

SNCF  
SG-RDD-Bibliothèque  
45, rue de Londres  
75379 PARIS CEDEX 08  
(Central courrier)  
Tél. 01 53 42 90 11

REFERENCE

**FER031047**

CAHIER N°

**125**

2847

**EISENBAHN INGENIEUR**

vol. 50, n° 7, juillet 1999, pp. 44-48, fig., bibliogr.

Comportement dynamique de divers types de voie en fonction des charges supportées.

CR

band Deutscher Verkehrsunternehmen VDV Köln über „Zusammenschlüsse im Schienenfahrzeugbau – Chancen und Gefahren“, und Dr.-Ing. *Thilo von Madeyski* von der Deutschen Bahn AG über „Forschungsanforderungen an Hochschulen und Institute in Verbindung mit dem Forschungs- und Technologiezentrum der DB AG“. Durch alle drei Vorträge zog sich wie ein roter Faden, daß offenbar zwischen Eisenbahnfahrzeugen und Massenprodukten, wie z.B. Kraftfahrzeugen, erhebliche Unterschiede bestehen und nicht alle Veränderungen der letzten Jahre in der Schienenfahrzeugentwicklung, -produktion, -erprobung und -beschaffung optimal waren. Nur die gemeinsame, sinnvolle Abstimmung der Aufgaben zwischen Hersteller und Betreiber wird zu technisch anspruchsvollen und zugleich ausreichend betriebstüchtigen Fahrzeugen führen.

Die Tagungssektionen und Workshops waren in drei parallele Blöcke

„Rad/Schiene“ (Leitung Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Mombrei*, Prof. Dr.-Ing. habil. *Peter Ottlinger*, Dipl.-Ing. Ir. *Joop Hertel*),

„Projektierung, Berechnung und Konstruktion von Schienenfahrzeugen“ (Leitung Prof. Dr.-Ing. habil. *Klaus Pflugbeil*, Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Fischer*, Prof. Dr.-Ing. habil. *Alfred Henatsch*, Prof. Dr.-Ing. habil. *Wolfgang Hanneforth*) sowie

„Fertigung, Instandhaltung und Kostenbewertung von Schienenfahrzeugen“ (Leitung Prof. Dr.-Ing. habil. *Günter Wöhl*, Prof. Dr.-Ing. habil. *Andreas Uelze*, Dr.-Ing. *Peter Strauß*) gegliedert. Die jeweils 12 bis 15 Vorträge in diesen drei Blöcken behandelten aktuelle Fragen

■ der Entwicklung von Rädern und Radwerkstoffen, die Verschleißminderung am Rad, von Rollgeräuschuntersuchungen, der Radsatzlager, der Unrundheit von Rädern und des dynamischen Verhaltens verschiedener Oberbausysteme,

■ der konstruktionsbegleitenden Simulation, der Antriebsprojektierung, des Wagenkastens, Drehgestell-, Lokomotiv- und Triebwagenbaus, der Bremstechnik, der Abgasemission, von Bahndieselmotoren, der Schienenfahrzeug-Klimatechnik und der Lebensdauerberechnung,

■ der Instandhaltungsstrategien, der Fahrzeug-Meß- und Diagnosetechnik, der Gütesicherung, der Anwendung der Lasertechnik und dem Life-Cycle-Cost-Management.

Die für die Leser des „Eisenbahningenieur“ interessantesten Beiträge werden nachfolgend in diesem sowie in weiteren Heften veröffentlicht.

So wie die zwei vorangegangenen Tagungen war auch die Rad '99 ein voller Erfolg und ein weiterer Meilenstein auf dem Wege, diese Veranstaltungen zu einer ständigen Reihe in 1½-jährigem Turnus werden zu lassen. Dabei soll ihr Rahmen überschaubar bleiben. Die Schienenfahrzeugfachleute sehen der nächsten Rad-Tagung im September 2000 in Dresden erwartungsvoll entgegen.

*Herbert L. Haßlinger / Paul Mittermayr / Gérard Presle*

## Das dynamische Verhalten unterschiedlicher Oberbausysteme zufolge fahrender Lasten\*)

Algorithmus und Rechenprogramm zur Untersuchung des dynamisch beanspruchten Oberbaus

Die Schienen und das darunter befindliche Stützsystem werden im Eisenbahnwesen bisher hauptsächlich mit der Formel von *Zimmermann* (z.B. in [1]) oder mit sehr einfachen Biegebalkenmodellen berechnet. Die Beanspruchung erfolgt dabei nur in der vertikalen Ebene und Massen- und Dämpfungswirkungen bleiben unberücksichtigt. Ergänzt wird diese Berechnung meist noch durch eine lokale, dreidimensionale und statische Betrachtung des Berührgebiets im Radaufstandspunkt, welche in erster Linie durch das Modell der *Hertzschen* Pressung beschrieben wird. Es gehen die Krümmungen des Schienenkopfes und des Rades im Berührungspunkt, beide unendlich ausgedehnt gedacht, ein. Für Simulationszwecke werden noch die auf *Boussinesq* aufbauenden Tangentialspannungen im Berührgebiet zufolge Haft- und *Coulombscher* Gleitreibung berücksichtigt. Die unkomplizierten Modelle berücksichtigen daher nur einen Teil der komplexen Wechselwirkung von Fahrzeug und Fahrbahn und können das reale Verhalten des Oberbaus nur unzureichend beschreiben. Andererseits benötigen aufwendige Methoden wie Finite Elemente enorme Rechenleistung und die Anpassung der unter Umständen großen Anzahl von Systemparametern an einen vorgegebenen Oberbau ist schwierig und zeitaufwendig.

