodell im MKS-Programm SIMPACK zur Verfügung steht. Die erste Vereinfachung des Systems durch Entfernung dieses Oberbaumodells soll zeigen, dass der Einfluss im betrachteten Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich vernachlässigbar klein ist. Dies kann durch Betrachtung der berechneten empirischen Übertragungsfunktion mit starrem Oberbau verifiziert werden, welche in der Abbildung mit einer grünen Linie dargestellt ist.

Da die Sekundärfederstufe des Reisezugwagenmodells bereits mit rein linearen Elementen realisiert wurde und die Einflüsse der Anschläge in den untersuchten Szenarien einen geringen Einfluss haben, wurde im nächsten Schritt die Auswirkung der Linearisierung der Radsatzführung untersucht. Diese Baugruppe hat eine große Bedeutung für das dynamische Verhalten des Fahrzeugs und wird deshalb mit einer entsprechend hohen Modelltiefe realisiert. Die Ergebnisse der Linearisierung zeigen deutlich den Einfluss der Nichtlinearität dieser Baugruppe. Die berechnete empirische Übertragungsfunktion (dünne rote Linie) weicht bereits signifikant vom nichtlinearen Fahrzeugmodell ab. Im Vergleich zur Übertragungsfunktion aus den Systemmatrizen (dicke strichlierte schwarze Linie) ist speziell im mittleren und kleineren Wellenlängenbereich noch eine große Differenz feststellbar.

Im letzten Schritt wurde die Linearisierung des noch verbleibenden nichtlinearen Elements, der Rad/Schiene-Kontakt, mit Hilfe der Methode der harmonischen Linearisierung (siehe Abschnitt 4.5.2) durchgeführt und geometrisch als Kreisprofil realisiert. Die aus dem nun vollständig linearisierten Modell berechnete empirische Übertragungsfunktion (dünne cyanfarbige Linie) zeigt, bis auf eine geringe Differenz im mittleren Wellenlängenbereich, eine gute Übereinstimmung mit der aus den Systemmatrizen berechneten Übertragungsfunktion.

#### 4.6.5 Schlussfolgerungen aus der Berechnung der Übertragungsfunktionen

Die Untersuchungen des Einflusses der Nichtlinearitäten des Systems auf die Übertragungsfunktionen haben gezeigt, dass durch die Berechnung der empirischen Übertragungsfunktionen diese deutlich besser berücksichtigt werden können als mit Hilfe der manuellen Linearisierung des Systems. Die Beschreibung des Übertragungsverhaltens des nichtlinearen Systems mittels empirischer Übertragungsfunktionen zeigt sowohl eine Abhängigkeit von den Frequenzanteilen als auch von den Amplituden der Eingangsgrößen. Zur Minimierung dieses Einflusses auf die Übertragungsfunktion eines spezifischen Fahrzeugs können diese für verschiedene Eingangsspektren berechnet und gemittelt werden. Auf Grund der Vorgabe von realen Gleislageabweichungen als Eingangsgrößen kann davon ausgegangen werden, dass dadurch *reale* Variationsbereiche der Systemzustände betrachtet und somit die besten Ergebnisse erzielt werden können.

Als Ergebnis der Berechnungen aus der Vorbereitungsphase stehen für die Anwendungsphase der entwickelten TGA-Methode jeweils die empirischen Übertragungsfunktionen (drei Gleislagebeschreibungsparameter kombiniert mit den beiden Fahrzeugreaktionskräften) für ein gewünschtes Fahrzeug in Kombination mit der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Verfügung. Daraus ergibt sich ein fahrzeug- und geschwindigkeitsspezifischer Satz

von sechs empirischen Übertragungsfunktionen mit

$$\hat{H}_{z \rightarrow Q_{11}} \left( \frac{1}{L} \right), \hat{H}_{y \rightarrow Q_{11}} \left( \frac{1}{L} \right), \hat{H}_{\delta \rightarrow Q_{11}} \left( \frac{1}{L} \right) \quad \text{für die Vertikaldynamik und} \quad (4.25)$$

$$\hat{H}_{z \rightarrow \Sigma Y_1} \left( \frac{1}{L} \right), \hat{H}_{y \rightarrow \Sigma Y_1} \left( \frac{1}{L} \right), \hat{H}_{\delta \rightarrow \Sigma Y_1} \left( \frac{1}{L} \right) \quad \text{für die Lateraldynamik.} \quad (4.26)$$

Ziel bei der Anwendung der TGA-Methode zur Beurteilung von Gleislageabweichungen ist es jedoch auch, Aussagen für verschiedene Fahrzeuge (bzw. Fahrzeugklassen) bei unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten zu treffen. Daher wurden neben diesen Parametern auch die Einflüsse von weiteren Größen wie Trassierung und Berührgeometrie untersucht und deren Auswirkungen auf die Form der Übertragungsfunktionen analysiert. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalysen sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

## 4.7 Sensitivitätsanalyse der Übertragungsfunktionen

Das Übertragungsverhalten des Fahrzeug/Fahrweg-Systems hängt nicht nur vom Fahrzeug bzw. dessen Geschwindigkeit, sondern auch von vielen weiteren Einflussgrößen wie z. B. Trassierungsverlauf, Oberbaueigenschaften, Rad/Schiene-Kontaktbedingungen und Rad/Schiene-Profilverschleiß ab. Die Berücksichtigung all dieser Größen ist zum einen deshalb schwierig, da die Bestimmung der Parameter für die Beschreibung dieser Größen teilweise gar nicht möglich ist oder mit großem Kostenaufwand verbunden ist. Zum anderen würde die Berücksichtigung dieser Größen die Komplexität der Methode bzw. die Anzahl der notwendigen Übertragungsfunktionen stark erhöhen.

Ein Ziel bei der Entwicklung der vorliegenden Methode war die Ermittlung eines guten Kompromisses zwischen Einfachheit der Methodik und ausreichender Modelltiefe zur Erfüllung der Basisanforderungen. Entscheidend ist auch, welche Aussagen bzw. Entscheidungshilfen für Maßnahmen auf Basis der Ergebnisse der TGA-Methode erwartet werden. Dies bedeutet, dass z. B. für die Maßnahme einer Geschwindigkeitsreduktion für bestimmte Fahrzeuge die Sensitivität der korrespondierenden Beschreibungsparameter entsprechend detailliert untersucht werden müssen.

Die Klassifizierung der Beschreibungsparameter für die Sensitivitätsanalyse erfolgte in Anlehnung an die EN 14363, da davon ausgegangen werden kann, dass bereits eine detaillierte Untersuchung der Klassengrenzen der Parameter hinsichtlich Einfluss auf die Fahrzeugreaktion erfolgte. Daher wurde die Sensitivität der Übertragungsfunktionen hinsichtlich Geschwindigkeit, Fahrzeugtyp und Trassierung mit den jeweiligen Klassengrenzen der EN 14363 analysiert. In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse dieser Analysen und zusätzlich der frequenzspezifische Einfluss der Amplitude der Gleislageanregungen, sowie der Einfluss der Berührgeometrieverhältnisse dargestellt.

### 4.7.1 Einfluss der Geschwindigkeit

Für die Untersuchung des Einflusses der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Form der Übertragungsfunktionen wurden MKS-Simulationen mit dem Reisezugwagenmodell durchgeführt. Die verwendeten Gleislageabweichungen wurden auf Basis der ORE-high PSD-Beschreibungsparameter synthetisch generiert. Diese Synthetisierung war notwendig, da die zur Verfügung stehenden gemessenen Gleislageabweichungen den zu analysierenden großen Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich nicht ausreichend abdecken. Die Fahrzeuggeschwindigkeit wurde entsprechend den Abstufungen der EN 14363 variiert und es wurden jeweils zwei Simulationen (für die Gleislageabweichungsparameter  $z$  und  $y$ ) je Geschwindigkeit ausgewertet.

Aus den Eingangs- und Ausgangsgrößen wurden die empirischen Übertragungsfunktionen  $Q_{11}/z$  (Kurzform für  $\hat{H}_{z \rightarrow Q_{11}}$ ) und  $\Sigma Y_1/y$  (Kurzform für  $\hat{H}_{y \rightarrow \Sigma Y_1}$ ) berechnet und dessen Betrag in Abb. 4.8 in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Als zusätzliche Information wurden die Wellenlängenbereiche D1 ( $3 \text{ m} < L \leq 25 \text{ m}$ ) mit dicken durchgezogenen Linien und die Wellenlängenbereiche D2 ( $25 \text{ m} < L \leq 70 \text{ m}$ ) mit dicken strichlierten Linien für die jeweilige Geschwindigkeit gekennzeichnet.

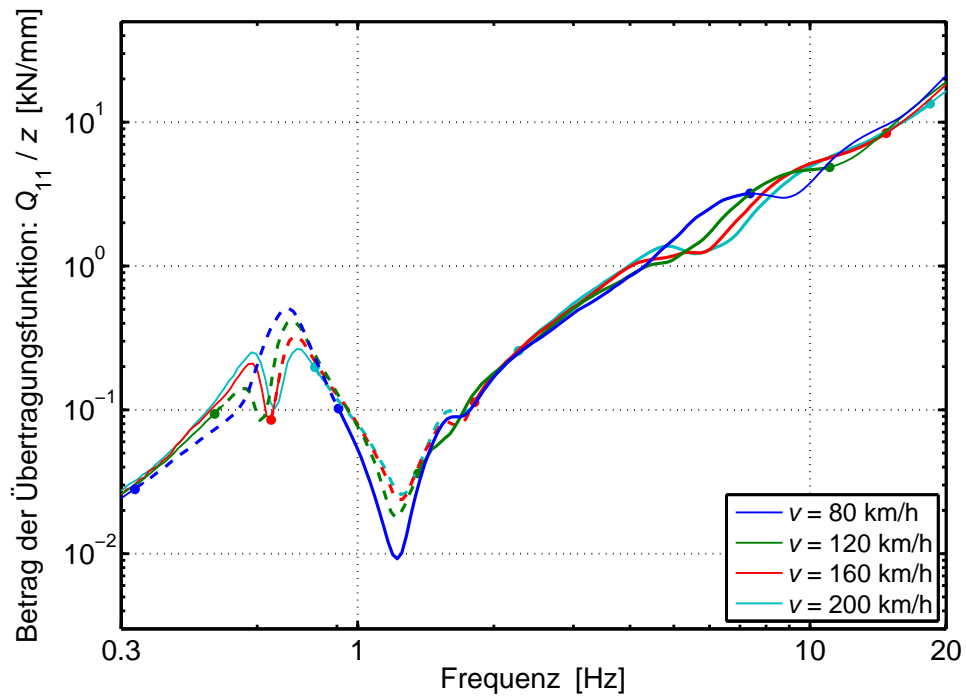
Betrachtet man den Betrag der vertikalen empirischen Übertragungsfunktion  $Q_{11}/z$  so zeigt sich eine geringe Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Im unteren Frequenzbereich (zwischen 0,5 und 0,8 Hz) sind auf Grund der Phasenverschiebung der Anregungsfunktionen bei höheren Geschwindigkeiten zwei ausgeprägte Amplitudenmaxima zu erkennen. Im mittleren Frequenzbereich sind die Übertragungsfunktionen nahezu von der Geschwindigkeit unabhängig und im oberen Frequenzbereich zeigen sich durch das Eigenverhalten der Radsätze in Kombination mit der Phasenverschiebung der Anregungsfunktionen wiederum kleine Unterschiede.

In der lateralen Richtung wirken sich die Phasenverschiebungen der Anregungsfunktionen signifikant aus. Dies zeigt sich deutlich in den Unterschieden der empirischen Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1/y$ . Bei Anregungsfrequenzen bis ca. 2,5 Hz treten bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten wesentlich größere Fahrzeugreaktionskräfte auf als bei höheren Geschwindigkeiten, wobei dieser Effekt zwischen 2,5 und 8 Hz gegenläufig zu beobachten ist. Für höhere Frequenzen ab ca. 10 Hz ist der Einfluss der Geschwindigkeit wiederum geringer.

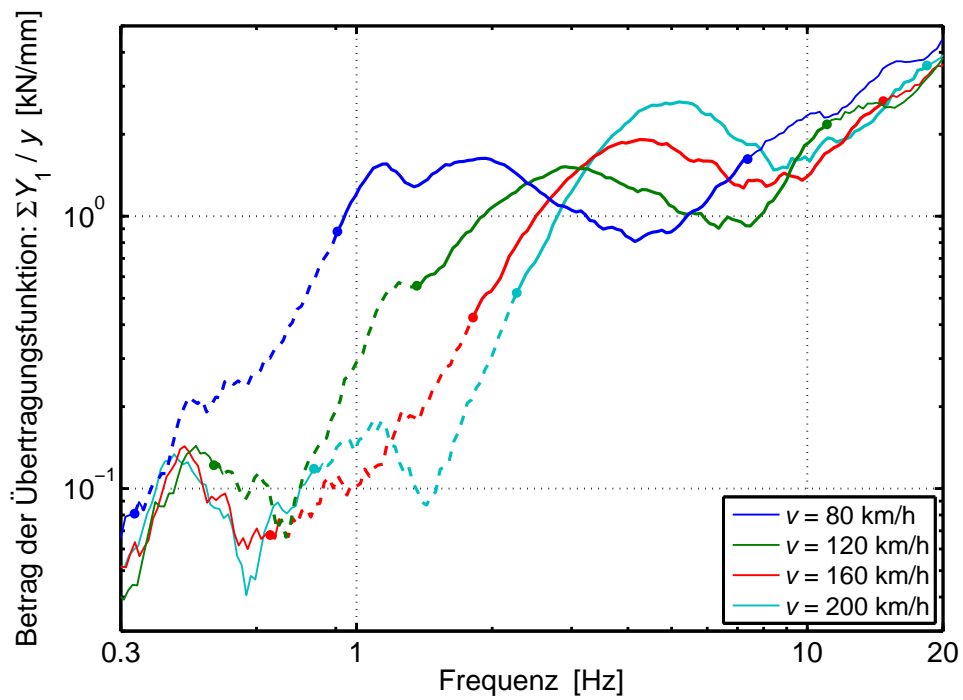
### 4.7.2 Einfluss verschiedener Fahrzeugtypen

Die Form der Übertragungsfunktionen wird maßgeblich von den jeweils wirksamen Massen, gekoppelt mit den Feder/Dämpfer-Eigenschaften des Systems, bestimmt. Für jeden Fahrzeugtyp ergibt sich somit eine bestimmte Kombination dieser Elemente. In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen den Übertragungsfunktionen spezifischer manuell linearisierter Fahrzeugtypen diskutiert. Hierfür wurden die Übertragungsfunktionen der beiden linearisierten MKS-Fahrzeugmodelle des Reisezugwagens





a. Übertragungsfunktion  $Q_{11}/z$

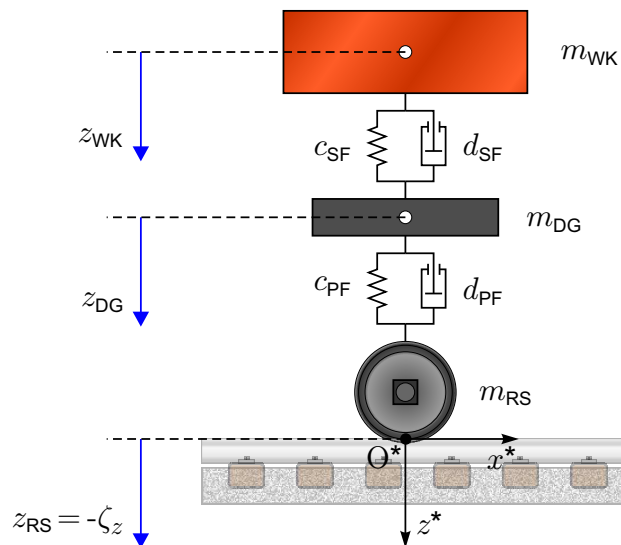


b. Übertragungsfunktion  $\Sigma Y_1/y$

**Abbildung 4.8** Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen des Reisezugwagenmodells in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit

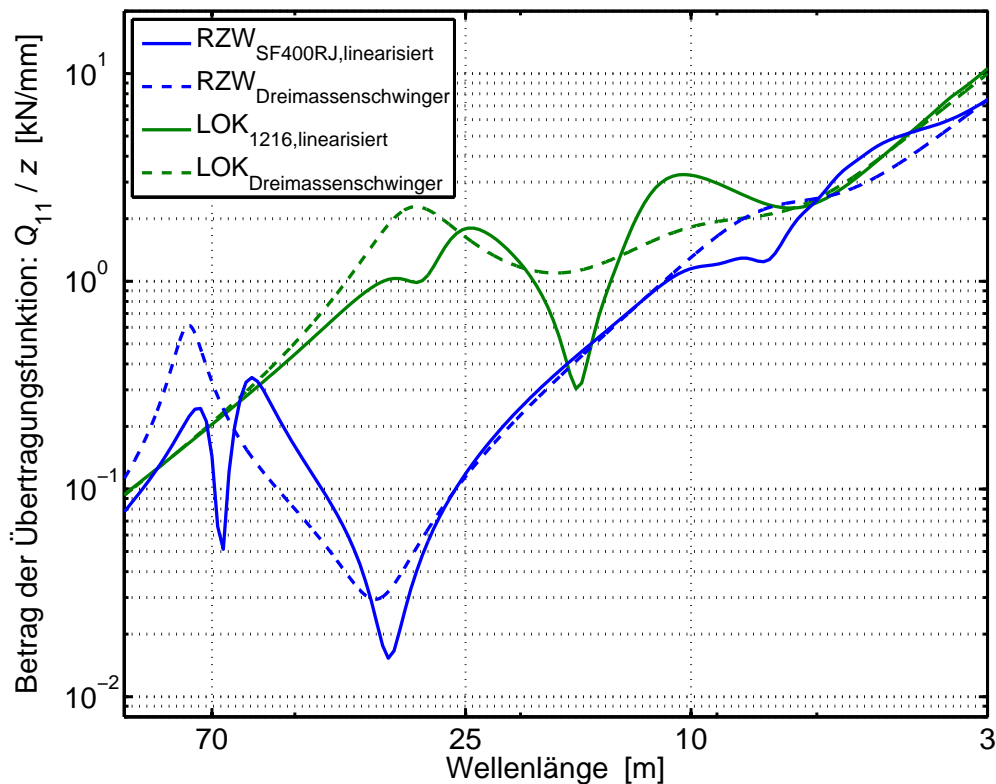
( $\text{RZW}_{\text{SF400RJ,linearisiert}}$ ) und der Lokomotive ( $\text{LOK}_{1216,linearisiert}$ ) für eine Geschwindigkeit von  $v = 160$  km/h berechnet und die Beträge dieser Funktionen in Abb. 4.10 für das vertikale Übertragungsverhalten und in Abb. 4.11 für das laterale Übertragungsverhalten dargestellt.

Zur Analyse des grundsätzlichen vertikalen Übertragungsverhaltens ist eine stark vereinfachte Abbildung des Systems als Dreimassenschwinger hilfreich. Dazu wird ein 4-achsiges Schienenfahrzeug, wie in Abb. 4.9 dargestellt, als sogenanntes *Achtelfahrzeug* betrachtet. Die durch die Längshöhenlage  $z$  verursachte vertikale Gleislageanregung  $\zeta_z$  wirkt direkt auf den Radsatz, welcher somit einer ungefederten Masse  $m_{\text{RS}}$  entspricht. Die erste Federstufe (PF...Primärfederung) besteht aus einer Parallelschaltung von einem Feder- und Dämpferelement. Darüber liegt die zweite Masse  $m_{\text{DG}}$  (DG...Drehgestellrahmen), darauf wiederum eine Parallelschaltung von einem Feder- und Dämpferelement (SF...Sekundärfederung), welche die dritte Masse  $m_{\text{WK}}$  (WK...Wagenkasten) stützt. Die Parameter (Massen  $m$ , Steifigkeiten  $c$  und Dämpfungen  $d$ ) sind auf Basis des linearisierten Gesamt-Fahrzeugmodells anteilig für das Achtelfahrzeug umgerechnet. Die vertikalen Übertragungsfunktionen für die äquivalenten Dreimassenschwinger des Reisezugwagens ( $\text{RZW}_{\text{Dreimassenschwinger}}$ ) und der Lokomotive ( $\text{LOK}_{\text{Dreimassenschwinger}}$ ) sind in Abb. 4.10 durch strichlierte Linien gekennzeichnet.



**Abbildung 4.9** Skizze eines äquivalenten Dreimassenschwingers für ein Achtelfahrzeug mit einer vertikalen Gleislageanregung  $\zeta_z$

Vergleicht man nun die Übertragungsfunktionen der Dreimassenschwinger mit jenen der linearisierten Fahrzeugmodelle, so sind bei beiden Fahrzeugmodellen zwei Amplitudenmaxima im Bereich der Wagenkastenanregung erkennbar. Die Ursache hierfür ist auf Grund der Phasenverschiebung der Gleislageanregungen zwischen den Radsätzen und den daraus resultierenden Anregungen der beiden Drehgestelle erklärbar. Beim

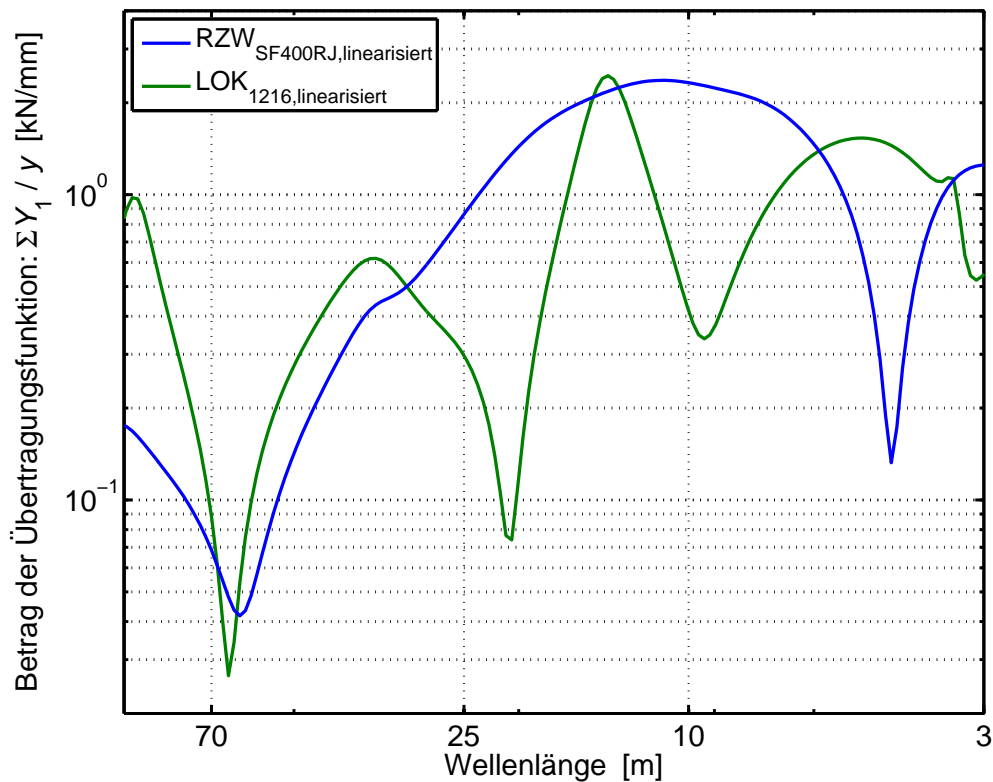


**Abbildung 4.10** Betrag der Übertragungsfunktion  $Q_{11}/z$  für verschiedene linearisierte Fahrzeugtypen und deren äquivalente Dreimassenschwinger

Reisezugwagen ist im Wellenlängenbereich zwischen 10 und 15 m wenig Unterschied zu erkennen. Erst bei Wellenlängen kleiner als 10 m wird der Unterschied durch die phasenverschobene Anregung der Radsätze wieder größer. Für die Lokomotive stimmt die Übertragungsfunktion mit dem Dreimassenschwinger erst bei Wellenlängen kleiner als 7 m überein, darüber sind bis ca. 70 m Wellenlängenanregungen deutliche Unterschiede zu erkennen. Die Vergleiche der Modelle mit dem Dreimassenschwinger zeigen, dass der Einfluss der Phasenverschiebung der Anregung auf das Fahrzeugreaktionsverhalten nicht zu vernachlässigen ist.

Der Vergleich der Übertragungsfunktionen  $Q_{11}/z$  zwischen den Fahrzeugmodellen verdeutlicht, dass die höheren Massenanteile der Lokomotive das lokale Amplitudenmaximum im Bereich der Eigenfrequenz des Wagenkastens in Richtung kleinere Wellenlängen verschiebt. Dies bewirkt, wie auch zu erwarten ist, eine höhere vertikale Fahrzeugreaktion bei Anregungen im mittleren und teilweise auch im kleineren Wellenlängenbereich. Das Amplitudenmaximum der Lokomotive bei einer Anregungswellenlänge von ca. 10 m ist auf Grund der Eigenfrequenz des Drehgestells erklärbar, wobei dieser Effekt beim Reisezugwagen durch verbesserte Komfortabstimmungen nicht auftritt.

Bei der Betrachtung des lateralen Übertragungsverhaltens ist eine Vereinfachung des Fahrzeugmodells mit einem Dreimassenschwinger nicht sinnvoll, da hier die Komplexi-



**Abbildung 4.11** Betrag der Übertragungsfunktion  $\Sigma Y_1/y$  für verschiedene linearisierte Fahrzeugtypen

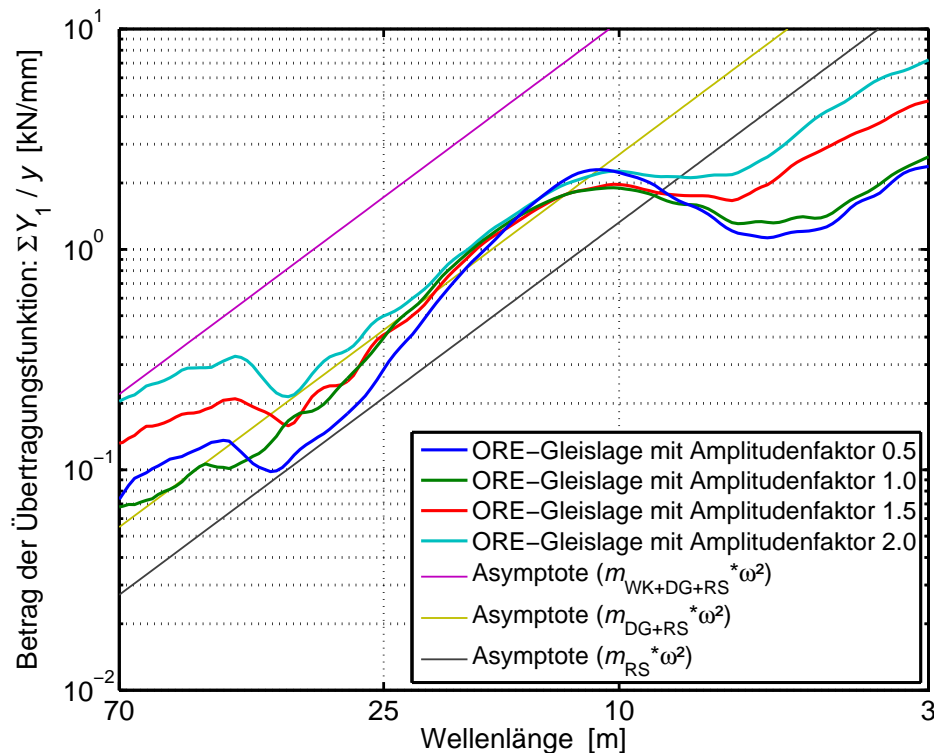
tät der Kopplung zwischen Rad und Schiene, sowie der einzelnen Baugruppen zueinander, zu hoch ist. Aus dem Vergleich der Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1/y$  der beiden Fahrzeugmodelle ist ersichtlich, dass beim Reisezugwagen trotz der niedrigeren Massenanteile fast über den gesamten Anregungswellenlängenbereich größere Fahrzeugreaktionen in lateraler Richtung auftreten. Hierfür sind die sehr ausgeprägten Entkopplungsfrequenzen bzw. Wellenlängen der Lokomotive verantwortlich, welche bei Wellenlängen von ca. 20 m und 10 m erkennbar sind.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nicht nur die Massenanteile alleine ausschlaggebend für das Übertragungsverhalten der Fahrzeuge sind. Hierfür müssen die Kombinationen der Elemente im Gesamten betrachtet werden. Eine höhere Fahrzeugmasse muss daher nicht direkt zu einer proportional höheren Fahrzeugreaktion führen. Für eine Klassifizierung der Übertragungsfunktionen der Fahrzeugklassen durch Zusammenfassung von dazugehörigen Fahrzeugtypen sind noch weitere Analysen notwendig, sodass die Abweichungen innerhalb einer Klasse möglichst gering gehalten werden können. Dies gilt speziell für die Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Güterwagen, welche für diese Arbeit jedoch nicht zur Verfügung standen.

