

Lauftechnik  
für hohe  
Geschwindigkeiten

Lauftechnik  
für hohe  
Geschwindigkeiten

#### HERAUSGEBER

Dipl.-Ing. Hans-Dietrich von Bernuth, Vorstandsmitglied Verkehrsausschuß BDI, Köln  
Professor Dr.-Ing. Rolf Kracke, Universität Hannover, Mitglied des Verwaltungsrats der DB  
Dr.-Ing. E.h. Helmut Maak, Bereichsleiter Bautechnik in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Theo Rahn, Präsident des Bundesbahn-Zentralamts München

#### SCHRIFTLEITER

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Franz Häfner, Abteilungspräsident beim Bundesbahn-Zentralamt München, Arnulfstraße 19, 8000 München 2, Ruf (089) 128/5437  
Professor Dr.-Ing. Karl W. Schreck, Friedrich-Bender-Straße 10, 6240 Königstein (Ts.), Ruf (06174) 21612

#### WIRTSCHAFT UND WERBUNG

Michael Brauckmann, Holzhofallee 33, 6100 Darmstadt, Ruf (06151) 33481

#### REDAKTIONSMITGLIEDER

Dipl.-Ing. Wolfgang Feldwisch, Bundesbahnberrat, ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Lothar Hennich, Bundesbahnberrat, ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.

#### FACHWISSENSCHAFTLICHER BEIRAT

Dipl.-Ing. Blank, Präsident des Bundesbahn-Zentralamts Minden  
Dipl.-Ing. (FH) Dittling, Direktor, Krupp MaK Maschinenbau GmbH, Kiel  
Professor Dr.-Ing. Eisenmann, TU München  
Professor Dr.-Ing. Fröderich, RWTH Aachen  
Dipl.-Ing. Frerk, Ministerialrat, Hauptabteilungsleiter – Reisezugwagen, Technik u. Vorhaltung – in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Gemeinhardt, Bereichsleiter Einkauf in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Göritz, Geschäftsführer der Krauss-Maffei Verkehrstechnik GmbH, München  
Professor Dipl.-Ing. Gottfried, Leiter des Stabas Informationslogistik in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Professor Dr.-Ing. Heimerl, Universität Stuttgart (TH)  
Dr.-Ing. Heller, Direktor, Krupp Stahl AG, Duisburg-Rheinhausen  
Professor Dr.-Ing. Herbst, TU Berlin  
Dipl.-Ing. Koch, Generalbevollmächtigter der Waggonfabrik Talbot KG, Aachen  
Dipl.-Ing. Kocher, Generalbevollmächtigter der ASEA Brown Boveri, Mannheim  
Dipl.-Ing. Kramer, Mitglied der Geschäftsführung Waggon Union GmbH, Netphen  
Dipl.-Ing. Linkerhagner, Ministerialdirigent, Bereichsleiter Neubaustrecken in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Professor Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Lissou, Präsident der BD München  
Dr.-Ing. Luber, Vorstandsmitglied der Held & Francke Bau AG, München  
Professor Dipl.-Ing. Dr. rer. pol. Mitz, Generalbevollmächtigter der AEG Aktiengesellschaft, Berlin  
Dipl.-Ing. Mollé, Ministerialrat, Bereichsleiter Maschinentechnik in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Manfred Montada, Verbandsdirektor des Bundesverbandes Deutscher Eisenbahnen, Köln  
Gabriela Freifrau v. Morsey-Picard, Geschäftsführer des Verbandes der Deutschen Lokomotivindustrie, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Münchswander, stellv. Mitglied des Vorstandes der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Naué, Ministerialrat, Hauptabteilungsleiter – Oberbau – in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Professor Dr.-Ing. Pierick, TU Braunschweig  
Dipl.-Ing. Reimers, Mitglied des Vorstandes der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Scheller, Geschäftsführer der Deutschen Eisenbahn-Consulting GmbH, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Sitzmann, Ministerialrat, Hauptabteilungsleiter – Betriebs- u. Systemtechnik S-Bahnen – in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Troche, Ministerialrat, Hauptabteilungsleiter – Produktion in den Werken – in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Professor Dipl.-Ing. Gerhard Voß, Universität Hannover  
Dipl.-Ing. Martin Voß, Ministerialrat, Hauptabteilungsleiter – Triebfahrzeuge und Straßenfahrzeuge – in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Professor Dr.-Ing. Wehner, Ministerialrat, Hauptabteilungsleiter – Signal- u. Telekommunikationsanlagen – in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Dr.-Ing. E.h. Weigelt, Präsident der BD Nürnberg  
Dipl.-Ing. Wiedemann, Mitglied des Vorstandes der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Ing. Wolters, Bereichsleiter Werke in der ZENTRALE Hauptverwaltung der DB, Frankfurt a.M.  
Dipl.-Volkswirt Wolz, Geschäftsführer des Verbandes der Waggonindustrie, Frankfurt a.M.

