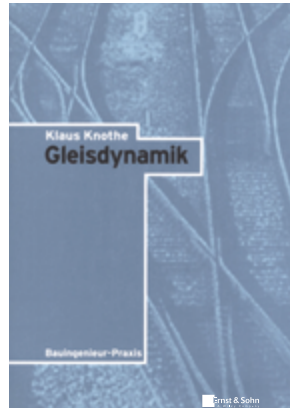


Klaus Knothe

# Gleisdynamik

- **Gleisdynamik und Gleisschädigungen sind ein relevantes Forschungsgebiet mit praktischer Anwendung, insbesondere im Anbetracht des Ausbaus der Bahn-Infrastruktur**
- **durch vorzügliche didaktische Aufbereitung und Darstellung des Stoffes erhalten Praktiker und Studenten einen einfachen Zugang**
- **Reprint der 1. Auflage von 2001**

Das Buch gibt einen Überblick über Probleme dynamischer Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Gleis mit Beispielen. Die Erweiterung des Modells der Winklerschen Bettung durch Timoshenko und anschließend beider Modelle wird erläutert und angewendet.



2021 · 222 Seiten · 20 Tabellen

Softcover  
ISBN 978-3-433-03366-1 € 39,90\*

## ÜBER DAS BUCH

Das Buch gibt in einem ersten Teil einen Überblick über die Probleme, die sich aufgrund der dynamischen Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Gleis ergeben. Anschließend werden die Möglichkeiten zur Modellierung aller Gleiskomponenten sowie derjenigen Fahrzeugkomponenten dargestellt, die bei Erfassung von Wechselwirkungen zu berücksichtigen sind. Lösungsalgorithmen und Lösungsbeispiele schließen den ersten Teil ab. - Als zweiter Teil ist eine deutsche Übersetzung der ersten Arbeit, in der Fragen der Gleisdynamik behandelt werden, aufgenommen (Timoshenko, 1915). Timoshenko verwendet eine außerordentlich einfache, aber auch heute noch in vielen Fällen sehr erfolgreiche dynamische Erweiterung des Modells der Winklerschen Bettung für Rechnungen im Zeitbereich. - Im dritten Teil schließlich wird zunächst das statische Modell von Winkler so für dynamische Rechnungen im Frequenzbereich erweitert, dass sich eine breite Palette von Gleismodellen damit behandeln lassen. Der Übergang zu Zeitbereichsmodellen, bei denen es sich dann um

Erweiterungen des Timoshenko-Modells handelt, wird vollzogen. Im Anhang findet der Leser Erläuterungen zu den heute existierenden Programmen, mit denen sich Probleme der Gleisdynamik lösen lassen. Da Gleisdynamik und Gleisschädigungen heute ein relevantes Forschungsgebiet sind, sind die Ausführungen für die theoretisch orientierte Forschung in den ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen von Interesse. Es richtet sich aber auch an Ingenieure in der Praxis, insbesondere beim Betreiber DB AG sowie bei Nahverkehrsbetrieben. Das Buch richtet sich ebenso an Studenten des Verkehrswesens und des Bauingenieurwesens, die sich mit Schienenfahrwegen beschäftigen müssen.

## BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03366-1	Gleisdynamik	€ 39,90*

## BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3366

	Privat	Geschäftlich
Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:	_____	_____
<b>Tel. +49 (0)30 47031-236</b>	Firma, Abteilung	UST-ID Nr.
<b>Fax +49 (0)30 47031-240</b>	_____	_____
<b>marketing@ernst-und-sohn.de</b>	Name, Vorname	Telefon
108208 Free Shipping	_____	_____
	Straße, Nr.	_____
	_____	_____
	PLZ/Ort/Land	E-Mail
	_____	_____
<b>www.ernst-und-sohn.de/3366</b>	Datum/Unterschrift	

# Vorwort

Im Jahre 1888 erschien im Verlag Ernst & Korn in Berlin in erster Auflage die Monographie von H. Zimmermann zur *Berechnung des Eisenbahn-Oberbaues* [351]. 1930, 42 Jahre später, kam es zu einer zweiten Auflage, in der nur kleinere Berichtigungen vorgenommen wurden. Die wesentliche Änderung war, dass der Verlag seinen Namen geändert hatte: Er hieß im Jahr 1930 Wilhelm Ernst & Sohn. Die dritte, unveränderte Auflage erschien 1941 bereits nach dem Tode von Zimmermann, ein Nachdruck dieser dritten Auflage wurde 1953 wiederum von Ernst & Sohn herausgegeben.

Die Tatsache, dass ein technisches Fachbuch nahezu ein Jahrhundert Bestand hatte, spricht für die Tragfähigkeit der seit 1867 verfügbaren Modelle zur Berechnung des Eisenbahnoberbaus und für die Sorgfalt, mit der Zimmermann das Problem abgehandelt hatte. Es ist aber auch Ausdruck einer gewissen Stagnation in der Entwicklung der Eisenbahntechnik in Deutschland, zumindest nach 1945. Japan nahm unmittelbar nach Ende des Zweiten Weltkrieges die Entwicklung eines Hochgeschwindigkeitszuges in Angriff. In Frankreich wurden 1955 erste Hochgeschwindigkeitsversuche mit dem späteren TGV durchgeführt. In Deutschland hingegen wurden erst Anfang der siebziger Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Erforschung der Grenzen des Rad/Schiene-Systems aufgenommen, die dann in die Entwicklung des ICE mündeten. Fragen der Gleisdynamik spielten dabei nur eine untergeordnete Rolle.

1997 trat der Autor an den Verlag Ernst & Sohn mit dem Vorschlag heran, ein Buch über Gleisdynamik zu verfassen. Ein solches Buch sollte kein Ersatz für die Zimmermannsche Monographie sein, sondern eine Übersicht über heutige Probleme und Lösungsmethoden auf dem Gebiet der Gleisdynamik und der Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung geben. Beim Verlag wurde dieser Vorschlag sehr offen aufgenommen. Daran änderte sich nichts, als die Abgabe des Manuskriptes immer wieder verschoben werden musste. Es änderte sich auch nichts, als es zu einem Besitzerwechsel kam. Für diese Geduld möchte der Autor dem Verlag zunächst seinen Dank aussprechen.