### 4.7.3 Einfluss der Anregungsamplitude

Das nichtlineare Übertragungsverhalten des Fahrzeug/Fahrwegsystems bewirkt zusätzlich zur Frequenzabhängigkeit eine Abhängigkeit der empirischen Übertragungsfunktionen von den Amplituden der Anregungsgrößen. In Abschnitt 4.6.3 wurde gezeigt, wie die empirischen Übertragungsfunktionen von den unterschiedlichen Anregungsspektren der gemessenen Gleislageabweichungen abhängen. Bei den in diesem Abschnitt durchgeführten Untersuchungen wurden für alle Simulationen die gleiche Form des Anregungsspektrums (synthetische ORE-high Anregung) verwendet, jedoch die Amplituden aller Frequenzen mit einem Faktor zwischen 0,5 und 2 variiert. Auf Basis dieser Variationen kann die Amplituden-Sensitivität in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz bzw.-wellenlänge analysiert werden.

Die MKS-Simulationen wurden mit dem Reisezugwagen-Modell bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h durchgeführt und auf Basis der Eingangs- und Ausgangsgrößen die empirischen Übertragungsfunktionen für die laterale Richtung bestimmt. Der Betrag dieser Funktionen für die jeweilige Amplitudenhöhe der Gleislageanregungen ist in Abb. 4.12 dargestellt.



**Abbildung 4.12** Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1/y$  des Reisezugwagenmodells in Abhängigkeit von den Anregungsamplituden

Zusätzlich zu den Übertragungsfunktionen sind in Abb. 4.12 die Asymptoten-Funktionen für ein ungedämpftes Übertragungsverhalten verschiedener wirksamer

Massen eingezeichnet. Die Berechnung der Asymptoten-Funktionen wurde in Abschnitt 3.3.2 mit Glg. (3.5) für das vertikale Übertragungsverhalten beschrieben und hier für die wirksamen ungefederten Massen der lateralen Bewegung durchgeführt. Die wirksamen Massen sind die jeweiligen Anteile der Radsatzmasse  $m_{RS}$ , der Summe der Drehgestellrahmenmasse und Radsatzmasse  $m_{DG+RS}$ , sowie der Summe aus der gesamten Fahrzeugmasse  $m_{WK+DG+RS}$  (Wagenkasten, Drehgestellrahmen und Radsatz). Die Massen der Kopplungselemente wurden anteilmäßig den jeweiligen Ebenen zugeordnet.

Die Abhängigkeit der empirischen Übertragungsfunktionen zeigt sich speziell bei niedrigen und hohen Frequenzen. Im Wellenlängenbereich D2 ( $25\text{ m} < L \leq 70\text{ m}$ ) nähert sich die Übertragungsfunktion bei größeren Anregungsamplituden stark der Asymptoten-Funktion der gesamten Fahrzeugmasse  $m_{WK+DG+RS}$ . Das bedeutet, dass mit den steigenden Anregungsamplituden in diesem Wellenlängenbereich der Wagenkasten immer stärker angeregt wird und sich die wirksame Masse auf Grund dieser Nichtlinearität entsprechend erhöht. Im mittleren Wellenlängenbereich zwischen 9 und 25 m ist der Amplitudeneinfluss nur gering, wobei sich alle Übertragungsfunktionen der Asymptote des Drehgestells  $m_{DG+RS}$  annähern bzw. teilweise überschreiten. Bei der Anregung des Systems mit kleinen Wellenlängen ist nur mehr ein Teil der Radsatzmasse wirksam. Hier spielt die Nichtlinearität des Rad/Schiene-Kontakts die wesentliche Rolle. Je größer die Anregungsamplituden der Gleislageabweichungen sind, desto stärker wandert der Rad/Schiene-Kontaktpunkt in Richtung des Spurkranzes. Dieser Effekt bewirkt wiederum eine größere Komponente der Rad/Schiene-Kontaktkraft in lateraler Richtung. Aus diesem Grund nähern sich die Übertragungsfunktionen im kleinen Wellenlängenbereich immer mehr der Asymptote der wirksamen ungefederten Radsatzmasse  $m_{RS}$  an.

Die Ergebnisse der Analysen der Amplitudenabhängigkeit haben die in Abschnitt 4.6.3 gezeigten Beobachtungen bestätigt. Speziell für die sensitiven Frequenz- bzw. Wellenlängenbereiche ist es daher von großer Bedeutung, dass die bei realen Gleislageabweichungen auftretenden Amplituden für die Berechnung des Übertragungsverhaltens entsprechend berücksichtigt werden.

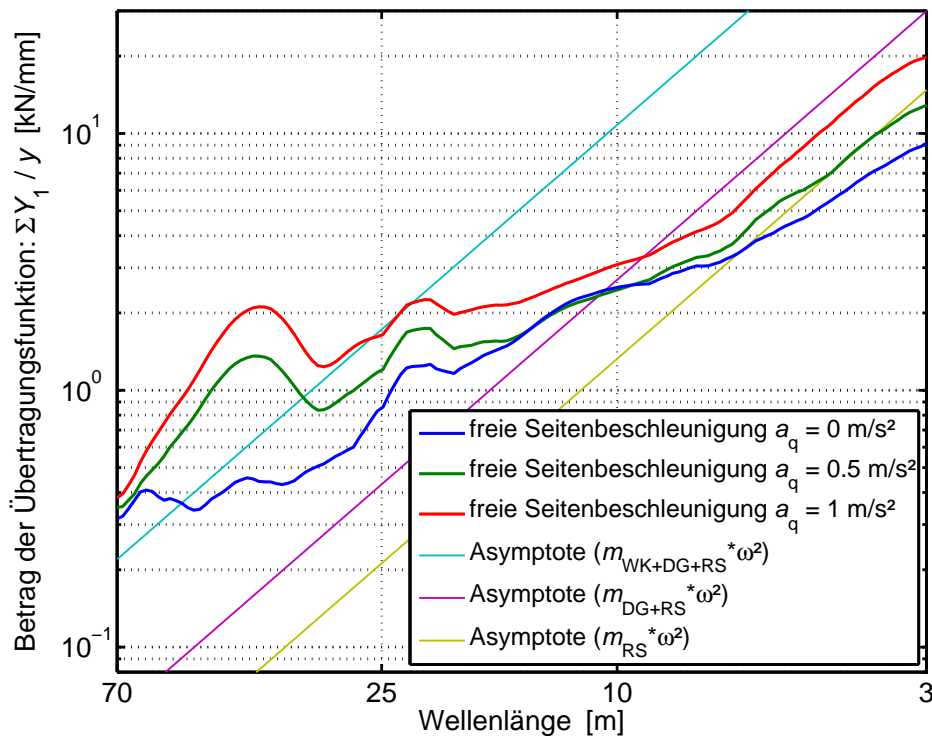
#### 4.7.4 Einfluss der Trassierung

Für die Analyse des Fahrzeugverhaltens im Bogen wird für grundsätzliche Untersuchungen der quasistatische Zustand betrachtet. Die Linearisierung des Systems zur Berechnung der Übertragungsfunktionen aus den Systemmatrizen in diesem Zustand ist mit einer hohen Komplexität verbunden und manuell nur sehr aufwändig durchführbar. Im Gegensatz dazu kann die Berechnung der empirischen Übertragungsfunktionen für eine Bogenfahrt wie in der Geraden durchgeführt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist auch, dass die Asymmetrie des Systems im Bogen ohne Zusatzaufwand mitberücksichtigt wird.

Die berechneten empirischen Übertragungsfunktionen wurden im ersten Schritt für unterschiedliche *freie Seitenbeschleunigungen*  $a_q$  (auf Gleisebene) im Bogen analysiert. Der Zusammenhang zwischen dem Bogenradius  $R$  und der freien (*unkompensierten*) Seitenbeschleunigung  $a_q$  ergibt sich aus

$$a_q = \frac{v^2}{R} - g_e \frac{u}{2b}, \quad (4.27)$$

wobei  $v$  die Fahrzeuggeschwindigkeit,  $g_e$  die Erdbeschleunigung,  $2b$  der Schienenabstand und  $u$  die Überhöhung der Schienen im Bogen ist. Die Simulationen wurden mit dem Reisezugwagenmodell bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h in einem 1900-m-Bogen ( $R = 1900$  m) durchgeführt. Die Variation der freien Seitenbeschleunigung erfolgte mittels variabler Überhöhung der beiden Schienen. In Abb. 4.13 sind die berechneten empirischen Übertragungsfunktionen für die laterale Richtung dargestellt, wobei zusätzlich die Asymptoten-Funktionen der wirksamen Massen für die Gerade eingezeichnet sind, sodass auch ein Vergleich mit Abb. 4.12 durchgeführt werden kann. Im Gegensatz zur vollständig kompensierten Seitenbeschleunigung  $a_q = 0$  m/s<sup>2</sup> zeigen

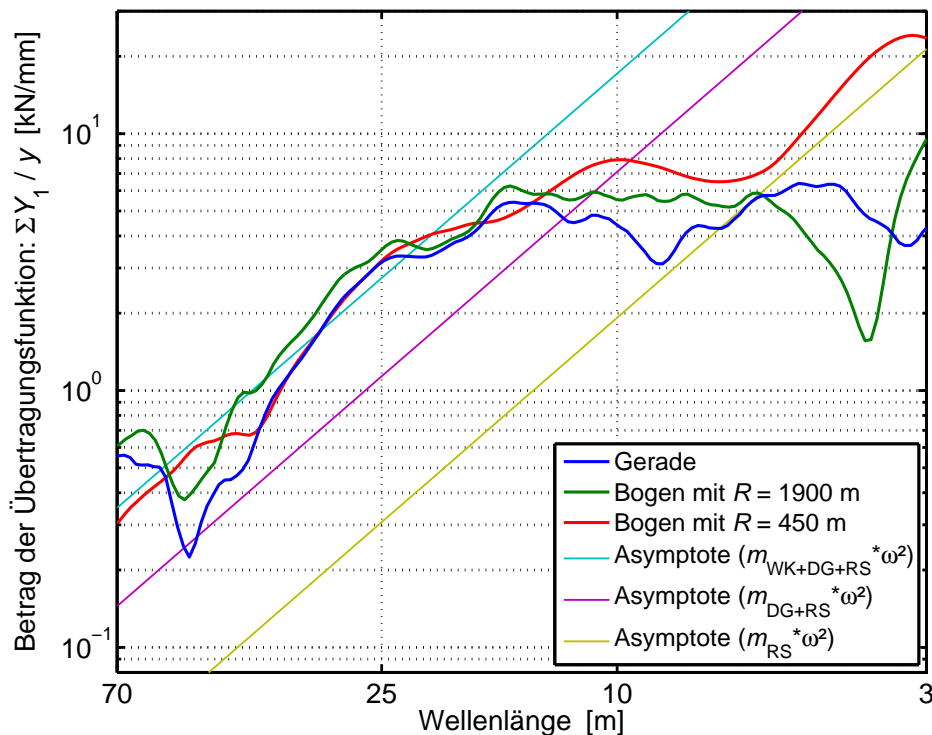


**Abbildung 4.13** Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1/y$  des Reisezugwagenmodells in Abhängigkeit von der freien Seitenbeschleunigung  $a_q$

die empirischen Übertragungsfunktionen bei den freien Seitenbeschleunigungen von  $a_q = 0,5$  m/s<sup>2</sup> bzw.  $a_q = 1$  m/s<sup>2</sup> deutliche Abweichungen im Wellenlängenbereich D2. Wie bei der Sensitivitätsanalyse für unterschiedliche Anregungsamplituden beschrieben, wandert der Radsatz bei einer größeren freien Seitenbeschleunigung in Richtung

Spurkranz, woraus sich der Effekt der Erhöhung der Übertragungsfunktionsamplituden ergibt.

Eine weitere Analyse des lateralen Übertragungsverhaltens im Bogen wurde mit dem Lok-Modell durchgeführt. Hierfür wurden die empirischen Übertragungsfunktionen für einen Bogenradius von 1900 m bzw. 450 m berechnet und mit der empirischen Übertragungsfunktion der Geraden (bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h) in Abb. 4.14 verglichen. Bei diesen Simulationsszenarien wurde die Überhöhung der bei-



**Abbildung 4.14** Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1/y$  des Lokmodells in der Geraden und im Bogen

den Bögen mit 15 mm für den 450-m-Bogen ( $R = 450$  m) und mit 6 mm für den 1900-m-Bogen in Anlehnung an die Praxis festgelegt. Für eine freie Seitenbeschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  ergibt sich somit eine Fahrzeuggeschwindigkeit für den 450-m-Bogen von 107,5 km/h und für den 1900-m-Bogen von 160 km/h. Wie in den vorherigen Abbildungen wurden auch hier die Asymptoten-Funktionen der wirksamen Massen für die Gerade eingezeichnet, jedoch mit den Massen der Lokomotive berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Übertragungsfunktion für einen großen Bogen (mit  $R = 1900$  m) in lateraler Richtung für größere Wellenlängen zwischen 12 und 70 m nur unwesentlich von der geraden Trassierung unterscheidet. Die Übertragungsfunktion des engen Bogens (mit  $R = 450$  m) zeigt ebenfalls diese Übereinstimmung, jedoch ist hier bei großen Wellenlängen ab 50 m der Effekt sichtbar, dass sich die Werte stark an die Asymptotenfunktion annähern. Auch dieser Effekt konnte bereits bei großen Amplituden in der Geraden beobachtet werden, woraus sich eine wirksame Massenanziehung ableiten lässt,



welche der gesamten Fahrzeugmasse entspricht. Für Wellenlängen kleiner als 12 m zeigen sich im lateralen Übertragungsverhalten, speziell im engen Bogen, auf Grund der geometrischen Rad/Schiene-Kontaktverhältnisse wiederum deutliche Unterschiede.

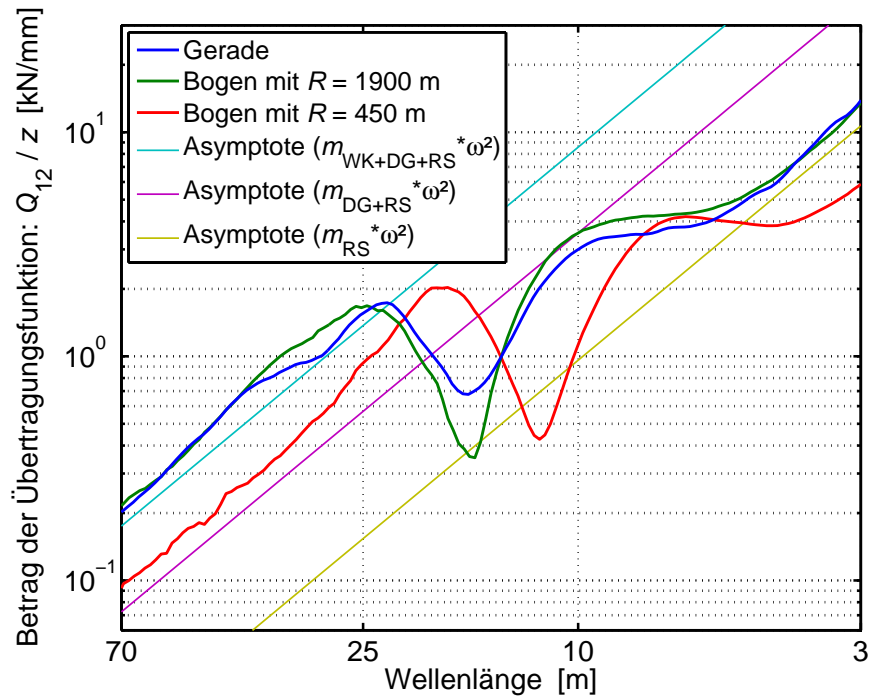
Zusätzlich zum lateralen Übertragungsverhalten wurden auch die empirischen Übertragungsfunktionen der vertikalen Richtung berechnet und analysiert. Die Versuchsbedingungen der Szenarien-Simulationen entsprechen jenen der lateralen Simulationen. Da die Simulation mit einem Rechtsbogen durchgeführt wurde, soll in diesem Fall als Ausgangsgröße die Radaufstandskraft  $Q_{12}$  des bogenäußeren Rades des ersten Radsatzes betrachtet werden. Der Betrag der berechneten empirischen Übertragungsfunktionen mit den entsprechenden Asymptoten-Funktionen ist in Abb. 4.15a und die Phase in Abb. 4.15b dargestellt.

Vergleicht man den Betrag der empirischen vertikalen Übertragungsfunktion im großen Bogen mit jener in der Geraden, so sind auch im kleineren Wellenlängenbereich nur geringe Differenzen feststellbar. Ein deutlich größerer Unterschied ergibt sich bei der Betrachtung der Phase dieser beiden Übertragungsfunktionen. Hier weichen die Funktionen auf Grund des Phasensprungs stark voneinander ab, woraus sich speziell bei der späteren Anwendung der Funktionen für den Wegbereich entsprechend große Unterschiede ergeben. Die empirischen vertikalen Übertragungsfunktionen für die beiden unterschiedlichen Bogenradien zeigen zwar sowohl im Betrag als auch in der Phase eine ähnliche Form, sie sind jedoch auf Grund der unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeit bei der Betrachtung im Wellenlängenbereich verschoben.

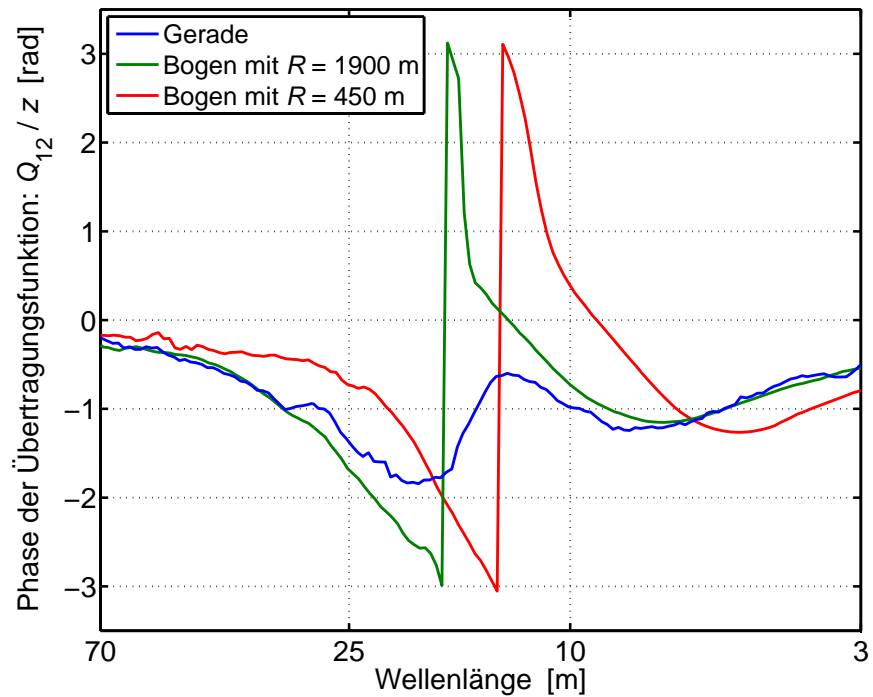
### 4.7.5 Einfluss der Berührgeometrie

Der Bereich der *wirksamen* Berührgeometrie ergibt sich aus dem Zusammenspiel des Rad- und Schienenprofils in Kombination mit der Einbauneigung und der Spurweite der Schienen. In diesem Abschnitt werden die empirischen Übertragungsfunktionen hinsichtlich des Einflusses dieser Größen analysiert, wobei die Parameter innerhalb eines Simulationsszenarios konstant bleiben. Eine dynamische Änderung der Einflussgrößen würde auch eine dynamische Änderung der Übertragungsfunktionen zur Folge haben. Die Berücksichtigung dieser Effekte könnte auf Grund der großen Komplexität nur mit hohem Aufwand erfolgen.

Als Fahrzeugmodell wurde wiederum ein Reisezugwagenmodell mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h verwendet, welches jedoch von dem bisher gezeigten Modell geringfügig abweicht. Aus der Kombination der weit verbreiteten Rad/Schiene-Profilpaarung vom Typ S1002/UIC60, einer Einbauneigung der Schienen von 1:40 und einer Nennspurweite von  $g_0 = 1435$  mm ergibt sich aus der harmonischen Linearisierung für die Linearisierungsamplitude von  $\hat{y}_{RS} = 3$  mm eine äquivalente Konizität von  $\lambda_e = 0,18$ . Für die nichtlinearen MKS-Simulationen wurden verschiedene Kombinationen von Rad/Schiene-Profilen und Parametern für die Einbauneigung und Spurweite von Siemens AG Österreich zur Verfügung gestellt, welche bei harmonischer Linearisierung den



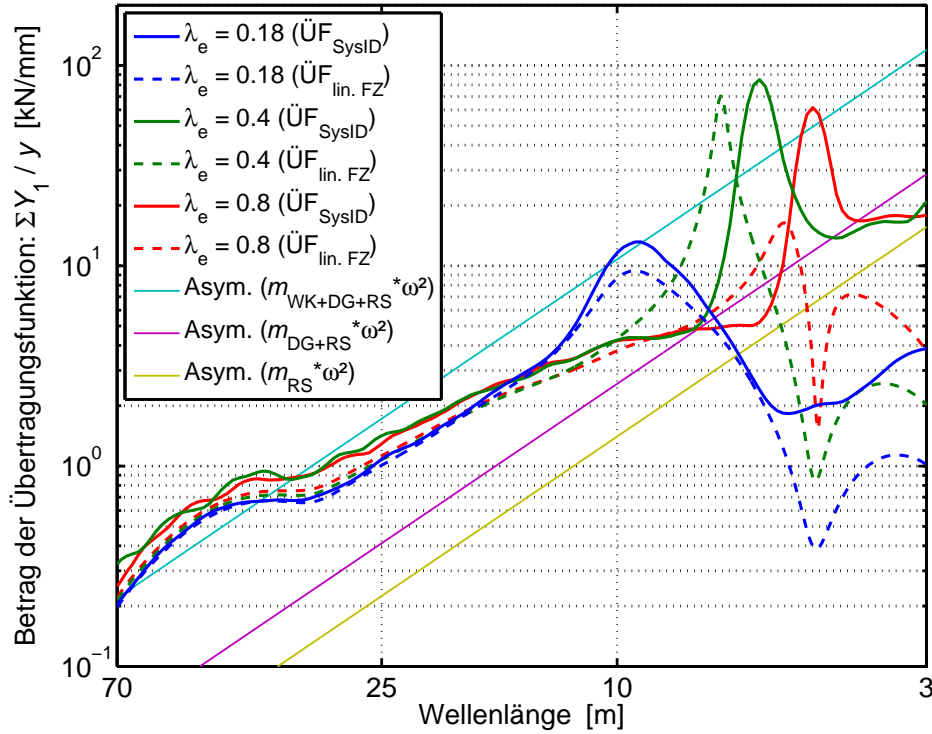
a. Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen



b. Phase der empirischen Übertragungsfunktionen

Abbildung 4.15 Empirische Übertragungsfunktionen  $Q_{12}/z$  des Lokmodells in der Geraden und im Bogen

äquivalenten Konizitäten von  $\lambda_e = 0,4$  und  $\lambda_e = 0,8$  entsprechen. Die aus diesen Simulationen berechneten empirischen lateralen Übertragungsfunktionen ( $\ddot{U}F_{\text{SysID}}$ ) sind in Abb. 4.16 als blaue, rote und grüne durchgezogene Kurven dargestellt.



**Abbildung 4.16** Betrag der Übertragungsfunktionen  $\Sigma Y_1 / y$  – in Abhängigkeit von der äquivalenten Konizität der Berührgeometrie

Für den Vergleich mit den Übertragungsfunktionen aus dem linearisierten Fahrzeugmodell ( $\ddot{U}F_{\text{lin. FZ}}$ ) wurden die Linearisierungsparameter für den Rad/Schiene-Kontakt in Form der äquivalenten Konizität vorgegeben. Die zwei weiteren notwendigen Parameter (siehe Abschnitt 4.5.2) können entsprechend dem Vorschlag der MKS-Software automatisiert mit  $\sigma_e = 0,2\lambda_e$  und  $\varepsilon_e = 0,85\lambda_e$  berechnet werden. Die aus den Systemmatrizen berechneten Übertragungsfunktionen sind für die jeweilige äquivalente Konizität als blau, rot und grün strichlierte Kurven in der Abbildung eingezeichnet. Die Funktionen der Asymptoten für die jeweils wirksamen Massen des Fahrzeugmodells sind ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Die Analysen der Ergebnisse zeigen, dass bei diesen Szenarien die Berührgeometrie bei Wellenlängen größer als 12 m nur einen geringen Einfluss hat. Für kleinere Wellenlängen zeigt sich bereits für eine äquivalente Konizität von  $\lambda_e = 0,4$  eine große Abweichung im Vergleich zu  $\lambda_e = 0,18$  (Standardprofilpaarung). Je mehr die äquivalente Konizität ansteigt, desto weiter wandern die Maximalamplituden des Betrags der Übertragungsfunktionen in Richtung kleinere Wellenlängen, wobei die Amplituden für  $\lambda_e = 0,4$  am größten sind. Ein Vergleich der empirischen Übertragungsfunktionen mit

den Übertragungsfunktionen aus der Linearisierung zeigt für Wellenlängen größer als 6 m einen tendenziell gleichen Verlauf. Bei kleineren Wellenlängen tritt ein ähnlicher Effekt auf, welcher in Abschnitt 4.7.3 für größere Amplituden bzw. in Abschnitt 4.7.4 für das Übertragungsverhalten im Bogen beschrieben wurde. Der Bereich des wirksamen Rad/Schiene-Kontaktpunkts wandert immer stärker in Richtung Spurkranz, woraus folgt, dass die wirksame Masse jener des Radsatzes entspricht (siehe Asymptotenfunktion in der Abbildung) bzw. diese sogar übersteigt.

### 4.7.6 Schlussfolgerungen aus der Sensitivitätsanalyse

Die untersuchten empirischen Übertragungsfunktionen zeigen, wie in den vorherigen Abschnitten dargestellt, eine mehr oder weniger große Abhängigkeit der Variationsparameter. Es ist daher davon auszugehen, dass diese Parameter bei der Klassifizierung der Übertragungsfunktionen entsprechend zu berücksichtigen sind. Ein Ziel bei der Entwicklung der Methode zur Bewertung der Gleislageabweichungen ist eine möglichst geringe Anzahl von Übertragungsfunktions-Klassen, auf deren Basis jedoch trotzdem die gewünschten Entscheidungen bzgl. Instandhaltungsmaßnahmen und hinsichtlich der Qualität der Gleislage für die fahrtechnische Zulassung getroffen werden können.

Die Analyse des Geschwindigkeitseinflusses hat gezeigt, dass dieser auf Grund der daraus resultierenden unterschiedlichen Phasenverschiebungen der Erregungen berücksichtigt werden muss. Aus der Untersuchung der Übertragungsfunktionen für verschiedene Fahrzeugtypen lässt sich ableiten, dass eine höhere Fahrzeugmasse nicht zwingend eine höhere Fahrzeugreaktion zur Folge hat. Daher sollten für eine Klassifizierung der Übertragungsfunktionen noch weitere Fahrzeuge verschiedener Fahrzeugklassen untersucht werden, dies gilt insbesondere für die Klasse von Güterwagen. Es bleibt jedoch die Frage offen, ob eine repräsentative Übertragungsfunktion für jede Fahrzeugklasse ausreichend ist, da sich die Eigenschaften der Fahrzeugtypen innerhalb einer Klasse doch deutlich unterscheiden können. Die Untersuchungen der Abhängigkeit der Übertragungsfunktionen von den Anregungsamplituden unterstreichen nochmals die Notwendigkeit, bei der Berechnung der Übertragungsfunktionen reale Gleislagespektren zu verwenden. Der Einfluss der Trassierung zeigt, dass die untersuchten Übertragungsfunktionen erst bei kleineren Wellenlängen in ihrer Form abweichen. Da die freie Seitenbeschleunigung jedoch einen entsprechend großen Einfluss hat, wurde diese für die Klassifizierung der Übertragungsfunktionen im Bogen in Anlehnung an den Zulassungswert für international betriebene Fahrzeuge (siehe [14]) mit  $a_q = 1 \text{ m/s}^2$  festgelegt.

Der Einfluss der Berührgeometrie auf die Form der Übertragungsfunktionen ist speziell für kleinere Wellenlängen nicht vernachlässigbar. Eine Berücksichtigung dieser Effekte würde aber die Komplexität der Methode deutlich steigern. Neben der Information der Gleislageabweichungen müssten die örtlichen Profilkfunktionen der Schiene ermittelt und mit der jeweiligen Einbauneigung der Schiene, der Radprofile und der Spurweite kombiniert werden bzw. daraus die äquivalente Konizität berechnet werden. Auf Basis dieser müssten für die jeweiligen (sehr kleinen) Auswertungsabschnitte die nach der

äquivalenten Konizität klassifizierten Übertragungsfunktionen ausgewählt werden. In dieser Arbeit werden daher die Parameter der Berührgeometrie zwar berücksichtigt, jedoch als konstant angenommen. Diese Parameter sind die Rad/Schiene-Profilpaarung vom Typ S1002/UIC60, die Einbauneigung der Schienen von 1:40 und die Nennspurweite von  $g_0 = 1435$  mm.