## Lieber Leser,

das Archiv für Eisenbahntechnik (AET) will erstmals mit neuer Konzeption und Gestaltung für eine größere Verbreitung wissenschaftlicher Arbeiten sorgen. Perspektiven, Möglichkeiten und Auswirkungen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf allen Gebieten der Bahntechnik stehen dabei im Vordergrund.

Diese komplexe Anforderung erfüllen hervorragende Autoren, Experten ihres Gebietes. Die regelmäßig vorgesehenen Veröffentlichungen sollen das AET zu einer wissenschaftlichen Schriftenreihe – sozusagen zu einem Kompendium der Bahntechnik von morgen – mit Fachbuch-Charakter wachsen lassen. Aus der Sammlung der AET-Bände wird im Laufe der Jahre ein unentbehrliches Nachschlagewerk für die Forschungs- und Entwicklungsarbeit im spurgeführten Verkehr entstehen. Somit ist das AET wertvoller Wegbegleiter intensiver, technischer Entwicklungs- und Forschungsarbeiten. Es bietet umfassendes Fachwissen für alle mit Forschung und technologischen Entwicklungen befaßten Fachleute aus Wissenschaft, Industrie, Verkehrsunternehmen und Behörden. Und es leistet einen Beitrag für eine erfolgreiche Verkehrsforschung.

Herausgeber, Schriftleitung und Verlag wissen um das Bedürfnis nach Fachinformation und möchten deshalb mit der neuen Konzeption des AET auch in Zukunft wichtige Orientierungshilfen für Ihre Arbeit bieten.

Für die Herausgeber  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Kracke,  
Universität Hannover

Schriftleitung  
Dipl.-Ing. Franz Häfner,  
München  
Prof. Dr.-Ing. Karl Schreck,  
Königstein (Ts)

Verlag  
Holger Musset,  
Darmstadt

# Inhalt

- 9 Leitartikel:  
Lauftechnik für hohe Geschwindigkeiten  
Siegfried Kademann, Kassel
- 15 Das Zusammenwirken von Rad und Schiene – Bedeutung für die technische Entwicklung des R/S-Systems  
Anton Nefzger und Bernd Bergander, München
- 35 Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik bei hohen Geschwindigkeiten aus der Sicht der Gleisstandhaltung  
Walter Hehenberger, München
- 53 Fahrdynamik von Laufdrehgestellen für hohe Geschwindigkeiten, erläutert am Drehgestell MD 52–350 für ICE-Mittelwagen  
Alfred Lohmann und Guido Bieker, Netphen
- 65 Triebdrehgestelle für hohe Geschwindigkeiten  
J. Martin Lipsius und Rainer Menssen, Kassel
- 77 Die Luftfeder für Schienenfahrzeuge  
Sándor Mohácsi, Nürnberg
- 87 Die Geschwindigkeitserhöhung bei den Bahnen und Beiträge des Forschungs- und Versuchsamts des Internationalen Eisenbahnverbandes  
J. Peter Blank, Minden (Westf)
- 97 Forschung und Lehre am Institut für Schienenfahrzeuge der Universität Hannover  
Gerhard Voß, Hannover
- 107 Berechnungen zur Spurführung  
Fritz Frederich, Aachen
- 119 Erkenntnisse und Maßnahmen zur Hochausnutzung des Kraftschlusses auf modernen Triebfahrzeugen  
Michael Weinhardt, Mannheim
- 145 Alternative Verfahren der räumlichen Trassierung für spurgebundene Verkehrssysteme  
Rudolf Gurr, Berlin
- 161 Fahrzeitberechnungen mit dem Massebandmodell  
Manfred Göpner, Hannover
- 171 Zu den größten Beanspruchungen schiefgelagerter Tragwerke mit dünnwandig offenem Querschnitt infolge ständiger Lasten  
Wilmar Weber, München
- 177 Forschungsarbeiten aus dem Bereich spurgeführter Verkehrssysteme an den Universitäten 1986/1987

# Die Autoren

Professor Dipl.-Ing. Siegfried Kademann, Chefsingenieur und Chefkonstrukteur im Bereich Lokomotiven und Flughafentechnik, Thyssen Industrie AG Henschel, Henschelplatz 1, D-3500 Kassel

Dipl.-Ing. Anton Nefzger, Dezernent für das Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrweg im Bundesbahn-Zentralamt (BZA) München, Arnulfstraße 19, D-8000 München 2

Dipl.-Ing. Walter Hehenberger, Dezernent für Gleismessung und -trassierung, Bundesbahn-Zentralamt München, Arnulfstraße 19, 8000 München 2

