

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 Winkler¹. 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 Langschwellengleisen 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 Zimmermann² 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.

¹Emil 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.

²Hermann 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].

Schwedler³ 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 Timoshenko⁴ 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 aus 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 behelf 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-

³Johann 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.

⁴Stephen 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 notgedrungenerweise 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.