

Numerische Simulation eines Überrollvorganges für ein Gleissystem auf geschichtetem Baugrund

Dipl.-Ing. Bernhard Faust (IFF-Berlin)
Dr.-Ing. Willi Sarfeld (SRD-Berlin)
Dipl.-Ing. Matthias Fritsche (IFF-Berlin)

1.0 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird das dynamische Verhalten eines Schiene-Schwellen-Systems auf einem geschichteten Boden analysiert. Dazu wird ein numerisches Rechenmodell entwickelt, das alle Komponenten des Gleissystems (Anregung, Schiene, Zwischenlage, Schwelle, Boden) berücksichtigt. Das Schiene-Schwellen-System wird mit finiten Elementen abgebildet, für den Boden werden frequenzabhängige Einflußfunktionen berechnet, die über ein Randelementmodell mit dem finiten Elementmodell gekoppelt werden. Es wird das Schwingungsverhalten des Gleissystems bei vollständiger Berücksichtigung der dynamischen Wechselwirkung zwischen Schiene-Schwellen-System und dem Boden untersucht. In einem weiteren Rechenmodell wird die Kopplung der Schwellen untereinander nur über die Schiene betrachtet. Die Ergebnisse dieser Analysen werden gegenübergestellt, um den starken Einfluß der Baugrundkopplung auf das Gleissystem zu zeigen. Mit den vorgestellten Fundamentallösungen kann dann ein Überrollvorgang berechnet werden.

The presented paper describes a numerical procedure to analyse a railway-track system on the surface of a layered soil. The railway-track is modelled by finite elements. The layered soil is described by influence functions. They will be used to realize a boundary element model which will be combined with the finite elements representing the railway track. In order to demonstrate the strong influence of the dynamic soil coupling, results are presented for two different numerical models. One takes into account the transmission of energy from one sleeper to another sleeper by propagating elastic waves in the layered soil and the coupling of the sleepers by rail. The other model considers the effect of coupling only through the rail itself.

2.0 Einleitung

Die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitsschienenfahrzeugen hat in den letzten 10 Jahren eine sehr große Bedeutung erreicht. Geschwindigkeiten von über 400 km/h werden angestrebt und stellen damit eine große technische Herausforderung dar. Problemstellungen, die früher vernachlässigt oder gar nicht erkannt wurden, müssen heute sowohl bei der Planung als auch bei der Konstruktion

beachtet werden. Mit diesem steigenden Anspruch wächst auch der Forschungsbedarf hinsichtlich Berechnungsmodellen, die den heutigen Stand analytischer und numerischer Möglichkeiten berücksichtigen. Darüber hinaus müssen ungeklärte technische Probleme Gegenstand neuer wissenschaftlicher Forschung werden, um unter wirtschaftlichen und noch mehr unter sicherheitstechnischen Aspekten ein zuverlässiges modernes Schienenfahrzeug zu entwickeln.

Neben den fahrdynamischen Problemen der Fahrzeugaufhängung sind die dynamischen Einflüsse des Gleisunterbaues zu untersuchen und die Stabilität des Gesamtsystems Schienenfahrzeug-Gleissystem zu beurteilen.

Im Rahmen dieses Beitrages wird der Einfluß des Baugrundes mit seinem dynamischen Verhalten als energieabsorbierendes und energietransportierendes Medium analysiert. Hierbei wird das stark anisotrope nichtlineare Verhalten des Schotterbettes nicht berücksichtigt. Vielmehr soll gezeigt werden, daß der Baugrund auch direkten Einfluß auf die dynamischen Fahreigenschaften des gesamten Gleis-Fahrzeugsystems hat.

3.0 Zur Entwicklung des Rechenmodells

Die Entwicklung des Rechenmodells basiert im wesentlichen auf modernen Verfahren von analytischen und numerischen Algorithmen zur Lösung baugrunddynamischer Probleme. Hierbei werden die Bewegungsgleichungen des Baugrundes mit Berücksichtigung der Strukturen, die auf dem Baugrund gegründet bzw. in ihm eingebettet sind, für den dreidimensionalen Fall numerisch gelöst.

Zunächst waren Lösungen für den elastischen isotropen Halbraum Grundlage zur Erfassung des Baugrundverhaltens bei dynamischen Analysen. Viele Verfahren basierten auf der Lösung von Holzöhner /1/, der eine geschlossene Beziehung für ein schlaffes Sohlspannungsbündel an der Oberfläche des Halbraumes veröffentlichte. Mit dieser Lösung konnten Sarfeld und Savidis /2/ schon 1980 Systeme mit Interaktion des Baugrundes über sieben Schwellen unter dynamischer Belastung analysieren. In der Arbeit von Lysmer und Waas /3/ wurde erstmals ein numerisches Verfahren gezeigt, mit dem Wellenausbreitungsprobleme in einem geschichteten Baugrund, der auf einem starren Untergrund lagert, behandelt werden können. Kausel /4/ hat die Arbeiten von Lysmer und Waas /3/ so erweitert, daß Einflußfunktionen eines horizontal geschichteten Baugrundes in geschlossener Form berechnet werden können. Mit diesen Einflußfunktionen können dann geschichtete Bodenprofile in ein Rechenmodell integriert und mit der Finiten-Element-Methode gekoppelt werden. Damit lassen sich beliebige Strukturen, wie Bauwerke, Gleissysteme etc. mit vollständiger dreidimensionaler Kopplung des Baugrundes modellieren.

