

BAM

**Bundesanstalt
für Materialforschung
und -prüfung, Berlin**

Forschungsbericht 169

**Integration der Untergrunddynamik
in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt
am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**

von Dipl.-Ing. Christian Kohl
Dr.-Ing. Werner Rücker



Berlin 1990

Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist als Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft das technisch-wissenschaftliche Staatsinstitut der Bundesrepublik Deutschland für Werkstoffwissenschaften, Materialprüfung und Chemische Sicherheitstechnik. Dieser Komplex stellt in allen Industrieländern einen technologischen Schlüsselbereich dar, da Materialien als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe die Grundlage der gesamten Technik bilden. Die Materialforschung, die zuverlässige, normgerechte und neutrale Prüfung sowie die sicherheitstechnische Beurteilung von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen sind wesentliche Voraussetzungen für eine leistungs- und wettbewerbsfähige Wirtschaft im Hinblick auf die Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit technischer Produkte, Umweltschutzanforderungen und die Notwendigkeit der sparsamen Verwendung von Rohstoffen und Energie.

Die Ursprünge der BAM reichen bis in das Jahr 1870 zurück, in dem durch Erlaß des damaligen Preußischen Ministeriums für Handel, Gewerbe und öffentliche Arbeiten die Gründung einer Mechanisch-Technischen Versuchsanstalt bei der Gewerbeakademie beschlossen wurde. 1895 erfolgte die Angliederung der im Jahre 1875 eingerichteten Prüfungsstation für Baumaterialien als neue Abteilung der Versuchsanstalt. Im Jahre 1904 kam es darüber hinaus zur Zusammenlegung mit der 1877 errichteten Chemisch-Technischen Versuchsanstalt zum Königlichen Materialprüfungsamt. Dessen erster Direktor, Adolf Martens (1850—1914), trat u. a. als Entdecker des nach ihm benannten Martensit-Gefüges von Stahl und als Mitbegründer sowie Vorsitzender (1896—1913) des „Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik“ hervor. Das Königliche Materialprüfungsamt, das im Jahre 1907 eine selbständige Behörde geworden war, wurde nach dem Ersten Weltkrieg dem Preußischen Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung unterstellt. Es bestand als Staatliches Materialprüfungsamt (MPA) — bei ständiger Erweiterung seiner Aufgabenbereiche und Angliederung anderer Institutionen, wie z. B. der Reichs-Röntgenstelle — bis 1945.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde dem MPA die im Jahre 1889 errichtete Chemisch-Technische Reichsanstalt (CTR) angeschlossen. Diese vereinigten Institutionen erhielten im Jahre 1954 den Status einer Bundesanstalt im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft, die seit 1956 den Namen „Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)“ trug und seit dem 1. 1. 1987 „Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)“ heißt.

Die Aufgaben der BAM wurden durch einen Erlaß des Bundesministers für Wirtschaft vom 1. September 1964 letztmalig festgelegt. Danach hat die Bundesanstalt die Aufgabe, Werkstoff- und Materialforschung entsprechend ihrer Zweckbestimmung zu betreiben und die Materialprüfung sowie die Chemische Sicherheitstechnik stetig weiter zu entwickeln. Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen. Für das Land Berlin hat die Bundesanstalt die Aufgaben eines staatlichen Materialprüfungsamtes. Auf Antrag steht die BAM Industriefirmen, Wirtschaftsverbänden, Verbrauchereinrichtungen sowie privaten Antragstellern zur Verfügung. Außerdem berät sie Bundesministerien und unterstützt Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Mit institutionen ähnlicher Zielsetzung des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstitutionen, arbeitet die BAM eng zusammen. Daneben ist sie in die technische Zusammenarbeit mit verschiedenen

Entwicklungsländern eingebunden. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzgebenden Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik Deutschland in internationalen und supranationalen Einrichtungen.

Aufgrund des Gesetzes über explosionsgefährliche Stoffe, des Gesetzes über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, des Waffengesetzes sowie einer Reihe weiterer gesetzlicher Regelungen und Verordnungen hat die Bundesanstalt den Status einer Bundesoberbehörde. Damit erhalten die in diesem Zusammenhang erteilten Zulassungen, Richtlinien und Auflagen bundesweit gesetzlichen Charakter. Im Rahmen der genannten Gesetze obliegen der BAM u. a. die Prüfung von Stoffen und Konstruktionen für die Zulassung explosionsgefährlicher Stoffe und Sprengzubehör, die Zulassung der Bauart von Verpackungen und die Genehmigung der Beförderung von gefährlichen Gütern ohne Schutzbehälter. Ferner läßt die Bundesanstalt Raketenmunition und Geschosse mit pyrotechnischer Wirkung im zivilen Bereich zu und prüft eine Vielzahl weiterer Produkte und Gegenstände im öffentlichen Interesse.