Ohne die Forschungsarbeiten von engagierten Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen und von Studierenden in den letzten 15 Jahren und ohne deren Mithilfe bei der Einarbeitung in  $\LaTeX$  wäre ein Buchprojekt über Gleisdynamik nicht zu realisieren gewesen. Ihnen allen sei, ohne einzelne Namen hervorzuheben, an dieser Stelle gedankt. Der Autor dankt besonders Stuart L. Grassie, mit dem er 1994 eine englische Übersichtsarbeit zu Fragen der Gleisdynamik verfasst hat, aus der das dritte Kapitel des Buches hervorgegangen ist. Er dankt Horst Elsner, der eine Übersetzung der Arbeit von Timoshenko besorgte und Professor Duda, der diese Übersetzung bearbeitete. Dank gebührt auch Frau Koll aus unserem Zeichenbüro, die vorhandene Zeichnungen überarbeitete und eine Vielzahl neuer Zeichnungen erstellte, so dass das Manuskript (besser das  $\LaTeX$ -Skript) heute in

elektronischer Form mit eingebundenen Bildern existiert. Meine Tochter Esther hat in der Abschlussphase einen Großteil des Textes sorgfältig durchgesehen und eine Vielzahl von Änderungsvorschlägen eingebracht, für die ich außerordentlich dankbar bin. Der Autor dankt schließlich allen Mitarbeitern von Ernst & Sohn, die am Zustandekommen des Projektes beteiligt waren, insbesondere Frau Herrmann, die das fertige L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Skript sehr sorgfältig Korrektur gelesen hat.

Bei aller Sorgfalt sind Fehler und Mängel in der Druckvorlage nicht zu vermeiden. Es ist vorgesehen, eine Liste der aufgefundenen Fehler (Errata-Liste) und der sich daraus ergebenden Korrekturen auf der homepage des Autors im Internet zugänglich zu machen (<http://ice.fb12.tu-berlin.de/lehre/lehrbuecher.html>). Fehlermeldungen werden erbeten an die email-Adresse [klaus.knothe@tu-berlin.de](mailto:klaus.knothe@tu-berlin.de).

Berlin im März 2001

Klaus Knothe

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	V
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	1
<b>2 Festigkeit von Schienen (Timoshenko 1915)</b> . . . . .	5
2.1 Schiene auf elastischen Stützen . . . . .	6
2.2 Balken auf kontinuierlicher elastischer Bettung . . . . .	9
2.3 Anwendungen auf die Berechnung von Schienen . . . . .	13
2.4 Dynamische Wirkungen des rollenden Rades . . . . .	18
2.5 Schwingungen bei der Bewegung des Rades . . . . .	20
2.6 Einfluss der Irregularitäten . . . . .	25
2.7 Wirkung eines Systems bewegter Lasten auf die Schiene . . . . .	36
2.8 Über die Vibrationen der Schiene . . . . .	40
<b>3 Gleismodellierung und Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung</b> . . . . .	45
3.1 Einleitung und historischer Hintergrund . . . . .	45
3.2 Probleme der Wechselwirkung von Fahrzeug und Fahrweg . . . . .	48
3.2.1 Probleme der Fahrzeugdynamik . . . . .	49
3.2.2 Probleme bei Drehgestellkomponenten und beim Radsatz . . . . .	51
3.2.3 Schäden in der Lauffläche von Rad und Schiene . . . . .	52
3.2.4 Schädigung von Gleiskomponenten . . . . .	57
3.2.5 Lärm und Erschütterungen . . . . .	59
3.2.6 Interessierende Frequenzbereiche . . . . .	60
3.3 Komponentenmodelle, Gleismodelle, Interaktionsmodelle . . . . .	62
3.3.1 Übersicht über Probleme bei der Modellierung . . . . .	62
3.3.2 Modellierung der Gleiskomponenten . . . . .	65
3.3.3 Modellierung der Fahrbahnplatte bei einer Festen Fahrbahn . . . . .	81
3.3.4 Modellierung des Systems Gleis . . . . .	81
3.3.5 Erregungsmechanismen und Erregermodelle . . . . .	84
3.3.6 Modellierung des Kontaktvorganges . . . . .	86
3.4 Lösungsalgorithmen . . . . .	88
3.4.1 Frequenzbereichslösung für eine harmonische Einzellast . . . . .	89
3.4.2 Frequenzbereichslösung für harmonische Wanderlast . . . . .	103
3.4.3 Anmerkungen zu Wellenausbreitungslösungen . . . . .	109
3.4.4 Zeitbereichslösungen . . . . .	109
3.4.5 Parametererregung und Selbsterregung . . . . .	115

3.5	Historischer Überblick . . . . .	119
3.6	Empfehlungen . . . . .	121
3.7	Schlussfolgerungen und offene Fragen . . . . .	125
<b>4</b>	<b>Ein einfaches Frequenzbereichsverfahren . . . . .</b>	<b>127</b>
4.1	Einleitung . . . . .	127
4.1.1	Wozu benötigt man Einfachmodelle? . . . . .	127
4.1.2	Voraussetzungen und Einsatzgrenzen . . . . .	128
4.1.3	Das Konzept des einfachen Frequenzbereichsverfahrens . . . . .	129
4.2	Modell für das Schottergleis . . . . .	131
4.2.1	Ausgangsmodell . . . . .	131
4.2.2	Verschmieren . . . . .	131
4.2.3	Frequenzabhängigkeit von Steifigkeit und Dämpfung . . . . .	132
4.2.4	Differenzialgleichung bei statischer Beanspruchung . . . . .	132
4.2.5	Differenzialgleichung bei dynamischer Beanspruchung . . . . .	133
4.3	Lösung im Frequenzbereich . . . . .	134
4.3.1	Statische Lösung für das mathematisch-mechanische Modell . . . . .	134
4.3.2	Dynamische Erweiterung für das Zweischichtmodell . . . . .	136
4.3.3	Analytische Lösung und Approximation der Eingangsrezeptanz . . . . .	140
4.4	Fahrzeug- und Kontaktrezeptanzen . . . . .	143
4.5	Gleichungen des Systems Fahrzeug/Gleis . . . . .	147
4.5.1	Aufstellen und Lösen der Systemgleichungen . . . . .	147
4.5.2	Ermittlung von Beanspruchungen . . . . .	149
4.6	Drehgestell mit zwei Radsätzen . . . . .	150
4.7	Ein Beispiel . . . . .	153
4.8	Parameteridentifikation . . . . .	157
4.9	Übergang in den Zeitbereich . . . . .	158
<b>5</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>159</b>
5.1	Zwischenlagen- und Schotterparameter . . . . .	159
5.1.1	Vorbemerkungen . . . . .	159
5.1.2	Parameter aus Rezeptanzmessungen im Gleis oder Labormessungen . . . . .	160
5.1.3	Parameter aus Messungen bei Zugüberfahrt . . . . .	162
5.2	Weitere elastisch gebettete Balken . . . . .	162
5.2.1	Schubweicher Balken . . . . .	163
5.2.2	Gleis mit Schienen unter Vorspannung . . . . .	169
5.2.3	Schottergleis mit Rahmenschwellen oder breiten Schwellen . . . . .	174
5.2.4	Feste Fahrbahn und Langschwengleis (Doppelbalken) . . . . .	177
<b>6</b>	<b>Bezeichnungen . . . . .</b>	<b>183</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>187</b>
	<b>Sachregister . . . . .</b>	<b>215</b>