Die in dieser Arbeit getroffene Einteilung der empirischen Übertragungsfunktionsklassen soll in erster Linie der Untersuchung der Methodik selbst dienen. Daher wurden die verwendeten Fahrzeugmodelle als sogenannte *Referenzfahrzeuge* ihrer Klassen angenommen, um so auch den Fehler auf Grund der Abweichungen innerhalb der Klassen zu minimieren. Es sei jedoch hier nochmals darauf hingewiesen, dass eine Berechnung einer repräsentativen Übertragungsfunktion für eine Fahrzeugklasse eine deutlich größere Anzahl von verschiedenen Fahrzeugtypen erfordern würde.

Für die sogenannte *Vorbereitungsphase* wurden die Klasseneinteilungen mit folgenden Bezeichnungen festgelegt:

- für das Fahrzeug mit *Lokomotive* und *Reisezugwagen*,
- für die Geschwindigkeit mit 80, 120, 160, 200, 300 km/h und
- für die Trassierung mit *Gerade*, *großer Bogen* (1900 m) und *kleiner Bogen* (450 m).

Aus der Kombination dieser Klassen wurden die empirischen Übertragungsfunktionen zwischen den jeweiligen Gleislageabweichungen und den Fahrzeugreaktionen berechnet. Für den Bogen wurden auf Grund der Definition der konstanten freien Seitenbeschleunigung nur die dazugehörigen Geschwindigkeiten verwendet.

## 4.8 Schätzung der Fahrzeugreaktionskräfte

Im ersten Teil der *Anwendungsphase* werden die Fahrzeugreaktionen geschätzt, welche auf Grund der zu bewertenden Gleislageabweichungen zu erwarten sind. Aus der Vorbereitungsphase stehen hierfür die komplexen empirischen Übertragungsfunktionen zur Berechnung der Radaufstandskraft  $Q$  für die vertikale Gleislagebewertung und zur Berechnung der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  für die laterale Gleislagebewertung zur Verfügung. Im zweiten Teil der Anwendungsphase werden die im Zeitbereich geschätzten Fahrzeugreaktionsgrößen zur Gleislagebewertung ausgewertet.

Die Ausgangsdaten der Anwendungsphase bilden die einzelnen Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen der zu bewertenden Strecke, diese sind

- die Abweichungen der Längshöhenlage  $z(s)$ ,
- die Abweichungen der Richtungslage  $y(s)$ , sowie
- die Abweichungen der Querhöhenlage  $\delta(s)$ .

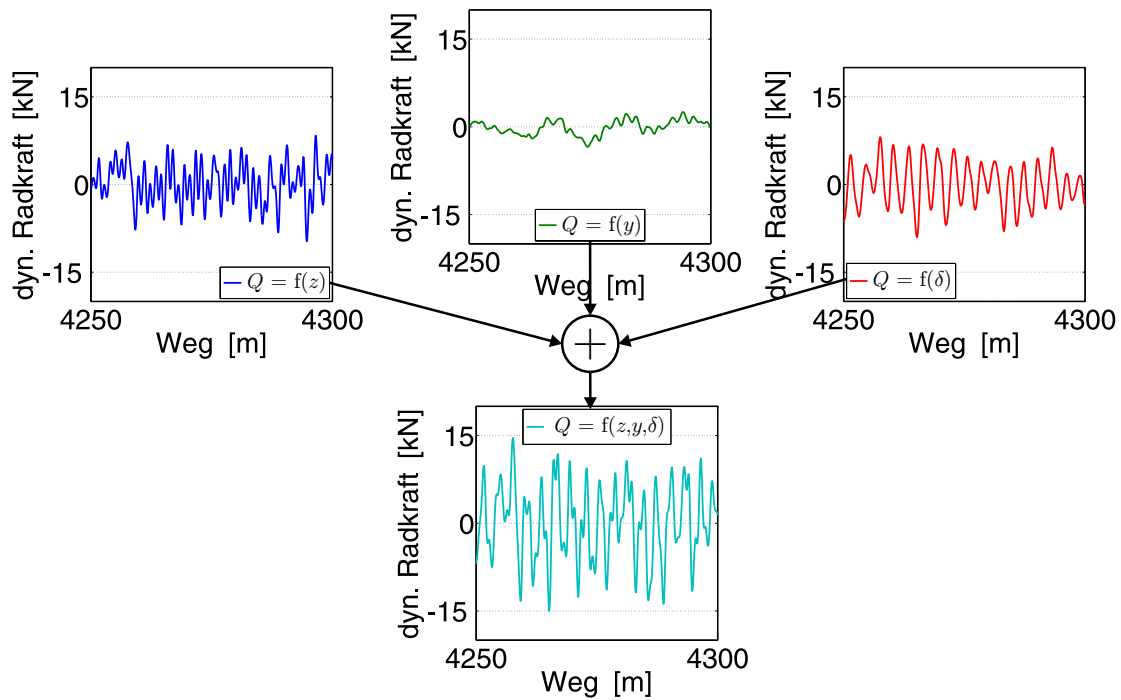
In Anlehnung an die EN 14363 werden die vorliegenden wegabhängigen Signale mit Hilfe eines Butterworth-Filters 4. Ordnung bandpassgefiltert. Die untere Eck-Wellenlänge wird mit  $L_u = 3$  m und die obere Eck-Wellenlänge mit  $L_o = 70$  m definiert. Anschließend werden die Daten der kompletten Strecke mit einem Tukey-Fenster gemäß Glg. (4.21) gefenstert und mittels der diskreten Fouriertransformation (DFT) entsprechend Glg. (3.12) in den Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich transformiert. Die daraus resultierenden komplexen Gleislagespektren sind eine Funktion der Wegfrequenz  $f_L = \frac{1}{L}$  und werden für die Längshöhenlage mit  $\hat{z}(\frac{1}{L})$ , für die Richtungslage mit  $\hat{y}(\frac{1}{L})$  und für die Querhöhenlage mit  $\hat{\delta}(\frac{1}{L})$  bezeichnet.

Für jedes Spektrum der Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen steht nun für die gewünschte Ausgangsgröße (Radaufstandskraft  $Q$ , Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$ ) und für die gewünschte Klasse (Fahrzeug, Geschwindigkeit, Trassierung) eine komplexe empirische Übertragungsfunktion zur Verfügung. Die Spektren der Gleislageabweichungen werden mit den interpolierten Übertragungsfunktionen multipliziert und mittels *inverser DFT (IDFT)* in den Wegbereich zurücktransformiert. Für jede Fahrzeugreaktionsgröße ( $V \dots vehicle\ response$ ) ergeben sich drei Komponenten ( $V_z(s), V_y(s)$  bzw.  $V_\delta(s)$ ), die jeweils eine Funktion der dazugehörigen Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen sind. Ein großer Vorteil dieser entwickelten Methode ist, dass sich die SISO-Komponenten der Fahrzeugreaktionen im Wegbereich analysieren lassen, um so z. B. für die Instandhaltung gezielte Maßnahmen hinsichtlich der Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen ableiten zu können. Die gesamte dynamische MISO-Fahrzeugreaktion ergibt sich näherungsweise durch Addition der drei Komponenten-Anteile. In Abb. 4.17 sind die SISO-Anteile und der sich daraus ergebende MISO-Anteil der Radaufstandskraft  $Q$  dargestellt. Aus dem gezeigten Beispiel ist ersichtlich, dass alle Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen einen entsprechenden Anteil zur gesamten geschätzten Fahrzeugreaktion beitragen. Diese Erkenntnis unterstreicht nochmals die Forderung, dass die Gleislageabweichungen kombiniert bewertet werden müssen.

Für den zweiten Teil der Anwendungsphase ist es notwendig, nicht nur den dynamischen Anteil, sondern auch den absoluten Anteil der Fahrzeugreaktion zu schätzen. Dies bedeutet, dass zum dynamischen Anteil noch der statische Anteil  $V_0(s)$  addiert werden muss, woraus sich die gesamte Fahrzeugreaktion ergibt mit

$$V(s) = V_0(s) + V_z(s) + V_y(s) + V_\delta(s). \quad (4.28)$$

Für die Radaufstandskraft  $Q$  wird diese Information aus der Vorbereitungsphase als *Offset-Wert*  $Q_0$  gemäß der statischen Gleichgewichtslage mitgeliefert. Die Problematik liegt jedoch bereits bei der Berechnung eines 'repräsentativen' Offset-Werts für die jeweilige Fahrzeug-Klasse, da die Fahrzeugtypen unterschiedliche Massen besitzen. Zur Minimierung des Fehlers wurde hier der Mittelwert der fahrzeugspezifischen Offset-Werte als „repräsentativ“ definiert. Für die einzelnen Szenarien im Bogen ergeben sich jeweils unterschiedliche quasistatische Zustände. Diese Zustände und die daraus resultierenden Offset-Werte werden nicht nur von der Fahrzeugmasse, sondern auch von



**Abbildung 4.17** Darstellung der dynamischen Radaufstandskraft  $Q_{\text{MISO}}$  und ihre Anteile  $Q_{\text{SISO}}$

der Fahrzeuggeschwindigkeit in Kombination mit den Bedingungen der Berührgeometrie beeinflusst. Aus diesem Grund wird auch für die Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  ein Offset-Wert  $\Sigma Y_0$  benötigt, der aus dem Mittelwert der szenarien-spezifischen Offset-Werte berechnet wird. Als Ergebnis des ersten Teils der Anwendungsphase stehen für die weitere Auswertung die absoluten Fahrzeugreaktionskräfte  $Q(s)$  und  $\Sigma Y(s)$  für alle Klassen zur Verfügung.

## 4.9 Auswertung der Fahrzeugreaktionskräfte

Auf Basis der geschätzten Fahrzeugreaktionen im Wegbereich werden im zweiten Teil der Anwendungsphase Größen für die Bewertung der Gleislageabweichungen abgeleitet. Hierfür werden die geschätzten Fahrzeugreaktionen aus der Berechnung als Messsignal einer fahrtechnischen Zulassung entsprechend der EN 14363 betrachtet und dementsprechend ausgewertet. Die Bedingungen für die Behandlung von Messsignalen der EN 14363 sind in [46] – S 71 – Tab.12 dargestellt. Die Bewertung der Gleislageabweichungen erfolgt bei der TGA-Methode anhand der Auswertung und Beurteilung der vertikalen Fahrzeugreaktion (Radaufstandskraft  $Q$ ) hinsichtlich Fahrwegbeanspruchung und der lateralen Fahrzeugreaktion (Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$ ) hinsichtlich Fahrsicherheit.

Der erste Schritt dieser Auswertung ist eine Bandpass-Filterung der Fahrzeugreaktions-Signale im Wellenlängenbereich zwischen 3 und 70 m, da die Beurteilung der Gleislageabweichungen in diesem Bereich erfolgen soll. In der EN 14363 ist für die Auswertung der Fahrzeugreaktions-Signale ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 20 Hz angegeben. Dies bedeutet für die TGA-Methode, dass die untere Eckwellenlänge des Bandpassfilters  $L_u$  bei Geschwindigkeiten über 216 km/h entsprechend  $L_u(v) = v/20$  zu erhöhen ist. Im nächsten Schritt wird für die Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  ein gleitendes Mittelwert-Verfahren durchgeführt, wobei die Mittelungslänge 2 m beträgt. Die Fortschrittswellenlänge entspricht der Samplingschrittweite  $\Delta s$  der zu bewertenden Gleislageabweichungen. Dieser Wert (üblicherweise 0,25 m) weicht zwar im Allgemeinen geringfügig von jenem in der EN 14363 angegebenen Wert von 0,5 m ab, bietet dadurch jedoch zwei Vorteile. Zum einen kann ein schneller Mittelwert-Filter für das Verfahren angewendet werden und zum anderen steht für jeden Sampling-Punkt der Gleislageabweichungen ein Beurteilungswert zur Verfügung.

In Anlehnung an die Methodik zur Beurteilung von Gleislageabweichungen nach Qualitätsniveaus (siehe Abschnitt 3.2.2) wird die zu bewertende Strecke in Auswertungsabschnitte mit einer Länge von je  $L_{AA} = 250$  m unterteilt. Zur Vereinfachung des Bewertungsverfahrens wird diese Länge im Vergleich zur EN 14363 unabhängig von der Geschwindigkeit und Trassierung konstant gehalten, wobei die TGA-Methode bei Bedarf auf eine variable Länge der Auswertungsabschnitte angepasst werden könnte. Innerhalb jedes Abschnitts werden zur Berechnung der maximalen Fahrzeugreaktionen ( $V_{\max}$ ) aus den vorbehandelten Größen der Radaufstandskraft  $Q$  die 99,85 % Perzentil-Werte und aus der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  die 0,15 % und 99,85 % Perzentil-Werte ermittelt. Diese Werte werden im Weiteren mit  $Q_{\max}$  bzw.  $\Sigma Y_{\max}$  bezeichnet.

Die Grenzen der maximalen Fahrzeugreaktionen ( $V_{\max, \lim}$ ) sind für die Fahrwegbeanspruchung in [46] – S 54 und für die Fahrsicherheit in [46] – S 51 definiert. Die maximale Radaufstandskraft  $Q_{\max, \lim}$  ergibt sich demnach mit

$$Q_{\max, \lim} = 90 \cdot 10^3 + Q_0, \quad (4.29)$$

wobei die Werte in Abhängigkeit von der Maximalgeschwindigkeit begrenzt sind. Die maximale Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{\max, \lim}$  wird berechnet mit

$$\Sigma Y_{\max, \lim} = k_1 * (10 \cdot 10^3 + \frac{2}{3} \cdot Q_0), \quad (4.30)$$

wobei der Faktor  $k_1$  für die Fahrzeugklassen Lokomotiven, Triebwagen und Reisezugwagen gleich 1 und für Güterwagen gleich 0,85 ist. Der Vorteil der Verwendung von Grenzwerten aus der EN 14363 ist, dass diese bereits für die jeweiligen Zielkriterien (Fahrwegbeanspruchung und Fahrsicherheit) als relevant definiert und hierfür ausreichend untersucht wurden. Das Verhältnis der Maximalwerte der Fahrzeugreaktionen zu diesen Grenzwerten wird als sogenannter *Ausnutzungsgrad* (*UL . . . utilization level*) bezeichnet und berechnet mit

$$UL_V = \frac{V_{\max}}{V_{\max, \lim}} \cdot 100\%. \quad (4.31)$$



Für die Bewertung der Gleislageabweichungen hinsichtlich Ableitung örtlicher Instandhaltungsmaßnahmen können die Werte des Ausnutzungsgrades auch kontinuierlich berechnet werden. Hierfür werden nicht die 99,85 % Perzentil-Werte der Auswertungsabschnitte, sondern direkt die vorbehandelten Fahrzeugreaktionsgrößen (gefilterte Radaufstandskraft  $Q$  und die gleitenden Mittelwerte der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$ ) herangezogen und das Verhältnis zu den Grenzwerten berechnet.

Die TGA-Methode bietet darüber hinaus für die Bewertung der Gleislageabweichungen die Möglichkeit, einen sogenannten *Dynamikfaktor*  $K_{\text{dyn}}$  zu berechnen. Dieser beschreibt das Verhältnis des dynamischen Anteils der Beurteilungsgröße zu einer (quasistatischen) Bezugsgröße. Für eine kontinuierliche Beurteilung hinsichtlich Vertikaldynamik entlang der Wegkoordinate  $s$  ergibt sich die Berechnung des Dynamikfaktors mit

$$K_{\text{dyn},Q}(s) = \frac{|Q(s) - Q_0|}{Q_0} \cdot 100\% , \quad (4.32)$$

wobei dieser dem Verhältnis des dynamischen Anteils zum quasistatischen Anteil der Radaufstandskraft  $Q$  entspricht. Überschreitet der dynamische Anteil der Radaufstandskraft  $Q$  den statischen Anteil, so würde sich daraus ein Dynamikfaktor  $K_{\text{dyn},Q}$  von über 100 % ergeben und dies würde wiederum ein Abheben des Rades zur Folge haben. Für eine Beurteilung der Gleislageabweichungen hinsichtlich Lateraldynamik wird der dynamische Anteil der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  ausgewertet. Da im Allgemeinen hier der quasistatische Anteil  $\Sigma Y_0$  in der Geraden relativ klein ist, kann als Bezugsgröße ebenfalls der quasistatische Anteil der Radaufstandskraft  $Q$  herangezogen und der Dynamikfaktor berechnet werden mit

$$K_{\text{dyn},\Sigma Y}(s) = \frac{|\Sigma Y(s) - \Sigma Y_0|}{Q_0} \cdot 100\% . \quad (4.33)$$

Für eine Klassifizierung der Gleislageabweichungen können im letzten Schritt dieser Bewertungs-Methode Klassengrenzen für den (abschnittsbezogenen oder kontinuierlichen) Ausnutzungsgrad bzw. für den Dynamikfaktor definiert werden. Es besteht daher für die Fahrzeughersteller hinsichtlich Interoperabilität und für die Betreiber hinsichtlich Instandhaltung die Möglichkeit, die Grenzen je nach Bedarf und Erfahrung festzulegen. Als Ergebnis der TGA-Methode stehen somit Qualitätsklassen von Gleislageabweichungen zur Verfügung, die einen direkten Zusammenhang mit den zu erwartenden Fahrzeugreaktionen aufweisen.

# 5 Ergebnisse der Gleislagebewertungsmethode

## 5.1 Überblick über den Prozess der Ergebnisanalyse

Die Ausgangsgrößen der in dieser Arbeit entwickelten TGA-Methode sind geschätzte Fahrzeugreaktionen im Wegbereich, die auf Grund der zu beurteilenden Gleislageabweichungen in Kombination mit den jeweiligen Versuchsbedingungen der Klassen zu erwarten sind. Als Ergebnis stehen neben den Wegverläufen der Fahrzeugreaktionen  $V_{\text{TGA}}(s)$  auch die Maximalwerte der Auswertungsabschnitte  $V_{\text{max,TGA}}(s)$  zur Verfügung, welche in weiterer Folge zur Beurteilung der Qualität der Gleislageabweichungen herangezogen werden. In den folgenden Abschnitten soll die Frage beantwortet werden, wie gut der Zusammenhang der Beurteilungsgrößen zwischen der TGA-Methode und den sogenannten *Referenz-Fahrzeugreaktionen* im Vergleich zum Zusammenhang zwischen den Beurteilungsgrößen der bisherigen Bewertungs-Methode aus der Europäischen Norm und den Referenz-Fahrzeugreaktionen ist. Der Vorgang für diese Vergleiche ist in Abb. 5.1 im Überblick dargestellt.

Als Basis für die Vergleiche der Ergebnisse wurden ausgewählte Strecken des europäischen Netzes mit gemessenen Gleislageabweichungen verwendet und die drei Beschreibungsparameter Längshöhenlage  $z(s)$ , Richtungslage  $y(s)$  und Querhöhenlage  $\delta(s)$  herangezogen. Die auf Grund dieser Abweichungen zu erwartenden Fahrzeugreaktionen wurden anhand der TGA-Methode entsprechend der Anwendungsphase, wie in Abschnitt 4.8 beschrieben, für unterschiedliche Klassen berechnet. Für die Analysen wurden jeweils hinsichtlich der resultierenden Vertikaldynamik die Radaufstandskraft  $Q_{\text{TGA}}(s)$  und für die Lateraldynamik die Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{\text{TGA}}(s)$  geschätzt. Anschließend wurden die Strecken in Auswertungsabschnitte unterteilt und die Maximalwerte berechnet. Wie in Abschnitt 4.9 erwähnt, werden in dieser Arbeit als Maximalwerte die 99,85 % Perzentil-Werte der Radaufstandskraft  $Q$  und die absoluten Größtwerte der 0,15 % Perzentil- bzw. 99,85 % Perzentil-Werte der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  bezeichnet.

Auf Grund der Tatsache, dass für die vorhandenen Streckenabschnitte keine dazugehörigen gemessenen Fahrzeugreaktionen zur Verfügung standen, wurden hierfür sogenannte *MKS-Referenzsimulationen* durchgeführt. Ein entscheidender Vorteil von MKS-Referenzsimulationen ist, dass die bei Messungen teilweise nur schwer bzw. aufwändig messbaren Einflussparameter wie Oberbaueigenschaften, Rad/Schiene-Profile, Rad/Schiene-Kontaktbedingungen usw. in der Simulation genau definiert

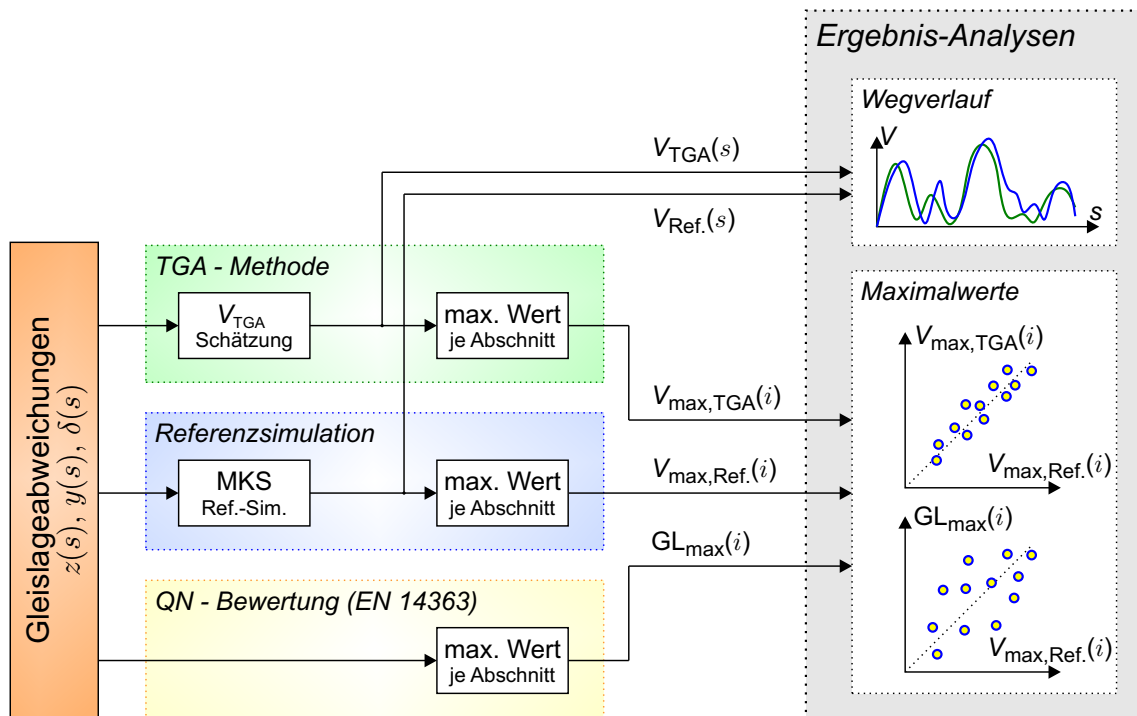


Abbildung 5.1 Überblick über den Vorgang zum Vergleich der Ergebnisse

werden können. Damit ist auch eine Reproduzierbarkeit der Analysen gegeben. Die verwendeten Fahrzeugmodelle des Reisezugwagens und der Lokomotive ist in Abschnitt 4.4 detailliert beschrieben. Die Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen wurden sowohl einzeln für die SISO-Simulationen, als auch kombiniert für die MISO-Simulationen als Anregungsgrößen aufgebracht. Die Variationsparameter der MKS-Simulationen (Fahrzeugmodell, Fahrzeuggeschwindigkeit und Trassierung) wurden entsprechend der jeweils zu untersuchenden Klasse gewählt. Als Ausgangsgröße der Simulationen ergeben sich die Referenz-Fahrzeugreaktionen, wobei hier wiederum die Radaufstandskraft  $Q_{Ref.}(s)$  und die Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{max,Ref.}(i)$  bzw. die jeweiligen Abschnittsmaximalwerte  $Q_{max,Ref.}(i)$  und  $\Sigma Y_{max,Ref.}(i)$  für den weiteren Vergleich der Ergebnisse berechnet wurden.

Für den Vergleich mit den bisherigen Bewertungs-Methoden aus den Europäischen Normen wurde die QN-Bewertung herangezogen (siehe Abschnitt 3.2.2). Hierfür wurden für jeden  $i$ -ten Auswertungsabschnitt die Maximalwerte der vorbehandelten Gleislageabweichungen  $GL_{max}(i)$  der Längshöhenlage  $z_{max}(i)$  und der Richtungslage  $y_{max}(i)$  berechnet. Ein Vergleich der klassifizierten Beurteilungsgrößen wird erst im nächsten Kapitel durchgeführt, da in den folgenden Abschnitten zuerst die grundsätzliche Frage des Zusammenhangs der Beurteilungsgrößen geklärt werden soll.

Die Ergebnisse der TGA-Methode wurden durch Vergleiche

- der Zeitverläufe der geschätzten und simulierten Fahrzeugreaktionen,

- der Orte der Maximalwerte aller Größen innerhalb der Auswertungsabschnitte,
- der Streudiagramme der Abschnittsmaximalwerte und
- der Eigenschaften der Streuungen der Punktwolken hinsichtlich linearer Korrelation analysiert.

Ein Beispiel dieser Vergleiche wird in Abschnitt 3.3.1 für die Analyse der bisherigen Bewertungsgrößen aktueller Methoden gezeigt. Im folgenden Abschnitt soll der Vergleich der Ergebnisse mittels Streudiagramm detaillierter beschrieben werden, da aus dieser Darstellungsform sehr gut der Zusammenhang der Beurteilungsgrößen analysiert und entsprechende Fragestellungen beantwortet werden können.

## 5.2 Methodik der Ergebnisanalyse

Die Beurteilungsgrößen der TGA-Methode sind Maximalwerte der geschätzten Fahrzeugreaktionen. Diese Größen werden in der Analyse der Ergebnisse mit den entsprechend der EN 14363 ausgewerteten Beurteilungsgrößen (ebenfalls Maximalwerte) der Fahrzeugreaktionen von Referenzsimulationen verglichen. Hierfür werden für jeden  $i$ -ten Abschnitt die  $xy$ -Wertepaare der Maximalwerte mit  $(V_{\max, \text{Ref.}}(i), V_{\max, \text{TGA}}(i))$  gebildet, wobei  $i = 1 \dots N$  und die Teststrecke in  $N$  Auswertungsabschnitte unterteilt ist. Der lineare Zusammenhang dieser beiden Beurteilungsgrößen kann mit Hilfe des empirischen Korrelationskoeffizienten  $r_{xy}$  bestimmt werden mit

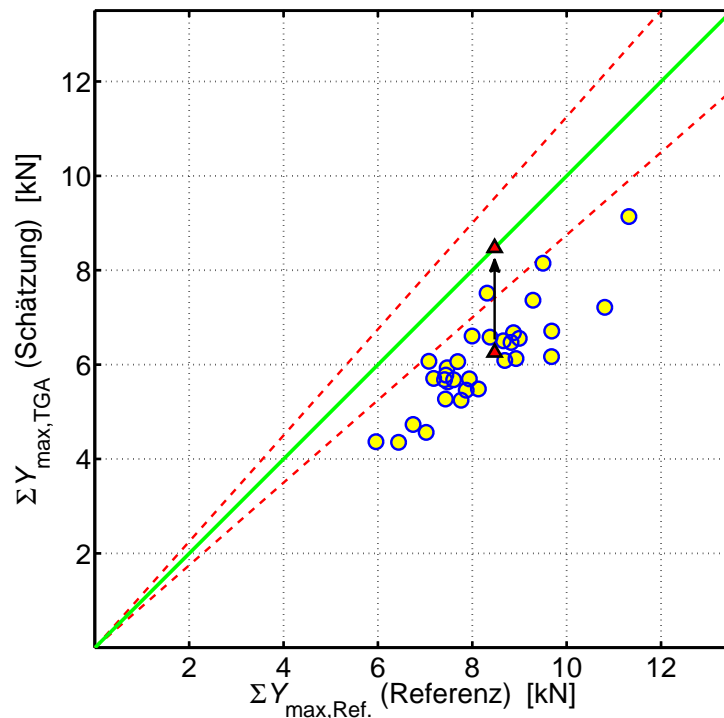
$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5.1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{und} \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (5.2)$$

wobei  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  die arithmetischen Mittelwerte der jeweiligen Beurteilungsgrößen sind. Mathematisch gesehen ist der Korrelationskoeffizient die Kovarianz zwischen den beiden Größen, normiert auf ihre Standardabweichungen. Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten ist  $-1 \leq r_{xy} \leq +1$ , wobei ein Wert um 0 keinen linearen Zusammenhang darstellt und der Betragswert von 1 eine vollständige lineare Korrelation repräsentiert. Bei den Untersuchungen der Beurteilungsgrößen ist ein möglichst hoher positiver Korrelationskoeffizient erwünscht.