4.0 Formulierung des Problems

4.1 Grundgleichungen

Das hier verwendete Rechenmodell ist in der Lage alle wesentlichen Komponenten des Gleissystems, wie Anregung, Schiene, Zwischenlage, Schwelle und Baugrund zu erfassen. Zur Erstellung der erforderlichen Bewegungsdifferentialgleichung wird vom Hamilton'schen Prinzip ausgegangen. Es lautet in allgemeiner dreidimensionaler Form:

$$\int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{1}{2} \int_V \mathbf{e}^t \mathbf{s} dV - \frac{1}{2} \int_V \rho \dot{\mathbf{u}}^t \dot{\mathbf{u}} dV - \int_V \mathbf{u}_0^t \mathbf{t}_0 dA \right] dt = \text{Extremum} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet \mathbf{e}^t den Vektor der Verzerrungen, \mathbf{s} den Vektor der Spannungen, \mathbf{u}^t den Deformationsvektor, $\dot{\mathbf{u}}^t$ den Geschwindigkeitsvektor, \mathbf{u}_0^t den Verschiebungsvektor an der Oberfläche und \mathbf{t}_0 den zugehörigen Spannungsvektor. Die Größe V entspricht dem Integrationsvolumen, A der Oberfläche, ρ der Massendichte und t_0 , t_1 sind Integrationsgrenzen der Zeit.

Das Gleissystem wird bei der numerischen Umsetzung auf einen endlichen Bereich abgebildet. Hierbei entsteht eine Kontaktfläche zwischen dem Schiene-Schwellen-System und dem Baugrund. (Bild 1)

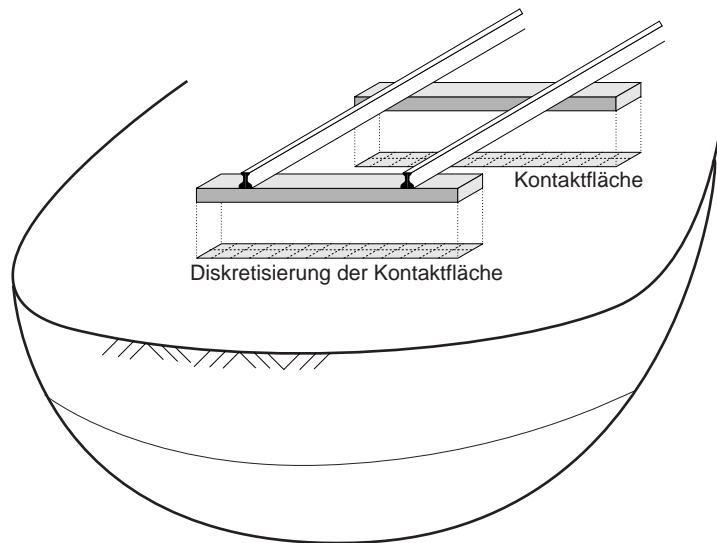


Bild 1: Gleissystem

Durch Wahl geeigneter Ansatzfunktionen im Hamilton'schen Prinzip erhält man nach Durchführung der ersten Variation die Bewegungsdifferentialgleichung

chungen in diskreter Form. Diese lauten in Matrizenform:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}(t) + \mathbf{f}_B(t) \quad (2)$$

Dabei sind \mathbf{M} , \mathbf{D} und \mathbf{K} die Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrix des Schiene-Schwellen-Systems; $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ und \mathbf{u} der Beschleunigungs-, der Geschwindigkeits- und Deformationsvektor. Die äußeren Kräfte werden mit $\mathbf{f}(t)$ und die Kräfte in der Kontaktfläche werden mit $\mathbf{f}_B(t)$ bezeichnet.

4.2 Modellierung des Baugrundes

Zur Bestimmung der Spannungen im Kontaktbereich wird der Baugrund als inhomogener Halbraum betrachtet. Um das Schwingungsverhalten, die Wellenausbreitung und die damit verbundene Energietransmission des Baugrundes im Rechenmodell zu erfassen, wird der Baugrund in vertikaler Richtung finit diskretisiert und in horizontaler Richtung durch analytische Funktionen beschrieben. Die vertikale Diskretisierung muß so gewählt werden, daß die kleinste noch zu berücksichtigende Wellenlänge hinreichend genau abgetastet wird. Diese Vorgehensweise führt zu wellenzahlabhängigen komplexen Steifigkeitsmatrizen für den geschichteten Baugrund. Durch geeignete inverse Integraltransformationen [4] können für verschiedene dynamische Belastungen frequenzabhängige Einflußfunktionen, die eine hohe numerische Genauigkeit aufweisen, in geschlossener Form ermittelt werden.