Dipl.-Ing. Alfred Lohmann und Dipl.-Ing. Guido Bieker, Waggon Union GmbH, Abteilung Lauftechnik TSL, Siegststraße 27, 5902 Netphen 2

Dr.-Ing. J. Martin Lipsius und Dipl.-Ing. Rainer Menssen, Abteilung Berechnung und Erprobung in der Lokomotivkonstruktion, Thyssen Industrie AG Henschel, Henschelplatz 1, D-3500 Kassel

Dr.-Ing. Sándor Mohácsi, MAN GUTEHOFFNUNGSHÜTTE GMBH, Schienenfahrzeugbau, Leiter der Abteilung Berechnung und Versuch, Postfach 440100, 8500 Nürnberg 44. – Neue Anschrift: SIG Schweizerische Industriegesellschaft, CH 8212 Neuhausen am Rheinfall

Dipl.-Ing. J. Peter Blank, Präsident des Bundesbahn-Zentralamtes Minden (Westf.), Weserglaci 2, 4950 Minden (Westf.), und des Direktionskomitees des Office de recherches et d'essais (ORE), Utrecht (Niederlande)

Professor Dipl.-Ing. Gerhard Voß, Institut für Schienenfahrzeuge und maschinelle Bahnanlagen der Universität Hannover (ISB-UH), Wilhelm-Busch-Straße 4, 3000 Hannover 1

Professor Dr.-Ing. Fritz Frederich, Lehrstuhl und Institut für Fördertechnik und Schienenfahrzeuge, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Seffenter Weg 8, D-5100 Aachen

Dr.-Ing. Michael Weinhardt, Referent für Drehstromantriebe im Geschäftsbereich Verkehr der ASEA Brown Boveri & Cie AG, Mannheim, Postfach 100351, D-6800 Mannheim

Dr.-Ing. Rudolf Gurr, bis April 1987 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrswegebau, Fachgebiet Eisenbahnwesen und spurgebundener Nahverkehr, Technische Universität (TU) Berlin, seit Mai 1987 beim Senator für Verkehr und Betriebe, An der Urania 4–10, 1000 Berlin 30

Dr.-Ing. Manfred Göpner, ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG, Am Hohen Ufer 6, 3000 Hannover 1

Dipl.-Ing. Wilmar Weber, Dezernent für Brückenbelastbarkeit, Baudynamik, Meßwesen im konstruktiven Ingenieurbau, Bundesbahn-Zentralamt München, Arnulfstraße 19, 8000 München 2

## Lauftechnik für hohe Geschwindigkeiten

Bereits um die Jahrhundertwende wurden mit Schienenfahrzeugen relativ hohe Fahrgeschwindigkeiten erzielt, obwohl damals theoretische Grundlagen über die Lauftechnik nicht in umfassender Form vorlagen. Betriebserfahrungen zeigten, daß sich derartige Geschwindigkeiten wohl am besten mit durch Drehgestelle geführten Brückenfahrzeugen erreichen ließen.

Es sei hier an die Versuchsfahrten von 1901 bis 1903 der „Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen GmbH“ zwischen Marienfelde und Zossen erinnert. Elektrische Schnellbahnwagen haben an demselben Tag, an dem Stephenson (1829) den Wettkampf mit seiner Dampflokomotive „Rocket“ gewann, dem 6. Oktober, zum ersten Mal für Schienenfahrzeuge 200 km/h und später 210 km/h erreicht.

Die technische Leistung fordert – rückblickend gesehen – Respekt, da mit großem konstruktivem Können angetriebene Laufwerke, d. h. Triebdrehgestelle mit jeweils drei Radsätzen für hohe Geschwindigkeiten gebaut worden waren, die nach den Fahrtberichten einwandfrei und sicher liefen. Diese Versuchsfahrten zeigten aber auch, daß die Eisenbahn als spurgeführtes System – heute allgemein als ein Rad/Schiene-System bezeichnet – noch lange nicht an der möglichen Grenze der Fahrgeschwindigkeit angelangt war. Das Zusammenwirken von Fahrzeug und Gleis als Wirkprinzip der Eisenbahn verfügt also über eine große Sicherheit. Allerdings ließ sich die Frage, wie groß die Sicherheit normalerweise oder bei Störungen am Fahrzeug und Gleis noch ist, nicht befriedigend beantworten.

Eine sehr übersichtliche, fundamentale Gleichung über den physikalischen und den mechanischen Zusammenhang zwischen vertikaler Radlast und der horizontalen Spurführungskraft wurde bereits 1896 von Nadal aufgestellt. Jedoch fehlte ein Verfahren, mit dem bei einem Schienenfahrzeug die Spurführungskräfte im voraus, d. h. theoretisch, ermittelt werden konnten. Infolge der anfangs mit ziemlich vielen Bögen versehenen Strecken wurde zunächst der Bogenlauf untersucht, um die Spurführungskräfte des Schienenfahrzeuges berechnen zu können.