Ein Korrelationskoeffizient von 1 bedeutet jedoch noch nicht, dass hiermit der gewünschte Zusammenhang der Beurteilungsgrößen erfüllt wird. Es kann sich z. B. auch bei einer stark unterproportionalen Regressionsgeraden, die auch nicht durch den Ursprung verlaufen muss, ein Wert von 1 ergeben. Für eine detailliertere Analyse wird daher bei diesen Untersuchungen das sogenannte *Streudiagramm* verwendet. Hierfür werden die Wertepaare in einem Diagramm aufgetragen, wobei aus dieser Punktwolke

der optische Zusammenhang der Größen auf Basis der Streuung der Punkte gut ermittelt werden kann. Ein weiterer Vorteil des Streudiagramms ist, dass Ausreißer im Datensatz sehr einfach identifiziert werden können, sodass daraus wiederum die Ursache dieser Abweichung innerhalb des jeweiligen Auswertungsabschnittes untersucht werden kann. Ein Beispiel für ein Streudiagramm zur Analyse des Zusammenhangs zwischen den Maximalwerten der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{\max}(i)$  ist in Abb. 5.2 dargestellt.



**Abbildung 5.2** Beispiel eines Streudiagramms zur Analyse der Maximalwerte der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{\max}(i)$

Die Wertepaare  $(\Sigma Y_{\max,\text{Ref.}}(i), \Sigma Y_{\max,\text{TGA}}(i))$  aller Auswertungsabschnitte sind im gezeigten Streudiagramm mit gelben Kreisen gekennzeichnet. Es ist erkennbar, dass der Zusammenhang der Beurteilungsgrößen in diesem Beispiel leicht unterproportional ist. Bei den folgenden Untersuchungen soll jedoch schwerpunktmäßig die Streuung der Beurteilungsgrößen analysiert werden, da diese im Gegensatz zu einer faktoriellen Abweichung nicht mit einem einfachen Faktor durch Optimierung der TGA-Methode korrigiert werden kann. Aus diesem Grund werden die Wertepaare optisch dahingehend korrigiert (bzw. normiert), dass der Schwerpunkt der Punktwolke auf der durch den Ursprung verlaufenden direkten Proportionalitätsgeraden mit der Steigung 1 (durchgezogene grüne Linie) abgebildet wird. Der empirische Schwerpunkt der Punktwolke (kleines rotes Dreieck) ergibt sich aus den empirischen Mittelwerten und entspricht dem Wertepaar  $(\bar{x}, \bar{y})$ . Die Verschiebung des Schwerpunktes (graphisch durch einen

schwarzen Pfeil dargestellt) entspricht einer Normierung der  $y$ -Werte mit dem Normierungsfaktor  $k_{\bar{x}\bar{y}}$ , woraus sich die optisch korrigierten Wertepaare ergeben mit

$$(x_i, y_i^*) = (x_i, y_i \cdot k_{\bar{x}\bar{y}}), \quad k_{\bar{x}\bar{y}} = \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad \text{und} \quad i = 1 \dots N. \quad (5.3)$$

Im gezeigten Beispiel ist dieser Normierungsfaktor  $k_{\bar{x}\bar{y}} = 1,35$  und auf Grund derselben Einheit der Beurteilungsgrößen dimensionslos. Für die Analyse der Streuung der korrigierten Wertepaare sind noch zwei Hilfslinien (strichlierte rote Linien) im Diagramm eingezeichnet, die die willkürlich gewählten Grenzen der  $\pm 15\%$  Abweichungen der Werte von der Geraden mit der Steigung 1 repräsentieren. Somit können die Ergebnisse auch mit jenen der weiteren Streudiagramme sehr einfach optisch verglichen werden.

Neben den Beurteilungsgrößen der TGA-Methode sollen auch die Beurteilungsgrößen der QN-Bewertung mit jenen aus den Referenzsimulationen verglichen werden. Hierfür werden ebenfalls die Maximalwerte zu Wertepaaren ( $V_{\max, \text{Ref.}}(i)$ ,  $GL_{\max, \text{TGA}}(i)$ ) für jeden Auswertungsabschnitt zusammengefasst und in einem Streudiagramm dargestellt. Die zuvor beschriebene Vorgehensweise der Normierung der Werte kann auch hier bei zwei verschiedenen physikalischen Größen angewendet werden. Der Normierungsfaktor ist in diesem Fall zwar nicht mehr dimensionslos, jedoch werden die Werte der Gleislageabweichungen (Ordinate) nach der Korrektur trotzdem mit den ursprünglichen Einheiten (mm) beschriftet. Dies ermöglicht somit, dass die Streubilder der Gleislageabweichungen und die Ergebnisse der TGA-Methode sehr leicht direkt miteinander verglichen werden können.

### 5.3 Vertikaldynamik

Für die Analyse der auf Grund der Gleislageabweichungen zu erwartenden Vertikaldynamik des Fahrzeug/Fahrweg-Systems wird der Zeitverlauf der Radaufstandskraft  $Q_{\text{TGA}}(s)$  ermittelt. Aus diesem werden für jeden Auswertungsabschnitt die Maximalwerte  $Q_{\max, \text{TGA}}(i)$  berechnet und analysiert. Zur Ermittlung der Referenz-Fahrzeugreaktionen wurde das MKS-Modell der Lokomotive (siehe Abschnitt 4.4) verwendet und der Verlauf der Radaufstandskraft  $Q_{\text{Ref.}}(s)$  für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 160$  km/h berechnet. Im ersten Schritt wurde die Simulation für die Ermittlung der SISO-Fahrzeugreaktionen nur mit einer Anregungsgröße, nämlich der gemessenen Abweichungen der Längshöhenlage  $z(s)$ , durchgeführt. Anschließend wurde dieselbe Simulation jedoch gleichzeitig mit allen Anregungsgrößen (Längshöhenlage  $z(s)$ , Richtungslage  $y(s)$ , Querhöhenlage  $\delta(s)$ ) wiederholt, woraus sich die Fahrzeugreaktionen für das MISO-System ergaben.

Der Vergleich der Ergebnisse des mit der TGA-Methode geschätzten SISO-Anteils der Radaufstandskraft  $Q_{z, \text{TGA}}(s)$  mit der Radaufstandskraft aus der SISO MKS-Referenzsimulation  $Q_{z, \text{Ref.}}(s)$  hatte gezeigt, dass diese beiden Größen nahezu vollständig übereinstimmen. Eine Begründung hierfür liegt darin, dass der Einfluss der

geometrischen Nichtlinearität des Rad/Schiene-Kontakts durch die rein vertikale Anregung des Systems zu vernachlässigen ist. Zusätzlich wirken in vertikaler Richtung im Fahrzeug selbst keine stark nichtlinearen Elemente. Daraus folgt auch, dass die Wertepaare der Beurteilungsgrößen ( $Q_{z,\max,dyn,TGA}(i)$ ,  $Q_{z,\max,dyn,Ref.}(i)$ ) nur minimal von der durch den Ursprung verlaufenden direkten Proportionalitätsgeraden abweichen.

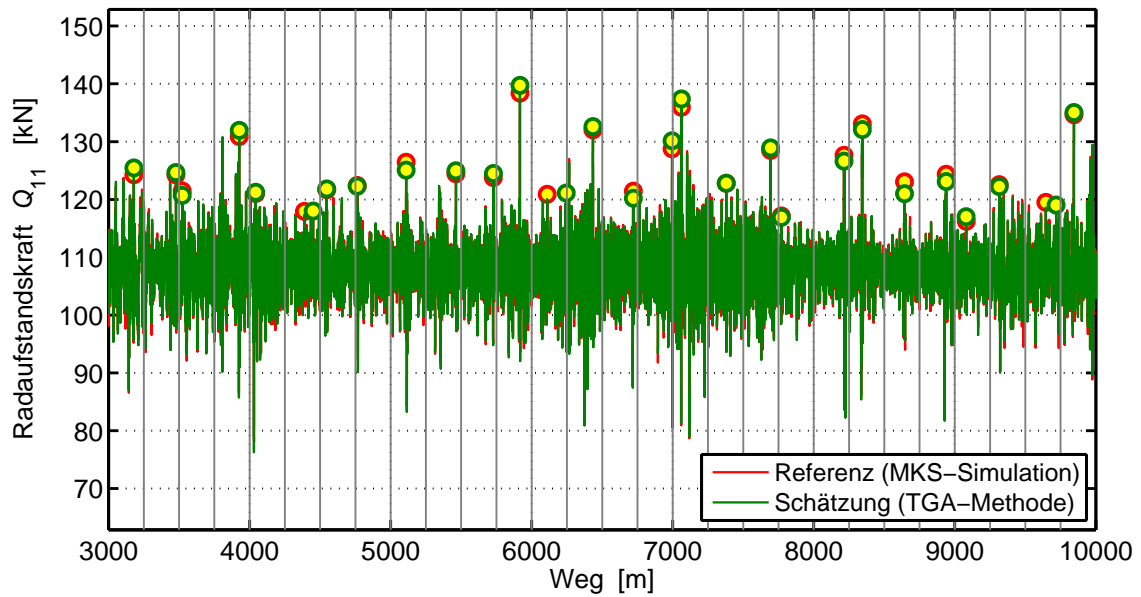
Im folgenden Abschnitt 5.3.1 sollen die Ergebnisse der MISO-Betrachtung des Systems dargestellt und die vertikalen Fahrzeugreaktionen analysiert werden. Eine Untersuchung des Fahrzeugeinflusses auf die in der TGA-Methode verwendeten repräsentativen empirischen Übertragungsfunktionen wurde in Abschnitt 4.7.2 durchgeführt und daher soll basierend auf diesen Überlegungen in Abschnitt 5.3.2 der Einfluss von abweichenden Übertragungsfunktionen auf die Ergebnisse der Beurteilungsgrößen analysiert werden. Hierbei sollen die sich daraus ergebenden Abweichungen mit jenen der bisherigen Beurteilungsmethode der Norm verglichen werden.

### 5.3.1 Vertikale Radaufstandskraft als MISO-Reaktion

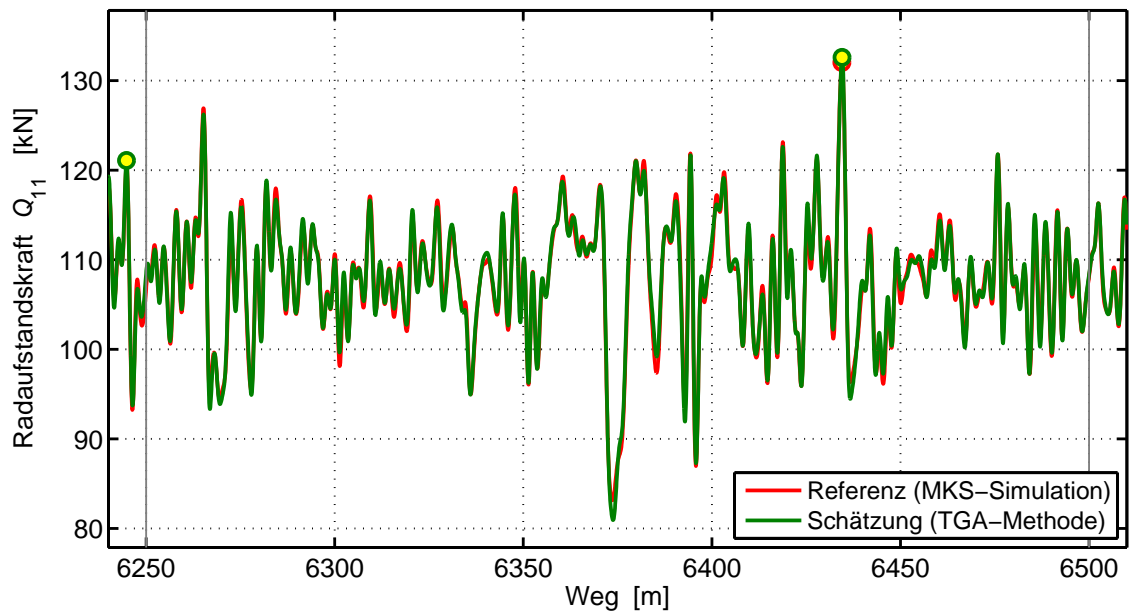
Die mit der TGA-Methode geschätzte vertikale Radaufstandskraft  $Q_{TGA}(s)$  ergibt sich durch die Addition ihrer SISO-Komponenten. Dies bedeutet für das konkrete Beispiel, dass die Radaufstandskraft des rechten Rades am ersten Radsatz  $Q_{11}(s)$  eine Fahrzeugreaktion auf Grund der Abweichungen aller Beschreibungsparameter der Gleislage darstellt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die SISO-Komponenten der Fahrzeugreaktion, speziell der Einfluss der Querhöhenlage  $\delta$ , nicht zu vernachlässigen sind. Diese Komponenten ergeben somit eine deutlich höhere Fahrzeugreaktion im Vergleich zur reinen SISO-Fahrzeugreaktionsbetrachtung.

Der Verlauf der Radaufstandskraft  $Q_{11}(s)$  ist in Abb. 5.3a für die Schätzung mit der TGA-Methode als grüne Linie und für die Berechnung mittels Referenzsimulation als rote Linie für eine komplette Teststrecke von 7 km dargestellt. Die Grenzen der 250 m langen Auswertungsabschnitte sind mit vertikalen grauen Linien eingezeichnet. Innerhalb jedes Auswertungsabschnittes wurden für beide Fahrzeugreaktionen die Maximalwerte berechnet und als gelbe Kreise eingezeichnet. Für eine detaillierte Analyse ist in Abb. 5.3b der Wegverlauf für einen 250 m Auswertungsabschnitt vergrößert dargestellt. Es ist erkennbar, dass die beiden Verläufe auch bei kleineren Wellenlängen nahezu vollständig übereinstimmen. Daraus ergibt sich folglich auch eine hohe örtliche Übereinstimmung der Abschnittsmaximalwerte.

Vergleicht man nun die Maximalwerte aller Auswertungsabschnitte, so ergibt sich für die Analyse der Wertepaare ( $Q_{11,\max,dyn,TGA}(i)$ ,  $Q_{11,\max,dyn,Ref.}(i)$ ) das in Abb. 5.4a gezeigte Streudiagramm. Die Streuung der Werte ist zwar ein wenig größer als bei der SISO-Betrachtung, jedoch liegen alle Werte innerhalb der als strichlierte rote Linien dargestellten  $\pm 15\%$  Abweichungsgrenzen. Für den Vergleich mit der QN-Bewertung wurden im ersten Schritt die Korrelationskoeffizienten berechnet. Im gezeigten Beispiel ist der Korrelationskoeffizient der TGA-Methode  $r_{TGA \leftrightarrow Ref.} = 93\%$  und jener



a. Komplette Teststrecke



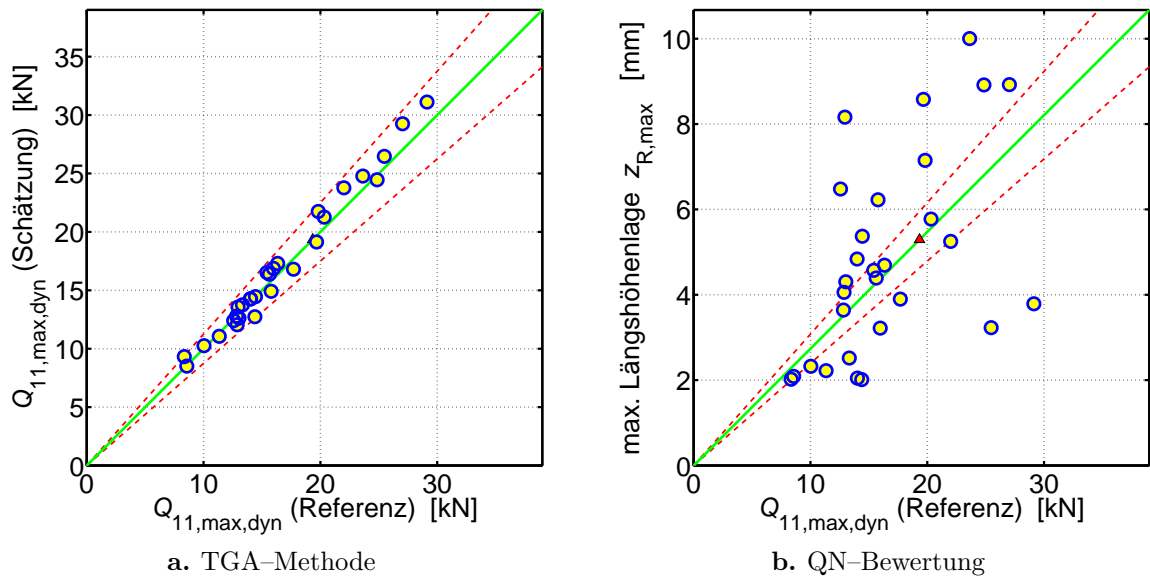
b. 250 m langer Auswertungsabschnitt der Teststrecke

**Abbildung 5.3** Verlauf der Radaufstandskraft  $Q_{11}$  mit den Maximalwerten der Auswertungsabschnitte

der QN-Bewertung  $r_{TGA \leftrightarrow Ref.} = 66 \%$ . Der relativ große Unterschied des linearen Zusammenhangs der Beurteilungsgrößen wird im Streudiagramm (siehe Abb. 5.4b) noch besser verdeutlicht. Wie in Abschnitt 3.3.1 bei der Analyse der Europäischen Normen dargestellt, ist auch in diesem Beispiel nahezu keine Korrelation der Beurteilungsgrößen zu erkennen. Vergleicht man letztendlich zwei ausgewählte Auswertungsabschnitte,



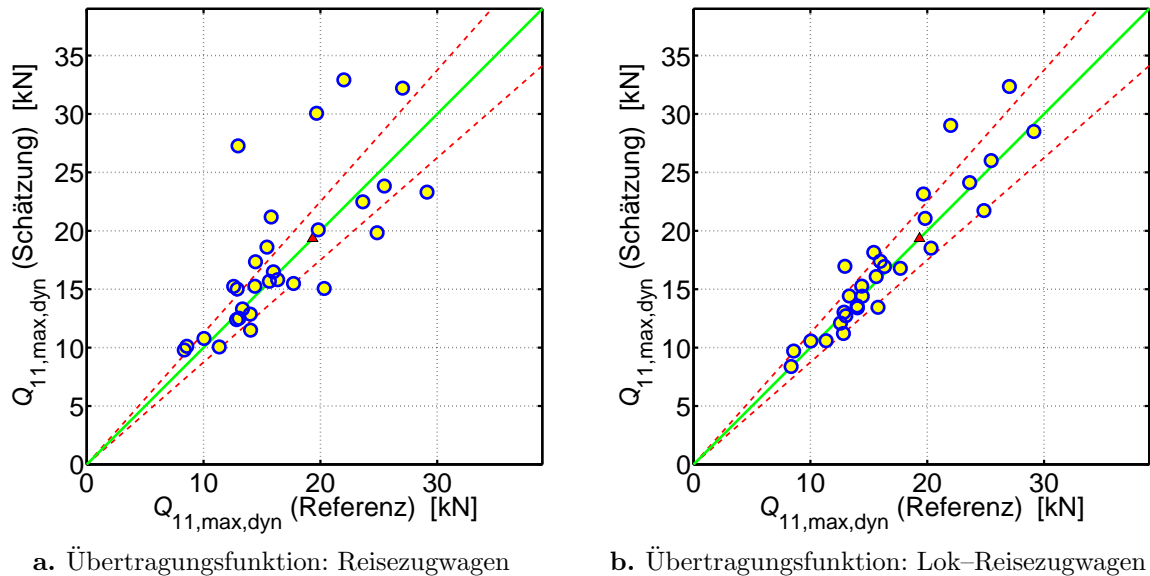
so ergibt sich im ersten bei einer Abweichung der Längshöhenlage von  $z_R = 3,8$  mm ein dynamischer Anteil der maximalen Radaufstandskraft von  $Q_{11,\max,\text{dyn,Ref.}} = 29$  kN und im zweiten bei einer über doppelt so großen Abweichung von  $z_R = 8,3$  mm ein nicht einmal halb so großer dynamischer Anteil der maximalen Radaufstandskraft von  $Q_{11,\max,\text{dyn,Ref.}} = 13$  kN.



**Abbildung 5.4** Vergleich der Maximalwerte der geschätzten Radaufstandskraft  $Q_{11,\max,\text{dyn}}$  und der Längshöhenlage  $z_{R,\max}$  mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation

### 5.3.2 Schätzung mit Übertragungsfunktionen verschiedener Fahrzeugtypen

Das Ziel bei den nachfolgenden Untersuchungen ist die Beantwortung der Frage, wie gut der Zusammenhang der Beurteilungsgrößen ist, wenn die bei der TGA-Methode verwendeten repräsentativen Übertragungsfunktionen vom Typ des Fahrzeugs der Referenzsimulation stark abweichen. Als Fahrzeugmodell für die MKS-Referenzsimulation wurde wie im vorherigen Beispiel die Lok1216 mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 160$  km/h verwendet. Für die Schätzung der Radaufstandskraft  $Q_{11,\text{TGA}}(s)$  wurden die repräsentativen Übertragungsfunktionen für den Reisezugwagen verwendet. Der Unterschied der Übertragungsfunktionen wurde für  $Q_{11}/z$  in Abschnitt 5.3.2 diskutiert und für die Längshöhenlage  $z$  als Anregungsgröße in Abb. 4.10 dargestellt. Die mit dem Reisezugwagen für die jeweiligen Auswertungsabschnitte geschätzten Maximalwerte der Radaufstandskraft werden mit den aus der Simulation mit dem Lokmodell ermittelten Maximalwerten verglichen und in Abb. 5.5a als Streudiagramm dargestellt.



**Abbildung 5.5** Schätzung der Maximalwerte der Radaufstandskraft  $Q_{11,\max,\text{dyn}}$  mit unterschiedlichen Fahrzeug-Übertragungsfunktionen

Die Streuung der Maximalwertpaare ist im gezeigten Vergleich bereits groß, wobei dies durch die deutliche Unterscheidung der Übertragungsfunktionen (fast im kompletten relevanten Wellenlängenbereich) zu erwarten war. Auf Grund der höheren Fahrzeugmasse der Lokomotive sind die (für einen Reisezugwagen) geschätzten vertikalen Fahrzeugreaktionen zu niedrig. Da jedoch bei der Darstellung der Punktwolken nur die Streuung der Beurteilungsgrößen untersucht und grafisch dargestellt werden soll, wurde diese Abweichung mit einem Normierungsfaktor von  $k_{\bar{x}\bar{y}} = 1,8$  bereits ausgeglichen. Vergleicht man nun die Streuung mit jener der QN-Bewertung (siehe Abb. 5.4b), so ist hier trotz der größeren Abweichungen ein besserer Zusammenhang der Beurteilungsgrößen erkennbar. Eine Begründung liegt darin, dass die zwei Fahrzeugtypen zwar große Abweichungen der geometrischen und physikalischen Parameter aufweisen, jedoch durch die Verwendung von Übertragungsfunktionen bei der TGA-Methode zumindest das grundsätzliche Fahrzeug/Fahrweg-Systemverhalten berücksichtigt wird.

Die TGA-Methode bietet auch die Möglichkeit, gemittelte repräsentative Übertragungsfunktionen von verschiedenen Fahrzeugtypen zu verwenden, sodass der Fehler innerhalb einer Fahrzeugklasse möglichst minimiert werden kann. Hierfür wurden die repräsentativen Übertragungsfunktionen der Lokomotive und des Reisezugwagens herangezogen und daraus die gemittelten Übertragungsfunktionen  $Q_{11}/z$ ,  $Q_{11}/y$  und  $Q_{11}/\delta$  berechnet. Mit diesen wurde die Radaufstandskraft  $Q$  geschätzt und die Auswertungsabschnitts-Maximalwerte der Fahrzeugreaktion ermittelt (siehe Abb. 5.5b). Es ist aus der Darstellung der Ergebnisse eine deutliche Verbesserung der Korrelation der Beurteilungsgrößen zu erkennen, wobei hier ebenfalls die zu niedrig geschätzten Werte mit einem Faktor von  $k_{\bar{x}\bar{y}} = 1,4$  normiert wurden.

Die Analysen der Ergebnisse mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen haben gezeigt, dass für eine möglichst genaue Schätzung der Fahrzeugreaktionen die verwendeten repräsentativen Übertragungsfunktionen für eine Fahrzeugklasse so wenig wie möglich von den unterschiedlichen Fahrzeugtypen innerhalb einer Klasse abweichen sollten. Im gezeigten Beispiel wurden zwar zwei Fahrzeugtypen unterschiedlicher Klassen verwendet, jedoch sind auch größere Abweichungen von Fahrzeugtypen innerhalb einer Klasse zu erwarten. Bei Bedarf sollte in diesem Fall die Fahrzeugklasse zumindest in zwei Unterklassen aufgeteilt werden.

## 5.4 Lateraldynamik

Die Analysen der Ergebnisse in Bezug auf das laterale Übertragungsverhalten wurden in gleicher Weise wie für die Vertikaldynamik durchgeführt. Aus den mit der TGA-Methode geschätzten Fahrzeugreaktionen (Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{TGA}(s)$ ) wurden die Maximalwerte  $\Sigma Y_{\max, TGA}(i)$  berechnet und mit den Ergebnissen der Referenz-Fahrzeugreaktionen verglichen. Bei den MKS-Referenzsimulationen wurde für die SISO-Basisuntersuchung die Richtungslage  $y$  als Anregungsgröße verwendet und für die MISO-Untersuchungen die Simulation kombiniert mit allen Beschreibungsparametern der Gleislageabweichungen wiederholt.

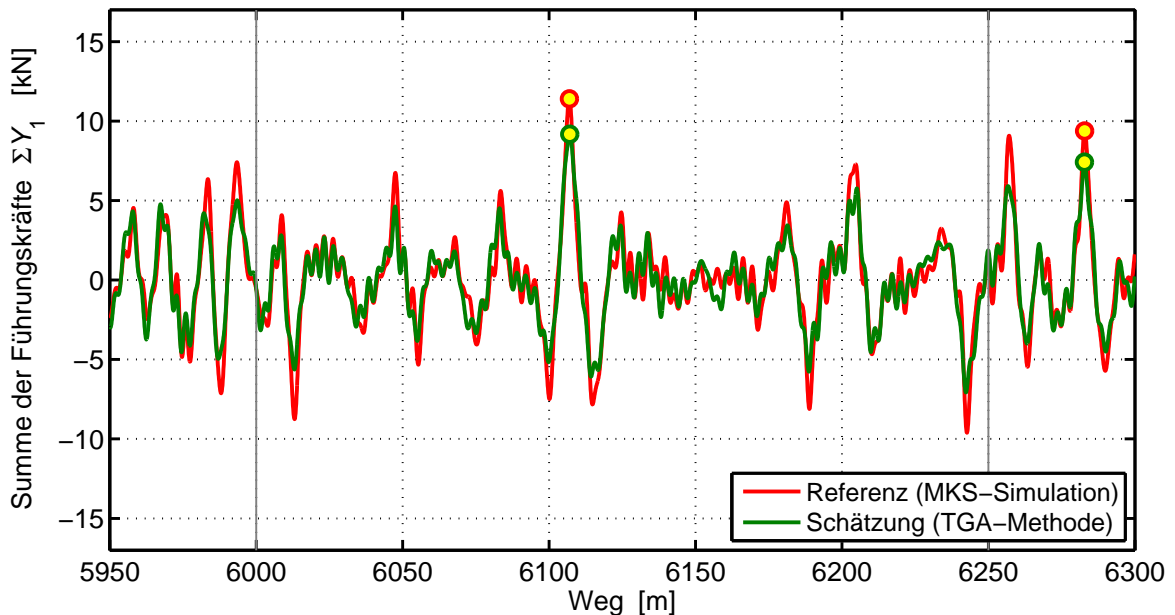
Die Untersuchungen der SISO-Ergebnisse zeigten beim Vergleich des Verlaufs zwischen  $\Sigma Y_{1, TGA}(s)$  und  $\Sigma Y_{1, Ref.}(s)$  grundsätzlich eine gute Übereinstimmung. Speziell bei großen Maximalwertspitzen wurde jedoch bei der TGA-Methode meist ein deutlich zu niedriger Spitzenwert geschätzt. Die Analysen der Dynamik des Fahrzeugs in der MKS-Simulation haben ergeben, dass dort auf Grund der starken lateralen Gleislageanregung ein Spurkranzanlauf aufgetreten ist. Diese starke Nichtlinearität in der Rad/Schiene-Kontaktgeometrie wirkt sich erheblich in der lateralen Komponente der Rad/Schiene-Fahrzeugreaktionskraft aus. Daraus ergibt sich wiederum ein hoher Maximalwert in der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{1, Ref.}(s)$ . Zusätzlich wird dieser Effekt noch auf Grund eines im MKS-Modell berücksichtigten Fertigungstoleranzspiels in der Radsatzführung verstärkt.