# 1 Einleitung

In den Anfangsjahren der Eisenbahn existierte eine kaum mehr überschaubare Vielfalt von unterschiedlichen Gleiskomponenten, d.h. von Schienenquerschnitten, Schienenbefestigungen, Schwellentypen und von Material und Aufbau der darunterliegenden Schichten [334]. Ursache dieser Vielfalt war zum einen die dezentrale Entwicklung des Gleisnetzes. Zum anderen waren nicht verfügbare theoretischen Modelle und Berechnungsverfahren dafür verantwortlich, dass im trial-and-error Verfahren optimale Varianten herausgefunden werden mussten. Mit jeder gebrochenen Schiene, mit jedem Schotterbett, in dem aufgrund von Überbeanspruchung unzulässige Setzungen auftraten, stieg das Bedürfnis nach verlässlichen Berechnungsverfahren. Statik und Festigkeitslehre waren Mitte des 19. Jahrhunderts relativ weit entwickelt, so dass es nur eine Frage der Zeit war, bis die entsprechenden Verfahren zur Verfügung standen. Die grundlegende Vorstellung dazu, wie sich die Beanspruchungen von Gleisen unter statischer Belastung abschätzen lassen, stammt von Emil Winkler<sup>1</sup>. Im Jahr 1867 führte Winkler in seinem Hauptwerk, der *Lehre von der Elastizität und Festigkeit* [333] und in der ersten Auflage seiner Vorlesungen zum *Eisenbahnoberbau* [334] das Modell des elastisch gebetteten Balkens für die Berechnung von Langschwengleisen ein. Dieses Modell, das heute seinen Namen trägt (Winklersche Bettung), setzte sich innerhalb von 20 Jahren durch. Maßgebend hierfür war die Einfachheit und Überschaubarkeit der Theorie, maßgebend war aber auch, dass sorgfältige experimentelle Untersuchungen [352] die theoretischen Voraussagen bestätigten.

Im Jahre 1888 erschien im Verlag Ernst & Korn in erster Auflage die Monographie von Zimmermann<sup>2</sup> zur *Berechnung des Eisenbahn-Oberbaues* [351], die 65 Jahre später nahezu unverändert als Nachdruck der dritten Auflage wiederum von Ernst & Sohn herausgegeben wurde. Das Buch enthielt mehr als nur eine Darstellung und Auswertung der Winklerschen Formeln. Die Monographie von Zimmermann und mit ihr das Modell der Winklerschen Bettung bildeten für Jahrzehnte die Grundlage, mit der die Spannungen in Schienen und Schwellen und die Schotterpressungen berechnet werden konnten.

---

<sup>1</sup>Emil Winkler, geb. 1835 in Falkenberg bei Torgau, gest. 1888 in Berlin. 1865-1868 Professor für Straßen- und Wasserbau in Prag, 1868-1877 für Brücken- und Eisenbahnbau in Wien (1868-1877). Im Jahr 1877 folgte Winkler einem Ruf nach Berlin, wo er das Fach Statik der Baukonstruktionen vertrat.

<sup>2</sup>Hermann Zimmermann, geb. 1845 in Langensalza, gest. 1935 in Berlin. 1869-1875 Studium in Karlsruhe, 1874 Promotion zum Dr. phil. an der Universität Leipzig. Ab 1875 Tätigkeit bei der Reichsbahn, zunächst in Straßburg, ab 1881 als Regierungsrat im Reichsamt für die Verwaltung der Reichseisenbahnen in Berlin. Von 1891 an Nachfolger Schwedlers im Preußischen Ministerium der öffentlichen Arbeiten (Brückenbauten, Ingenieurhochbauten, Oberbau). Schöpfer der Reichstagskuppel. 1930 Veröffentlichung des Buches "Die Lehre vom Knicken auf neuer Grundlage" [96].

Schwedler<sup>3</sup> hatte das Modell schon 1882 vor der Institution of Civil Engineers in London präsentiert [275] und damit zu seiner Verbreitung im angelsächsischen Raum beigetragen, ohne allerdings Winklers Namen zu nennen.

Es dauerte nahezu weitere 40 Jahre bis sich die Erkenntnis durchsetzte, dass man das Modell der Winklerschen Bettung auch unmittelbar für Querschwellengleise einsetzen konnte. Zimmermann hatte zwar schon 1888 die Biegemomente in Querschwellen und die Schotterpressung unter den Schwellen mit Winklers Modell berechnet. Aber erst Timoshenko<sup>4</sup> wies nach, dass man ohne größere Fehler die diskrete Lagerung auf Querschwellen durch eine kontinuierliche Lagerung ersetzen konnte. Heute spricht man von einem "Verschmieren" der diskreten Lagerung. Der Inhalt dieser 1915 in Petersburg veröffentlichten Arbeit wurde erst 1926 durch einen englischsprachigen Vortrag [309] bekannt. Die Arbeit Timoshenkos aus dem Jahr 1915 war auch die erste, in der Untersuchungen zur Gleisdynamik durchgeführt wurden.

Das vorliegende Buch über Gleisdynamik knüpft an dieser Stelle an. Es ist weder ein Lehrbuch im herkömmlichen Sinn, noch ein Buch zur Präsentation eines Verfahrens wie die Monographie von Zimmermann. Es besteht auf drei Hauptteilen: In *Kapitel 2* wird eine deutsche Übersetzung der Arbeit Timoshenkos mit dem ersten Beitrag zu gleisdynamischen Problemen veröffentlicht. *Kapitel 3* gibt eine umfassende Übersicht über Probleme, Modelle und Lösungsansätze zur Gleisdynamik. *Kapitel 4* schließlich behandelt ausführlich ein Einfachmodell für Probleme der Gleisdynamik.