Für das hier vorgestellte Beispiel wurden Einflußfunktionen $g_z(\mathbf{x}'; \mathbf{x})$ im Bereich von $f = 0$ bis 100 Hz für eine vertikal wirkende Punktlast berechnet. Hierbei bezeichnet der Vektor \mathbf{x}' die Koordinaten des Quellpunktes und \mathbf{x} die Koordinaten des Aufpunktes. Das Bodenprofil wurde in 116 Subschichten unterteilt, dies entspricht einer Abtastrate von sieben Stützpunkten für die kleinste auftretende Wellenlänge.

4.3 Randkräfte

Zur Ermittlung der resultierenden Halbraummatrix im Kontaktbereich des Gleissystems mit dem Boden werden die berechneten Einflußfunktionen eingesetzt. Der Kontaktbereich zwischen Schwelle und Boden wird in Teilflächen diskretisiert. Weiter wird gefordert, daß das Verschiebungsfeld der Schwelle mit dem des Bodens kompatibel sein muß. Die Sohlspannungsverteilungen $q(x, y)$ in der Kontaktfläche werden als Funktionen der noch unbekanntenen Knotenfreiwerte \mathbf{q} ausgedrückt.

$$q(x, y) = \mathbf{L}^T(x, y) \mathbf{q} \quad (3)$$

Die Matrix $\mathbf{L}^T(x, y)$ enthält die Ansatzfunktionen.

Die vertikale Verschiebung an einer beliebigen Stelle $\mathbf{x} = \{x, y\}$ auf der Bodenoberfläche infolge einer Spannungsverteilung auf einem Teilbereich in der Kontaktfläche kann mittels vertikaler Einflußfunktionen $g_z(\mathbf{x}'; \mathbf{x})$ berechnet

werden. Es gilt:

$$w_B(x, y) = \iint_{x'y'} g_z(\mathbf{x}'; \mathbf{x}) q(\mathbf{x}') dx' dy' \quad (4)$$

Setzt man nun Gl. (3) in Gl. (4) ein, so folgt:

$$\begin{aligned} w_B(x, y) &= \iint_{x'y'} g_z(\mathbf{x}'; \mathbf{x}) \mathbf{L}(x', y') dx' dy' \mathbf{q} \\ &= \mathbf{g}^T \mathbf{q} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{mit } \mathbf{g}^T = \iint_{xy'} g_z(\mathbf{x}'; \mathbf{x}) \mathbf{L}(x', y') dx' dy'$$

Da sowohl die Kontaktfläche A wie auch die Schwellen diskretisiert wurden, kann die Kompatibilität des Verschiebungsfeldes der Schwelle w_S mit dem des Bodens w_B nur noch im Mittel erfüllt werden /5/. Es gilt

$$\int_A W(x, y) [w_S(x, y) - w_B(x, y)] dA = 0 \quad (6)$$

wobei $W(x, y)$ eine beliebige Wichtungsfunktion ist. Für die weitere Herleitung werden die Ansatzfunktionen aus Gl. (3) verwendet.

Das vertikale Verschiebungsfeld der Schwelle kann ausgedrückt werden als $w_S(x, y) = \mathbf{N}^T(x, y) \mathbf{u}_S$. Dabei sind $\mathbf{N}(x, y)$ die Ansatzfunktionen und \mathbf{u}_S die Verschiebungsfreiwerte. Setzt man diese Beziehung und Gl. (5) in Gl. (6) ein, so erhält man für den Sohlspannungsvektor folgende Gl.

$$\begin{aligned} \int_A \mathbf{L}(x, y) \mathbf{g}^T dA \mathbf{q} &= \int_A \mathbf{L}(x, y) \mathbf{N}^T(x, y) dA \mathbf{u}_S \\ \mathbf{G} \mathbf{q} &= \mathbf{T} \mathbf{u}_S \\ \mathbf{q} &= \mathbf{G}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{u}_S \end{aligned} \quad (7)$$

Um die Knotenkräfte \mathbf{f}_B , die auf die Schwellen wirken, zu erhalten, muß der Sohlspannungsvektor $q(x, y)$ über die Fläche integriert werden. Es gilt $\mathbf{f}_B = \int_A \mathbf{N}(x, y) q(x, y) dA$. Unter Verwendung von Gl.(7) und (3) erhält man dann

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_B &= \int_A \mathbf{N}(x, y) \mathbf{L}^T(x, y) dA \mathbf{G}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{u}_S \\ &= \mathbf{T}^T \mathbf{G}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{u}_S \\ &= \mathbf{R}_B(i\Omega) \mathbf{u}_S \end{aligned} \quad (8)$$