Die Bedeutung des Reibungsmittelpunktes – eines Momentanpoles, der beim Wenden (Fahren) des Schienenfahrzeuges im Bogen auftritt – erkannte 1903 zuerst Übelacker. Entscheidenden Durchbruch zur Bestimmung der Spurführungskräfte im Bogen erzielten in den folgenden



**HESTRA-VERLAG**  
**Postfach 42 44**  
**D-6100 Darmstadt 1**  
**Telefon (0 61 51) 3 34 81**

### Wege in die Zukunft

*Neubau- und Ausbaustrecken der Deutschen Bundesbahn*

Am 29. 5. 1988 war die Inbetriebnahme des Abschnitts Fulda-Würzburg. Schon seit einigen Jahren entstehen zwischen Hannover und Würzburg sowie zwischen Mannheim und Stuttgart neue Strecken für Tempo 200 bis 250. Viele rechtliche, planerische, konstruktive und ausführungstechnische Probleme waren zu lösen. Zahlreiche imposante Bauwerke entstanden: Neben vielen Einschnitten und Dämmen insgesamt 76 Tunnelbauwerke mit einer Gesamtlänge von 153 Kilometern und mehr als 380 Brücken.

Den beteiligten Fachleuten ist es mit diesem Buch gelungen, eine einmalige und

umfassende Dokumentation über die Neubau- und Ausbaustrecken zu erstellen. Im Vordergrund stehen die Bauleistungen: Kühne Konstruktionen, neuartige Bauverfahren und weiterentwickelte Ausführungstechniken kennzeichnen dieses Jahrhundertbauwerk.

*Hrsg.: Dipl.-Ing. K. Reimers, Dipl.-Ing. W. Linkerhägner.*  
*Text-Bild-Band, 272 Seiten mit 65 farbigen und 162 s/w Abbildungen, Graphiken und 2 achtfarbigen Streckenkarten, Großformat 21,5 x 30 cm, vierfarbiger Hardcover, cellophanisiert, ISBN 3-7771-0200-8, 86,— DM.*  
*(Vorzugspreis für Eisenbahner 79,80 DM)*

### ICE ZUG DER ZUKUNFT

*Weltrekord auf der Schiene mit Tempo 406,9*

Als die Dampflokomotive den Landverkehr revolutionierte, konnte die Menschheit in ungewohnte Geschwindigkeiten vorstoßen. Wie dem Adler vor 150 Jahren kommt dem ICE in ähnlicher Weise eine besondere Bedeutung zu, wenn ein optimal abgestimmtes Hochgeschwindigkeitssystem der Deutschen Bundesbahn in den neunziger Jahren realisiert sein wird. Einsteigen, Türen schließen, Abflug könnte es dann beim ICE fast heißen.

Ein kompetentes Expertenteam hat über „ihren“ ICE mit großem Fleiß eine hochwertige Wissensquelle geschaffen. Mit der authentischen Darstellung des Zuges der Zukunft gelingt es den Projekt-

verantwortlichen, daß der Leser jetzt erlauben kann, welche ungeheure Ingenieurleistung hinter der Entwicklung und dem Bau des ICE steht und welchen Einfluß dieses Spitzenprodukt modernster Technologie auch auf die Zukunft der Bahn nehmen wird. Genauso wird aber auch die Geschichte des Schnellverkehrs deutscher Eisenbahnen beschrieben.

*Herausgeber: Dipl.-Ing. Rahn, Prof. Hochbruck und F. W. Möller; Redaktion: Dipl.-Ing. Lübke, 160 Seiten Gesamtumfang mit 78 farbigen und 94 s/w Abbildungen, Großformat 21,5 x 30 cm, Hardcover, vierfarbig cellophanisiert, ISBN 3-7771-0192-3, 39,60 DM.*



**HESTRA-VERLAG**  
**Postfach 42 44**  
**D-6100 Darmstadt 1**  
**Telefon (0 61 51) 3 34 81**



# Fahrdynamik von Laufdrehgestellen für hohe Geschwindigkeiten, erläutert am Drehgestell MD 52-350 für ICE-Mittelwagen

*Nach Beschreibung der lauftechnischen Konstruktionsmerkmale werden Versuchsergebnisse der Drehgestelle MD 52-350 vorgestellt. Bisher wurden bei Streckenversuchen 345 km/h ohne Grenzwertüberschreitung gefahren. Streckensimulationen auf dem Rollprüfstand erfolgten bis 385 km/h. Anschließend werden lauftechnische Berechnungen mit Versuchsergebnissen verglichen.*