Wie im folgenden Abschnitt 5.4.1 im Detail dargestellt, tritt dieser Effekt bei der MISO-Betrachtung in einer deutlich abgeschwächten Form auf. Des Weiteren werden in Abschnitt 5.4.2 die Ergebnisse der TGA-Methode in zwei verschiedenen Bögen dargestellt und mit den Ergebnissen der bisherigen Beurteilungsmethode der Norm verglichen.

### 5.4.1 Summe der Führungskräfte als MISO-Reaktion

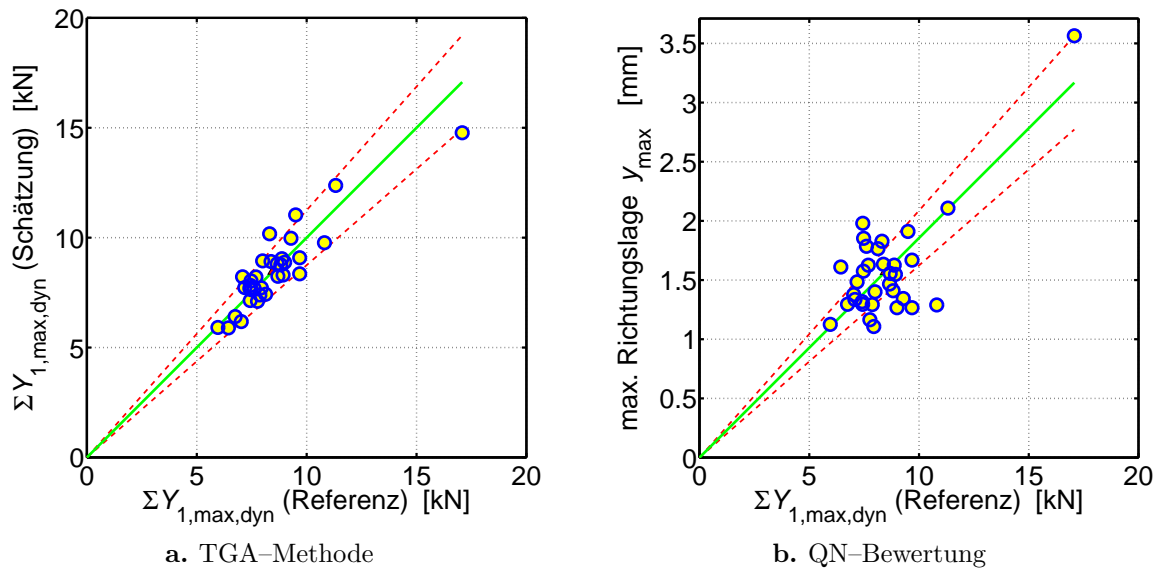
Bei der MISO-Betrachtung ergibt sich aus der Addition der einzelnen SISO-Komponenten die geschätzte Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_1(s)$  am ersten Radsatz. Der Verlauf dieser Größe ist für einen ausgewählten Auswertungsabschnitt in Abb. 5.6

dargestellt. Die Grenzen dieses Auswertungsabschnittes sind wiederum mit zwei vertikalen grauen Linien eingezeichnet und die Abschnittsmaximalwerte jeweils mit einem gelben Kreis gekennzeichnet. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Verlaufs der beiden Fahrzeugreaktionen, jedoch sind Abweichungen bei den Spitzenwerten zu erkennen. Diese Abweichungen sind zwar geringer als bei der SISO-Betrachtung, jedoch werden die Maximalwerte bei der TGA-Methode niedriger geschätzt. Es kann daraus geschlossen werden, dass die auf Grund der örtlich erhöhten Radsatzdynamik wirkenden Nichtlinearitäten auf die Spitzen einen entsprechenden Einfluss haben. Die grundsätzliche Dynamik des Fahrzeugs kann sehr gut geschätzt werden, da der Verlauf der Fahrzeugreaktion auch nach einer örtlich wirkenden Nichtlinearität wiederum weitgehend mit jenem der Referenzsimulation übereinstimmt.



**Abbildung 5.6** Verlauf der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_1$  mit den Abschnitts-Maximalwerten

Wenn die Abschnittsmaximalwerte der TGA-Methode  $\Sigma Y_{1,\max,\text{dyn},\text{TGA}}(i)$  im Vergleich zu jenen der Referenzsimulationen  $\Sigma Y_{1,\max,\text{dyn},\text{Ref.}}(i)$  um einen konstanten Faktor zu niedrig geschätzt werden würden, dann könnte diese Abweichung durch Optimierung der Methode stark verringert werden. Wie jedoch in Abb. 5.7a im Streudiagramm dargestellt, zeigt sich auch eine wesentlich höhere Streuung der Maximalwerte im Vergleich zu den Analyseergebnissen der Vertikaldynamik. Die mittlere Abweichung der Maximalwerte wurde bereits mit dem Normierungsfaktor von  $k_{\bar{x}\bar{y}} = 1,3$  berücksichtigt. Die Streuung der Maximalwerte ist jedoch verglichen mit jener in Abb. 5.7b gezeigten Streuung der QN-Bewertungsergebnisse noch immer deutlich geringer. Der Unterschied ist optisch dadurch zu erkennen, dass bei der TGA-Methode in diesem Beispiel erheblich weniger Maximalwertpaare außerhalb der  $\pm 15\%$  Abweichungslinie (strichlierte rote Linie) liegen.



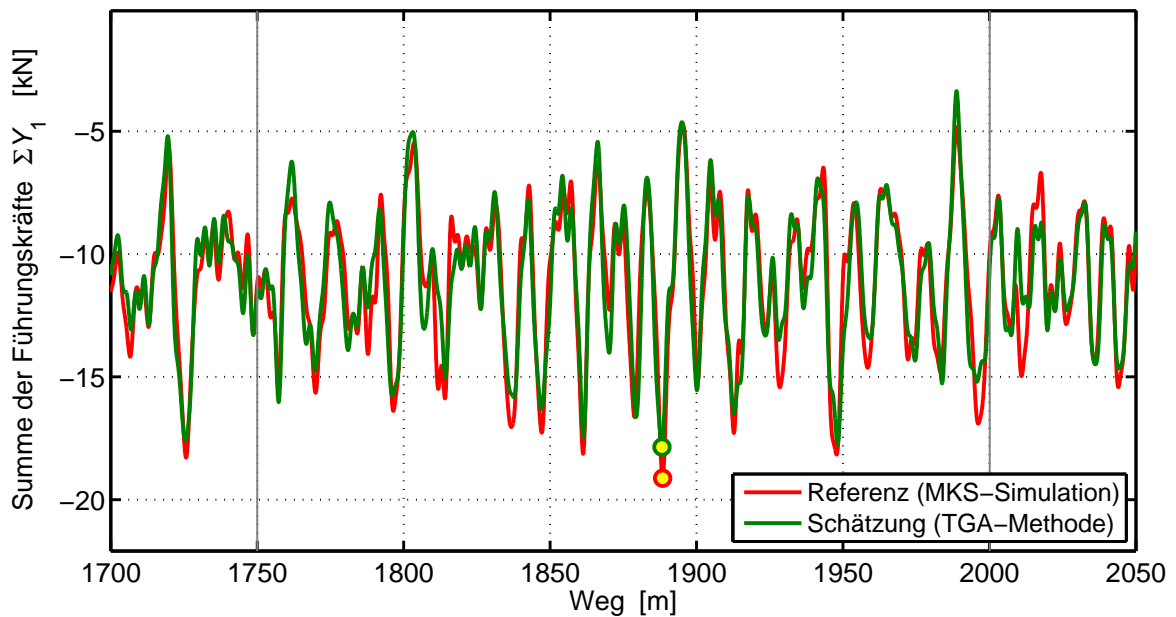
**Abbildung 5.7** Vergleich der Maximalwerte der vorherhergesagten Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{1,\max,\text{dyn}}$  und der Richtungslage  $y_{\max}$  mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation

### 5.4.2 Auswertung und Analyse im Bogen

Die Untersuchung der Ergebnisse der Lateraldynamik wurde auch für die geschätzte Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_1(s)$  im Bogen durchgeführt. Das grundsätzliche Übertragungsverhalten wurde in Abschnitt 4.7.4 für zwei unterschiedliche Bogenradien analysiert. In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der TGA-Methode mit den Referenzfahrzeugreaktionen verglichen werden. Die MKS-Simulationen wurden hierfür mit einem Lok-Modell in einem Rechts-Bogen durchgeführt. Für eine freie Seitenbeschleunigung von  $a_q = 1 \text{ m/s}^2$  und einer angenommenen Überhöhung von  $u = 15 \text{ cm}$  ergibt sich mit Glg. (4.27) eine Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 160 \text{ km/h}$  im  $R = 1900 \text{ m}$  Bogen und  $v = 107 \text{ km/h}$  im  $R = 450 \text{ m}$  Bogen.

Der Wegverlauf der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_1(s)$  am ersten Radsatz ist für den 1900-m-Bogen in Abb. 5.8 für einen ausgewählten Auswertungsabschnitt dargestellt. Es zeigt sich im Wegverlauf die entsprechend den Analysen des grundsätzlichen Übertragungsverhaltens gewonnene Erkenntnis, dass sich eine resultierende Dynamik in einem großen Bogen sehr ähnlich wie in der Geraden ergibt. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung des Verlaufs zu erkennen, wobei die Maximalwerte wiederum zu niedrig geschätzt wurden.

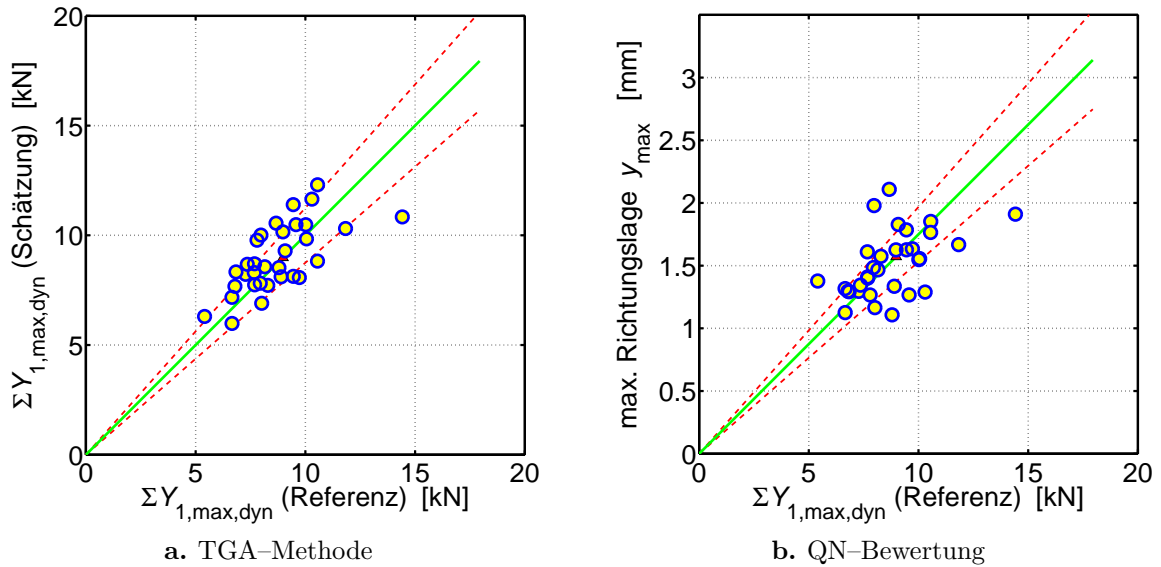
Die Streuung der in Abb. 5.9a dargestellten Maximalwerte im 1900-m-Bogen ist im Vergleich zur Streuung in der Geraden größer. Dies ist dadurch zu begründen, dass zur lateralen Dynamik des Radsatzes noch die Nichtlinearitäten auf Grund der unsymmetrischen Fahrzeugdynamik im Bogen hinzukommen. Die mittlere Abweichung der



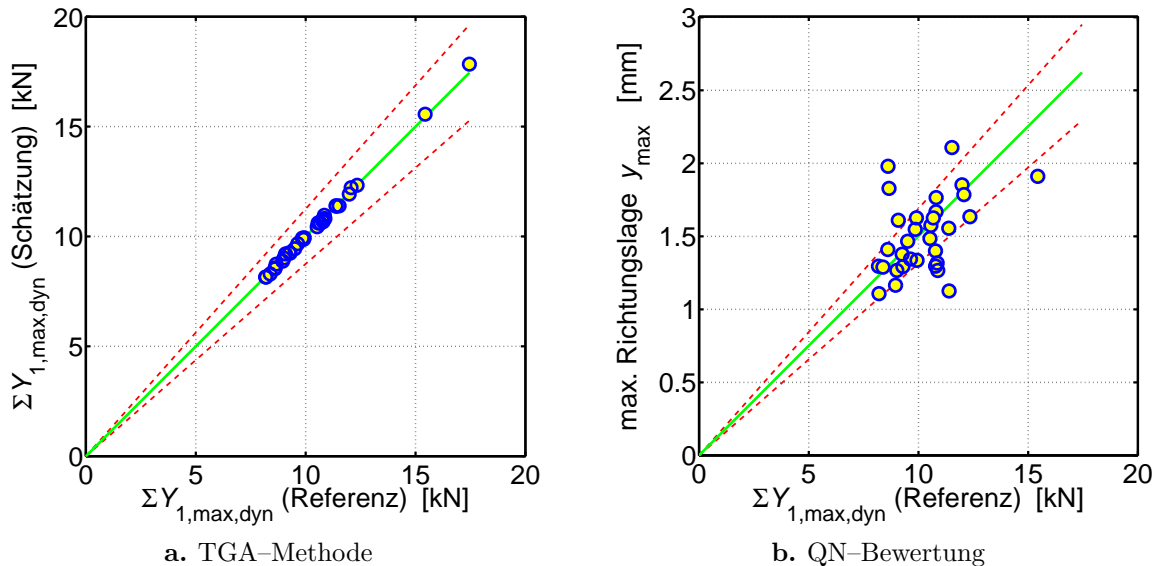
**Abbildung 5.8** Verlauf der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_1$  und Darstellung des Maximalwerts des Auswertungsabschnitts in einem 1900-m-Bogen

geschätzten Maximalwerte im Vergleich zu den Referenz-Maximalwerten wurde bereits mit dem Normierungsfaktor von  $k_{\bar{x}\bar{y}} = 1,16$  berücksichtigt, welcher im Vergleich zur Geraden geringer ist. In den aktuellen Bewertungsmethoden der Europäischen Normen wird die Trassierung bei der Beurteilung auf Basis von Maximalwerten in keiner Weise berücksichtigt. Daraus folgt, dass sich bei der QN-Bewertungsmethode, wie in Abb. 5.9a gezeigt, nahezu keine Korrelation der Maximalwerte im Bogen ergibt und diese somit trotz hoher Streuung bei der TGA-Methode signifikant höher ist.

Für die Untersuchung der Ergebnisse in einem engen Bogen ( $R = 450$  m) wurden die Maximalwertpaare in Abb. 5.10a dargestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Korrelation zwischen den mit der TGA-Methode geschätzten Maximalwerten und jenen aus der Referenz-Fahrzeugsimulation extrem hoch ist. Bei diesen Fahrzeug/Fahrweg-Szenarien befindet sich das Fahrzeug im sogenannten *Spießgang*. Dies bedeutet, dass kein Spurspiel mehr vorhanden ist und sich daraus nur eine sehr geringe freie Dynamik des Radsatzes ergibt. Eine Einschränkung der Dynamik führt zu einem sehr kleinen Variationsbereich der Zustände, woraus sich wiederum ein deutlich verringerter Einfluss der Nichtlinearitäten ergibt. Da dieses Verhalten bereits bei der Ermittlung der repräsentativen Übertragungsfunktionen der TGA-Methode berücksichtigt wurde, können die zu erwartenden Fahrzeugreaktionen mit einer hohen Genauigkeit geschätzt werden. Der Vergleich mit den Ergebnissen der QN-Bewertung (siehe Abb. 5.10b) zeigt auch hier die deutliche Überlegenheit der TGA-Methode gegenüber den aktuellen Bewertungsmethoden aus den Europäischen Normen.



**Abbildung 5.9** Vergleich der Maximalwerte der vorherhergesagten Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{1,max,dyn}$  und Richtungslage  $y_{max}$  mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation in einem 1900-m-Bogen



**Abbildung 5.10** Vergleich der Maximalwerte der vorherhergesagten Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y_{1,max,dyn}$  und Richtungslage  $y_{max}$  mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation in einem 450-m-Bogen

# 6 Anwendung und Diskussion der Gleislagebewertungsmethode

## 6.1 Beispiel einer Bewertung und Klassifizierung

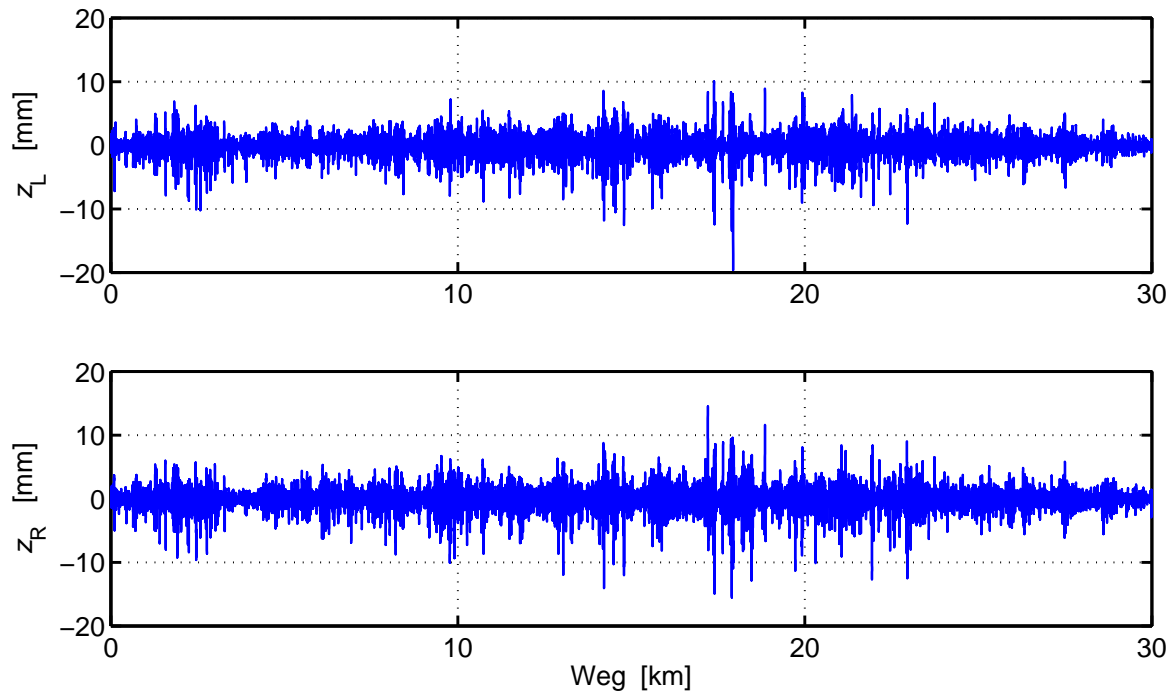
Die Analysen der Ergebnisse im vorherigen Kapitel haben gezeigt, dass der Verlauf der mit der TGA-Methode geschätzten Fahrzeugreaktionen gut mit dem Verlauf der Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulationen übereinstimmt. Die Korrelation der Basisgrößen für die Bewertung ist ebenfalls hoch. Für eine Bewertung der Gleislageabweichung können, wie in Abschnitt 4.9 gezeigt, entsprechende Größen wie *Ausnutzungsgrad* und *Dynamikfaktor* abgeleitet und in weiterer Folge klassifiziert werden.

Basierend auf den genannten Vorschlägen soll in diesem Kapitel ein Beispiel für eine Auswertung einer 30 km langen Strecke diskutiert werden. Diese Strecke wurde sowohl mit den Methoden der beiden Europäischen Normen EN 14363 und EN 13848–5 als auch mit der TGA-Methode ausgewertet und klassifiziert. In Abschnitt 6.2 werden die Ergebnisse der TGA-Methode an zwei ausgesuchten Stellen dieser Beispielstrecke nochmals analysiert und diskutiert. Das Potenzial der TGA-Methode für einen praktischen Einsatz bei der fahrtechnischen Zulassung und im Instandhaltungsprozess wird dann in Abschnitt 6.3 aufgezeigt und diskutiert.

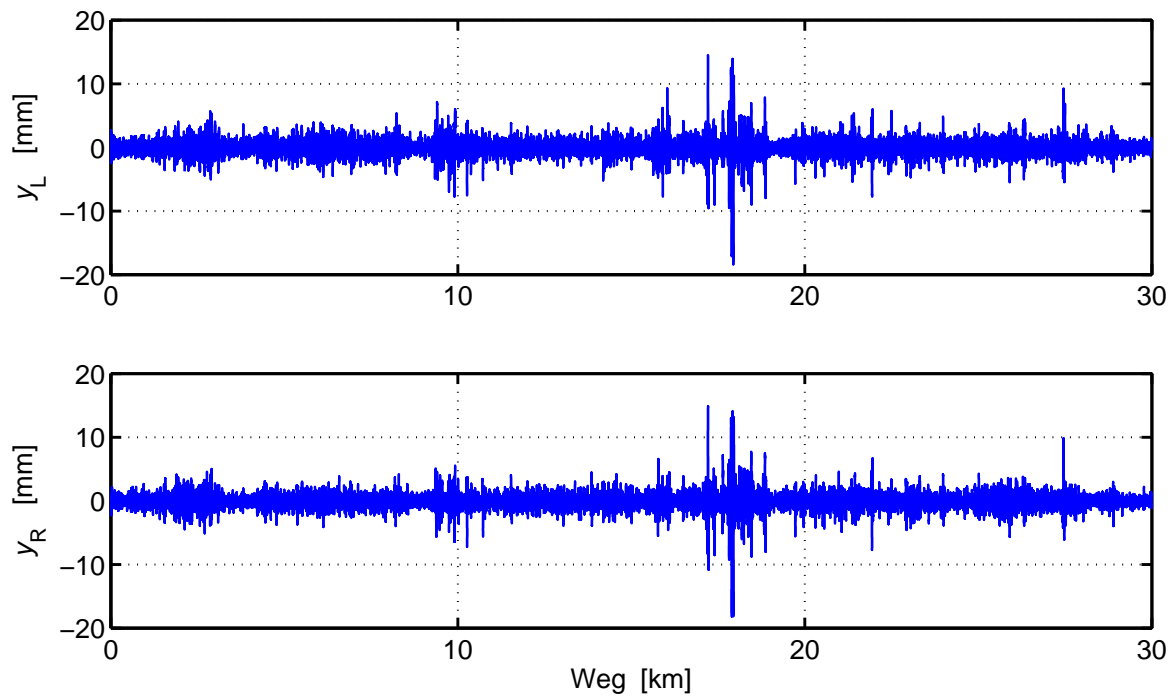
Der Ausgangspunkt für diese Analysen ist ein 30 km langer Streckenabschnitt einer europäischen Vollbahn mit gemessenen Gleislageabweichungen. Diese Gleislageabweichungen wurden bei der Entwicklung der Methode bzw. bei der Bestimmung der repräsentativen Übertragungsfunktionen nicht berücksichtigt, sondern nur für diese Untersuchungen herangezogen. Der Verlauf der Längshöhenlageabweichungen und der Richtungslageabweichungen ist jeweils für die linke und rechte Schiene in Abb. 6.1 dargestellt. Das Koordinatensystem der Gleislageparameter entspricht dem in Abschnitt 2.2 vorgestellten UIC Koordinatensystem. Die Wellenlängen-Bandbreite der Gleislageabweichungen wurde für eine möglichst reale Analyse sehr groß gewählt und beträgt  $1 \text{ m} < L \leq 70 \text{ m}$ . Bei der Auswertung dieser Gleislageabweichungen wird angenommen, dass die zu beurteilende Strecke eine Gerade ist und die zulässige Höchstgeschwindigkeit durchgehend  $v = 160 \text{ km/h}$  beträgt.

Die Auswertung der Gleislageabweichungen nach EN 14363 entspricht der sogenannten *QN-Bewertung*, welche in Abschnitt 3.2.2 ausführlich beschrieben wurde. Die Gleislageabweichungen werden im Wellenlängenbereich zwischen 3 und 25 m bandpassgefiltert





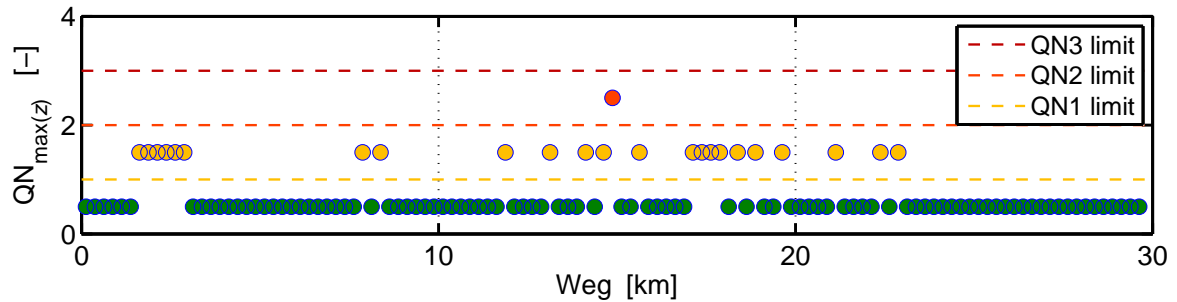
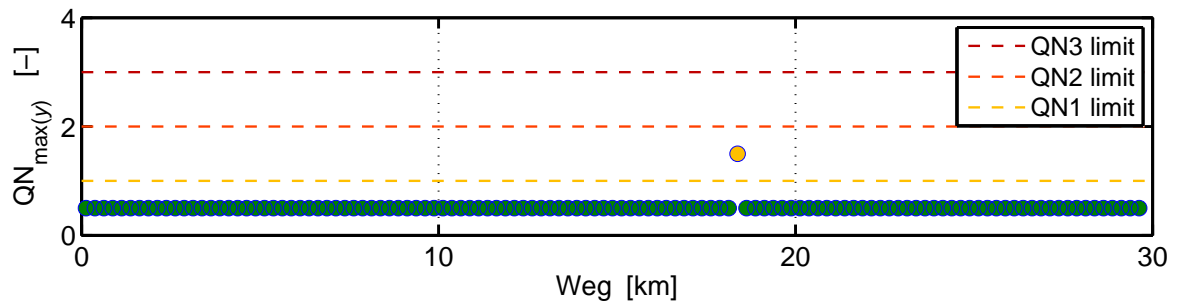
a. Längshöhenlage  $z$  für die linke und rechte Schiene



b. Richtungslage  $y$  für die linke und rechte Schiene

**Abbildung 6.1** Verlauf von gemessenen Gleislageabweichungen einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke

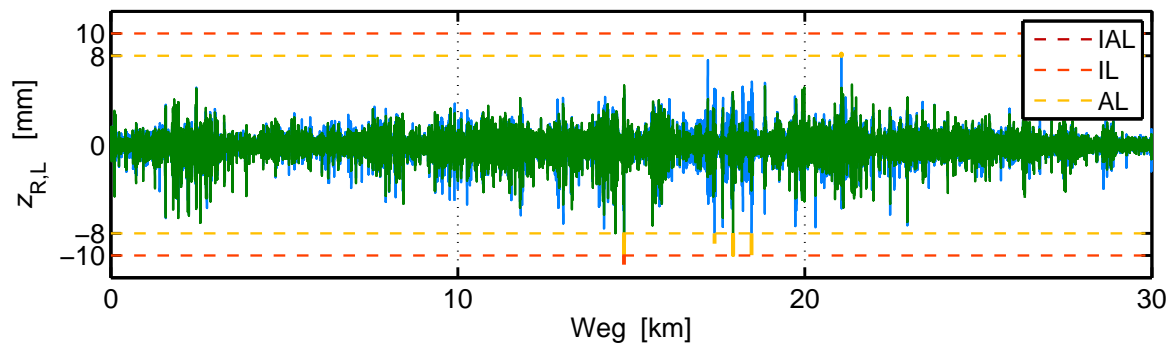
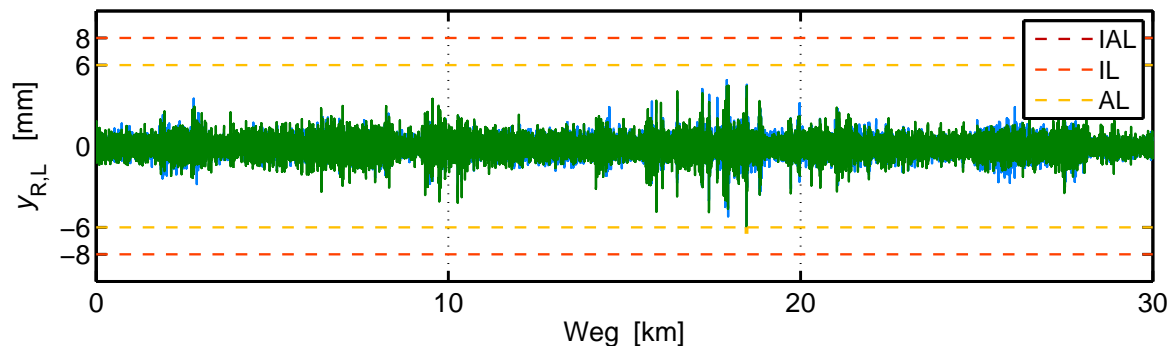
und die Maximalwerte der Auswertungsabschnitte berechnet, wobei für jede Auswertungsrichtung (vertikal und horizontal) der betragsmäßig jeweils größere Maximalwert der beiden Schienen herangezogen wird. Die Klassifizierung dieser Maximalwerte für eine Geschwindigkeit von  $v = 160$  km/h ergibt die in Abb. 6.2 dargestellte QN-Verteilung entlang der Strecke.

a. QN-Klassen der Maximalwerte der Längshöhenlage  $z$ b. QN-Klassen der Maximalwerte der Richtungslage  $y$ 

**Abbildung 6.2** QN-Klassifizierung der Gleislageabweichungen für die Auswertungsabschnitte einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke

Für die Beurteilung der Gleislageabweichungen hinsichtlich Instandhaltung werden diese nach EN 13848-5 ausgewertet, wobei die Methode ebenfalls ausführlich in Abschnitt 3.2.1 beschrieben wurde. Für eine Geschwindigkeit von  $v = 160$  km/h sind die normativen IAL-Grenzwerte (Längshöhenlage und Richtungslage) nur für den D1-Wellenlängenbereich ( $3 \text{ m} < L \leq 25 \text{ m}$ ) definiert. Der Verlauf der sich daraus ergebenden gefilterten Gleislageabweichungen entlang der Strecke ist in Abb. 6.3 für die Längshöhenlage  $z$  und die Richtungslage  $y$  der rechten (hellblau) und linken (hellgrün) Schiene dargestellt. Die Klassifizierung der Abweichungen erfolgt anhand der betragsmäßig größeren örtlichen Werte der linken und rechten Schiene. Eine Überschreitung der Aufmerksamkeitsgrenze (AL) ist mittels oranger Linie und eine Überschreitung der Eingriffsgrenze (IL) mittels roter Linie gekennzeichnet. Die normative Sicherheitsgrenze (IAL) wird in diesem Beispiel nicht überschritten, zur Vollständigkeit ist sie jedoch in der Legende mit einer strichlierten dunkelroten Linie symbolisiert.