Die Biege-, Schub- und Torsionsbeanspruchung der Schiene und die räumlichen Beanspruchungen der Schienenbefestigungen zufolge schrägen Kraftangriffs, sowie die Einsenkung der Schwellen oder die Deformation einer Festen Fahrbahn können mit den erwähnten einfachen Modellen nicht ermittelt werden, sie sind aber für eine genaue Kenntnis des Verhaltens und zur Dimensionierung des Oberbaus unerlässlich. Nur bei einer genauen physikalischen Beschreibung können unterschiedliche Bauformen sinnvoll verglichen und in ihrer Effektivität beurteilt werden.

Zusätzlich treten dynamische Effekte auf, welche hauptsächlich in zwei Gruppen unterteilt werden können: Einerseits die dynamischen Auswirkungen zufolge Betrags- und Richtungsänderungen der durch die Räder aufgebrachtten Kräfte, an-

dererseits Einflüsse zufolge ihrer Bewegung mit mehr oder weniger hoher Geschwindigkeit längs des Gleises. Für die erste Gruppe läßt die Stellung des Radsatzes relativ zur Gleismittellinie, Sinus- und Bogenlauf, von großer Bedeutung, sowie die (Un)Rundheit der Räder, die das „Hämmern“ auf die Schienen bewirkt. Der Befestigungsabstand und die Anregungsfrequenz gehen direkt als wesentliche Parameter ein, die Schallabstrahlung des Oberbaus wird hiervon maßgeblich determiniert.

Die zweite Gruppe umfaßt Effekte zufolge der Translation der Kräfte. Dadurch wird die Bewegung von der Dämpfung der Schienen, der Zwischenlagen und der Niederhalter, gegebenenfalls der Festen Fahrbahn, und des Untergrundes ebenso wie von den Massen der Schienen und Schwellen oder Fester Fahrbahn und der Massendichte des Untergrundes beeinflusst. Deren Auswirkungen werden durch das Konzept der dynamischen Steifigkeiten bestimmt, das einfach durch eine Messung der Einsenkung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ohne wohldefinierte Abbildung in einem mechanisch-mathematischen Modell dargestellt ist. Vielerlei Steifigkeiten, Dämpfungen und Trägheiten werden hierin ohne Ansprechbarkeit der einzelnen Parameter in ihrer Summenwirkung erfaßt. Für jeden Oberbautyp ist deshalb ein eigener Versuch notwendig, eine Analyse des Oberbauverhaltens vor Ausführung aus bekannten Eigenschaften von neu kombi-

\*) Der Beitrag basiert auf einem Vortrag, den Herr *Haßlinger* auf der „Rad/Schiene '99“ an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (FH) in Dresden gehalten hat.

### Die Autoren

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Herbert L. Haßlinger**, staatlich befugter und beeideter Zivilingenieur für Maschinenbau, Wien;  
Dipl.-Ing. Dr. techn. **Paul Mittermayr**, Geschäftsinhaber des Büros für angewandte Mechanik und Mathematik, Wien;  
Dr. **Gérard Presle**, Leiter Geschäftsbereich Fahrweg – Technik der Österreichischen Bundesbahnen ÖBB, Wien, Österreich

nierten Elementen ist damit nicht möglich.

Bei beiden Gruppen sind jedenfalls die Effekte zufolge der Geometrie der Trasierung eher quasistatischer Natur. Bei in Bögen gekrümmten Gleismittellinien oder nur gekrümmten Schienen, etwa in den Übergangsbereichen zu geraden Rampen, sowie bei Stabilitätsbetrachtungen des geraden Gleises, wo Theorie zweiter Ordnung anzuwenden ist, werden die Längskräfte besonders wirksam und bestimmen wesentlich die Querbewegung mit. Die Feinheiten des Kontaktbereichs Rad-Schiene, die für die Fahrdynamik und die Untersuchung der Riffelbildung größte Bedeutung haben, sind für die Dynamik des Gleises als Ganzes nicht von Interesse. Sonderfälle wie Weichen, wo der Einfluß der Temperatur sehr wichtig ist, Kreuzungen, Brücken und Bahnübergänge erfordern spezielle Modelle. Auch sprunghafte Änderungen der Parameterwerte, etwa beim Hohlliegen einer Schwelle oder dem Übergang von einer Oberbauausführung auf eine andere, sind gesondert zu behandeln.

## Aufgabenstellung

Dieser somit geschilderte Bedarf an einer grundlegenden Untersuchung veranlaßt die Österreichischen Bundesbahnen, Geschäftsbereich Fahrweg – Technik, ein Forschungsprojekt zu beauftragen [4]. Entwickelt wurde ein exaktes Rechenmodell, das all die angeführten Parameter berücksichtigt und als Eingangsdaten in das Computerprogramm **TrackDyn** (Track dynamics, siehe [6]) benötigt. Der Typ des Oberbaus, Schotter, Feste Fahrbahn oder Masse – Feder – System [3], der Zustand und die tatsächlich auftretende, räumliche Beanspruchung der Schienen und Befestigungssysteme, die elastischen und dämpfenden Eigenschaften etwaig vorhandener Matten, sowie die durch die Bewegung der Lasten angesprochenen Dämpfungs- und Trägheitswirkungen waren zu berücksichtigen.