Dabei entspricht $\mathbf{R}_B(i\Omega)$ der auf die Freiheitsgrade der Schwelle transformierten Bodensteifigkeitsmatrix. Sie ist im Frequenzraum definiert und kann durch eine inverse Fourier Transformation \mathcal{F}^{-1} in den Zeitbereich übertragen werden.

$$\mathbf{R}_B(t) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathbf{R}_B(i\Omega)\}$$

4.4 Randkräfte im Zeitbereich

Die unbekanntenen Randkräfte $\mathbf{f}_B(t)$ im Zeitbereich können dann durch Faltung der Randmatrix und des dazugehörigen Randverschiebungsvektors ausgedrückt werden durch

$$\mathbf{f}_B(t) = \int_0^t \mathbf{R}_B(t - \tau) \mathbf{u}_S(\tau) d\tau \quad . \quad (9)$$

4.5 Überrollvorgang

Der Überrollvorgang wird über die Superposition bewegter Lasten dargestellt. Damit reduziert sich die Analyse auf das Auffinden einer Lösung, die einen Zusammenhang zwischen einer Schwingungsgröße u (Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung) im Aufpunkt x und einer bewegten Last am Quellpunkt x' herstellt. Sie lautet in mathematischer Form:

$$u(x', t) = \int_0^t H(x(\tau), x') F(x(\tau)) d\tau \quad (11)$$

Hierbei sind t die aktuelle Zeit und τ die Integrationsvariable in den Grenzen von $0 < \tau < t$. Die Funktion $H(x, x')$ ist die Übertragungsfunktion zwischen Quell- und betrachtetem Aufpunkt. Die Funktion $F(x(\tau))$ beschreibt die effektive Lastfunktion eines Radsatzes.

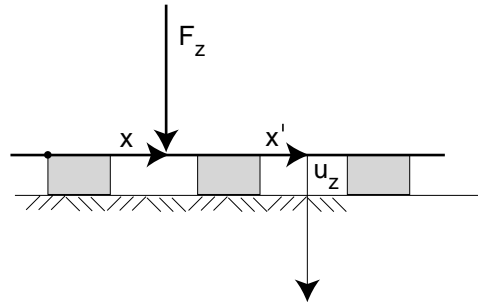


Bild 2: Systemskizze zum Überrollvorgang

Für einen Überrollvorgang mit definierter Geschwindigkeit c kann $x(t)$ ausgedrückt werden als $x(t) = ct$. Eingesetzt in Gl. (11) erhält man die System-

antwort infolge einer bewegten Lastfunktion

$$u(x', t) = \int_{t_0}^{t_1} H(c\tau, x') F(c\tau) d\tau \quad (12)$$

Da das Gleissystem in Bezug auf die Längsachse einer Schwelle unendlich viele Symmetrieachsen besitzt, reduziert sich die Berechnung der Übertragungsfunktionen nur auf den Bereich zwischen 2 benachbarten Schwellen. Somit ist in Abhängigkeit der Überrollgeschwindigkeit c die diskrete Übertragungsfunktion nach dem Abtasttheorem an n -Stützstellen zu berechnen. Der Ansatz der Lastfunktion $F(c\tau)$ hängt neben der Überrollgeschwindigkeit noch von zeitlichen Störungsfunktionen ab. Die resultierende Lastfunktion und ihre Verteilung für den Quellpunkt kann unter Verwendung des Prinzips der virtuellen Verrückung ermittelt werden.

5.0 Numerische Modellbildung

5.1 Modellübersicht

Für die numerischen Analysen wird ein Modell für ein Gleissystem auf einem geschichteten Boden erstellt. Die Schienen sind mit den Schwellen über eine Zwischenlage verbunden, die mit Feder- und Dämpferelementen modelliert werden. Die Schwellen werden mit elastischen Plattenelementen diskretisiert. Das Schotterbett wird in diesem Rechenmodell noch nicht berücksichtigt und soll später mit einer weiteren Schicht zwischen Schwelle und Baugrund in das Modell integriert werden. Zur Abbildung des nichtlinear dynamischen Materialverhaltens des Schotters können näherungsweise scherdehnungsabhängige Werte für Schubmodul und Dämpfung angesetzt werden. Die für das Modell benötigten Materialparameter müssen erforderlichenfalls experimentell bestimmt werden.

Das Gleissystem wird auf Schwelle 11 mit zwei an den Schienen wirkenden Einzellasten über ein Frequenzband von $f = 0$ Hz bis 100Hz in Schritten von $\Delta f = 1$ Hz erregt.

Die gesamte Ausdehnung des Modells beträgt $A_g = 15.9 \text{ m} \times 8.25 \text{ m}$. Die Schiene hat eine Länge $L_r = 12 \text{ m}$, einen Elastizitätsmodul $E_r = 2.1 \times 10^6 \text{ MN/m}^2$, eine Massendichte $\rho_r = 7.803 \times 10^{-3} \text{ MN s}^2/\text{m}^4$, eine Querschnittsfläche $A_r = 7.67 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ sowie die Trägheitsmomente $I_{yy} = 3.055 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ und $I_{zz} = 5.24 \times 10^{-6} \text{ m}^4$.