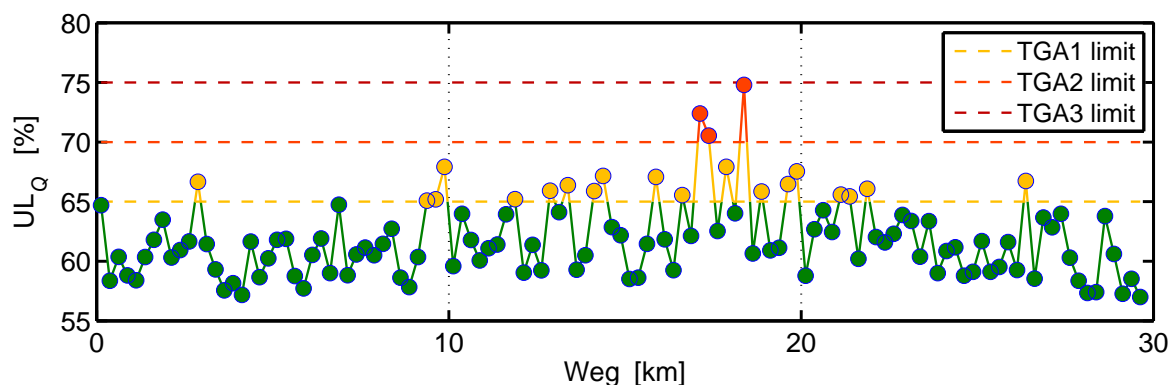
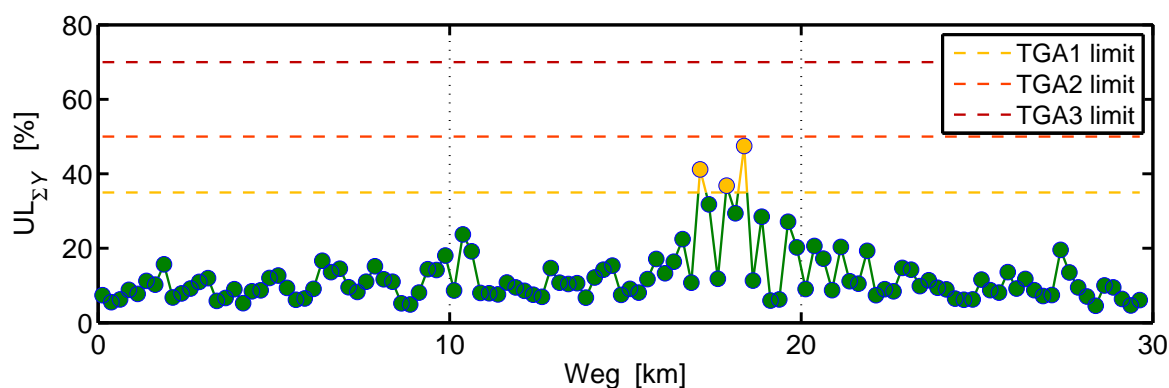
Die Verläufe der nach den beiden Normen ausgewerteten Gleislageabweichungen zeigen, dass sich die Maximalwerte durch die eingeschränkte Betrachtung des Wellenlängenbe-

a. EN13848-Klassen der Längshöhenlage  $z$ b. EN13848-Klassen der Richtungslage  $y$ 

**Abbildung 6.3** EN13848-Klassifizierung der Gleislageabweichungen einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke

reichs stark reduzieren. Die Stelle mit der betragsmäßig größten Abweichung der Längshöhenlage ( $z_{\max} \approx 20$  mm) liegt bei den Rohdaten bei  $s = 17,93$  km (siehe Abb. 6.1a) und ergibt nach der Filterung eine Amplitude von ca. 9 mm (siehe Abb. 6.3a). Der Maximalwert der gefilterten Längshöhenlageabweichungen (ca. 11 mm) liegt jedoch nicht an dieser Stelle, sondern bei  $s = 14,19$  km. Hier wird sowohl die Eingriffsschwelle der Längshöhenlage, als auch die Schwelle des Qualitätsniveaus QN 2 des entsprechenden Auswertungsabschnittes überschritten.

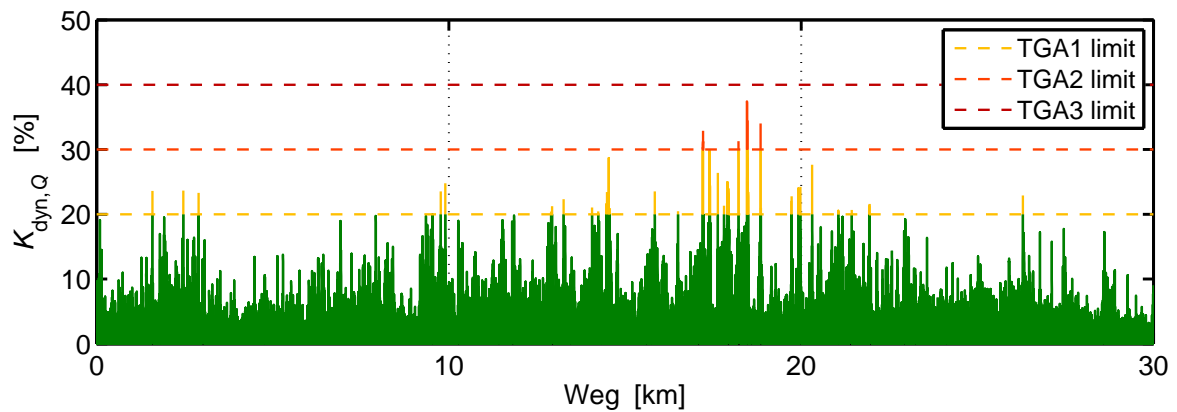
Im nächsten Schritt der Analyse wurden die gegebenen Gleislageabweichungen mit der in dieser Arbeit entwickelten TGA-Methode ausgewertet. Für die Schätzung des Verlaufs der Radaufstandskraft  $Q$  und der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  wurde die Fahrzeugklasse *Lokomotive* und eine Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 160$  km/h angenommen. Auf Basis der Auswertungsabschnitts-Maximalwerte wurde der Ausnutzungsgrad (*UL . . . utilization level*) für die vertikale und laterale Dynamik hinsichtlich Fahrwegbeanspruchung und Fahrsicherheit berechnet. In Abb. 6.4 ist ein Beispiel für eine Klassifizierung der Ergebnisse dargestellt. Dieses Beispiel soll nur eine mögliche Klassifizierung aufzeigen und daher wurden die eingezeichneten Klassengrenzen beliebig gewählt. Sie betragen für den Ausnutzungsgrad der Radaufstandskraft 65, 70 und 75 % und für jenen der Summe der Führungskräfte 35, 50 und 70 %.

a. TGA-Klassen der Radaufstandskraft  $Q$ b. TGA-Klassen der Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$ 

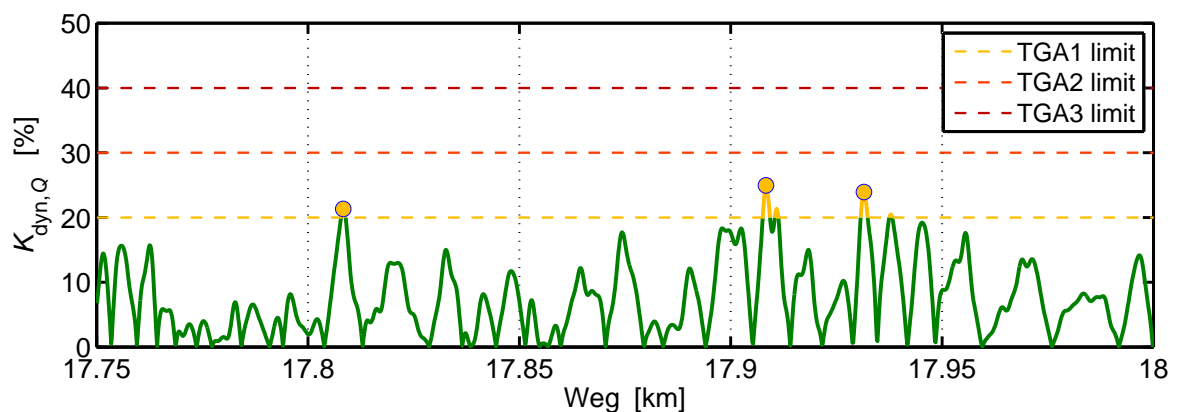
**Abbildung 6.4** Neue TGA-Klassifizierung der Gleislageabweichungen für die Auswertungsabschnitte einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke als Ausnutzungsgrad der Fahrzeugreaktionen hinsichtlich der Grenzwerte aus der EN 14363

Die angenommene TGA-Schwelle von 70 % Ausnutzungsgrad der Radaufstandskraft wird innerhalb von drei Auswertungsabschnitten überschritten (siehe Abb. 6.4a). Die Schätzung der TGA-Methode geht also davon aus, dass in diesen Abschnitten eine Lokomotive bei 160 km/h mit einer erhöhten vertikalen Fahrzeugreaktion auf die vorhandenen räumlichen Gleislageabweichungen reagieren wird. Vergleicht man diese Abschnitte mit jenen Überschreitungen der in Abb. 6.2a dargestellten QN-Bewertung, so ist zu sehen, dass dort jeweils nur das QN1-Limit überschritten wird. Da sowohl die Abweichungen der Richtungslage gering sind als auch die Trassierung als Gerade angenommen wurde, ist die zu erwartende Dynamik des Fahrzeugs in vertikaler Richtung dominierend. Daraus ergibt sich einerseits eine gute Qualität bei der QN-Bewertung der Richtungslage, als auch eine geringe Lateraldynamik in der Schätzung mit der TGA-Methode. Der Abschnitt mit der Überschreitung des QN1-Limits der Richtungslage stimmt somit bei diesem Beispiel mit dem maximalen Ausnutzungsgrad der Summe der Führungskräfte überein.

Da mit der TGA-Methode der Verlauf der Fahrzeugreaktionen geschätzt wird, kann für die vertikale Richtung der Dynamikfaktor berechnet werden (siehe Abschnitt 4.9). Der Verlauf des mit Glg. (4.32) berechneten Dynamikfaktors der Radaufstandskraft ist in Abb. 6.5a für die komplette Strecke dargestellt. Auch hier wurden die Grenzen für die Klassifizierung der Ergebnisse beliebig gewählt und betragen 20, 30 und 40 %. Der Vorteil dieser Darstellung bzw. Bewertung ist, dass die Informationen bzgl. der zu erwartenden Vertikaldynamik für jeden Ort der Gleislageabweichungen zur Verfügung gestellt werden. Treten innerhalb eines Auswertungsabschnittes mehrere Überschreitungen der definierten Schwellen auf, so sind diese im Dynamikfaktor-Verlauf entsprechend erkennbar. Ein Beispiel für so eine mehrmalige Überschreitung ist in Abb. 6.5b dargestellt. Im Gegensatz dazu liefert die Beurteilung mit Hilfe des Ausnutzungsgrades hier nur einen Gesamtwert für diesen Auswertungsabschnitt, wobei der dabei berechnete 99,85 % Perzentil-Wert örtlich nur dem Maximalwert zugeordnet werden könnte.



a. Dynamikfaktor-Verlauf der kompletten Strecke



b. Dynamikfaktor-Verlauf eines 250 m Abschnitts mit lokalen Maximalwerten

**Abbildung 6.5** Neue TGA-Klassifizierung der Gleislageabweichungen einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke entsprechend dem Dynamikfaktor der vertikalen Fahrzeugreaktionen

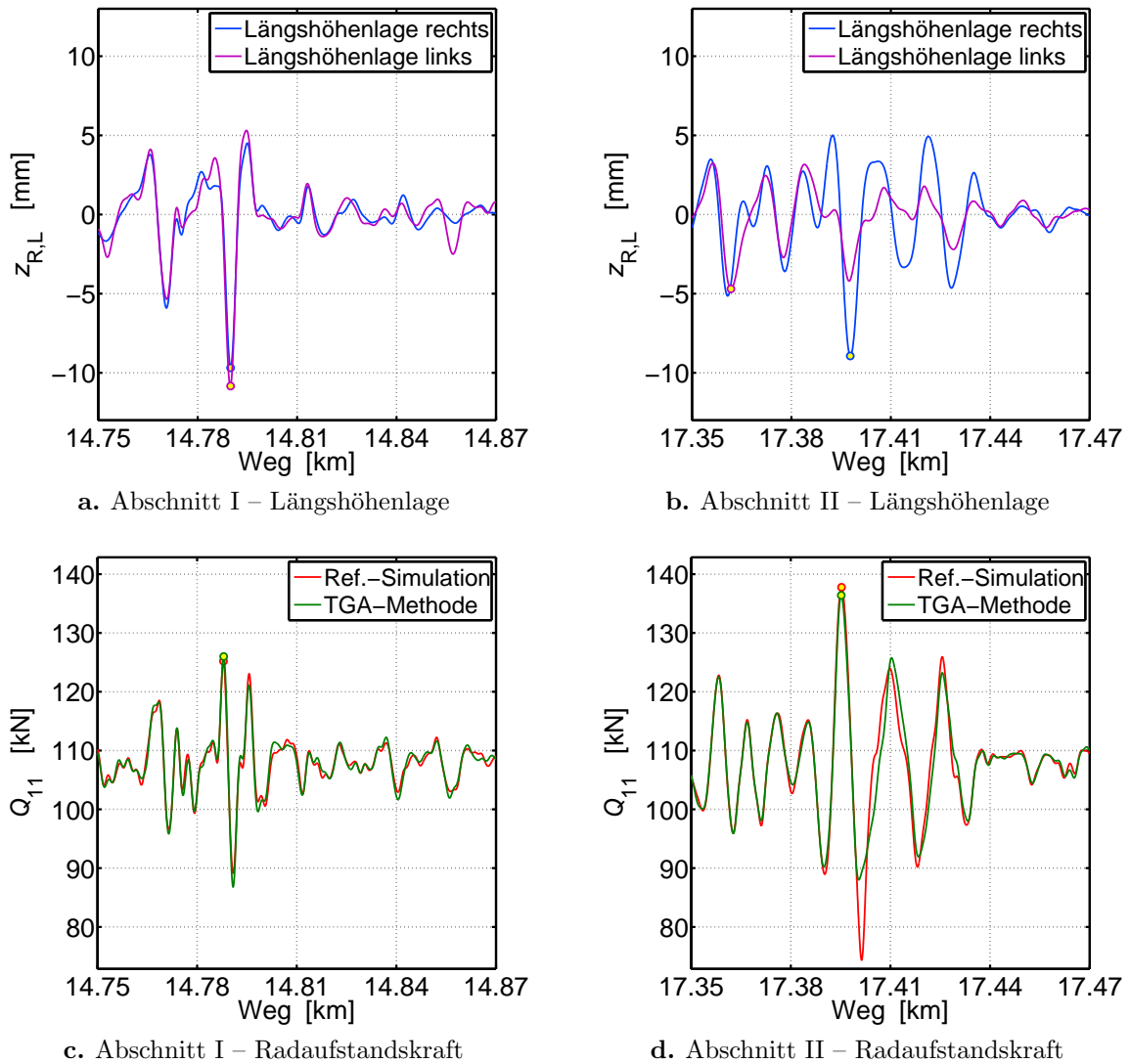
## 6.2 Diskussion der TGA–Methodenergebnisse an zwei ausgesuchten Streckenabschnitten

Der Zusammenhang zwischen den Beurteilungsgrößen der QN–Bewertungsmethode und den Beurteilungsgrößen der Referenz–Fahrzeugreaktionen wurde mit Hilfe der Darstellung im Streudiagramm in Abschnitt 3.3.1 diskutiert. Beim Vergleich der Ergebnisse einer EN 13848–5 Auswertung in Abb. 6.3a mit jenen der UL–Bewertung der TGA–Methode in Abb. 6.4a ist ebenfalls festzustellen, dass diese beiden Beurteilungsgrößen nur geringfügig miteinander korrelieren. In diesem Abschnitt soll am Beispiel zweier ausgewählter Stellen der 30 km langen Vollbahnstrecke der Verlauf der Längshöhenlageabweichungen der linken und rechten Schiene, sowie die geschätzten und simulierten Verläufe der Radaufstandskraft miteinander verglichen und die Ergebnisse diskutiert werden. Die Auswahl der Stellen wurde so durchgeführt, dass im *Abschnitt I* eine große Maximalamplitude der Gleislageabweichungen und eine niedrige Maximalamplitude der Referenz–Fahrzeugreaktionen und im *Abschnitt II* ein umgekehrtes Verhältnis zu beobachten ist. Der Verlauf aller Analysegrößen ist für die beiden Abschnitte in Abb. 6.6 dargestellt.

Die Längshöhenlageabweichung der linken Schiene von  $z_{L,\max} = -11$  mm (violette Linie) verursacht im Abschnitt I eine Überschreitung der Eingriffsgrenze IL nach EN 13848–5 (siehe Abb. 6.6a). Vergleicht man an dieser Stelle die Maximalamplitude der Radaufstandskraft  $Q_{11}$  des rechten Rades des ersten Radsatzes, so zeigt sich dort ein dynamischer Anteil von  $Q_{11,\max,\text{dyn}} = 18$  kN (siehe Abb. 6.6c). Es sei hier angemerkt, dass entsprechend der Auswertung der Fahrzeugreaktionskräfte nach EN 14363 für die Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung der Absolutwert herangezogen wird, woraus sich ein höherer dynamischer Absolut–Maximalwert, wie in diesem Fall von  $Q_{11,\max,\text{dyn}} = -21$  kN, ergeben kann.

Im Abschnitt II wird auf Grund der maximalen Längshöhenlageabweichung der rechten Schiene von  $z_{R,\max} = -9$  mm (blaue Linie) zwar die Aufmerksamkeitsgrenze AL überschritten (siehe Abb. 6.6b), jedoch ist die Amplitude geringer als im Abschnitt I. Im Gegensatz dazu ist hier ein dynamischer Anteil beim Maximum der Referenz–Radaufstandskraft von  $Q_{11,\text{dyn}} = 30$  kN zu beobachten (siehe Abb. 6.6d). Dies bedeutet, dass das Fahrzeug an dieser Stelle im Abschnitt II mit einer um 50 % höheren dynamischen Radaufstandskraft reagiert als im Vergleich zum Abschnitt I. Die Schätzung der Radaufstandskraft mit der TGA–Methode stimmt beim Maximum wiederum gut überein.

Betrachtet man jedoch das Minimum des dynamischen Anteils der Referenzsimulation, so zeigt sich hier eine deutlich höhere Entlastung des Fahrwegs im Vergleich zur Schätzung mit der TGA–Methode. Eine Erklärung für die Differenz von ca. 13 kN zwischen den beiden Radaufstandskräften könnte darin liegen, dass in den Gleislageabweichungen ein Anteil mit einer Wellenlänge kleiner als 3 m dominant ist. Dieser Anteil würde in der Referenzsimulation zu einer höherfrequenten Anregung führen, jedoch auf Grund



**Abbildung 6.6** Analyse der Wegverläufe von zwei ausgewählten Abschnitten der QN-Bewertung und der TGA-Bewertung und Vergleich mit den Ergebnissen der Referenzsimulation

der Wellenlängenbegrenzung bei der TGA-Methode ( $3 \text{ m} < L \leq 70 \text{ m}$ ) nur bedingt berücksichtigt werden. Eine weitere Begründung könnte darin liegen, dass sich auf Grund der Differenz der Längshöhenlageabweichung zwischen der linken und rechten Schiene ein höherer Querhöhenfehler ergibt. Dieser bewirkt wiederum eine größere dynamische Anregung in lateraler Richtung, woraus sich ein stärkerer Einfluss der Nichtlinearitäten ergeben kann.

Die Analyse dieser beiden Stellen zeigt deutlich, dass die mangelnde Berücksichtigung der räumlichen Gleislageabweichungen, speziell an der Stelle im Abschnitt II, zu einer möglichen Unterschätzung des Gefahrenpotenzials führen könnte. Unter räumlicher

Betrachtung ist hier die Kombination der durch die TGA-Methode berücksichtigten Anteile der Fahrzeugreaktionen zu verstehen, welche sowohl die wellenlängenspezifische Interaktion der Gleislageabweichungen und die dazugehörigen Fahrzeugreaktionen als auch die phasenrichtige Addition dieser Fahrzeugreaktionskomponenten beinhaltet. Dies ermöglicht somit die im Beispiel gezeigte gute Übereinstimmung des Verlaufs der Fahrzeugreaktionen.

Vergleicht man den Zusammenhang der Beurteilungsgrößen (Auswertungsabschnitts-Maximalwerte) der TGA-Methode mit jenen der Referenzsimulationen, so ist ebenfalls wie bei den gezeigten Verläufen der Größen eine Korrelation feststellbar. Wie in diesem Beispiel im Abschnitt II dargestellt, können jedoch auch größere Abweichungen einzelner Werte auftreten. Eine Verbesserung dieser Korrelation könnte dadurch erreicht werden, indem der berücksichtigte Wellenlängenbereich speziell für kleinere Wellenlängen bei der Berechnung der repräsentativen Übertragungsfunktionen der TGA-Methode erweitert wird. Hier wäre jedoch zu beachten, dass einerseits die für die Berechnung notwendigen Messungen von Gleislageabweichungen eine entsprechend hohe Güte in diesem Bereich haben müssten und andererseits der Vergleich mit den bisherigen Bewertungsmethoden aus der Norm nur mehr bedingt möglich wäre. Zuvor wäre jedoch die Klärung der beiden Fragen sinnvoll, welche Anteile der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Gleislageabweichungen beurteilt werden sollen und welche Maßnahmen daraus abgeleitet werden könnten.

### 6.3 Einsatzmöglichkeiten der TGA-Methode

Ein fundamentales Ziel im Eisenbahnbereich ist ein möglichst störungsfreies Zusammenwirken zwischen Fahrzeug und Infrastruktur. Im Betrieb spielen für dieses Zusammenwirken die Gleislageabweichungen eine wesentliche Rolle, da diese das System anregen und daraus wiederum Rückwirkungen auf das Fahrzeug ebenso wie auf den Fahrweg resultieren. Eine Methode zur Bewertung von Gleislageabweichungen soll neben der Erfüllung der in Abschnitt 4.1 gestellten Anforderungen auch die Möglichkeit bieten, dass diese sowohl bei der fahrtechnischen Zulassung, als auch bei der Instandhaltung eingesetzt werden kann.

In den folgenden beiden Abschnitten soll aufgezeigt werden, wie die in dieser Arbeit entwickelte TGA-Methode in der Praxis angewendet werden kann. Die Basis in beiden Anwendungsfällen bilden die auf Grund der definierten Versuchsbedingungen geschätzten Fahrzeugreaktionen im Wegbereich. Daraus können je nach Bedarf und Anforderung unterschiedliche Beurteilungsgrößen wie z. B. Ausnutzungsgrad oder Dynamikfaktor abgeleitet und klassifiziert werden. Die TGA-Methode bietet auch eine gute Möglichkeit, dass sich Fahrzeughersteller und Infrastrukturbetreiber auf eine gemeinsame sinnvolle Obergrenze (maximale Klassengrenze) einer Beurteilungsgröße einigen. Damit könnte die in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Diskussion über die Differenz zwischen der IAL-Grenze und der QN3-Grenze effizient gelöst werden.



### 6.3.1 Fahrtechnische Zulassung

Zur Prüfung des Fahrverhaltens von Eisenbahnfahrzeugen werden neben den stationären Versuchen auch Streckenversuche durchgeführt und die Ergebnisse entsprechend der Europäischen Norm EN 14363 ausgewertet (siehe Abschnitt 3.2.2). Die Ergebnisse hängen dabei maßgeblich von den Abweichungen der Gleislage der Versuchsstrecke ab. Die Verteilung der Qualität der einzelnen Auswertungsabschnitte soll entsprechend der Norm einer bestimmten Verteilung unterliegen, sodass diese dem Referenzzustand entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass der Referenzzustand die im Betrieb zu erwartende Verteilung der Gleislageabweichungen widerspiegelt. Die Forderung der Fahrzeughersteller und Betreiber nach einer internationalen Vergleichbarkeit der Referenzzustände von unterschiedlichen Teststrecken kann nur dadurch erfüllt werden, indem die Beurteilungsgrößen zur Bestimmung der Gleislagequalität eine möglichst hohe Korrelation zu den Beurteilungsgrößen der Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion aufweisen. Die Ergebnisse der TGA-Methode haben im Gegensatz zu jenen der QN-Bewertung gezeigt, dass genau diese Forderung in einem hohen Maße erfüllt wurde.

Die QN-Methode bewertet die Gleislageabweichungen der Längshöhenlage  $z$  und der Richtungslage  $y$  getrennt, sodass sich für jeden Auswertungsabschnitt zwei Qualitätsniveaus ( $QN_I$  und  $QN_{II}$ ) ergeben, welche die räumlichen (3-dimensionalen) Abweichungen nicht berücksichtigen. Der jeweilige Zusammenhang zwischen den Qualitätsniveaus und Gleislageabweichungen in Kombination mit der Geschwindigkeit  $v$  kann demnach beschrieben werden mit

$$QN_I = f_z(z_R, z_L, v) \quad \text{und} \quad QN_{II} = f_y(y_R, y_L, v). \quad (6.1)$$

Für die Bewertung der Qualität der Gleislageabweichungen der Auswertungsabschnitte berücksichtigt die TGA-Methode die Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion, welche sich aus der räumlichen Kombination der einzelnen Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameter ergibt. Dies bedeutet, dass nicht nur das jeweilige Fahrzeug (FZ), sondern auch die Trassierung miteinbezogen wird. Es ergeben sich wiederum zwei Qualitätsniveaus jeweils für die Vertikal- und Lateraldynamik ( $QN_{I,TGA}$  und  $QN_{II,TGA}$ ), jedoch sind diese von allen Parametern der Gleislageabweichungen und Versuchsbedingungen abhängig. Der jeweilige Zusammenhang kann beschrieben werden mit

$$QN_{I,TGA} = f_Q(z, y, \delta, v, \text{FZ-Klasse, Trassierung}) \quad \text{und} \quad (6.2)$$

$$QN_{II,TGA} = f_{\Sigma Y}(z, y, \delta, v, \text{FZ-Klasse, Trassierung}). \quad (6.3)$$

Durch den Einsatz der TGA-Methode zur Bestimmung der Qualität der Gleislageabweichungen können sowohl Auswertungsabschnitte einer Teststrecke als auch komplette Teststrecken miteinander verglichen werden. Wird z. B. ein Auswertungsabschnitt mit einem bestimmten Qualitätsniveau mit Hilfe der TGA-Methode bewertet, so kann

davon ausgegangen werden, dass in einem anderen Auswertungsabschnitt mit dem gleichen Qualitätsniveau für ein definiertes Fahrzeug bei einer definierten Geschwindigkeit eine ähnliche Fahrzeugreaktion zu erwarten ist.