## 1 Einleitung

Die ausgezeichneten mehrjährigen Betriebserfahrungen der Deutschen Bundesbahn mit dem Drehgestell MD 522 (Bild 1) im IC-Verkehr bis 200 km/h und die hervorragenden lauftechnischen Versuchsergebnisse bis 250 km/h haben die Firma Waggon Union veranlaßt, dieses Drehgestell für höhere Fahrgeschwindigkeiten weiterzuentwickeln [1]. Im Rahmen eines vom BMFT geförderten Forschungsvorhabens konnte im Triebzug Intercity-Experimental der Meß-

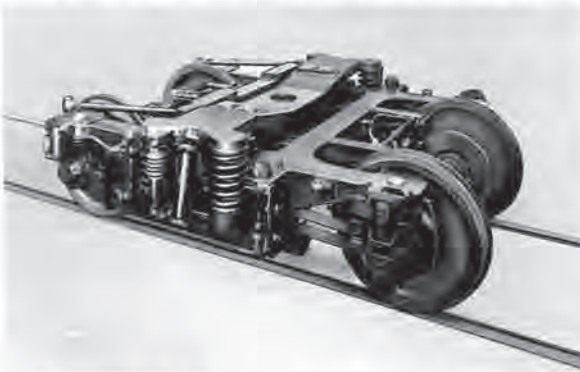


Bild 1: Drehgestell MD 522

wagen und der Demowagen 2 mit Drehgestellen MD 52-350 der Waggon Union ausgerüstet werden [2].

## 2 Lauftechnische Konstruktionsmerkmale des Drehgestells MD 52-350 (Bild 2)

Aus der Sicht der Lauftechnik ergeben sich folgende Merkmale:

H-förmiger Drehgestellrahmen, verschleißfreie elastische Radsatzführung durch Doppelblattlenker mit Gummi-Metall-Federelementen am Achslagerauge, Achsschraubenfeder über dem Achslager. Der Achsabstand wurde gegenüber dem MD 522-Drehgestell von 2,5 auf 2,8 m vergrößert. Sekundär wird der Wagenkasten durch Schraubenfedern abgedeutert, die sich auf den in Schwingenpendeln aufgehängten Federträgern abstützen. Eine Wankstütze ist

Die Gleislage geht über die vertikalen und horizontalen Schienenlagefehler bei der Fahrschienen in das Modell ein.

Häufig wurden und werden die Vertikalbewegungen von den Querbewegungen und umgekehrt losgelöst betrachtet und berechnet. Dies ist nur für Näherungsrechnungen zulässig. Vertikalbewegungen und daraus resultierende Vertikalkräfte wirken sich unmittelbar auf Querkkräfte aus. Sehr anschaulich ist dies im Rad/Schiene-Kontakt. Sowohl die Geometrieseitenkräfte als auch die Kraftschlußkräfte hängen von der Radlast ab. Demzufolge ändern sie sich im gleichen Maße wie die Radlasten.

Die hier verwendeten Schwingungersatzsysteme berücksichtigen die Vertikal- und die Querbewegungen.

Wegen der schwachen Kopplung beider Fahrwerke durch den langen Wagenkasten reicht es aus, nur ein Fahrwerk im Modell zu berücksichtigen. Die für das berücksichtigte Fahrwerk ermittelte Verteilung der Bewegungsgrößen des Wagenkastens gilt bei Entkopplung spiegelbildlich auch für die Verteilung, die durch das nicht berechnete Fahrwerk hervorgerufen wird. Die lineare Superposition der originären mit der gespiegelten Verteilung führt zum vollständigen Bewegungsverhalten des Wagenkastens.

## 2 Mathematische Beschreibung

### 2.1 Koordinatensystem

Jeder Masse  $m_i$  wird ein Koordinatensystem  $(o_i^*, x_i^*, y_i^*, z_i^*)$  zugeordnet. Der Ursprung  $o_i^*$  liegt im Massenmittelpunkt der Masse  $m_i$ ; die Koordinatenachsen fallen mit den Hauptträgheitsachsen zusammen.

Die Lage der Masse  $m_i$  im Raum wird durch ein zweites Koordinatensystem  $(o_F, x_F, y_F, z_F)$  beschrieben. Dessen Ursprung  $o_F$  liegt auf der theoretischen Gleismitte, die  $x_F$ -Achse zeigt in Richtung der theoretischen Gleisachse und die  $y_F$ -Achse ist parallel zur Tangente an die theoretischen Fahrflächen beider Schienen, Bild 2.