Für die Zwischenlage werden translatorische Steifigkeiten und Dämpfungen von $c_x = 2.8 \times 10^2 \text{ MN/m}$, $c_y = 2.5 \times 10^1 \text{ MN/m}$, $c_z = 1.0 \times 10^{-3} \text{ MN/m}$, $d_x = 2.0 \times 10^{-2} \text{ MNs/m}$, $d_y = 7.0 \times 10^{-3} \text{ MNs/m}$, $d_z = 1.0 \times 10^{-4} \text{ MNs/m}$ angesetzt.

Die Schwelle hat eine Grundfläche $A_s = 0.3 \text{ m} \times 2.60 \text{ m}$ und eine Dicke

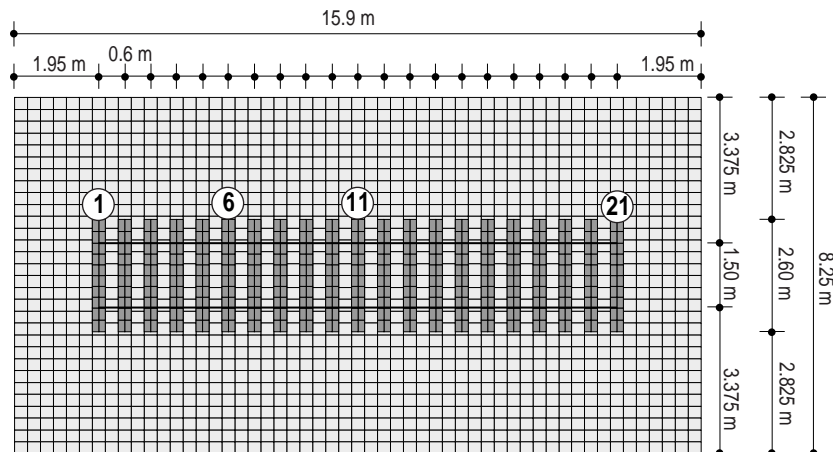


Bild 3: Grundriß des Gleissystems mit Baugrundausschnitt

von $d_s = 0.2$ m. Der Elastizitätsmodul beträgt $E_s = 27650 \text{ MN/m}^2$, die Querkontraktionszahl $\nu_s = 0.2$ und die Massendichte $\rho_r = 2.0 \times 10^{-3} \text{ MN s}^2/\text{m}^4$.

Der Baugrund besteht aus 2 Schichten, die auf einem Halbraum gelagert sind. Die Deckschicht ist 2 m dick und weist einen geringen Schubmodul auf. Die darunterliegende Schicht entspricht einem mitteldicht gelagerten Sandboden, ist 20 m dick und liegt auf einem dicht gelagerten Sand-Kiesboden auf. Für die Deckschicht wurde eine geringe Steifigkeit angesetzt, um mögliche Auswirkungen von Resonanzerscheinungen im Baugrund auf das Gleissystem zu untersuchen. Die verwendeten Stoffdaten gehen aus Tabelle 1 hervor.

	Dicke [m]	Dichte [MN s ² /m ⁴]	Schubmodul [MN/m ²]	ν []
Schicht 1	2.0	2.0×10^{-3}	12.8	0.3
Schicht 2	20.0	2.0×10^{-3}	125.0	0.4
Halbraum		2.0×10^{-3}	320.0	0.4

Tabelle 1: Stoffdaten des Bodenprofils

5.2 Rechenmodelle

Die Berechnung des hier vorgestellten Gleissystems wurde mit zwei verschiedenen Modellen durchgeführt, die das dynamische Tragverhalten des Baugrundes unterschiedlich berücksichtigen.

In Modell 1 wird die Kopplung der Schwellen sowohl über die Schienen wie auch über die vollständige dynamische Wechselwirkung mit dem Baugrund berücksichtigt. Das durch die Sohlspannungen der Schwelle i emittierte Wellenfeld im Baugrund erzeugt eine Fußpunkterregung der Schwelle k . Die durch die

Abhängigkeit der Masse und der kinematischen Randbedingungen entstehenden Sohlspannungen unter der Schwelle k strahlen dann ein neues Wellenfeld ab, das wiederum auf die Schwelle i einwirkt. Diese Interaktion wird über alle 21 Schwellen berücksichtigt und als global reagierendes Schienen-Schwellen-Baugrundsystem bezeichnet (GS-Modell).

Im 2. Modell wird die Kopplung der Schwellen nur über die Schienen berücksichtigt. Der Einfluß des durch die Schwelle i erzeugten Wellenfeldes im Baugrund auf die Schwelle k wird nicht berücksichtigt. Somit ist die effektive Steifigkeit der einzelnen Schwelle unabhängig von denen der anderen Schwellen. Dieses Modell wird als lokal reagierendes Schienen-Schwellen-Baugrundsystem (LS-Modell) definiert.