Für eine Etablierung der TGA-Methode im praktischen Einsatz sollen jedoch noch weitere Fragen geklärt werden. Die Untersuchungen in Abschnitt 5.3.2 haben gezeigt, dass der Einfluss des Fahrzeugtyps innerhalb einer Fahrzeugklasse groß sein kann. Hierfür sind noch Berechnungen zusätzlicher Übertragungsfunktionen verschiedener Fahrzeugtypen einer Fahrzeugklasse notwendig, um deren Sensitivität entsprechend genau zu bestimmen und daraus wieder eine Verfeinerung der Fahrzeugklassifizierung ableiten zu können. Eine weitere zu klärende Frage ist jene der Größe der Grenzen für die Klassifizierung der Beurteilungsgrößen und somit zur Bestimmung der Gleislagequalität. Bei der Verwendung des Ausnutzungsgrades als Beurteilungsgröße ist dieser sowohl für die Vertikal- als auch für die Lateraldynamik von der quasistatischen Radaufstandskraft  $Q_0$  abhängig. Ein erster möglicher Lösungsschritt für diese fahrzeugspezifische Abhängigkeit ist die Verwendung einer definierten quasistatischen Radaufstandskraft für jede Fahrzeugklasse. Auch hier müssten noch weitere Untersuchungen der sich daraus ergebenden Differenzen innerhalb der Fahrzeugklassen durchgeführt werden, um bei Bedarf eine Verfeinerung der Fahrzeugklassifizierung ableiten zu können.

### 6.3.2 Instandhaltung

Die Infrastrukturbetreiber müssen die minimale Qualität der Gleisgeometrie sicherstellen, sodass ein sicherer Betrieb der Züge gewährleistet werden kann. Für die Qualitäts-Bestimmung steht dem Betreiber die EN 13848-5 zur Verfügung, wobei die darin enthaltenen Grenzwerte der Beurteilungsgrößen eingehalten werden müssen. Die Betreiber erstellen zur Ableitung von Maßnahmen einen Instandhaltungsplan, der zumindest die normativ definierte Soforteingriffsschwelle als maximal zulässigen Grenzwert enthalten muss. Es steht dem Betreiber frei, diese Grenze niedriger anzusetzen bzw. die Schwellen für die Aufmerksamkeitsgrenze und Eingriffsschwelle selbst zu definieren. Sowohl die Erfahrungen der Betreiber als auch die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen ergeben, dass die Methode der Europäischen Norm den Zusammenhang zwischen den Beurteilungsgrößen und der Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion nicht ausreichend erfüllt.

Die in dieser Arbeit entwickelte TGA-Methode zeigt hier eine deutliche Verbesserung des geforderten Zusammenhangs, sodass daraus wiederum sinnvolle Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, berücksichtigt die TGA-Methode die Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion durch eine Kombination der durch die einzelnen Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameter verursachten Fahrzeugreaktionsanteile. Damit werden auch besondere Kombinationen von Gleisgeometrie-Parametern berücksichtigt, die entsprechend der Anmerkung in der EN 13848-5 einen starken Einfluss auf die Fahrzeugreaktionen haben können. Die Maßnahmen für die Instandhaltung auf Basis der zu erwartenden (geschätzten) Fahrzeugreaktionen können für die jeweiligen Streckenabschnitte spezifisch für unterschiedliche

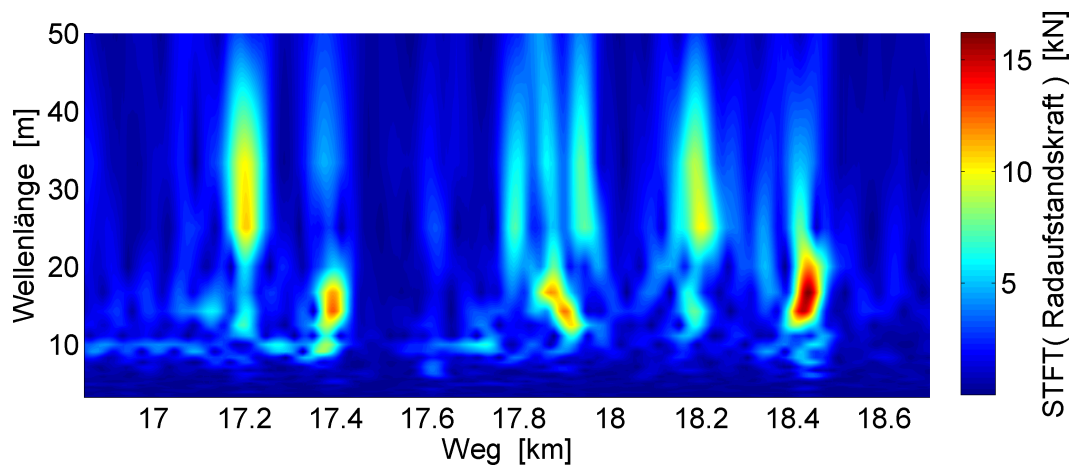
Fahrzeug- und Geschwindigkeitsklassen getroffen werden. Zusätzlich wird auch noch die Trassierung als weiterer Einflussparameter bei der TGA-Methode berücksichtigt. Die in Abschnitt 4.8 gezeigten SISO-Anteile der jeweiligen Fahrzeugreaktion stehen für eine spezifische Analyse des Fahrwegs ebenfalls zur Verfügung und liefern hilfreiche Informationen hinsichtlich der Sensitivität der Gleislageabweichungs-Beschreibungsparameter. Des Weiteren lassen sich verschiedene Wellenlängenanteile der Gleislageabweichungen analysieren und daraus wiederum Erkenntnisse für die Instandhaltung ableiten.

Zur Beurteilung der Qualität der Gleislageabweichungen können verschiedene Größen aus dem geschätzten Zeitverlauf der Fahrzeugreaktionen berechnet werden. Für die gemeinsame Definition der Obergrenze hinsichtlich Fahrzeugzulassung und Instandhaltung könnte, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, der Ausnutzungsgrad als Beurteilungsgröße verwendet werden (siehe Abb. 6.4a). Der Ausnutzungsgrad wird standardmäßig für einen Auswertungsabschnitt von 250 m bei der fahrtechnischen Zulassung berechnet, wobei bei einem Einsatz in der Instandhaltung ein gleitendes Fenster in Kombination mit einer kleineren Fensterbreite zu überlegen wäre. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Grenzwerte der Fahrzeugreaktionen für die Berechnung des Ausnutzungsgrades auf den 99,85 % Perzentil-Werten der 250 m breiten Auswertungsabschnitte basieren und dies bei schmaleren Fensterbreiten eine grundsätzliche Abweichung der Beurteilung in Bezug auf die Obergrenze bedeuten würde. Für die Ableitung von örtlichen Maßnahmen auf Basis der geschätzten Vertikaldynamik würde sich der Dynamikfaktor als Beurteilungsgröße am besten eignen (siehe Abb. 6.5a). Hierbei wird nicht der Maximalwert der absoluten Radaufstandskraft, sondern der Betrag des dynamischen Anteils bewertet. Dies hat den Vorteil, dass auch potenzielle Radentlastungen entsprechend berücksichtigt werden.

Für die Auswahl der Beurteilungsgröße und Einbindung der TGA-Methode in den Instandhaltungsprozess wären weitere Untersuchungen sinnvoll. Hierbei sollten im ersten Schritt die Ergebnisse der unterschiedlichen TGA-Beurteilungsgrößen mit den praktischen Erfahrungen aus der Instandhaltung verglichen werden. Daraus könnten effizientere Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden, welche die Sicherheit im Betrieb gewährleisten und gleichzeitig den wirtschaftlichen Nutzen erhöhen. Des Weiteren sollten die Fragen der Fahrzeugsensitivität mit zusätzlichen Fahrzeugtyp-Untersuchungen, wie beim Einsatz bei der fahrtechnischen Zulassung beschrieben, beantwortet und bei Bedarf entsprechende Klassenverfeinerungen durchgeführt werden. Die offenen Punkte der Methode hinsichtlich Einbindung des Spurweitenfehlers in Kombination mit der Berücksichtigung der Berührgeometrie sollten ebenfalls geklärt bzw. eine praktikable Lösung in weiteren Forschungsprojekten erarbeitet werden. Nach der Auswahl der für die jeweilige Zielrichtung geeigneten Beurteilungsgrößen wäre eine Ausarbeitung eines Vorschlags für die Klassifizierung der Beurteilungsgrößen wünschenswert, sodass damit letztendlich eine internationale Akzeptanz erreicht und sichergestellt werden kann.

Bei Planung und Durchführung der Instandhaltung können mit Hilfe der TGA-Methode neben den zuvor genannten Beurteilungsgrößen noch weitere hilfreiche Informationen gewonnen werden. Für die Untersuchung der Ursachen bestimmter

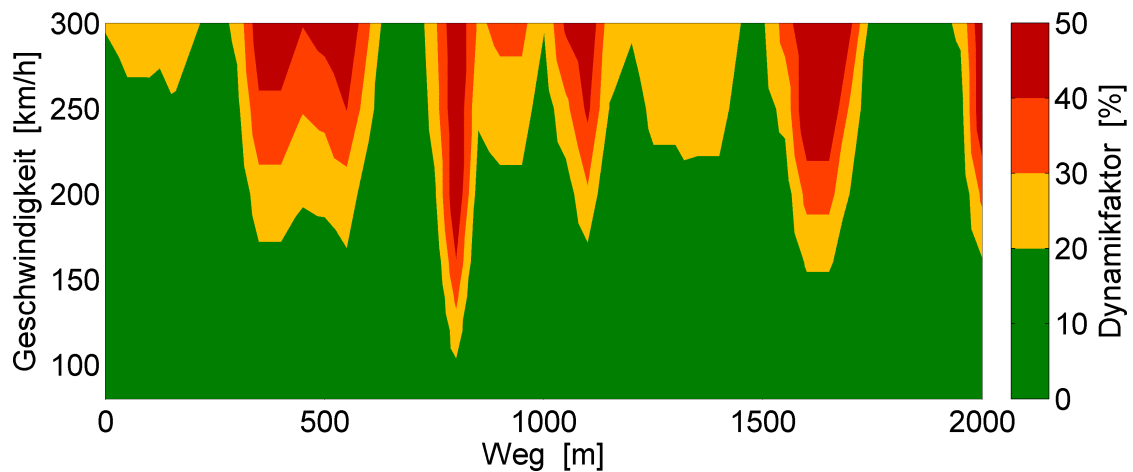
Gleislageabweichungen können nicht nur die SISO–Anteile der jeweiligen Fahrzeugreaktionen, sondern auch deren Wellenlängenspektrum analysiert werden. Ein Beispiel für solch ein Wellenlängenspektrum der mit der TGA–Methode geschätzten Radaufstandskraft  $Q$  ist für einen ausgewählten 1850 m langen Abschnitt in Abb. 6.7 dargestellt. Für die Berechnung des Spektrums wurde der Wegverlauf mit Hilfe der in Abschnitt 3.4.2.1 gezeigten Short–Time–Fourier–Transformation (STFT) in den Wellenlängenbereich transformiert. Für das verwendete Fenster vom Typ *von Hann* wurde eine Breite von 100 m ausgewählt und für eine möglichst genaue örtliche Analyse gleitend mit einer Schrittweite eines Samples angewendet. Aus der Abbildung



**Abbildung 6.7** Einsatzmöglichkeit der TGA–Methode zur Analyse des Wellenlängenspektrums

ist gut ersichtlich, an welcher Stelle das gewählte Fahrzeug, hier die Lokomotive, bei einer gewählten Geschwindigkeit von  $v = 160$  km/h auf welche Wellenlängenanteile der Gleislageabweichungen mit welcher Intensität reagiert. Aus einem relativ schmalen, jedoch über mehrere Wellenlängen verteilten Ereignis, wie z. B. an der Stelle  $s = 17,2$  km, kann auf einen Stoß im Gleis geschlossen werden. Im Gegensatz dazu sind die Ereignisse an den Stellen  $s = 17,4$  km bzw.  $s = 18,4$  km etwas breiter, jedoch dominieren hier deutlich Schwingungen mit bestimmten Wellenlängen im Bereich von  $L = 15$  m. Auf Basis dieser zusätzlichen Informationen können spezifische Maßnahmen in der Instandhaltung getroffen oder aber auch auf Basis längerfristiger Beobachtungen zeitliche Entwicklungen vorhergesagt werden. Die Berechnung der STFT bietet ebenfalls die Möglichkeit, daraus wiederum das Leistungsdichtespektrum (PSD) für jedes einzelne Fenster zu berechnen und somit die Veränderung der statistischen Eigenschaften entlang des Weges zu beobachten (siehe Abschnitt 3.4.1.2). Aus jedem Spektrum kann wiederum die Standardabweichung durch Integration der Leistungsdichte über den gewünschten Wellenlängenbereich als Maß für die Interaktion berechnet und als zusätzliche Beurteilungsgröße analysiert werden. Zu beachten wäre hier jedoch, dass die Standardabweichung einer Fahrzeugreaktionskraft entsprechend der fahrtechnischen Zulassung nicht bewertet wird und somit auch keine Grenzwerte für die Berechnung eines Ausnutzungsgrades definiert sind.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz der TGA-Methode bei der Instandhaltung soll zeigen, wie die Wirksamkeit von Maßnahmen schnell und einfach überprüft werden kann. Bei einer Überschreitung der in der Norm definierten Gleislageabweichung muss der Betreiber je nach Höhe entsprechende Maßnahmen wie z. B. eine allgemeine Geschwindigkeitsreduktion für einen gewissen Abschnitt der Strecke setzen. Es steht ihm jedoch kein Hilfsmittel zur Verfügung, welches Auskunft über die Effizienz in Bezug auf die fahrzeugspezifische Interaktion gibt. In Abb. 6.8 ist dargestellt, wie die TGA-Methode dem Betreiber diese hilfreiche Information in Form eines Geschwindigkeitsspektrums liefern könnte. Hierfür wurde für einen ausgewählten Abschnitt von 2 km der Dyna-



**Abbildung 6.8** Einsatzmöglichkeit der TGA-Methode zur Analyse der Effizienz von fahrzeugspezifischen Geschwindigkeitsreduktionen

mikfaktor der Radaufstandskraft für alle Geschwindigkeitsklassen eines bestimmten Fahrzeugs (Lokomotive) berechnet und in der Abbildung interpoliert dargestellt. Wird diese Berechnung für mehrere Fahrzeugklassen durchgeführt, so kann für jede Klasse ein Geschwindigkeitsprofil auf Basis eines angenommenen maximalen Dynamikfaktors ermittelt und daraus fahrzeugspezifische Geschwindigkeitsreduktionen auf Basis der zu erwartenden Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion bestimmt werden. Geht man im gezeigten Beispiel davon aus, dass die zulässige Streckengeschwindigkeit  $v = 160$  km/h beträgt und wird der maximal zulässige Dynamikfaktor z. B. mit 30 % angenommen, so müssten Fahrzeuge dieser Fahrzeugklasse nur an der Stelle um  $s = 800$  m die Geschwindigkeit auf  $v = 140$  km/h reduzieren. Für die anderen Fahrzeugklassen könnten je nach Berechnungsergebnis mehrere Stellen mit Geschwindigkeitsreduktionen notwendig sein.

Aus den in den beiden vorherigen Abschnitten gezeigten konkreten Anwendungsbeispielen ist zu erkennen, dass die TGA-Methode eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Beurteilung und Analyse von Gleislageabweichungen bietet. Bereits aus den vorliegenden Untersuchungen wurde das Potenzial der TGA-Methode in Hinblick auf den praktischen Einsatz klar dargestellt und gezeigt, dass diese einen hilfreichen Beitrag für ein möglichst störungsfreies Zusammenwirken zwischen Fahrzeug und Infrastruktur leisten kann.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Abweichungen der Gleislage von der Soll-Lage spiegeln sich im Zusammenspiel mit Schienenfahrzeugen in Form einer erhöhten Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion bezüglich Kräften und Bewegungen wider. Für eine Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich Aufwand und Kosten spielen diese Gleislageabweichungen sowohl bei der fahrtechnischen Zulassung von Schienenfahrzeugen als auch bei der Fahrweg-Instandhaltung eine bedeutende Rolle. Zur Bestimmung der Qualität von Gleislagen werden für beide Anwendungsfälle Methoden in Europäischen Normen definiert, welche als Beurteilungsgrößen rein geometrische Größen wie Maximalwerte und Standardabweichungen der Gleislageabweichungen heranziehen. Die Erfahrung der Fahrzeughersteller und Infrastrukturbetreiber zeigt jedoch, dass diese Beurteilungsgrößen keinen ausreichenden Zusammenhang mit den zu erwartenden Fahrzeugreaktionen aufweisen. Für eine optimale Berücksichtigung der zu erwartenden Fahrzeugreaktionen bei der Beurteilung der Gleislage muss deshalb das Gesamtsystem, d. h. die Interaktion zwischen den Gleislageabweichungen und dem Fahrzeug, betrachtet werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte *Track Geometry Assessment* (TGA) Methode berücksichtigt für die Bewertung der Gleislageabweichungen genau diese Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion. Hierfür wird in einer Vorbereitungsphase das dynamische Verhalten zwischen den Gleislageabweichungen und den verschiedenen Fahrzeugen bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen analysiert und mit Hilfe von sogenannten *empirischen Übertragungsfunktionen* beschrieben. Die Berechnung der empirischen Übertragungsfunktionen erfolgt auf Basis einer nicht-parametrischen System-Identifikationsmethode. Dazu werden Simulationen mit einem *Mehrkörpersystem* (MKS) Programm unter Einbeziehung realer Gleislageabweichungen durchgeführt und die dazugehörigen Fahrzeugreaktionskräfte, wie die *Radaufstandskraft*  $Q$  und die *Summe der Führungskräfte*  $\Sigma Y$  eines Radsatzes, ermittelt. Durch die Verwendung von realen Gleislageabweichungen in der Simulation kann der Einfluss der Nichtlinearitäten des Systems speziell für das laterale Übertragungsverhalten deutlich besser berücksichtigt werden als mit jenen aus den Systemmatrizen des linearisierten Modells ermittelten Übertragungsfunktionen. Als Ergebnis der Vorbereitungsphase steht dem Anwender der Methode jeweils ein Satz von sechs komplexen empirischen Übertragungsfunktionen für jede Fahrzeug-, Geschwindigkeits- und Trassierungsklasse zur Verfügung. Diese sechs komplexen empirischen Übertragungsfunktionen ergeben sich aus den drei Gleislagebeschreibungsparametern *Längshöhenfehler*  $z(s)$ , *Richtungsfehler*  $y(s)$  und *Querhöhenfehler*  $\delta(s)$  entlang der Wegkoordinate  $s$  als Eingangsgrößen kombiniert mit den beiden oben angegebenen Fahrzeugreaktionskräften als Ausgangsgrößen.

Bei der Anwendung der Methode bilden geschätzte Fahrzeugreaktionen die Basisgrößen für die Bewertung der Gleislageabweichungen. Dazu werden die drei Beschreibungsparameter der Gleislageabweichungen in den Wegfrequenzbereich transformiert, mit den jeweiligen komplexen Übertragungsfunktionen gewichtet und in den Wegbereich zurücktransformiert. Im Allgemeinen hat jeder Gleislagebeschreibungsparameter einen entsprechenden Einfluss auf die Fahrzeugreaktion. Um dies zu berücksichtigen, werden hier die drei Komponenten im Wegbereich superponiert, woraus sich die Betrachtung eines sogenannten *multiple input single output* Systems ergibt. Die geschätzte Radaufstandskraft  $Q$  wird hinsichtlich Fahrwegbeanspruchung und die Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  eines Radsatzes wird hinsichtlich Fahrsicherheit entsprechend der Europäischen Norm für die fahrtechnische Zulassung ausgewertet und die Ergebnisse werden im Verhältnis zu den in der Norm definierten Grenzwerten gesetzt. Dieses Verhältnis entspricht dem sogenannten *Ausnutzungsgrad* und wird als maßgebende Größe für die Bewertung der Gleislageabweichungen herangezogen.

Für die Analyse der Ergebnisse der TGA-Methode wurden die sogenannten *Referenz-Fahrzeugreaktionen* mittels MKS-Simulationen ermittelt. Dies ermöglicht erstens eine von realen und teilweise nicht bekannten Versuchsbedingungen unbeeinflusste Bewertung der Methode, zweitens eine Reproduzierbarkeit der Vergleiche und drittens die Möglichkeit auch die Ergebnisse von einzeln aufgebrachten Anregungssignalen zu analysieren. Der Vergleich des mit der TGA-Methode geschätzten Wegverlaufs der Radaufstandskraft  $Q$  mit jenen aus der Referenzsimulation zeigt im gesamten betrachteten Wellenlängenbereich von 3 bis 70 m eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Auch der Vergleich der Maximalwerte, welche innerhalb von 250 m langen Auswertungsabschnitten berechnet werden, zeigt eine hohe Korrelation der Beurteilungsgrößen. Die Auswertungen der untersuchten Teststrecken mittels der in der Europäische Norm definierten *Qualitätsniveau* QN-Bewertung ergibt, dass die bisher verwendeten Beurteilungsgrößen (Maximalwerte der Gleislageabweichungen) nahezu keine Korrelation mit den Ergebnissen der Referenzsimulationen aufweisen.

Die Analyse des Wegverlaufs der mit der TGA-Methode geschätzten Summe der Führungskräfte  $\Sigma Y$  ergibt ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit der Referenzsimulation. Die geschätzten Maximalwerte der Auswertungsabschnitte werden im Vergleich zu jenen der Referenzsimulation jedoch zu niedrig geschätzt und auch das dazugehörige Streudiagramm zeigt eine niedrigere Korrelation der Beurteilungsgrößen. Die grundsätzliche Dynamik des Fahrzeugs in lateraler Richtung wird mit der TGA-Methode zwar entsprechend gut berücksichtigt, jedoch verursachen die örtlich wirkenden Nichtlinearitäten bei stark erhöhter lateraler Radsatzdynamik eine Abweichung der Spitzenwerte an diesen Stellen. Trotz der niedrigeren Korrelation in lateraler Richtung ist diese, verglichen mit den Analyse-Ergebnissen der QN-Bewertung, noch immer wesentlich größer. Auf Grund der durchgeführten Untersuchung kann daraus auf eine Überlegenheit der TGA-Methode gegenüber den aktuellen Bewertungsmethoden aus den Europäischen Normen geschlossen werden.

Die TGA-Methode erfüllt neben der beschriebenen Korrelation der Beurteilungsgrößen mit jenen der fahrwegbeanspruchungs- und fahrsicherheitsrelevanten Fahrzeugdynamikgrößen noch weitere wichtige Anforderungen. Die Bewertung und Klassifizierung der Gleislageabweichungen kann mittels des geschätzten Ausnutzungsgrads durchgeführt werden, woraus sich ein direkter Zusammenhang mit den bereits in der Norm definierten und bewährten Grenzwerten ergibt. Zusätzlich können im Vergleich zu den bisherigen Bewertungsmethoden auch spezifische Aussagen hinsichtlich Trassierung und Fahrzeugklasse in Kombination mit unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten getroffen werden. Bei der Anwendung der Methode werden hierfür keine spezifischen Simulationsprogramme bzw. darauf abgestimmte Fahrzeugmodelle benötigt. Da auch keine speziellen Lösungsalgorithmen für die Berechnung gebraucht werden, stehen die Ergebnisse für die unterschiedlichen Versuchsbedingungen bereits nach einer kurzen Berechnungszeit zur Verfügung. Die wissenschaftliche Forderung nach einem vereinfachten physikalischen Ersatzmodell des Fahrzeug/Fahrweg-Systems bei gleichzeitig ausreichender Modelltiefe wird mit der TGA-Methode somit a priori erfüllt.

Eine weiterhin offene Fragestellung der TGA-Methode betrifft die Berücksichtigung einer dynamischen Änderung der Rad/Schiene-Berührgeometrieverhältnisse. Diese Änderung kann durch einen Spurweitenfehler, aber auch durch eine Variation des Rad- bzw. Schienenprofils hervorgerufen werden. Die Einbindung dieses Effekts (z. B. mit dynamisch veränderbaren empirischen Übertragungsfunktionen) würde die Komplexität stark erhöhen und möglicherweise keine ausreichende Akzeptanz der Anwender zur Folge haben. Auch die im Rahmen dieser Arbeit recherchierten Forschungsarbeiten bieten hierfür keine adäquaten Lösungen. Eine Verfeinerung der TGA-Methode könnte durch Einbeziehung weiterer Fahrzeugmodelle für die Ermittlung der empirischen Übertragungsfunktionen erreicht werden. Für die vorliegende Arbeit standen nur zwei Fahrzeugmodelle (Reisezugwagen, Lokomotive) mit hoher Modelltiefe zur Verfügung, wobei besonders die Untersuchung eines Güterwagenmodells auf Grund des zu erwartenden starken Einflusses der Nichtlinearitäten sinnvoll wäre. Zusätzlich könnten auf Basis von mehreren Fahrzeugtypen die Grenzen für die Fahrzeugklassen analysiert bzw. bei Bedarf in weitere Klassen unterteilt werden. Die Einteilung der Klassen für die letztendliche Beurteilung der geometrischen Gleislageabweichungen sollte durch Einbeziehung von praktischen Erfahrungen erfolgen, da in der Europäischen Norm für die fahrtechnischen Zulassungsversuche nur die Maximal-Grenzwerte ohne Zwischenabstufungen definiert sind.

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass dem Anwender mit der in der vorliegenden Arbeit entwickelten TGA-Methode eine neue und effiziente Möglichkeit zur Bewertung von Gleislageabweichungen auf Basis von Fahrzeugreaktionen zur Verfügung steht. Mit dieser Arbeit wird das Potenzial für eine gemeinsam verwendbare und akzeptable Methode für die Fahrzeughersteller und Infrastrukturbetreiber aufgezeigt und damit ein wissenschaftlicher Beitrag für die Interoperabilität des Bahnsystems in Europa geleistet.



# Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit

## Journals und Proceedings

- Peer-Reviewed Paper für das Journal Vehicle System Dynamics [34]:  
Luber, B.; Haigermoser, A. and Grabner, G.: *Track geometry evaluation method based on vehicle response prediction*, Vehicle System Dynamics, 48, November, 2010
- Peer-Reviewed Paper für das Journal e&i Elektrotechnik und Informationstechnik [32]:  
Luber, B.: *Railway track quality assessment method based on vehicle system identification*, e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, 126, Mai, 2009
- Paper für das Journal Internationales Verkehrswesen [36]:  
Luber, B.; Rosenberger, M. und Schmeja, M.: *Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion: Ihre Bedeutung für das System Eisenbahn*, Internationales Verkehrswesen, 9, 2010
- Paper für das Journal European Rail Technology Review [37]:  
Luber, B.; Rosenberger, M. and Schmeja, M.: *Research into vehicle/track interactions*, European Rail Technology Review, 51, 2011
- Paper für das Journal Virtual Vehicle Magazin [31]:  
Luber, B.: *Gleislage - Qualität?*, Virtual Vehicle Magazine, 3, 2009
- Full-Paper für die IAVSD-2009 [33]:  
Luber, B.; Haigermoser, A. and Grabner, G.: *Track geometry evaluation method based on vehicle response prediction*, 21<sup>th</sup> International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Stockholm, Sweden 17-21 August, 2009
- Full-Paper für die VSDIA-2008 [35]:  
Luber, B.; Haigermoser, A.; Grabner, G.; Schleinzer, G. and Hirschberg, W.: *Methods for classification and track geometry evaluation based on vehicle response analysis*, 11<sup>th</sup> Mini Conference on Vehicle System Dynamics Identification and Anomalies, Budapest, Hungary, 10-12 November, 2008
- Full-Paper für die Rad-Schiene-2011 [13]:  
Fuchs, J.; Luber, B.; Stephanides, J. und Philipp, T.: *Methoden zur Beschreibung der Gleislage zur Detektion charakteristischer Störungen*, Tagungsband der 11. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden, Deutschland, 23.-25. Februar, 2011

## Konferenzvorträge

- Vortrag bei der IAVSD–2009:  
Luber, B. and Haigermoser, A.: *Track geometry evaluation method based on vehicle response prediction*, 21<sup>th</sup> International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Stockholm, Sweden, 17-21 August, 2009
- Vortrag bei der VSDIA–2008:  
Luber, B.: *Methods for classification and track geometry evaluation based on vehicle response analysis*, 11<sup>th</sup> Mini Conference on Vehicle System Dynamics Identification and Anomalies, Budapest, Hungary, 10-12 November, 2008
- Vortrag bei der Rad–Schiene–2011:  
Fuchs, J.; Luber, B.: *Methoden zur Beschreibung der Gleislage zur Detektion charakteristischer Störungen*, 11. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, Deutschland, 23.-25. Februar, 2011

# Literaturverzeichnis

- [1] AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Richtlinie 96/48/EG – Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems – Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) des Teilsystems Infrastruktur*, 03 2008.
- [2] ANDERSON, M.: *Strategic planning of track maintenance*. Doktorarbeit, Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure, Division of Urban Studies, Stockholm, 2002.
- [3] BERGGREN, E. G., M. X. D. LI und J. SPÄNNAR: *A new approach to the analysis and presentation of vertical track geometry quality and rail roughness*. *Wear*, 265(9-10):1488–1496, 2008.
- [4] BERGH, J., F. EKSTEDT und M. LINDBERG: *Wavelets mit Anwendungen in Signal- und Bildbearbeitung*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [5] BOCCIOLONE, M., A. CAPRIOLI, A. CIGADA und A. COLLINA: *A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21:1242–1254, 2007.
- [6] DE BOOR, C.: *A Practical Guide to Splines*. Springer Verlag, New York, 2001.
- [7] ESVELD, C.: *Modern Railway Track*. MRT-Productions, Zaltbommel, 2001.
- [8] EUROPÄISCHES PATENTAMT: *EP 1 977 950 A2 – Verfahren zur wirkungsbezogenen Beurteilung der Lagequalität eines Gleises*, 2008.
- [9] FATEH, M.: *Fractal Analysis of Geometry Data for Railroad Track Condition Assessment*. Techn. Ber., Federal Railroad Administration, 2006.
- [10] FENDRICH, L.: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [11] FREDERICH, F.: *Die Gleislage - aus fahrzeugtechnischer Sicht*. *ZEVrail Glasers Annalen*, 108(12):335–362, 1984.
- [12] FUCHS, J.: *Analyse und Bewertung von Einzelstörungen in der Gleislage*. Diplomarbeit, FH JOANNEUM Studiengang Fahrzeugtechnik / Automotive Engineering & Railway Engineering, Graz, 2008.
- [13] FUCHS, J., B. LUBER, J. STEPHANIDES und T. PHILIPP: *Methoden zur Beschreibung der Gleislage zur Detektion charakteristischer Störungen*. In: *Tagungsband der 11. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden*, 2011.

- [14] HAIGERMOSER, A.: *Schienenfahrzeuge*. Technische Universität Graz, Maschinenbau, 2002.
- [15] HAIGERMOSER, A., K. LUBOSCH und W. BREUER: *Grundsätzliche Überlegungen zur Fahrwerkstechnik am Beispiel der Lokomotiv-Baureihe 189*. ZEVrail Glasers Annalen, Sonderband im Rahmen der Tagung Moderne Schienenfahrzeuge Graz, 129(129):2–15, 2005.
- [16] HANREICH, W., M. WOGOWITSCH und M. DATLER: *Umsetzung des Instandhaltungsplanes bei ÖBB Infrastruktur nach internationalen Normen*. ETR, 09:548–551, 2008.
- [17] HECHT, M.: *Gleislageuntersuchung aus fahrzeug- und oberbautechnischer Sicht*. Forschungsbericht 104, VDI, 1988.
- [18] HIRSCHBERG, W.: *Fahrzeugdynamik*. Technische Universität Graz, Vorlesungsskript, 2009.
- [19] HIRSCHBERG, W., A. EICHBERGER und H. M. WASER: *Modellbildung und Simulation in der Fahrzeugdynamik*. Technische Universität Graz, Vorlesungsskript, 2009.
- [20] HOLZFEIND, J. und R. HUMMITZSCH: *Qualitätsverhalten von Gleisen - Effekte von Neulage und Instandhaltung*. ZEVrail Glasers Annalen, 132:212–224, 06/07 2008.
- [21] KNOTHE, K. und S. STICHEL: *Schienenfahrzeugdynamik*. Springer Verlag, Berlin, 2003.
- [22] KOZEK, M.: *Track Quality Evaluation Using a Dynamic Black-Box Model of a Railway Vehicle: A Feasibility Study*. Doktorarbeit, Technischen Universität Wien - Fakultät für Maschinenbau, 1998.
- [23] KRITZER, T.: *Vergleich von international üblichen Qualitätskriterien zur Gleislagebewertung*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz - Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 2003.
- [24] KUGI, A.: *Prozessidentifikation*. Technische Universität Wien, Vorlesungsskript, 2007.
- [25] LEE, S.: *Development of Objective Track Quality Indices*. Techn. Ber., Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, Washington, 03 2005.
- [26] LI, M., E. G. BERGGREN, M. BERG und I. PERSSON: *Assessing track geometry quality based on wavelength spectra and track vehicle dynamic interaction*. Vehicle System Dynamics, 46:261–276, 2008.
- [27] LICHTBERGER, B.: *Der Einfluss des Dynamischen Gleisstabilisators auf die Haltbarkeit der Gleislage*. EI - Eisenbahningenieur, 52(6):14–19, 2001.

- [28] LICHTBERGER, B.: *Handbuch Gleis*. Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2004.
- [29] LIU, Y. und E. MAGEL: *Performance-based track geometry and the track geometry interaction map*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 223(2):111–119, 2 2009.
- [30] LJUNG, L.: *On the estimation of transfer functions*. Automatica, 21(6):677 – 696, 1985.
- [31] LUBER, B.: *Gleislage - Qualität?*. VVM - Virtual Vehicle Magazine, 3:6, 2009.
- [32] LUBER, B.: *Railway track quality assessment method based on vehicle system identification*. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 126(5):180–185, 05 2009.
- [33] LUBER, B., A. HAIGERMOSER und G. GRABNER: *Track geometry evaluation method based on vehicle response prediction*. In: *Proceedings of the IAVSD2009 - 21th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, Stockholm, 2009.
- [34] LUBER, B., A. HAIGERMOSER und G. GRABNER: *Track geometry evaluation method based on vehicle response prediction*. Vehicle System Dynamics, 48(Supplement 1):157 – 173, 11 2010.
- [35] LUBER, B., A. HAIGERMOSER, G. GRABNER, G. SCHLEINZER und W. HIRSCHBERG: *Methods for classification and track geometry evaluation based on vehicle response analysis*. In: *Proceedings of the VSDIA2008 - 11th Mini Conference on Vehicle System Dynamics Identification and Anomalies*, Budapest, 2008.
- [36] LUBER, B., M. ROSENBERGER und M. SCHMEJA: *Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion: Ihre Bedeutung für das System Eisenbahn*. Internationales Verkehrswesen, 09:17 – 19, 09 2010.
- [37] LUBER, B., M. ROSENBERGER und M. SCHMEJA: *Research into vehicle/track interactions*. RTR - European Rail Technology Review, 51:32 – 34, 1 2011.
- [38] MADEJSKI, J. und J. GRABCZYK: *Continuous geometry measurement for diagnostics of tracks and switches*. In: *Proceedings of the international conference on switches*, Delft, The Netherlands, 2002. Delft University of Technology.
- [39] MAICZ, D., P. MITTERMAYER, G. PRESLE und J. STEPHANIDES: *Muster im chaotischen dynamischen System Eisenbahn - Bildung von Strukturen*. ZEVrail Glasers Annalen, Sonderband im Rahmen der Tagung Moderne Schienenfahrzeuge Graz, 2008.
- [40] MANDELBROT, B.: *Fractal analysis and synthesis of fracture surface roughness and related forms of complexity and disorder*. International Journal of Fracture, 138:13–17, 2006.

- [41] MAZZEO, P. L., M. NITTI, E. STELLA und A. DISTANTE: *Visual recognition of fastening bolts for railroad maintenance*. Pattern Recognition Letters, 25(6):669 – 677, 2004.
- [42] MÜLLER, P. C., K. POPP und W. O. SCHIEHLEN: *Berechnungsverfahren für stochastische Fahrzeugschwingungen*. Archive of Applied Mechanics, 49(3-4):235–254, 1980.
- [43] N.N.: *Matlab 2008a*. Verfügbar unter: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), [Datum des Zugriffs: 01.07.2008].
- [44] N.N.: *Simpack 8.901*. Verfügbar unter: [www.simpack.com](http://www.simpack.com), [Datum des Zugriffs: 01.12.2008].
- [45] ÖNORM: *EN 13848-1 – Qualität der Gleisgeometrie – Teil 1: Beschreibung der Gleislagegeometrie*, 12 2003.
- [46] ÖNORM: *EN 14363 – Fahrtechnische Prüfung für die Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche*, 06 2005.
- [47] ÖNORM: *EN 15302 – Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Konizität*, 10 2005.
- [48] ÖNORM: *EN 13848-2 – Qualität der Gleisgeometrie – Teil 2: Messsysteme-Gleismessfahrzeuge*, 08 2006.
- [49] ÖNORM: *EN 13848-5 – Qualität der Gleisgeometrie – Teil 5: Geometrische Qualitätsbewertung*, 06 2008.
- [50] OPENHEIM, A. V. und R. W. SCHAFER: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. Oldenbourg Verlag, München, 3. Aufl., 1999.
- [51] ORE: *ORE-Bericht B 176 – Drehgestelle mit radial einstellbaren Radsätzen*, Utrecht, 1989.
- [52] PROUD’HOMME, A.: *La Voie*. Revue Generale des Chemins de Fer, 1:56–72, 1970.
- [53] QUARZ, V.: *Generierung von Fahrwegstörungen für vorgegebene Spektraldichten mit Hilfe orthogonaler Funktionen*. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 2004.
- [54] RIESSBERGER, K.: *Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit - oder - wie gut muß ein Gleis sein?*. In: *ÖVG Spezial*, Bd. 41, Wien, 1997.
- [55] SADEGHI, J. M. und H. ASKARINEJAD: *Development of track condition assessment model based on visual inspection*. Structure and Infrastructure Engineering, 1:1–11, 2009.
- [56] SCHIEHLEN, W.: *Technische Dynamik*. Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1986.

- [57] STRADTMANN, H. und T. KOLBE: *Die DIN EN 14363 - Grundlage der fahrtechnischen Zulassung*. In: *Tagungsband der 8. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden*, 2006.
- [58] UIC: *UIC-Merkblatt Nr. 518 - Fahrtechnische Prüfung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung und Fahrverhalten*, 01 2003.
- [59] ZACHER, M.: *Erfahrungen über das Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrweg im Hochgeschwindigkeitsverkehr bei der Deutschen Bahn AG*. *ZEVrail Glasers Annalen*, 132:241–249, 06 2008.
- [60] ZHANG, Y.-J., M. EL-SIBAIE und S. LEE: *FRA Track Quality Indices and Distribution Characteristics*. In: *Proceedings of the AREMA 2004 Annual Conference*, Nashville, TN, 09 2004.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Überblick über den Aufbau dieser Arbeit . . . . .	3
2.1	Fahrzeug und Fahrweg als gemeinsames dynamisches System . . . . .	4
2.2	Das Gleis im verwendeten Koordinatensystem . . . . .	6
2.3	Gleisgeometrie in Schienen- und Gleiskoordinaten . . . . .	6
2.4	Räumlicher Verlauf von Gleislageabweichungen . . . . .	8
2.5	Gliederung von Signalen . . . . .	9
2.6	Zeitlich bzw. örtlich verschobene Fahrzeug-Anregungssignale $\zeta_i(t)$ . . . .	14
2.7	Darstellung der Fahrzeug-Anregungsfrequenzen $f$ in Abhängigkeit von den Wellenlängen $L$ der Gleislageabweichungen und den Fahrzeuggeschwindigkeiten $v$ . . . . .	16
2.8	Schematischer Aufbau eines Schienenfahrzeugs . . . . .	17
2.9	Dynamische Rad/Schiene-Kontakt Kräfte des ersten Radsatzes bei Einpunktberührung . . . . .	18
3.1	Vergleich der Einzelfehler-Grenzwerte in EN 14363 (QN 3) und EN 13848-5 (IAL) . . . . .	26
3.2	Verlauf der Radaufstandskraft $Q_{11}$ (oben, rot) und der Längshöhenlage $z_R$ (unten, blau) mit den Maximalwerten der 250 m langen Auswertungsabschnitte . . . . .	29
3.3	Analyse eines 250 m langen Auswertungsabschnittes hinsichtlich Position und Größe des Maximalwerts der Radaufstandskraft $Q_{11}$ (oben, rot) und der Längshöhenlage $z_R$ (unten, blau) . . . . .	30
3.4	Vergleich der Maximalwerte der Längshöhe $z_{R,max}$ und der Radaufstandskraft $Q_{11,max,dyn}$ aller Abschnitte . . . . .	31
3.5	Vergleich des Zusammenhangs der Radaufstandskraft $Q_{11}$ zur Längshöhenlage $z$ des Lok-Modells und der QN-Bewertungsfunktion der Gleislageabweichungen nach EN 14363 . . . . .	32
3.6	Zusammenhang der Maximalwerte der Längshöhenlage und der 2. räumlichen Ableitung der Längshöhenlage für jeweils 500 m lange Auswertungsabschnitte (in Anlehnung an [15]) . . . . .	33
3.7	Verlauf der gefensternten Standardabweichungen einer (ungefilterten) Längshöhenlage $z$ . . . . .	35
3.8	Leistungsdichtespektrum der Längshöhe $z$ mit verschiedenen Bewertungsgrenzen . . . . .	38



3.9	Analyse der Längshöhenlage $z$ eines 800 m langen Abschnitts mit STFT und WT . . . . .	41
3.10	Verlauf der Verwindung entlang eines 100 m Abschnitts im Verhältnis zum Grenzwerte der jeweiligen Bezugsbasis . . . . .	43
3.11	Bewegungsverlauf des Wagenkastenschwerpunkts (COG) von zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten zur Berechnung der Qualität der Gleise mittels MDZ-a Ziffer . . . . .	47
4.1	Überblick über die entwickelte TGA-Methode . . . . .	54
4.2	MKS-Modelle für die Entwicklung der TGA-Methode . . . . .	56
4.3	Ein- und Ausgangsgrößen der MKS-Simulation für die Schätzung der empirischen Übertragungsfunktion . . . . .	63
4.4	Spektren der Ein- und Ausgangsgrößen für die Schätzung der empirischen Übertragungsfunktion . . . . .	65
4.5	Betrag der empirischen Übertragungsfunktion $\Sigma Y_1/y$ mit Glättung und polynomapproximiert . . . . .	66
4.6	Betrag der Übertragungsfunktionen $\Sigma Y_1/y$ – berechnet aus der System-Identifikation bzw. aus den Zustandsraum-Matrizen . . . . .	67
4.7	Betrag der Übertragungsfunktionen $\Sigma Y_1/y$ – in Abhängigkeit der Linearisierungsstufen . . . . .	68
4.8	Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen des Reisezugwagenmodells in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit . . . . .	72
4.9	Skizze eines äquivalenten Dreimassenschwingers für ein Achtfahrzeug mit einer vertikalen Gleislageanregung $\zeta_z$ . . . . .	73
4.10	Betrag der Übertragungsfunktion $Q_{11}/z$ für verschiedene linearisierte Fahrzeugtypen und deren äquivalente Dreimassenschwinger . . . . .	74
4.11	Betrag der Übertragungsfunktion $\Sigma Y_1/y$ für verschiedene linearisierte Fahrzeugtypen . . . . .	75
4.12	Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen $\Sigma Y_1/y$ des Reisezugwagenmodells in Abhängigkeit von den Anregungsamplituden . . . . .	76
4.13	Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen $\Sigma Y_1/y$ des Reisezugwagenmodells in Abhängigkeit von der freien Seitenbeschleunigung $a_q$ . . . . .	78
4.14	Betrag der empirischen Übertragungsfunktionen $\Sigma Y_1/y$ des Lokmodells in der Geraden und im Bogen . . . . .	79
4.15	Empirische Übertragungsfunktionen $Q_{12}/z$ des Lokmodells in der Geraden und im Bogen . . . . .	81
4.16	Betrag der Übertragungsfunktionen $\Sigma Y_1/y$ – in Abhängigkeit von der äquivalenten Konizität der Berührgeometrie . . . . .	82
4.17	Darstellung der dynamischen Radaufstandskraft $Q_{\text{MISO}}$ und ihre Anteile $Q_{\text{SISO}}$ . . . . .	86
5.1	Überblick über den Vorgang zum Vergleich der Ergebnisse . . . . .	90
5.2	Beispiel eines Streudiagramms zur Analyse der Maximalwerte der Summe der Führungskräfte $\Sigma Y_{\text{max}}(i)$ . . . . .	92

5.3	Verlauf der Radaufstandskraft $Q_{11}$ mit den Maximalwerten der Auswertungsabschnitte . . . . .	95
5.4	Vergleich der Maximalwerte der geschätzten Radaufstandskraft $Q_{11,max,dyn}$ und der Längshöhenlage $z_{R,max}$ mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation . . . . .	96
5.5	Schätzung der Maximalwerte der Radaufstandskraft $Q_{11,max,dyn}$ mit unterschiedlichen Fahrzeug-Übertragungsfunktionen . . . . .	97
5.6	Verlauf der Summe der Führungskräfte $\Sigma Y_1$ mit den Abschnitts-Maximalwerten . . . . .	99
5.7	Vergleich der Maximalwerte der vorherhergesagten Summe der Führungskräfte $\Sigma Y_{1,max,dyn}$ und der Richtungslage $y_{max}$ mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation . . . . .	100
5.8	Verlauf der Summe der Führungskräfte $\Sigma Y_1$ und Darstellung des Maximalwerts des Auswertungsabschnitts in einem 1900-m-Bogen . . . . .	101
5.9	Vergleich der Maximalwerte der vorherhergesagten Summe der Führungskräfte $\Sigma Y_{1,max,dyn}$ und Richtungslage $y_{max}$ mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation in einem 1900-m-Bogen . . . . .	102
5.10	Vergleich der Maximalwerte der vorherhergesagten Summe der Führungskräfte $\Sigma Y_{1,max,dyn}$ und Richtungslage $y_{max}$ mit den Fahrzeugreaktionen der Referenzsimulation in einem 450-m-Bogen . . . . .	102
6.1	Verlauf von gemessenen Gleislageabweichungen einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke . . . . .	104
6.2	QN-Klassifizierung der Gleislageabweichungen für die Auswertungsabschnitte einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke . . . . .	105
6.3	EN13848-Klassifizierung der Gleislageabweichungen einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke . . . . .	106
6.4	Neue TGA-Klassifizierung der Gleislageabweichungen für die Auswertungsabschnitte einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke als Ausnutzungsgrad der Fahrzeugreaktionen hinsichtlich der Grenzwerte aus der EN 14363 . . . . .	107
6.5	Neue TGA-Klassifizierung der Gleislageabweichungen einer 30 km langen europäischen Vollbahn-Strecke entsprechend dem Dynamikfaktor der vertikalen Fahrzeugreaktionen . . . . .	108
6.6	Analyse der Wegverläufe von zwei ausgewählten Abschnitten der QN-Bewertung und der TGA-Bewertung und Vergleich mit den Ergebnissen der Referenzsimulation . . . . .	110
6.7	Einsatzmöglichkeit der TGA-Methode zur Analyse des Wellenlängenspektrums . . . . .	115
6.8	Einsatzmöglichkeit der TGA-Methode zur Analyse der Effizienz von fahrzeugspezifischen Geschwindigkeitsreduktionen . . . . .	116

# Abkürzungen, Symbole und Formelzeichen

## Abkürzungen

Tabelle: Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AL	engl. Alert Limit (Aufmerksamkeitsgrenze)
COG	engl. Center Of Gravity (Schwerpunkt)
<i>D1</i>	Wellenlängenbereich zwischen 3 und 25 m
<i>D2</i>	Wellenlängenbereich zwischen 25 und 70 m
<i>D3</i>	Wellenlängenbereich zwischen 70 und 150 m
DB	Deutsche Bahn
DFT	Diskrete Fourier–Transformation
DG	Drehgestell, Drehgestellrahmen
EN	Europäischen Norm
ETFE	engl. Empirical Transfer Function Estimate
EU	Europäische Union
FFT	engl. Fast Fourier–Transformation
FRA	Federal Railroad Administration
FZ	Fahrzeug
GL	Gleislage
HS INS TSI	Technischen Spezifikationen zur Interoperabilität – Teilsystem Infrastruktur
IAL	engl. Immediate Action Limit (Sicherheitsgrenze)
IDFT	Inverse Diskrete Fourier–Transformation
IL	engl. Intervention Limit (Eingriffsgrenze)
KOS	Koordinatensystem
KTH	Königliche Technische Hochschule
Lok	Lokomotive
LOK <sub>1216</sub>	Elektrolokomotive der in Österreich geführten Baureihe 1216

Tabelle: Abkürzungen (*Fortsetzung*)

Abkürzung	Beschreibung
LZI	linear und zeitinvariant
MDZ	Maschinen–Durcharbeitungsziffer
MISO	engl. Multiple Input Single Output
MKS	Mehrkörpersystem
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
ORE	franz. Office de Recherches et d’Essais (Forschungs- und Versuchsamt des internationalen Eisenbahnverbands)
PSD	engl. Power Spectral Density (Leistungsdichtespektrum)
QI	Qualitätsindex
QN	Qualitätsniveau
RS	Radsatz
RZW <sub>SF400RJ</sub>	Reisezugwagen mit einem Drehgestell vom Typ SF400RJ
SF400RJ	Drehgestelltyp eines Reisezugwagens
SISO	engl. Single Input Single Output
SOK	Schienenoberkante
SR	Störungs– und Reaktionsverfahren
STFT	engl. Short-Time–Fourier-Transformation
TGA	engl. Track Geometry Assessment
TGIM	engl. Track Geometry Interaction Map
TQI	engl. Track Quality Index
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
UIC	franz. Union Internationale des Chemins de Fer (Internationaler Eisenbahnverband)
UL	engl. Utilization Level (Ausnutzungsgrad)
VRA	engl. Vehicle Response Analysis
WGB	Wirkungsbezogenen Gleislagebeurteilung
WK	Wagenkasten
WT	Wavelet–Transformation

## Formelzeichen

Tabelle: Lateinische Buchstaben

Symbol	Beschreibung	Einheit
$a$	Beschleunigung	$\text{m/s}^2$
$a_q$	freie Seitenbeschleunigung	$\text{m/s}^2$
$b$	Nennabstand der Schienen	m
$2b$	Schienenabstand	m
$C$	Autokorrelationsfunktion	
$e_0$	halber Abstand zwischen den Messkreisebenen der Rad/Schienepaarung	m
$f$	Frequenz	Hz
$f_L$	Wegfrequenz	1/m
$g$	Spurweite	m
$g_0$	Nennspurweite	m
$\Delta g$	Spurweitenfehler	m
$gh$	gegenseitige Höhenlage	m
$h_g$	Bezugspunktabstand	m
$H$	Übertragungsfunktion	
$kr$	Krümmungsradius	m
$K$	Wavelet-Koeffizienten	
$K_{\text{dyn}}$	Dynamikfaktor	-
$l$	Verwindebasis	m
$L$	Wellenlänge	m
$L_A$	Analyselänge	m
$L_{AA}$	Länge eines Auswertungsabschnittes	m
$L_0$	spezifische Bogenlänge der Soll-Gleislage	m
$L_o$	obere Eck-Wellenlänge des Filters	m
$L_S$	spezifische Bogenlänge der realen Gleislage	m
$L_u$	untere Eck-Wellenlänge des Filters	m
$m$	Masse	kg
$N$	Normalkraft im Rad/Schiene-Kontakt	N
$p$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	
$P$	Wahrscheinlichkeit	

Tabelle: Lateinische Buchstaben (*Fortsetzung*)

Symbol	Beschreibung	Einheit
$Q$	Radaufstandskraft	N
$Q_0$	statischer Anteil der Radaufstandskraft	N
$r_0$	Rollkreisradius des Rades	m
$\Delta r$	Rollradiendifferenz-Funktion	m
$R$	Gleisbogenradius	m
$R_{\text{Rad}}$	Krümmungsradius des Radprofils	m
$R_{\text{Schiene}}$	Krümmungsradius des Schienenprofils	m
$s$	Bogenlänge (Wegstrecke)	m
$s_0$	Bezugsbogenlänge	m
$\Delta s$	Sampling-Abstand	m
$\Delta s_{\varphi 0}$	Nullphasenverschiebungsweg	m
$\Delta s_P$	Wegperiode	m
$S$	Spektrale Leistungsdichte, Leistungsdichtespektrum	
$t$	Zeit	s
$\Delta t_{\varphi 0}$	Nullphasenverschiebungszeit	s
$\Delta t_P$	Zeitperiode	s
$T_{\text{lim}}$	Verwindungsgrenzwert	mm/m
$T_y$	Querreibkraft im Rad/Schiene-Kontakt	N
$u$	Überhöhung der Schienen im Bogen	m
$v$	Fahrzeuggeschwindigkeit	km/h
$V$	Fahrzeugreaktionsgröße	
$W$	Fenster-Funktion	
$W_v$	Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion	
$y$	Richtungsfehler	m
$y_{\text{RS}}$	Radsatzquerverschiebung	m
$\ddot{y}$	Querbeschleunigung im Fahrzeug	m/s <sup>2</sup>
$\ddot{y}^*$	Querbeschleunigung im Wagenkasten	m/s <sup>2</sup>
$\ddot{y}^+$	Querbeschleunigung am Drehgestell	m/s <sup>2</sup>
$Y$	Führungskraft	N
$\Sigma Y$	Summe der Führungskräfte je Radsatz	N
$\Sigma Y_0$	statische Anteil der Summe der Führungskräfte je Radsatz	N
$\Sigma Y_{\text{RSL}}$	Summe der Radsatzlagerquerkräfte je Radsatz	N

Tabelle: Lateinische Buchstaben (*Fortsetzung*)

Symbol	Beschreibung	Einheit
$Y/Q$	Quotient aus Führungskraft und Radaufstandskraft	-
$z$	Längshöhenfehler	m
$\ddot{z}^*$	Vertikalbeschleunigung im Wagenkasten	$m/s^2$
$\mathbf{A}$	Systemmatrix	
$\mathbf{B}$	Eingangsmatrix	
$\mathbf{C}$	Ausgangsmatrix	
$\mathbf{D}$	Durchgangsmatrix	
$\mathbf{I}$	Einheitsmatrix	
$\mathbf{M}$	Massenmatrix	
$\mathbf{p}$	Lagevektor	
$\mathbf{u}$	Eingangsvektor	
$\mathbf{v}$	Geschwindigkeitsvektor	
$\mathbf{w}$	Vektor der Lageintegrale der Kraftgrößen	
$\mathbf{x}$	Zustandsvektor	
$\mathbf{y}$	Ausgangsvektor	
$DFT$	Operator für die diskrete Fourier–Transformation	
$E$	Operator für den Erwartungswert	
$\mathcal{F}$	Operator für die Fourier–Transformation	
$\mathcal{F}^{-1}$	Operator für die inverse Fourier–Transformation	
$IDFT$	Operator für die inverse diskrete Fourier–Transformation	

Tabelle: Griechische Buchstaben

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\gamma_e$	Konizitätswinkel (zwischen Rad und Schiene)	rad
$\delta$	Querhöhenfehler	rad
$\delta_0$	Tangentenneigung im Radaufstandspunkt bei zentrischer Radstellung	rad
$\varepsilon_e$	äquivalenter Koeffizient der Kontaktwinkel–Funktion	-
$\zeta$	Anregungsfunktion, Anregungssignal, Zufallsfunktion	
$\lambda_e$	äquivalente Konizität (zwischen Rad und Schiene)	-
$\sigma^2$	Varianz	

Tabelle: Griechische Buchstaben (*Fortsetzung*)

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\sigma_e$	äquivalenter Koeffizient der Wankwinkel-Funktion	-
$\phi$	Einseitige Spektraldichte	
$\varphi$	Phasenwinkel	rad
$\Psi$	Wavelet-Funktion	
$\omega$	Zeitkreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit	rad/s
$\omega_L$	Wegfrequenz	1/m
$\Omega$	Wegkreisfrequenz	rad/m
$\zeta$	Anregungsvektor	

Tabelle: Indizes

Abkürzung	Beschreibung
dyn	dynamischer Anteil der Fahrzeugreaktionskraft
Ew	Extremwert
L	linke Schiene, linkes Rad
lim	Grenzwert
max	absoluter Größtwert (Mittelwert bis Spitze) bei Gleislagegrößen, 99,85 % Perzentil-Wert bei einer Radaufstandskraft $Q$ , Größtwert der 0,15 % und 99,85 % Perzentil-Werte bei einer Summe der Führungskräfte je Radsatz $\Sigma Y$
min	Minimalwert
R	rechte Schiene, rechtes Rad
Ref	Referenzgröße
St	Steigung