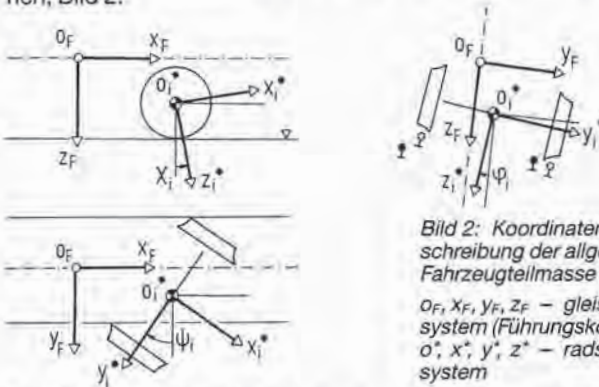


Bild 2: Koordinatensysteme zur Beschreibung der allgemeinen Lage einer Fahrzeugteilmasse im Raum

$o_F, x_F, y_F, z_F$  - gleisfestes Koordinatensystem (Führungskordinaten)  
 $o_i^*, x_i^*, y_i^*, z_i^*$  - radsatzfestes Koordinatensystem

Das Koordinatensystem  $(o_i^*, x_i^*, y_i^*, z_i^*)$  ist gegenüber dem Koordinatensystem  $(o_F, x_F, y_F, z_F)$  um  $x_i, y_i$  und  $z_i$  verschoben und um  $\phi_i, \psi_i$  verdreht.

Wenn man auf Glieder höherer Ordnung verzichtet, lassen sich die Translationsbewegungen im System  $(o_F, x_F, y_F, z_F)$  und die Rotationsbewegungen im System  $(o_i^*, x_i^*, y_i^*, z_i^*)$  einfach angeben.

### 2.2 Bewegungsgleichungen

Die ausführliche Formulierung der Bewegungsgleichungen ist seit langem bekannt [2, 3, 4]. Sie werden hier in einer rechnerfreundlichen, auf Unterpro-

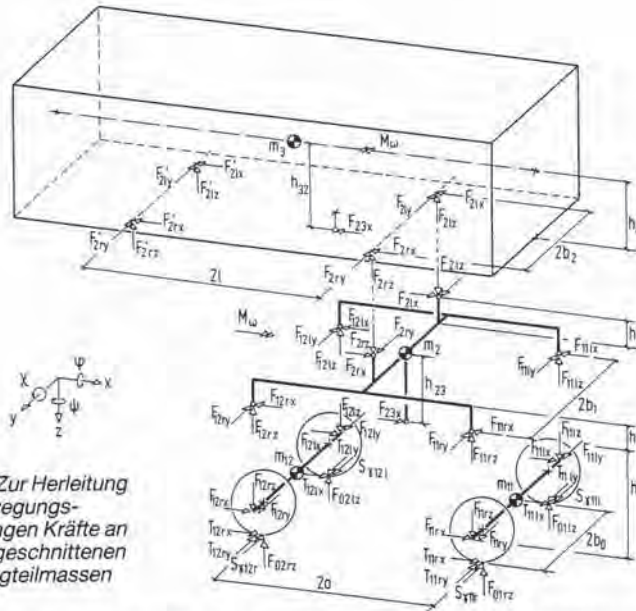


Bild 3: Zur Herleitung der Bewegungsgleichungen Kräfte an den freigeschnittenen Fahrzeugteilmassen

gramme abgestimmten Form dargestellt. Unmittelbar aus Bild 3 lassen sich die Bewegungsgleichungen angeben. Sie lauten für das

### 2.2.1 Fahrzeug mit Drehgestell:

Wagenkasten

$$\ddot{x}_3 = \frac{1}{m_3} (-F_{2rx} - F_{21x} - F'_{2rx} - F'_{21x} - F_{23x}) \quad (2.1)$$

$$\ddot{y}_3 = \frac{1}{m_3} (-F_{2ry} - F_{21y} - F'_{2ry} - F'_{21y}) - \ddot{y}_{Fb} \quad (2.2)$$

$$\ddot{z}_3 = \frac{1}{m_3} (-F_{2rz} - F_{21z} - F'_{2rz} - F'_{21z}) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\Phi}_3 = \frac{1}{J_{3x}} [ & (-F_{2rx} + F_{21x} - F'_{2rx} - F'_{21x}) b_2 \\ & + (+F_{2ry} + F_{21y} + F'_{2ry} + F'_{21y}) h_4 \\ & - M_w ] \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{X}_3 = \frac{1}{J_{3y}} [ & (-F_{2rx} - F_{21x} - F'_{2rx} - F'_{21x}) h_4 \\ & + (+F_{2rz} + F_{21z} - F'_{2rz} - F'_{21z}) l \\ & - F_{23x} h_{32} ] \end{aligned} \quad (2.5)$$