6.0 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse umfaßt die frequenzabhängigen Verschiebungsverläufe einzelner Schwellen und die Verformung der Schienen für das GS-Modell. Um den starken Einfluß der Schwelle-Baugrund-Schwelle-Wechselwirkung zu verdeutlichen, werden Ergebnisse beider Modelle (GS und LS) gegenübergestellt. Weiter wird das Wellenfeld an der Baugrundoberfläche infolge einer harmonischen Erregung der Schwelle 11 für das GS-Modell gezeigt.

Bild 4 zeigt den Betrag der vertikalen Verschiebung in der Mitte der Schwellen 1, 6 und 11 infolge einer vertikalen Erregung der Schwelle 11 über einen Frequenzbereich von 0 bis 100 Hz für das GS-Modell. Für die erregte Schwelle sind zwei signifikante Resonanzen zu erkennen, die beide aus Bodenschwingungen resultieren. Die erste Resonanzstelle liegt bei 17 Hz und bestimmt das Schwingungsverhalten aller Schwellen maßgeblich. Es handelt sich um die niedrigste Eigenfrequenz der obersten Bodenschicht bei Vertikalerregung und kann damit nur bei inhomogenen Böden auftreten.

Die zweite Resonanz liegt bei 91 Hz und zeigt sich nur an der erregten Schwelle 11. Hier handelt es sich um eine Resonanz der Schwelle selbst, die aus der Wechselwirkung über den Boden mit anderen Schwellen entsteht und sich überwiegend aus vertikalen Schwingungsanteilen zusammensetzt. Diese Veränderung des Schwingungsverhaltens wird "Interaktion" genannt. Das Schwingungsverhalten der fußpunkterregten Schwellen 1 und 6 wird durch Kippschwingungen dominiert, so daß sich die Resonanz bei 91 Hz bei diesen sog. "passiven" Schwellen nur schwach andeutet.

Die Reflexionen an den offenen Schienenenden bewirken trotz größeren Abstandes zur Erregung eine geringfügig größere Verschiebung der Schwelle 1 gegenüber der Schwelle 6, was durch Verwendung eines Übertragungsverfahrens für das Gleis verhindert werden kann. Zwischen 40 und 60 Hz werden die Verschiebungsspektren von der zweiten 20 m mächtigen Schicht geprägt.

Die Bilder 5 und 6 zeigen die Beträge der vertikalen Verschiebungen in der

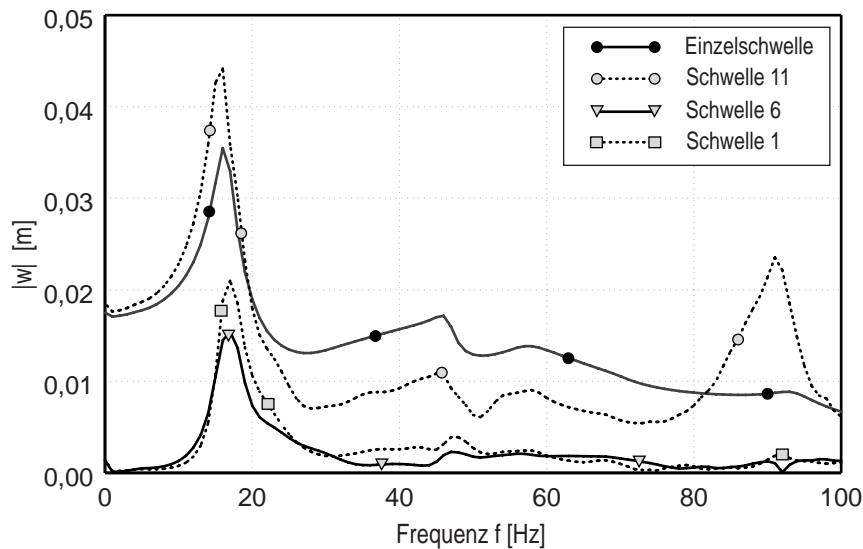


Bild 4: Vertikalverschiebung der Schwellen 1,6 und 11 des GS-Modells

Mitte der Schwellen 11 und 6 infolge einer vertikalen Erregung der Schwelle 11 für das GS- und das LS- System im Vergleich. Bild 5 zeigt, daß sich die aus der Wechselwirkung über den Boden resultierende Resonanz bei 91 Hz für die Schwelle 11 im lokal reagierenden System LS nicht ausbilden kann. Die fehlende dynamische Wechselwirkung über den Boden bewirkt auch eine Halbierung der Verschiebungsüberhöhung an der Schichteigenfrequenz bei 17 Hz.