## Ausgangsgleichungen

### Massebehaftete Komponenten

Ausgang für die trägen und schweren Gleiskomponenten ist die um die Werkstoffdämpfung, die Vorspannung gemäß Theorie zweiter Ordnung und den Einfluß der Temperatur erweiterte und nach *Timoshenko* benannten Balkengleichungen, [7], [9] oder [2], die hier in den beiden Variablen Durchbiegung  $w_z$  und der Verdrehung  $\varphi_y$  getrennt angeschrieben wird:

$$\begin{aligned} \rho \cdot A \cdot \frac{\partial^2 w_z}{\partial t^2} = & + \frac{A}{\kappa_z} \cdot \left( G \cdot \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + D_S \cdot \frac{\partial^3 w_z}{\partial x^2 \partial t} + \right. \\ & + G \cdot \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} + D_S \cdot \frac{\partial^2 \varphi_y}{\partial x \partial t} \left. \right) + N \cdot \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + A \cdot f_z + q_z \end{aligned} \quad (1)$$

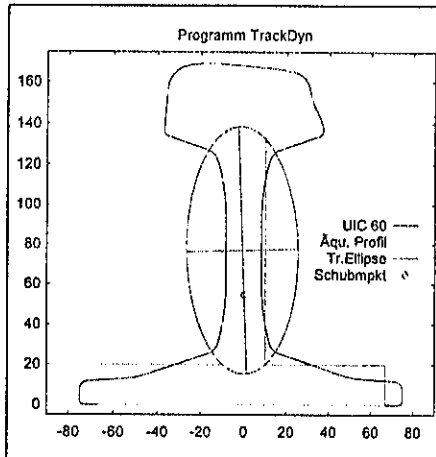


Abb.1: UIC 60 synthetisch verschlissen

$$\begin{aligned} \rho \cdot J_y \cdot \frac{\partial^2 \varphi_y}{\partial t^2} = & + J_y \cdot \left( E \cdot \frac{\partial^2 \varphi_y}{\partial x^2} + D_L \cdot \frac{\partial^3 \varphi_y}{\partial x^2 \partial t} \right) + \frac{\partial M_{Ty}}{\partial x} \\ & - \frac{A}{\kappa_z} \cdot \left( G \cdot \varphi_y + D_S \cdot \frac{\partial \varphi_y}{\partial t} + G \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + D_S \cdot \frac{\partial^2 w_z}{\partial x \partial t} \right) + m_y \end{aligned} \quad (2)$$

Sie können auf eine Differentialgleichung 6. Ordnung in der Durchbiegung umgeformt werden, wobei Kopplungen zwischen den Trägheiten und elastischen Größen des Balkens, sowie der Vorspannkraft  $N$  auftreten.  $D_L$  ist der Längsdämpfungs-,  $D_S$  der Schubdämpfungs-,  $E$  der Elastizitäts- und  $G$  der Schubmodul,  $A$  die Querschnittsfläche,  $J_y$  das Flächenträgheitsmoment,  $\rho$  die Massendichte und  $\kappa_z$  die Schubeinflußzahl. Die Temperatur wirkt sich in der Längskraft und im Temperaturmoment  $M_{Ty}$  aus.

Ähnlich aufwendig wird die Torsion nach *Saint Venant* (ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung), ebenfalls mit Dissipation und Auseinanderfallen von Schub- und Flächenmittelpunkt angesetzt:

$$\begin{aligned} + \rho \cdot J_x \cdot \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial t^2} - D_S \cdot J_T \cdot \frac{\partial^3 \varphi_x}{\partial x^2 \partial t} - G \cdot J_T \cdot \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial x^2} + \\ + \frac{A \cdot z_x}{\kappa_y} \cdot \left( + D_S \cdot \left( + \frac{\partial^3 w_y}{\partial x^2 \partial t} - \frac{\partial^2 \varphi_z}{\partial x^2 \partial t} \right) + G \cdot \right. \\ \cdot \left( + \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} - \frac{\partial \varphi_z}{\partial x} \right) \left. \right) + \frac{A \cdot y_x}{\kappa_z} \cdot \left( - D_S \cdot \left( + \frac{\partial^3 w_z}{\partial x^2 \partial t} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial^2 \varphi_y}{\partial x \partial t} \right) - G \cdot \left( + \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_y}{\partial x} \right) \right) = + m_x \end{aligned} \quad (3)$$

$G \cdot J_T$  ist die Drillsteifigkeit, die Querkkräfte wurden mit dem Werkstoffgesetz und nicht dem Schwerpunktsatz eliminiert.

Auf die Schiene werden die Gleichungen (1) und (2) in den beiden Richtungen der Trägheitshauptachsen angewendet, die bei Vorhandensein von Schienenneigung und/oder Verschleiß nicht identisch mit der Hoch- und Querachse des Gleises sind. Zur Berechnung der Torsion nach Gleichung (3) wird das Torsionsflächenmoment  $J_T$  benötigt. Dieses kann exakt aus der Lösung der *Poisson*-Gleichung oder aus einem, statisch und dynamisch der

Schiene völlig äquivalenten, dünnwandigem Ersatzprofil berechnet werden. Aus letzterem wird auch die Lage des Schubmittelpunkts bestimmt. Die Schubeinflüßzahlen in den beiden Richtungen werden ebenfalls aus dem Querschnitt berechnet. Aus dem Umriss der Schiene, sei er durch eine CAD oder einer Messung der Punkte gegeben, werden dann alle genannten Parameter durch **TrackDyn** automatisch ermittelt (siehe [6]). Man kann aber auch von neuen Schienen ausgehen und diese synthetisch durch zwei Parameter abnutzen oder durch ein Maß rundherum korrodieren.