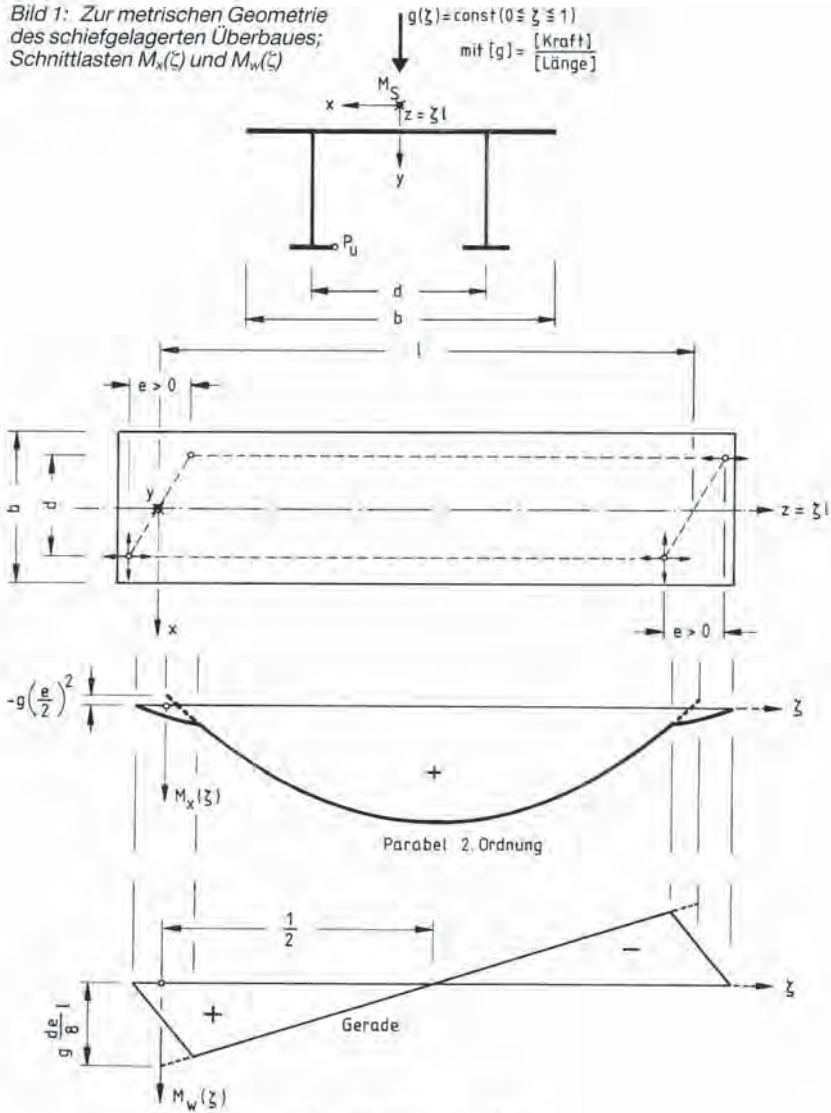
$$\begin{aligned} \ddot{\Psi}_3 = \frac{1}{J_{3z}} [ & (F_{2rx} - F_{21x} + F'_{2rx} - F'_{21x}) b_2 \\ & + (-F_{2ry} - F_{21y} + F'_{2ry} + F'_{21y}) l ] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Drehgestellrahmen

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} (- & F_{11rx} - F_{11ix} - F_{12rx} - F_{12ix} \\ & - F_{2rx} - F_{21x} + F_{23x}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_2 = \frac{1}{m_2} (- & F_{11ry} - F_{11iy} - F_{12ry} - F_{12iy} \\ & + F_{2ry} + F_{21y}) - \ddot{y}_{Fb} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Bild 1: Zur metrischen Geometrie des schiefgelagerten Überbaues; Schnittlasten  $M_x(\zeta)$  und  $M_w(\zeta)$



$$M_x(\zeta) = \frac{g l^2}{4} \left[ 2\zeta(1-\zeta) - \left(\frac{e}{l}\right)^2 \right], \quad \frac{e}{2l} \leq \zeta \leq 1 - \frac{e}{2l} \quad (1)$$

$$M_w(\zeta) = \frac{g l^3}{8} \frac{d}{l} \frac{e}{l} (1-2\zeta).$$

Aus der ersten Relation von (1) folgt, daß die Biegemomente im Feld auf Kosten der fiktiven Stützenmomente an den Trägerenden abgebaut werden (vgl. Bild 1). Die Gesamtnormalspannungen  $\sigma(\zeta; y, w)$  infolge  $g = \text{const}$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  setzen sich aus den Biege- ( $\sigma_x$ ) und Wölbnormalspannungen ( $\sigma_w$ ) zusammen:

$$\sigma(\zeta; y, w) = \frac{g l^2}{4} \left\{ \left[ 2\zeta(1-\zeta) - \left(\frac{e}{l}\right)^2 \right] \frac{y}{I_x} + \frac{d e}{2l} (1-2\zeta) \frac{w}{A_{ww}} \right\} \quad (2)$$

mit  $\frac{e}{2l} \leq \zeta \leq 1 - \frac{e}{2l}$ .