In den Bildern 4 und 5 ist vergleichsweise auch das Verschiebungsspektrum einer gleichermaßen erregten Einzelschwelle auf dem geschichteten Halbraum dargestellt. Ihre Verschiebungen sind bei 17 Hz stärker als beim LS-Modell, aber schwächer als beim GS-Modell. Die Schwelle im Gleissystem reagiert aufgrund der Kopplung über die Schienen geringfügig steifer als die Einzelschwelle. Erst bei Berücksichtigung der Wechselwirkung über den Baugrund ändert sich das dynamische Verhalten des Gesamtsystems erheblich und zeigt eine stärkerer Ausprägung des Schwingungsverhaltens an der Schichteigenfrequenz und die Ausbildung einer Resonanzstelle bei 91 Hz. Im mittleren Frequenzbereich zwischen 20 und 80 Hz reagiert die Einzelschwelle weicher als beide Rechenmodelle.

Die Verschiebungsspektren der Schwelle 6 in Bild 6 für beide Modelle zeigen für 17 Hz eine Abschwächung der Verschiebungen auf 5% beim LS-Modell und auf 35% bei GS-Modell gegenüber der erregten Schwelle. Diese verdeutlicht die schwache Kopplung über die Schiene.

Bild 7 zeigt mit dem Realteil des komplexen Verschiebungsfeldes eine Momentanaufnahme der Durchbiegung der Schiene beider Modelle bei einer harmonischen Erregung mit 45 Hz. Bei dieser Frequenz ist das GS-Modell an Schwelle

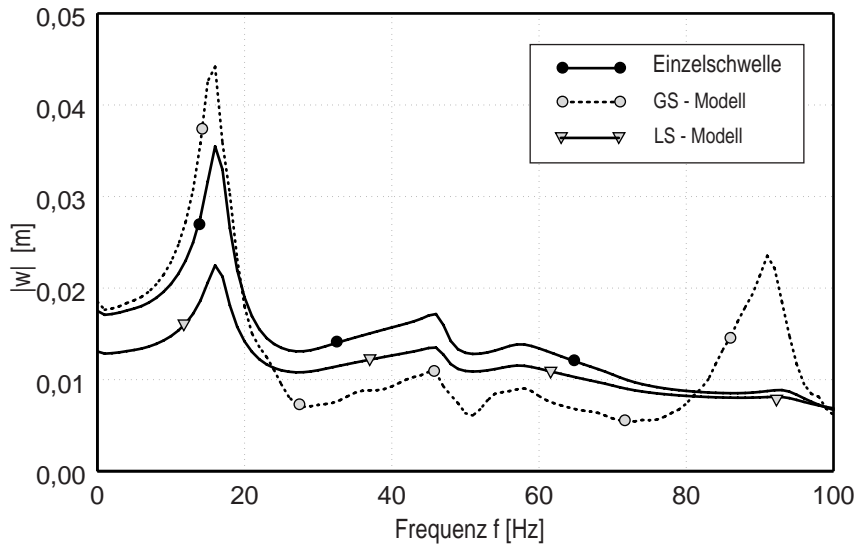


Bild 5: Vertikalverschiebung der Schwelle 11 für GS- und LS-Modell

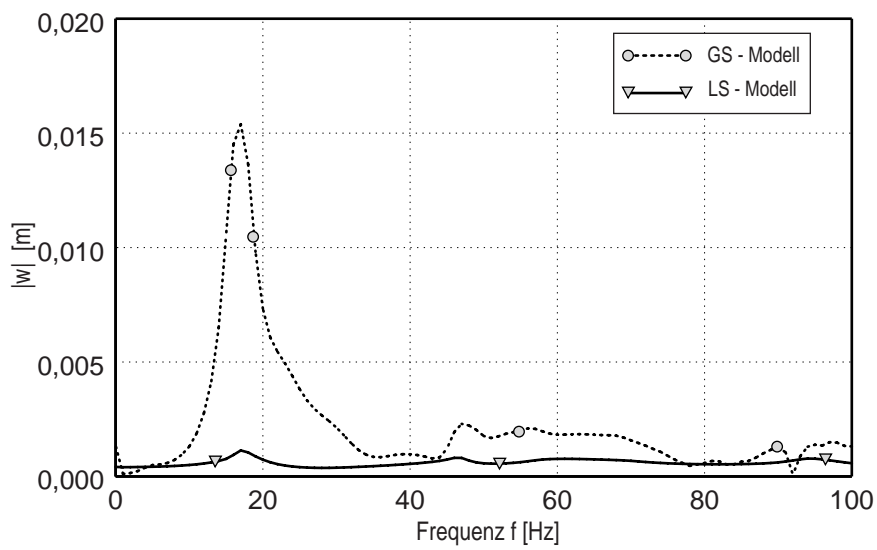


Bild 6: Vertikalverschiebung der Schwelle 6 für GS- und LS-Modell

11 steifer als das LS-Modell - s. auch Bild 5 - und bewirkt durch Wellenpropagation im Boden Verschiebungen über die gesamte Länge der Schiene. Da beim LS-Modell keine Interaktion des Schiene-Schwelle-Systems mit dem Baugrund

auftritt, nehmen die Verschiebungen der Schiene mit zunehmender Entfernung von der Erregung rasch ab.