Die Arbeit Timoshenkos zur Gleisdynamik wird zwar häufig zitiert, sie ist aber im deutschen und englischen Sprachraum nicht zugänglich. Da sie den Ausgangspunkt für gleisdynamische Untersuchungen bildet, wird sie als *Kapitel 2* des Buches in deutscher Übersetzung veröffentlicht. Für die Bedürfnisse der Bahntechnik in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts hätten die Untersuchungen Timoshenkos zur Gleisdynamik ausgereicht. Anders als im Fall der Winklerschen Bettung wurden seine Ergebnisse aber nicht akzeptiert. Die Ursache dürfte darin liegen, dass Messungen Anfang der dreißiger Jahre [169] zu Ergebnissen führten, die im Widerspruch zu den Vorhersagen Timoshenkos standen. Eisenbahningenieure sind ein skeptisches Volk. Das Vertrauen in Experimente war zumindest in Deutschland deutlich höher als das Vertrauen in theoretische Untersuchungen. Man behalt sich damit, dass man aus Messungen dynamische Zuschlagfaktoren herleitete und die Beanspruchungen weiterhin statisch ermittelte [51].

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Gleisdynamik ging weiter. In Deutschland war sie zunächst von stark theoretischen Arbeiten von Mechanikern geprägt. Die praktische Anwendbarkeit stand nicht im Vordergrund. Ganz anders in den angelsächsischen Ländern und in Japan. In Japan war mit dem Beginn des Hochgeschwindigkeitsverkehrs Anfang der sechziger Jahre erkennbar, dass die bisherigen Verfahren zur Ermittlung von Gleis-

---

<sup>3</sup>Johann Wilhelm Schwedler, geb. 1823 in Berlin, gest. 1894 in Berlin. 1852-1858 Tätigkeit im Eisenbahnbau und 1858-1891 Vortragender Rat im Preußischen Ministerium der öffentlichen Arbeiten. Von 1859-1876 zugleich Lehrer an der Bauakademie (Maschinenbau, Baukonstruktionslehre, Brückenbau). Arbeiten zur Theorie stählerner Brücken und Kuppelgewölbe.

<sup>4</sup>Stephen P. Timoshenko, geb. 1878 in einem Dorf in der Ukraine, gest. 1972 in USA. Studium in Petersburg (1896-1900). Gastaufenthalte in München und Göttingen. 1906-1911 Professor in Kiev, später Forschungsaufenthalt in Petersburg. Nach der Oktoberrevolution zunächst in Zagreb, ab 1921 in den USA. 1927-1936 Professor in Ann Arbor, von 1936 bis 1944 Professor für Engineering Mechanics in Stanford.

beanspruchungen unzulänglich waren. In den angelsächsischen Ländern versuchte man, Schäden an Rad und Schiene, die offensichtlich dynamisch bedingt waren, theoretisch und experimentell aufzuklären. Die Entwicklung in Deutschland (aber auch in anderen Ländern) war in einem deutlichen Rückstand zu den Entwicklungen in Japan, England und den USA. Seit Mitte der 70er Jahre gab es zwar Forschungsvorhaben zur Erforschung der Grenzen des Rad/Schiene-Systems; hierbei stand aber durchweg das Fahrzeug im Mittelpunkt. Welche Auswirkungen steigende Fahrgeschwindigkeiten, höhere Achslasten, höherer Durchsatz, höhere Traktion oder konstruktive Veränderungen bei Gleisen und Fahrzeugen im Gesamtsystem zur Folge haben, wurde kaum untersucht. Die Ergebnisse dieser Forschungs- und Entwicklungsvorhaben müssen daher durchweg als Subsystemoptimierungen bezeichnet werden. Erst Mitte bis Ende der 80er Jahre gab es, vor allem an Hochschulen, eine Reihe von Vorhaben, bei denen das Gleis und die aus dem Zusammenwirken von Rad und Schiene resultierenden Beanspruchungen im Zentrum standen. Diese Entwicklung hat sehr schnell auch auf die Deutsche Bahn übergegriffen.

*Kapitel 3* befasst sich mit dieser Entwicklung. Nicht im Sinne einer historischen Abhandlung, sondern indem zunächst die Probleme erörtert werden, die bei der Wechselwirkung von Fahrzeug und Gleis zu erwarten sind, anschließend die unterschiedlichen Modelle diskutiert und schließlich die Lösungsalgorithmen vorgestellt werden. Ein Grund für diese recht ausführliche Darstellung ist, dass viele Arbeiten in Deutschland nahezu unbekannt sind. Das gilt insbesondere für Arbeiten aus China, Japan, Australien und zum Teil aus den USA, es gilt aber auch für "graue Literatur" aus Europa, die in Tagungsbänden erschienen ist oder als Technischer Bericht veröffentlicht wurde. Ein Beispiel soll illustrieren, wie wichtig es sein kann, Arbeiten wenigstens zur Kenntnis zu nehmen. 1987 trug Ahlbeck auf einer Tagung in Prag [2] Ergebnisse einer Untersuchung zum Thema "A study of dynamic impact load effects due to railroad wheel profile roughness" vor, das heißt, zum Problem dynamischer Beanspruchungen bei unrunder Rädern. Bei einer statischen Radlast von 140 kN ergaben sich dynamische Lasten von bis zu 340 kN. In der Schlussfolgerung heißt es: "These wheel profile errors are difficult to detect visually, and require electronic load detection methods to identify properly." Genau dies tut die DB AG heute, nach Eschede, mit dem verstärkten Einsatz von Radlastmessstellen. Als Anfang der neunziger Jahre unrunder Räder beim ICE auftraten, schien niemand zu wissen, dass fünf Jahre vorher Ahlbeck bereits auf dieses Problem hingewiesen hatte.

Es liegt in der Natur der Sache, dass kaum eine dieser "grauen" Arbeiten intensiv besprochen werden kann. Es soll aber wenigstens auf sie hingewiesen werden. Wer an einzelnen Aspekten interessiert ist, muss notgedrungenenerweise auf die jeweils angegebene Literatur zurückgreifen.

In *Kapitel 4* wird das einfache Frequenzbereichsverfahren für das Schotter-Querschwellengleis, das unmittelbar an das Winkler-Zimmermannsche Modell anschließt, ausführlich behandelt. Hierauf aufbauend kann der Leser selbst Programme entwickeln, mit denen sich die Kräfte zwischen Rad und Schiene, die daraus resultierenden Biegebeanspruchungen in der Schiene und die Schotterbeanspruchungen, beispielsweise aufgrund unrunder Räder, ermitteln lassen. Dies dürfte den Bedürfnissen von Eisenbahningenieuren aus der Praxis entgegenkommen. Man soll sich aber keinen Illusionen hingeben: Die Prognose von Schotterersetzungen oder die Untersuchung von Rollkontaktermüdungsschäden sind aktuelle Forschungsprobleme, die den Einsatz wesentlich aufwendigerer Analysemethoden erfordern.