Bei entsprechender Symmetrie des Gleisoberbaus und der Fahrzeuglasten erfolgt keine Torsions- und seitliche Bewegung der Festen Fahrbahn und des Gleistrogs eines Masse-Feder-Systems. Der Schwellenoberbau wird modelliert indem man alle viskoelastischen Parameter und die Längskraft null setzt. Weiter gilt mit der Masse  $m$  und dem Massenträgheitsmoment  $I_y$  der Schwelle, sowie dem Befestigungsabstand  $l_B$ :

$$A \cdot \rho = \frac{m}{l_B}, \quad J_y \cdot \rho = \frac{I_y}{l_B} \quad (4)$$

Alle Eigengewichte werden auf den rechten Seiten der Gleichungen berücksichtigt.

### Viskoelastische Komponenten

Die Schienenbefestigungen bestehen aus den verteilt unter dem Schienenfuß wirkenden Zwischenlagen und beliebigen Niederhaltern, die an einigen diskreten Stellen mit Einzelkräften angreifen. Alle Teile können einen nichtlinearen Verlauf der Steifigkeit normal zur Fußebene haben, der im Vorspannpunkt linearisiert wird. Parallel zu jeder Feder wirkt ein linearer Dämpfer, somit wird das Materialverhalten durch *Kelvin*-Elemente beschrieben. Man erhält eine Steifigkeits- und Dämpfungsmatrix für die Zwischenlage, welche bei Bezug auf den Mittelpunkt des Schienenfußes diagonal sind und in denen ihre Flächenträgheitsmomente als Parameter aufscheinen, und je eine Matrix pro Angriffspunkt der Niederhalter. Die Deformierbarkeit und Dissipationswirkung in allen Richtungen und um alle Achsen ist damit gegeben.

Ebenso wird eine elastische Besohlung der Schwellen, Matten unter der Festen Fahrbahn und die elastische Lagerung des Gleistrogs mit Dämpfung modelliert.

### Der Untergrund

Der Untergrund, bestehend aus Schotter und/oder Boden, wird als träges, elastisches und gedämpftes Kontinuum gedacht. Bei nur geringen Verschiebungsgradienten in der Gleisebene hat man einen ebenen Verzerrungszustand des Halbraums, bei welchem einzelne Säulen voneinander unabhängig wirken. Jede dieser Säulen wird durch die folgende Diffe-

rentialgleichung dritter Ordnung in der Verschiebung  $w$  beschrieben:

$$+ \rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - k_0 \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - k_1 \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial t} = f \quad (5)$$

$\rho$  ist die Massendichte,  $k_0$  der Steifigkeitswert, der aus dem Elastizitätsmodul und der Querdehnzahl berechnet werden kann,  $k_1$  die Dämpfung und  $f$  die Volumskraft, gebildet aus dem Eigengewicht. Bei verschwindender Dämpfung spezialisiert (5) zur bekannten, eindimensionalen Wellengleichung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit ebener Wellen  $c = \sqrt{k_0/\rho}$ .

Wie in der technischen Mechanik üblich, wird (5) mittels Ritzschem Ansatz  $w^*(z,t)$  mit anzunehmenden Verlaufsfunktionen  $w_i(z)$  und Zeitfunktionen  $q_i(t)$  weiter bearbeitet [9]. Hier wird nur ein eingliedriger Ansatz mit an der Oberfläche auf 1 normierter Verlaufsfunktion genommen,  $q_1(t)$  ist dann die Lagekoordinate an der Verbindungsstelle zur darüberliegenden Komponente.

$$w^*(z,t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \cdot w_i(z) \quad (6)$$

$$w^*(z,t) = q_1(t) \cdot w_1(z)$$

Sechs Verläufe stehen im Programm **TrackDyn** fertig zur Auswahl zur Verfügung: Drei finite, bis zu einer wählbaren Tiefe begrenzt wirkende – der einfache lineare, ein exponentieller, durch die Randsteigung determinierter, und einer in Polynomform – und drei infinite, unendlich weit wirkende und dort auf null abklingende – ein einfach exponentieller, ein gebrochen rationaler und ein aus einem Produkt gebildeter. Der Untergrund mit seiner Massendichte, Steifigkeit und Dämpfung wird somit als Verteilung einläufiger, gedämpfter Schwinger modelliert, dessen Parameter je nach Ansatzfunktion von diesen Größen unterschiedlich abhängen. Die praktische Erfahrung muß bei der Auswahl der Verlaufsfunktion Eingang finden.

## Zusammenbau der Komponenten

Beim Zusammenbau der Komponenten werden alle Abmessungen in Hoch-

richtung und alle Winkel exakt berücksichtigt. Die Kraftgrößen werden analytisch nach der Verschiebungsmethode eliminiert. Zusätzliche Parameter wie der Befestigungsabstand zur kontinuierlichen Verteilung der Befestigungskräfte, Normalkräfte, Temperaturen und Temperaturmomente und die Pressungsbreite zum Untergrund sind anzugeben.

Der Gleisoberbau und alle seine Belastungen seien symmetrisch. Die Verschiebungen und Verdrehungen werden in einem Vektor zusammengefaßt. Die Schiene hat an jedem Ort fünf, die Schwellen oder Feste Fahrbahn zwei, der optionale Gleistrog ebenfalls zwei und bei elastischer Ankopplung des Untergrunds dieser einen Freiheitsgrad. Je nach Ausführung des Oberbaus sind somit 7, 8 oder 10 Variable beteiligt. Die Systemmatrizen haben dementsprechend unterschiedliche Dimension. Der Erregungsvektor enthält die verteilten äußeren Belastungen und die Eigengewichte.