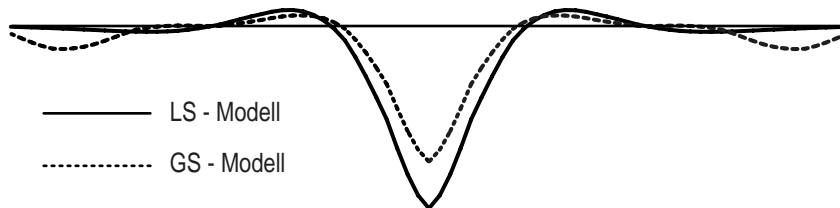


Bild 7: Durchbiegung der Schiene bei 45 Hz für GS- und LS-Modell

Bild 8 zeigt die räumliche Ausbildung des Wellenfeldes des GS-Modells bei harmonischer Erregung der Schwelle 11 mit 45 Hz. Die Anregung des Baugrundes und des gesamten Schienensystems über den Boden in Form von konzentrischen Kreisen wird nochmals verdeutlicht. Für Prognosen zum Immissionsschutz können die Schwingungsgrößen an beliebigen Koordinaten der diskretisierten Baugrundoberfläche angegeben werden.

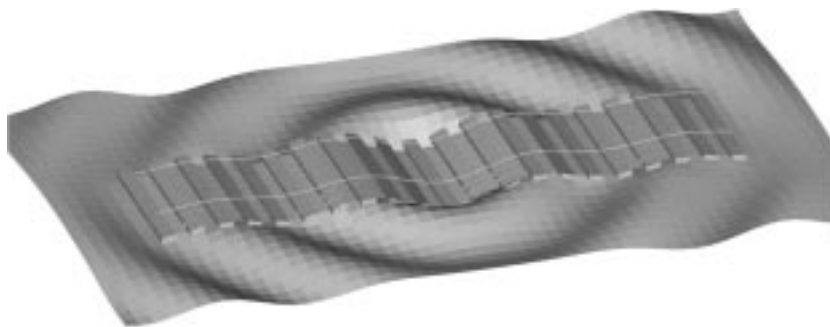


Bild 8: Räumliche Darstellung des Wellenfeldes bei 45 Hz

7.0 Schlußfolgerungen

Die Ansprüche an die Gleissysteme aus technischer Sicht sind aufgrund der heute erreichbaren und in Zukunft angestrebten Zug-Geschwindigkeiten enorm gestiegen. Numerische Analysen leisten heute einen großen Beitrag zur Beurteilung von Konstruktionen. Durch die Entwicklung neuer Rechnergenerationen

ergibt sich die Möglichkeit, komplexe Abhängigkeiten numerisch zu modellieren und mit vertretbarem Zeitaufwand zu berechnen.

Leistungsfähige Rechenmodelle erlauben realitätsnahe Simulationsrechnungen, die kostenintensive Messungen in situ sinnvoll ergänzen können. Zur Verifikation der Ergebnisse und zur Kalibrierung der Rechenmodelle ist es jedoch erforderlich, gemessene Parameter in das Modell zu integrieren und die numerischen Ergebnisse mit Messungen in situ zu vergleichen.

Mit dem hier vorgestellten Rechenmodell ist es möglich, sowohl das Schiene-Schwellen-System wie auch einen beliebig geschichteten Baugrund zu erfassen. Dabei wird die Wellenausbreitung mit der damit verbundenen Energietransmission und die Kopplung des Schwellen-Systems über den Baugrund numerisch "exakt" wiedergegeben. Mit dieser Studie wurden die aus der Berücksichtigung der Baugrundkopplung resultierenden teilweise erheblichen Veränderungen des Schwingungsverhaltens des Gesamtsystems aufgezeigt. Im Bereich der diskretisierten Baugrundoberfläche können die Schwingungsgrößen des Freifeldes – z.B. für Prognosen zum Immissionsschutz – ausgegeben werden.

Mit der vollständigen Berücksichtigung der dynamischen Wechselwirkung über den Boden kann schließlich der Überrollvorgang eines Zuges simuliert werden. Daraus können realitätsnahe Aussagen über die Beanspruchung des Schiene-Schwellen-Systems abgeleitet werden, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen.

8.0 Literatur

- /1/ Holzlöhner, U. ,1969, "Schwingungen des elastischen Halbraumes bei Erregung einer Rechteckfläche", Ing. Arch. 38, 370-379
- /2/ Savidis, S. und Sarfeld, W.,1980, "Verfahren und Anwendung der dreidimensionalen dynamischen Wechselwirkung", Vorträge zur Baugrundtagung 1980 in Mainz, 47-78
- /3/ Lysmer, J. and Waas, G. ,1972, "Shear waves in plane infinite structures", J. Engrg. Mech. Div., ASCE, 98, 859-877
- /4/ Kausel, E. ,1981, "An explicit solution for the Green functions for dynamic loads in layered media", Research Report No. R81-13, Publication No. 699, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
- /5/ Wolf, J. P. ,1985, "Dynamic Soil Structure Interaction", Prentice Hall, Englewood Cliffs