Das Schotter-Querschwellengleis ist zwar das derzeitige Standardgleis. Es gibt daneben aber auch die Feste Fahrbahn und innovative Gleise mit breiten Schwellen, mit Rahmenschwellen oder mit Langschwellen (Leiterschwellen). Für die Behandlung dieser Gleise sowie mit ähnlichen Einfachverfahren sowie für zwei Erweiterungen des Querschwellengleises werden im Anhang (*Kapitel 5*) die erforderlichen Grundlagen bereitgestellt. Der Anhang enthält außerdem umfangreiche, tabellarische Zusammenstellungen von Parametern für Zwischenlagen und für Schotter/Untergrund.

Die *Gleisdynamik* ist kein Buch, das für die nächsten Jahrzehnte an die Stelle der Zimmermannschen Monographie treten wird. Für eine solche Arbeit ist die Zeit noch nicht reif. Was erreicht werden soll, ist die Einsicht in Probleme, die sich aus der Wechselwirkung von Fahrzeug und Gleis ergeben. Fahrzeug und Gleis sind Teile eines Gesamtsystems, das in aller Regel, vor allem beim Hochgeschwindigkeitsverkehr und beim Schwergüterverkehr, auch als Gesamtsystem behandelt werden muss.

### 3.3 Komponentenmodelle, Gleismodelle und Interaktionsmodelle

#### 3.3.1 Übersicht über Probleme bei der Modellierung

Bei der Modellierung des dynamischen Verhaltens des Gleises und der Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrweg unterscheidet man bei Schottergleisen bis zu sieben Subsysteme, vergleiche Bild 3.4:

1. Das Fahrzeug, d. h. Wagenkasten, Drehgestell und Radsatz;
2. den Rad-Schiene-Kontakt und den Anregungsmechanismus;
3. die Schiene;
4. das Befestigungssystem, wozu neben der Schienenbefestigung selbst vor allem die Zwischenlage gehört;
5. die Schwelle, gegebenenfalls mit Schwellenbesohlung;
6. den Schotter, unter Umständen noch mit einer Unterschottermatte;
7. den Untergrund.

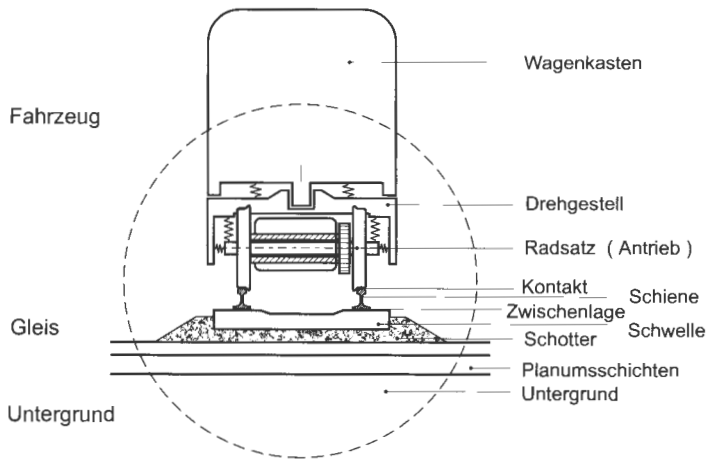


Bild 3.4: Komponenten des Systems Fahrzeug-Gleis

Bei der Festen Fahrbahn mit diskreter Lagerung sind die Schwellen fest mit der Fahrbahnplatte verbunden. Es entfallen dann die Komponenten 5 und 6, an ihre Stelle tritt die Fahrbahnplatte.

## Fahrzeugmodellierung

Im Abschnitt 3.2.1 wurde bereits dargestellt, dass zur Fahrzeugmodellierung, vom Radsatz abgesehen, nur wenige Anmerkungen erforderlich sind. Für Untersuchungen zur Stabilität, zum Führverhalten und zum Komfort ist nur das dynamische Verhalten im Niederfrequenzbereich von Interesse, das sich heute für die meisten praktischen Zwecke zufriedenstellend erfassen lässt. Das ist schon daraus ersichtlich, dass eine Reihe kommerzieller Simulationsprogramme verfügbar sind, mit denen die dynamische Fahrzeugantwort ermittelt werden kann (z. B. MEDYNA, SIMPACK, NUCARS, VAMPIRE, VOCO, ADAMS/RAIL, GENSYS). Für den Bereich der eigentlichen Fahrzeugdynamik existieren hervorragende Lehrbücher [174, 238], hinsichtlich moderner Methoden zur Untersuchung des Bogenlaufverhaltens ist das leider nicht der Fall.

Bei Frequenzen, die höher sind als 20 Hz, sollen die Primär- und Sekundärfederung den Drehgestellrahmen und den Wagenkasten von den Radsätzen isolieren. Auch wenn dies, wie man am Beispiel des „Brummens“ im ICE gesehen hat, nicht immer zufriedenstellend gelingt, so sind zumindest Rückwirkungen von schwachen, höherfrequenten Schwingungen im Wagenkasten auf den Radsatz praktisch nicht vorhanden. Für die höherfrequenten Vertikalbeanspruchungen zwischen Rad und Schiene und für die auf das Gleis wirkenden Lasten wird daher zumeist mit dem Konzept der „unabgefederten“ Masse gearbeitet. Hierzu gehören bei einer konservativen Betrachtung die Radsatzmasse, die Massen der Radlager und gegebenenfalls bei Tatzlagermotoren Teile der Motor- und Getriebemassen. Wenn man diese „unabgefederten“ Massen für die Vertikalberechnung als starren Körper betrachtet, dann liegt man auf der sicheren Seite. Manche Bahnverwaltungen machen von diesem Verhalten beim routinemäßigen Einsatz von Beschleunigungsmessern an Achslagern Gebrauch, um Gleislagefehler zu überwachen. Das Konzept der unabgefederten Masse in der oben geschilderten Form versagt, wenn das Rad selbst ausgeprägte Elastizitäten enthält, also beispielsweise in Form von Gummielementen zwischen Radreifen und Radscheibe oder bei Radsätzen mit stark gekrümmter Radscheibe. Etwa bei 70 Hz liegt die erste Radsatzzeigenfrequenz, bei der es zu einer Biegung der Radsatzwelle kommt, so dass man bei Anregungsfrequenzen über 50 Hz die verteilten Massen und Steifigkeiten der Welle berücksichtigen sollte. Da Eigenfrequenzen, bei denen die üblichen Radscheiben Eigenschwingungen in ihrer Ebene ausführen, erst über 2 kHz liegen, kann man bei Radsätzen ohne zusätzliche Nachgiebigkeiten auch bei Frequenzen von einigen 100 Hz näherungsweise noch mit dem Konzept der unabgefederten Masse arbeiten, wenn man als unabgefederte Masse nur die Radmasse berücksichtigt.