## Bewegungsgleichung und Transformation

Man erhält ein System partieller Differentialgleichungen, auf Grund der inneren Dämpfung dritter Ordnung:

$$m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + d_2 \cdot \frac{\partial^3 y}{\partial x^2 \partial t} + d_1 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + d_0 \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + k_2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + k_1 \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + k_0 \cdot y = f(x,t) = g_0 + g + q + f_T \quad (7)$$

In Gleichung (7) ist  $m$  die diagonale Massenmatrix,  $d_2$  die führende, diagonale,  $d_1$  eine schiefsymmetrische,  $d_0$  eine symmetrische Dämpfungsmatrix,  $k_2$  eine von den Längskräften abhängige,  $k_1$  eine schiefsymmetrische und  $k_0$  eine symmetrische Steifigkeitsmatrix. Der Erregungsvektor besteht aus Eigengewicht, externer Belastung zufolge dem Kollektiv der an der Schiene angreifenden Kräften beliebigen Betrags- und Wirkungslinie und Temperatur(momenten). Diese Vektorgleichung bildet das ganze, auch instationäre, dynamische Verhalten des geraden Gleises ab.

Unter Annahme konstanter Verhältnisse längs der Gleismittellinie  $x$  und konstanter Fahrgeschwindigkeit  $v$  der Folge von sonst beliebig wirkenden Einzelkräften kann Gleichung (7) in ein mit den Lasten mitbewegtes System transformiert werden. Die Zeit bleibt dadurch ungeändert, der Ort  $\xi$  lautet wie folgt:

$$\xi = x - v \cdot t \quad (8)$$

Weiter werden nur mehr die stationären Vorgänge betrachtet, das heißt, die Deformationslinien fahren unverändertlich mit und die Kräfte müssen konstant sein. Das partielle Bewegungsgleichungssystem (7) wird dann zum gewöhnlichen:

$$-v \cdot d_2 \cdot \frac{d^3 y}{d\xi^3} + (v^2 \cdot m - v \cdot d_1 + k_2) \cdot \frac{d^2 y}{d\xi^2} + (-v \cdot d_0 + k_1) \cdot \frac{dy}{d\xi} + k_0 \cdot y(\xi) = f(\xi) = g_0 + g + q + f_T \quad (9)$$

Ein Exponentialansatz für die allgemeine Lösung von Gleichung (9) liefert ein Matrixeigenproblem mit den zugehörigen Eigenwerten und Eigenvektoren, welche in der Modalmatrix gesammelt werden. Die Integrationskonstanten einer speziellen Lösung werden aus den Randbedingungen mit der Forderung des Abklingens im Unendlichen und den Übergangsbedingungen vor und hinter jeder Last ausgewertet. Eine neue Lastkonfiguration erfordert keine neuerliche Lösung des Eigenproblems, wohl aber eine andere Fahrgeschwindigkeit oder sonst geänderte Systemparameter. Da eine aufwendige numerische Integration vermieden wurde, ist die Rechenzeit extrem niedrig.

## Auswertung mit dem Programmsystem TrackDyn

Das auf einem handelsüblichen PC lauffähige Programmpaket **TrackDyn** bietet unter einer einheitlichen graphischen Benutzeroberfläche neben umfangreichen Hilfe- und Berichtsfunktionen problemlosen Zugriff auf die Berechnungs- und Auswertungsmoduln (siehe Abb. 2).

Alle Eingaben und Rechenwerte werden in einer eigenen Datenbank verwaltet. In ihr stehen die Querschnitte dreier gängiger Schienentypen, UIC 60, UIC 54E und S 49 und der lärmarmen Schiene VA 71B zur Verfügung. Sie können mit zwei Parametern synthetisch verschlissen oder rundherum korrodiert werden. Weiter können auch externe Dateien der Umrißkoordinaten, etwa solche aus Messungen, verarbeitet werden. Fläche, Mittelpunkt, Trägheitsmomente, Schubmittelpunkt, Schubeinflußzahlen und das Torsionsflächenmoment als Lösung der Poisson-Gleichung [5] werden numerisch ermittelt. Übliche Schienenwerkstoffe mit und ohne innerer Dämpfung, beliebig kombinierbare Zwischenlagen und Niederhalter, verschiedene Holz- und Betonschwellen