Für  $y, w = \text{const}$  hat (2) ein relatives Maximum

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{1}{\ell} \frac{d\sigma}{d\zeta} = \frac{g\ell}{2} \left[ (1-2\zeta) \frac{y}{I_x} - \frac{de}{2\ell} \frac{w}{A_{ww}} \right] \stackrel{!}{=} 0$$

in

$$\zeta_0 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{de}{2\ell} \frac{w}{y} \frac{I_x}{A_{ww}} \right), \quad 0 < \zeta_0 < 1.$$

Die größte Gesamtbeanspruchung infolge  $g = \text{const}$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  tritt also außerhalb der Mitte der Trägerstützweite auf.

Mit

$$1 - \zeta_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{de}{2\ell} \frac{w}{y} \frac{I_x}{A_{ww}} \right)$$

und (3) folgen aus (2) die größten Gesamtnormalspannungen infolge ständiger Lasten zu

$$\max \sigma(\zeta_0; y, w) = \frac{g\ell^2}{32} \left\{ 4 + \left[ d^2 \left( \frac{w I_x}{y A_{ww}} \right)^2 - 8 \right] \left( \frac{e}{\ell} \right)^2 \right\} \frac{y}{I_x} \quad (4)$$

Die Einzelspannungsanteile sind die Biegenormalspannung

$$\sigma_x(\zeta_0; y, w) = \frac{g\ell^2}{32} \left\{ 4 - \left[ 8 + d^2 \left( \frac{w I_x}{y A_{ww}} \right)^2 \left( \frac{e}{\ell} \right)^2 \right] \right\} \frac{y}{I_x} \quad (4a)$$

und die Wölbnormalspannung

$$\sigma_w(\zeta_0; y, w) = \frac{g\ell^2}{16} d^2 \left( \frac{w I_x}{y A_{ww}} \right)^2 \left( \frac{e}{\ell} \right)^2 \frac{y}{I_x}. \quad (4b)$$

Damit liegen der Ort des maßgebenden Querschnitts und die zugehörige maximale Beanspruchung samt ihren Anteilen infolge  $g = \text{const}$ ,  $0 \leq \zeta \leq 1$  für den schiefgelagerten Einfeldträger analytisch vor. Die Beanspruchungsanteile lassen sich für den Untergurt eines Hutquerschnittes abschätzen (Bild 2). Dazu wird der folgende Sachverhalt als Lemma benutzt:

Die Querverteilungslinie (Quereinflußlinie) der Normalspannung in einem Querschnittspunkt  $P_u$  des Untergurtes sieht für eine vertikale Einzellast  $F$  mit der Außermitte bezüglich des Schubmittelpunktes  $M_S$  analytisch so aus:

$$\sigma_u = \frac{M_x}{I_x} y_u + \frac{M_w}{A_{ww}} w_u = \frac{M_x}{I_x} y_u \left( 1 + \frac{M_w}{M_x} \frac{w_u}{y_u} \frac{I_x}{A_{ww}} \right). \quad (5)$$

Da  $M_w/M_x = Fx/F = x$  ist, wird aus (5)

$$\sigma_u = \frac{M_x}{I_x} y_u \left( 1 + \frac{w_u}{y_u} \frac{I_x}{A_{ww}} x \right), \quad -\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2}, \quad (6)$$

d.h. die Querverteilungslinie  $\sigma_u = \sigma_u(x)$  ist eine Gerade (vgl. Bild 2). Sie hat zwei ausgezeichnete Punkte. Für  $x := 0$  folgt die Ordinate zu  $M_x y_u / I_x$  (Biegeanteil), und  $\sigma_u$  wird null, falls

$$x_L := x = -\frac{y_u A_{ww}}{w_u I_x} \quad (6a)$$

ist. Die Abszisse  $x_L$  und  $\sigma_u = 0$  definieren die Lastscheide der Querverteilungslinie. Eine dort wirkende vertikale Einzelkraft hat keine zusätzliche Wölbnormalspannung im Punkt  $P_u$  des Querschnittes zur Folge. Damit entpuppt sich der erste gebrochene Quadratterm in (4a) und (4b) als das Quadrat der reziproken Abszisse der Lastscheide.

Nun läßt sich anhand der gängigen Hutquerschnitte des Eisenbahnbrückenbaus bei unterschiedlichen Materialverteilungen und Abmessungen zeigen, daß

$$x_L := -\frac{y_u A_{ww}}{w_u I_x} \approx -\frac{d}{2} \quad (7)$$

ist.