Wenn man Lateralschwingungen der Radscheibe untersuchen will, die durch normale und tangential Kontaktkräfte angeregt werden können, dann ist aufgrund der hohen lateralen Nachgiebigkeit des Rades ein deutlich komplizierteres Modell erforderlich. Hierbei müssen die Resonanzstellen korrekt erfasst werden, etwa um Lärmphänomene richtig wiedergeben zu können. Zu diesem Zweck sind eine Reihe relativ einfacher, semianalytischer Modelle entwickelt und verifiziert worden, bei denen zumeist der Radreifen als elastisch gebetteter Balken behandelt wird [92, 244]. In der Mehrzahl der jüngeren Arbeiten werden aber Finite-Elemente-Modelle oder Varianten davon eingesetzt [61, 109, 175, 271, 298]. Die für den mittelfrequenten Bereich verfügbaren Modelle, bei denen gleichzeitig statische und dynamische Formen berücksichtigt werden müssen, befriedigen noch nicht voll [175].

### Historische Anmerkung

Die erste Gleismodellierung ist mehr als 100 Jahre alt [275, 333, 334]. Trotzdem stehen wir heute vor der Situation, dass wir weit weniger über das Verhalten des Gleises als über das Verhalten des Fahrzeugs wissen, insbesondere was den Bereich mittlerer und hoher Frequenzen betrifft. Diese Tatsache ist vor allem eine Folge davon, dass in der Vergangenheit den Problemen der Fahrzeugdynamik größere Bedeutung beigemessen wurde als den Problemen der Gleisdynamik und der Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung, vergleiche Abschnitt 3.2. Ein Schienenfahrzeug sollte zuerst einmal in der Lage sein, mit hoher Geschwindigkeit zu fahren, bevor man sich mit den daraus resultierenden Schäden am Fahrzeug und am Gleis und mit den Instandhaltungskosten auseinandersetzt. Diese vor nunmehr sieben Jahren niedergeschriebenen Feststellungen [152] haben mit der Katastrophe von Eschede eine traurige Bestätigung erfahren. Offenkundig war es unvorstellbar, dass Betriebs- oder Dauerfestigkeitsprobleme bei der Bahn ein Risiko darstellen könnten, obwohl Ausgangspunkt für die Versuche von Wöhler Risse in den Achsen von Radsätzen waren [335, 336, 337].

Besonderes Unverständnis herrscht hinsichtlich des Schotters. Seit mehr als 100 Jahren werden Schwellen im Schotter gelagert. Zum dynamischen Verhalten des Schotters liegen trotz der verdienstvollen experimentellen Untersuchungen, z. B. [53, 190], kaum gesicherte Erkenntnisse vor. Die Herstellung von Schottergleisen ist billig, ihre Instandhaltung ist vergleichsweise einfach, allerdings kostenaufwendig. Es ist daher unwahrscheinlich, dass Schottergleise durchgängig durch die Feste Fahrbahn ersetzt werden. Ob Schottergleise sich auch bei den neuen Hochgeschwindigkeitsstrecken behaupten können, wird u. a. davon abhängen, ob es in absehbarer Zeit gelingt, das Schotterverhalten grundsätzlich physikalisch zu verstehen.

Was existiert an Übersichtsarbeiten zur Gleismodellierung? Da ist zunächst Frýbas hervorragendes theoretisches Buch [72], das seit 25 Jahren ein zuverlässiges Nachschlagewerk ist. Konstruktive Fragen zu Gleisen werden ausführlich von Esveld [59] abgehandelt. Für Probleme von Schotter und Untergrund sei auf die Monographie von Selig und Waters [276] verwiesen. Beides sind Bücher für den Praktiker, die nahezu keine Hinweise zur Gleisdynamik enthalten. In den beiden Vorläufern dieses Kapitels [86, 152] wurde bereits versucht, den Erkenntnisstand zusammenzufassen. Eine Vielzahl von Arbeiten findet man in den Proceedings der Heavy Haul Conferences, z. B. [277], die allerdings schwer zugänglich sind. Ausdrücklich hingewiesen wird auf vier Sammelbände, in denen Tagungsergebnisse zusammengefasst sind [141, 153, 216, 218].

Die folgenden Unterabschnitte beschäftigen sich mit Anforderungen an Gleismodelle und mit Lösungsverfahren. Hierbei geht es nicht um Details, sondern um Grundlagen, die für ein Verständnis erforderlich sind. Zunächst wird die Modellierung von Gleiskomponenten erörtert (Abschnitt 3.3.2), dann wird auf Aspekte der Modellierung des vollständigen Gleises eingegangen (Abschnitt 3.3.4). Schließlich werden in den Unterabschnitten 3.3.5 und 3.3.6 Fragen der Anregung und der Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes behandelt.

### 3.3.2 Modellierung der Gleiskomponenten

#### Modellierung der Schiene

Für statische Betrachtungen, Schwingungs- und Stabilitätsuntersuchungen vor 1960 und zum Teil noch danach wurde die Schiene für Vertikalschwingungen als Bernoulli-Balken behandelt, z. B. [113, 147, 240, 242, 275, 307, 309, 310, 333, 334, 351, 353]. Für Frequenzen unter etwa 500 Hz ist dieses Modell auch heute noch angemessen. Je mehr man mit der Anregung in den Bereich höherer Frequenzen kommt, umso stärker nimmt der Einfluss der Schubdeformation zu, so dass man gezwungen ist, mit einem Modell zu arbeiten, bei dem die Schiene als schubweicher Balken (Timoshenko-Rayleigh-Balken) modelliert wird. Weitaus komplizierter ist die Situation bei Lateralschwingungsvorgängen. Schon bei niedrigen Frequenzen unter 100 Hz führt die Schiene gleichzeitig Biege- und Torsionsschwingungen aus. Der statische Fall war bereits 1926 von Timoshenko betrachtet worden [309]. Da der Steg der Schiene sich gegenüber seitlichen Verformungen im Vergleich zum Schienenkopf und zum Schienenfuß relativ weich verhält, müssen schon bei wenigen hundert Hertz Kopf und Fuß getrennt als Balken mit Biege- und Torsionseigenschaften modelliert werden. Will man wissen, für welche Frequenzbereiche die unterschiedlichen Modelle einsetzbar sind, so muss man mit den Ergebnissen einer genaueren Modellierung vergleichen, die zusätzlich noch durch Experimente abgesichert sein sollte. Der erste, der ein derartiges genaueres Modell einsetzte und verifizierte, war Scholl [272, 273]. In seiner Arbeit wurde die Schiene durch Platten-Scheiben-Komponenten modelliert (Bild 3.5a).