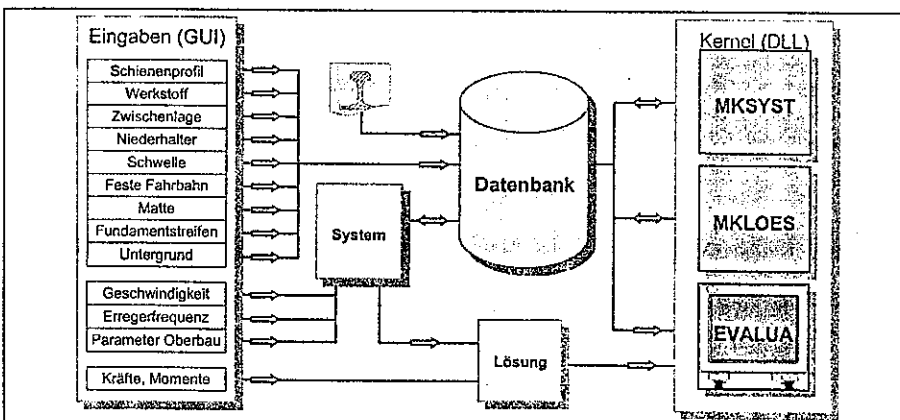


Abb. 2: Aufbau des Programmsystems TrackDyn 2.0

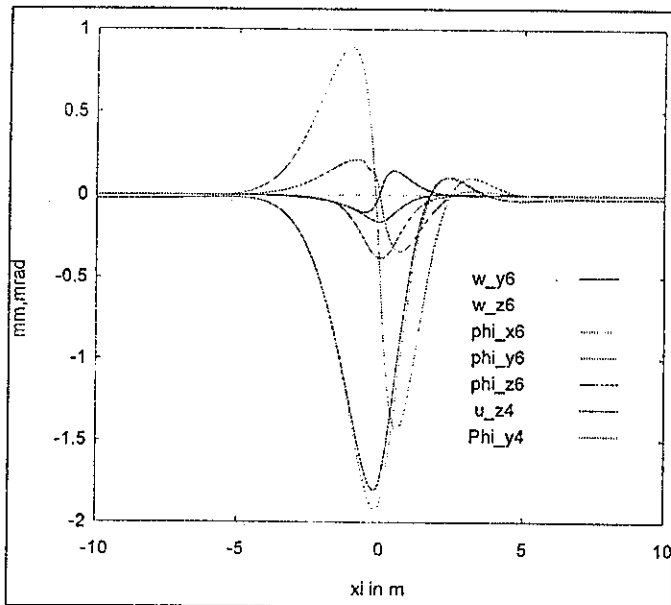


Abb. 3: Verschiebungen und Verdrehungen

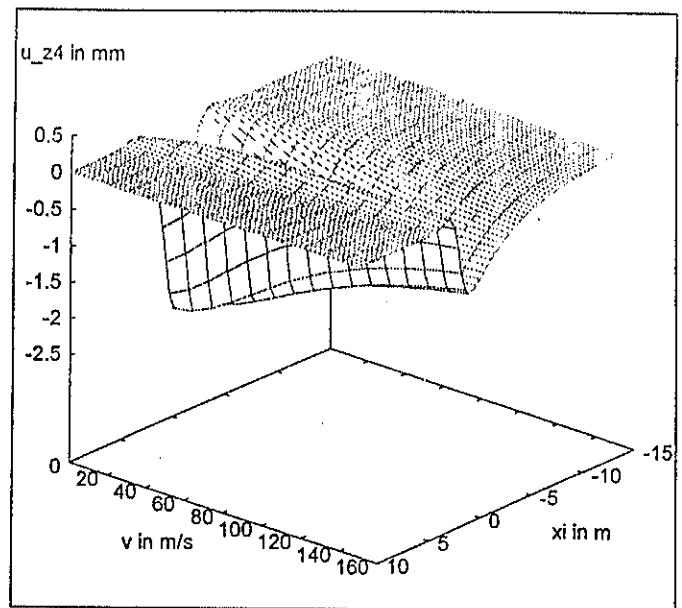


Abb. 4: Einfluß der Geschwindigkeit

sowie Feste Fahrbahnen mit konstanter Biegesteifigkeit stehen in der Datenbank bereit oder können über Masken rasch hinzugefügt werden. Für den Untergrund stehen die sechs verschiedenen Ansatztypen zur Verfügung, mit welchen eine Anpassung an die realen Verhältnisse erfolgen kann.

Es können alle interessierenden kinematischen Größen, wie Verschiebungen und Verdrehungen, siehe Abb. 3, sowohl absolut als auch relativ zueinander und ihre Ableitungen bis dritter Ordnung, die zusammengesetzten Größen, wie Spurweite etc., und die kinetischen Größen wie Last- und Momentenverteilungen, Schnittkräfte, Schnittmomente und Längsspannungen, jeweils in verschiedenen Koordinatensystemen, durch Linearkombination der Eigenvektoren als Funktion des Abstandes zum Lastangriffspunkt rasch berechnet werden. Bei der graphischen Ausgabe können die Abbildungsbereiche automatisch oder manuell gewählt werden, auch eine normierte Darstellung ist möglich.

Bei Kenntnis der Parameter sind mit diesem Rechensystem vielfältigste Studien möglich; es werden exemplarisch einige Ergebnisse herausgegriffen.

Bei Belastung durch eine Einzelkraft ist bei verschwindender Geschwindigkeit die Biegelinie symmetrisch, die Lösung klingt mit zunehmender Entfernung vom Lastangriff rasch ab und kleine Bereiche mit negativer Absenkung entstehen. Für den Schwellenoberbau kann damit das Ergebnis von Zimmermann nachgerechnet werden. Das Programm **Track Dyn** berücksichtigt jedoch auch wegen der Schienenneigung und eventuellem Verschleiß sowie entsprechender Lage des Kraftangriffspunkts die Biegung in Querrichtung und die Torsion der Schiene. Bei Vorhandensein von Dämpfung wird bei zunehmender Fahrgeschwindigkeit, siehe Abb. 4, die Abbiegewelle vor

der Last größer. Hinter ihr findet ein zunehmend langsames Abklingen der Ausschläge statt, und der Kraftangriffspunkt wandert vor die Stelle der größten Durchbiegung aus. Damit fährt die Last immer „bergauf“ und man benötigt eine Antriebskraft, um sie über das Gleis zu treiben. In ihr ist ein Teil des Rollwiderstands zu erkennen.

Beim Schotterbett sind ausgeprägte Maxima der Schwellenabsenkungen an den Laststellen zu beobachten, bei der Festen Fahrbahn hingegen teilt sich die Belastung auf längere Bereiche vor und hinter der Last bei wesentlich kleinerer Amplitude auf (siehe Abb. 5). Deshalb ist beim Schotteroberbau das Material unter den Schwellen viel stärker beansprucht als bei der Festen Fahrbahn der Untergrund.

Wegen der hohen Steifigkeit letzterer findet hingegen ein wesentlich größerer Anteil der Deformation in den Zwischenlagen statt, die damit im Lastbereich viel stärker deformiert werden als beim Schotteroberbau. Hier sind demnach auch die Schienenbefestigungen deutlich höheren Verformungen ausgesetzt. Weiche und dementsprechend dicke Zwischenlagen, wie sie zur Verminderung der Riffelbildung versuchsweise eingesetzt wurden, haben weite Beanspruchungszyklen, welche die Niederhalter ohne Beschädigung mitmachen können müssen. Der Einfluß der Geschwindigkeit auf die Deformation ist bei der Festen Fahrbahn kleiner als beim Schotteroberbau.

Während die Verschiebungen der Schiene in der Hochrichtung und auch

## T&A Schweiß- und Schneidtechnik GmbH Kompetenz im Schienenschweißen



Wir stellen her und liefern:

**Produkte für die Oberbauschweißtechnik von A bis Z**

- Absaugvorrichtungen, Arbeitsschutz, Autogentechnik
- Drahtvorschubsysteme
- Fülldrahttechnologie
- Schleifmaschinen
- Schweißbadsicherungen, alle Profile
- Schweißmaschinen und Schweißautomaten
- Service, Umbauten und Neukonstruktionen
- Zusatzwerkstoffe für Verbindungs- und Auftragschweißen
- Zubehör für die Schweiß- und Schneidtechnik und vieles mehr ...

Ihr Partner in der Oberbauschweißtechnik

Industriestraße 31 · D-51399 Burscheid · Tel. 021 74/64570 · Fax 021 74/64670  
eMail: TAGmbH@t-online.de

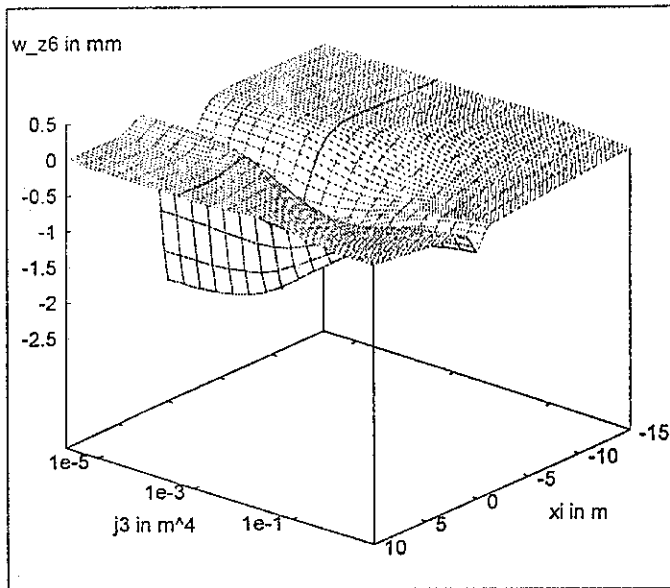


Abb. 5: Einfluß der Steifigkeit der Festen Fahrbahn

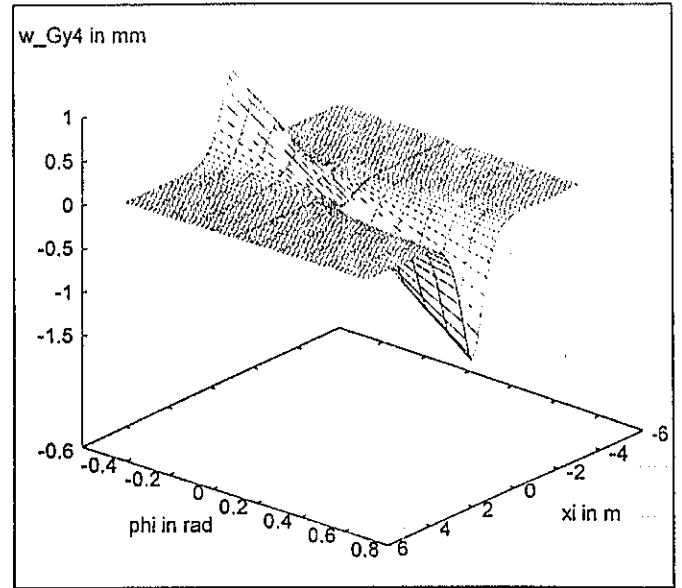


Abb. 6: Einfluß der Lastneigung auf die Spurweite

jene in der Querrichtung bei entsprechenden Beachtung des Kraftangriffspunktes noch phänomenologisch leicht erklärbar sind, gilt dies für den Torsionswinkel schon weniger und gar nicht mehr für die Ableitungen dieser Größen, die mit den Momenten und den Komponenten der Querkraft in Beziehung stehen. Hier sind zum Teil heftige Oszillationen zu beobachten mit Extrema an unterschiedlichen Stellen, wie sie eben bei der dynamischen Beanspruchung eines komplexen Systems auftreten. Dies gilt auch für die Längsspannungen in ausgesuchten Punkten. Die Veränderung der Spurweite als eine zusammengesetzte Größe weist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit unterschiedliche Verläufe auf. In Abb. 6 ist der Einfluß der Neigung der Last gegenüber der Vertikalen auf die seitliche Verschiebung des Spurweitenmeßpunktes dargestellt. Durch die Schienenneigung kommt es auch bei vertikalem Lastangriff zu einer deutlichen Änderung der Spurweite (rote Linie in Abb. 6).