Für eine UIC 60 Schiene wurden von Scholl die Dispersionsrelationen ermittelt, d. h. die Wellenlängen, die sich bei harmonischer Anregung mit einer bestimmten Frequenz einstellen. Die zu vier dieser Dispersionsrelationen gehörigen Schwingungsformen sind in Bild 3.6 dargestellt. Die Form A erfasst die laterale Biegung, wobei im Fuß schon Torsionseffekte erkennbar sind, die Form B die vertikale Biegung, die Form C ist die erste Torsionsform und die Form D eine höhere Biege-Torsions-Form. Nicht wiedergegeben wurde die Form F, bei der es sich um eine Längsschwingung handelt, die nur bei einer Darstellung als bewegtes Bild erkennbar ist. Der von Scholl durchgeführte Vergleich mit gemessenen Werten zeigte eine gute Übereinstimmung.

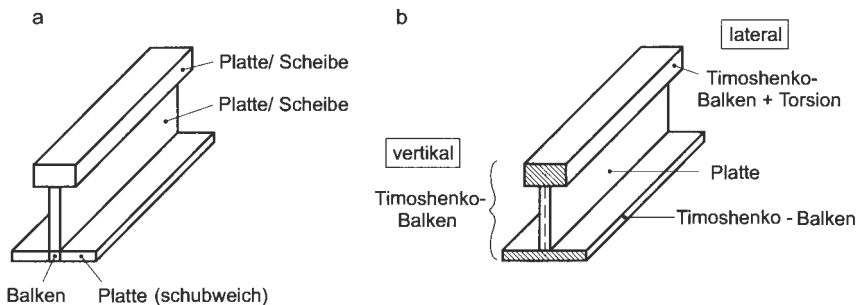


Bild 3.5: Schienenmodellierung bei Verwendung von (a) Plattenelementen (nach Scholl [273]) und (b) Balkenelementen (nach Ripke [256])

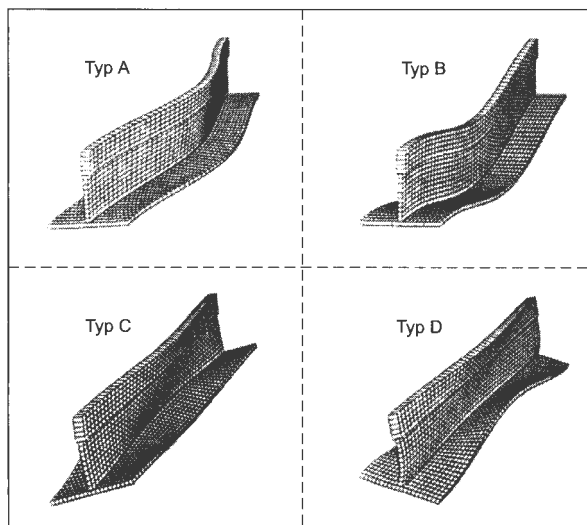


Bild 3.6: Wellenausbreitungsformen (Schwingungsformen) bei einer UIC 60 Schiene. A,C,D: Lateral-Torsions-Schwingungen; B: Vertikalschwingungen

Man könnte einwenden, dass die Schwingungen einer freien Schiene uninteressant sind, da jede Schiene auf den Schwellen gelagert ist. Die Untersuchungen haben aber sowohl praktische als auch theoretische Bedeutung. Die praktische Bedeutung besteht darin, dass immer dann, wenn eine Schwingungsform sich aufgrund der Wellenlänge gerade in den Schwellenabstand einordnet (also beispielsweise bei einem Schwellenabstand von 60 cm eine Schwingungsform mit einer Wellenlänge von  $L = 1,20\text{m}$  oder einer Wellenzahl von  $k_x = 2\pi/L \cong 5 \text{ [}\frac{1}{\text{m}}\text{]}$ ), diese Form besonders leicht anregbar sein wird. Es kommt zu einer Resonanzstelle, die beispielsweise bei der vertikalen Schwingung der UIC 60 Schiene bei 1070 Hz liegt. Derartige Schwingungsformen werden im englischen als pinned-pinned-modes bezeichnet, ein Begriff, der auch ins Deutsche übernommen wurde.

Die theoretische Bedeutung der Dispersionsrelation besteht darin, dass man mit ihrer Hilfe einfachere Modelle (Bild 3.5b) mit komplizierteren Modellen vergleichen kann. Ein solcher Vergleich findet sich in [158]. Das Ergebnis ist in Bild 3.7 wiedergegeben, wobei das Schienenmodell von Bild 3.5b verwendet wurde.

Solange man sich nur für Vertikalschwingungen bis 2,5 kHz und Wellenlängen über 40 cm interessiert, reicht es aus, die Schiene als Timoshenko-Rayleigh-Balken zu modellieren. Für Lateral- und Torsionsschwingungen in diesem Bereich müssen Schienenkopf und Schienenfuß getrennt als Timoshenko-Rayleigh-Balken erfasst werden, wobei der Schienensteg keine eigenen Freiheitsgrade besitzt, sondern nur als elastisches Verbindungselement wirkt, dessen Masse anteilig den Massen von Kopf und Fuß zugeschlagen wird. Die Eingabedaten für einen derartigen Doppelbalken lassen sich relativ einfach gewinnen.