Der Einfluß zufolge Verschleiß der Schienen, Steifigkeit der Zwischenlagen, Schotteroberbau oder Fester Fahrbahn, diverser Untergrundeigenschaften kann somit mit all seinen Unterschieden im dynamischen Verhalten mit dem Programm **TrackDyn** umfassend studiert werden. Die Auswirkungen von Änderungen in den Parametern können unabhängig von einer tatsächlichen Ausführung leicht analysiert werden. Mit dem vorgestellten Modell für das dynamische Verhalten des Oberbaus können daher mannigfaltige Phänomene qualitativ und bei entsprechender meßtechnischer Verifikation der Parameter auch sehr genau quantitativ studiert werden. Viele Konstruktionsvarianten lassen sich vor einer praktischen Erprobung untersuchen und nach gewählten Kriterien beurteilen. Derzeit werden Überlegungen zur Umsetzung der Methode in eine Oberbauvorschrift angestellt.

## Zusammenfassung

Zur Berechnung des Gleisoberbaus unter fahrenden Lasten ist es notwendig, neben der Steifigkeit auch die Dämpfung und Trägheit aller beteiligten Elemente einzeln zu berücksichtigen. Der vorgestellte Algorithmus und das Rechenprogramm **TrackDyn** erfassen in sehr genauer Weise die Schienen in ihrem tatsächlichen Zustand, ihre Befestigungen als räumlich deformierbare und gedämpfte Systeme, die Schwellen oder Feste Fahrbahn, sowie einen gegebenenfalls vorhandenen Gleistrog mit ihren Trägheiten und den Untergrund als elastisches Kontinuum, ebenfalls mit Massenträgheit und Dissipation. Bei letzteren werden Ansatzfunktionen auf den Halbraum angewendet. Es können sehr komfortabel verschiedene Oberbaukonstruktionen, Effekte zufolge der Fahrgeschwindigkeit, der Einfluß von Parameteränderungen und die Wirkung einer schrägen Belastungsrichtung im Detail untersucht werden. Phänomene, die aus Messungen bekannt sind, werden durch die Berechnungen bestätigt.

## Literatur

- [1] Dörr, J.: Der unendliche, federnd gebettete Balken unter dem Einfluß einer gleichförmig bewegten Last. Ingenieur-Archiv Band XIV. Seiten 167–192, Springer 1943.
- [2] Fastenrath, F.: Die Eisenbahnschiene. Berlin München Düsseldorf: Wilhelm Ernst & Sohn 1977.
- [3] Gruber, O.: „Schwimmendes Schotterbett“; Körperschalldämmung an Gleisanlagen. Bauwelt (Baukunst Bautechnik, Bauwirtschaft) 51. Jahrgang Heft 14 vom 4. April 1960.
- [4] Haßlinger, H. L.: Dynamik von Gleis und Oberbau. Abschlußbericht zum Auftrag der Österreichischen Bundesbahnen, Wien: 27.06.1996.
- [5] Mittermayr, P.: Das Torsionsflächenmoment. TORMOM ein Programm zur numerischen Lösung der Poissonsgleichung. BAMM, 1995.
- [6] Mittermayr, P.: Dynamik des Gleisoberbaues speziell für Feder-Masse-Systeme. Beschreibung des Programmes TrackDyn. Im Auftrag der Österr. Bundesbahnen, 1998.

- [7] Timoshenko, S., Goodier J.N.: Theory of Elasticity, 2nd edition. New-York Toronto London: McGraw-Hill Book Company 1951.
- [8] Steele, C.R.: The Timoshenko Beam With a Moving Load; Journal of Applied Mechanics, pages 481–488, 1968.
- [9] Ziegler, F.: Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper; 2., verbesserte Auflage. Wien, New-York: Springer 1992.

## Summary/Résumé

The dynamic behaviour of various track constructions due to travelling loads

For the calculation of the dynamic behaviour of a track due to driving loads it is necessary to take damping and inertia beneath stiffness of all elements separately into account. The algorithm and computer program performed evaluates precisely the rails in their actual state, the rail fastenings with their spatial deformation and damping, sleepers or slab track, and an optional floating track bed with their inertia. The subbase is modelled as an elastic continuum with inertia and damping, where Ansatz-functions are applied to the half-space. Various track constructions, effects due to speed, the influence of changes in the parameters and skew load can be studied comfortably in detail. Effects which are known from measurement are confirmed.

Comportement dynamique de divers types de voie en fonction des charges supportées

Pour calculer le comportement dynamique des voies en fonction des charges supportées, il faut considérer l'amortissement et l'inertie séparément compte tenu de la rigidité de tous les éléments. L'algorithme et le programme de calcul effectué fournissent un calcul précis de l'état actuel des rails, des fixations avec leur déformation dans l'espace et l'amortissement, des traverses ou de la voie sans ballast, ainsi que, au choix, d'une couche de forme à assiette flottante avec leur inertie. La plate-forme de la voie est modélisée comme un continuum élastique avec amortissement et inertie, des fonctions d'approche étant appliquées à l'espace semi-infini. Les divers types de voie, les effets fonction de la vitesse, l'influence des changements de paramètres ainsi que le chargement oblique peuvent être facilement étudiés en détail. Des effets connus par des mesures sont confirmés.