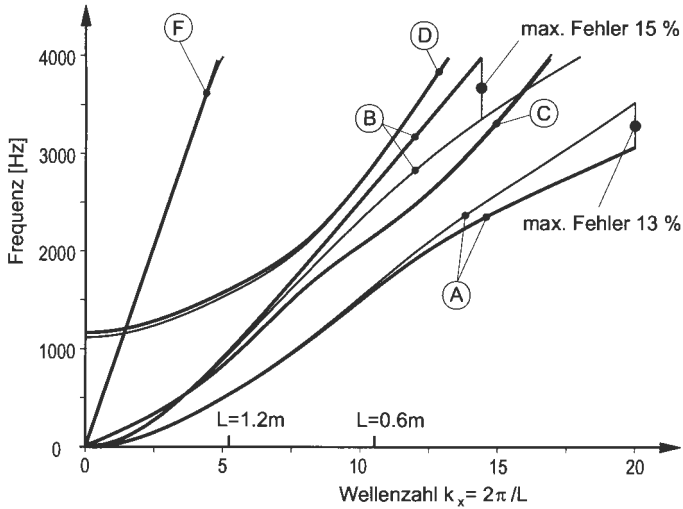


Bild 3.7: Dispersionsrelationen für eine freie UIC 60 Schiene (dicke Linien: einfaches Schienenmodell nach [256]; dünne Linien: komplexes Schienenmodell nach [273])

Für höhere Frequenzbereiche sind feinere Modellierungen erforderlich, die zum Teil schon in [158] dargestellt sind. Von Umlauf [317] wurde eine Modellierung verwendet, die bis über 10 kHz gültig ist und damit den gesamten akustisch interessierenden Frequenzbereich abdeckt. Der Modul ist im Simulationsprogramm SFE AKUSRAIL eingebaut.

### Modelle für das Schienenbefestigungssystem

Das üblicherweise bei Betonschwellen benutzte Schienenbefestigungssystem besteht aus einer zwischen Schiene und Schwelle angeordneten Zwischenlage und einer deutlich elastischeren Klemme, von der eine Vielzahl konstruktiver Varianten bestehen (siehe z. B. Bild 3.8a). Klemme und Zwischenlage sind im wesentlichen parallel geschaltete Federn. Die Klemmen sind deutlich weicher als die Zwischenlagen. Ihre Federsteifigkeit kann daher in der Regel vernachlässigt werden. Das Material der Zwischenlage ist typischerweise Gummi, ein Polymermaterial oder ein Kompositmaterial wie gummigebundener Kork. Das Last-Verschiebungs-Verhalten der Schienenbefestigung wird von der Zwischenlage bestimmt und ist nichtlinear (siehe Bild 3.9). Eine Linearisierung des Last-Verschiebungs-Diagramms um einen Arbeitspunkt wird üblicherweise damit gerechtfertigt, dass man sich hauptsächlich für das Verhalten der Zwischenlage interessiert, wenn das Rad in der Nähe der Schwelle ist. Als Arbeitspunkt wird dann die auf die Schwelle einwirkende statische Last gewählt.

Für die Vertikalschwingungen wird die Zwischenlage zumeist als Parallelschaltung von Feder und viskoser Dämpfung modelliert, siehe (Bild 3.8b). Von Kanamori [145] wurde vorgeschlagen, nicht mit viskoser Dämpfung sondern mit Strukturdämpfung zu arbeiten. Dies würde zwar dem Materialverhalten von Gummi entsprechen, es führt aber zu der Schwierigkeit, dass ein solches Modell nicht unmittelbar im Zeitbereich eingesetzt werden

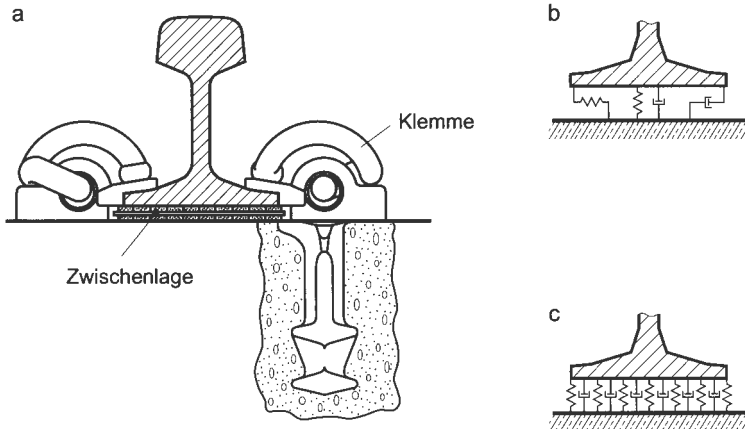


Bild 3.8: Schienenbefestigung: (a) reales System, (b) Feder-Dämpfer-Modell, (c) Bettungsmodell

kann. Sato [268] hat vorgeschlagen, dass zur Modellierung von Polymer-Zwischenlagen ein Drei-Parameter-Modell besser geeignet sein könnte, um die Veränderung der Zwischenlagensteifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz zu erfassen. Ein derartiges Modell hat zweifelsohne einige Vorteile, es wird aber auch deutlich komplizierter, drei Parameter zu ermitteln.

Für das laterale Schwingungsverhalten wird die Zwischenlage ähnlich modelliert, siehe Bild 3.8b. Will man den allgemeinen, dreidimensionalen Bewegungsvorgang modellieren, dann ist es üblich, die Zwischenlage durch eine über den Schienenfuß verteilte, viskoelastische Bettung zu erfassen (Bild 3.8c). Bei diesem Modell handelt es sich um eine Erweiterung der Winklerschen Bettung. Eine derartige Bettung lässt sich auch durch ein Kompaktelement, d. h. durch Feder-Dämpfer-Elemente in allen drei Richtungen und durch Drehfeder-Drehdämpfer-Elemente um alle drei Raumachsen ersetzen.

Praktisch ist es sehr schwierig, die richtigen Werte für die Parameter der Zwischenlage zu finden, unabhängig davon, ob man sich für ein Modell mit viskoser Dämpfung oder für ein Modell mit Strukturdämpfung entschieden hat. Es ist durchaus möglich, Laboruntersuchungen mit Zwischenlagen oder ganzen Schienenbefestigungen durchzuführen [46]. Ein anderer Weg, der vielfach als praxisnäher angesehen wird, besteht darin, auf einer Strecke mit den interessierenden Zwischenlagen bei der Überfahrt eines Fahrzeugs Messungen durchzuführen. Die gewünschten Daten lassen sich dann durch die Anpassung von Ergebnissen von Simulationsrechnungen an Messergebnisse gewinnen. Ein Kompromiss aus beiden Vorgehensweisen besteht darin, im Gleis Versuche mit einem Impulshammer oder einem elektromagnetischen Shaker durchzuführen.

Auf diese Weise gewonnene Parameter zum Vertikalverhalten von Zwischenlagen, die gegenwärtig nach Kenntnis des Autors verfügbar sind, sind im Anhang (Seite 159 bis 162) zusammengestellt. Es fällt zunächst auf, dass sich die Steifigkeiten um mehr als eine Zehnerpotenz unterscheiden. Dies ist u. a. eine Folge davon, dass bei der Auslegung von