Mit nahezu 1.200 Mitarbeitern, darunter etwa 300 Wissenschaftlern unterschiedlicher naturwissenschaftlicher und technischer Fachrichtungen, befaßt sich die BAM in mehr als 100 Laboratorien damit, die chemischen, physikalischen und technologischen Eigenschaften von Werkstoffen zu bestimmen und Zusammenhänge zwischen Stoffkennwerten und Materialverhalten beim praktischen Einsatz aufzuklären. Dadurch werden Rohstoffe und Werte erhalten, Schäden vermindert und Unfälle verhütet. Das Arbeitsgebiet schließt alle technischen Materialien ein: Metalle, anorganische nichtmetallische Stoffe, insbesondere Baustoffe und keramische Werkstoffe, organische Stoffe wie Kautschuk, Kunststoffe, Textilien, Leder, Papier, Holz, aber auch Verbundwerkstoffe, technische Fluide und Gase sowie feste, flüssige und gasförmige explosionsfähige Stoffe. Für die Untersuchung von Materialien unter den verschiedensten Beanspruchungen, z. B. mechanischer, thermischer, tribologischer, chemischer, korrosiver oder biologischer Art, werden unterschiedlichste Meß-, Prüf- und Analysetechniken einschließlich zerstörungsfreier Prüfverfahren und Computertechniken eingesetzt. Durch Forschung und Entwicklung, Prüfung und Untersuchung sowie Beratung und Information dient die BAM dem Ziel, die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft zu fördern, die technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse zu erweitern sowie die Lebensbedingungen zu sichern und zu verbessern.

Die Arbeitsergebnisse der BAM werden in eigenen Publikationsreihen veröffentlicht:

- dem Amts- und Mitteilungsblatt, das jährlich mit 4 Ausgaben erscheint und in dem auch die amtlichen Zulassungen der BAM veröffentlicht werden;
- dem Jahresbericht, der die Arbeitsschwerpunkte und die wichtigsten Erträge des jeweils vorausgegangenen Jahres ausführlich dokumentiert;
- den Forschungsberichten, die in unregelmäßiger Folge die Resultate wichtiger BAM-Forschungsvorhaben präsentieren. Anfang 1987 waren rund 140 Berichte lieferbar.

Für weitere Information steht gerne BAM — 7.1 „Information und Öffentlichkeitsarbeit“, Tel.: 030/8104 7100, zur Verfügung.

ISBN 3-88314-959-4

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Forschungsbericht 169

**Integration der Untergrunddynamik
in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt
am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**

von Dipl.-Ing. Christian Kohl
Dr.-Ing. Werner Rücker

Berlin 1990

116 Seiten, 29 Abbildungen, 3 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 8 112 029 Teletex 2 627-308 372=bamb

Copyright © 1990 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Zusammenfassung

In bisherigen Untersuchungen zur Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik von schnellfahrenden Zügen wurde der Untergrund nur sehr ungenügend abgebildet. Ziel des Vorhabens war deshalb die Entwicklung und Einbindung eines realistischen Untergrundmodelles in das MKS-Programmsystem MEDYNA. Dies führte zur Entwicklung eines Oberbaumoduls der aus den elastischen Schienen, den Zwischenlagen zwischen Schienen und Schwellen, den Schwellen sowie dem eigentlichen Untergrund der als linear elastischer Halbraum modelliert wird, besteht. Das Besondere an diesem Untergrundmodell im Vergleich mit anderen Modellen ist, daß hier die Wellenausbreitung im Untergrund berücksichtigt wird. Zur Verifikation dieses Modelles wurden Eigenfrequenzen, Eigenformen und Frequenzgänge verschiedener Fahrzeug-Fahrwegmodelle auf der Basis des Hochgeschwindigkeitszuges ICE berechnet. Aus diesen Berechnungen lassen sich folgende erste Ergebnisse ablesen:

- Die berechneten statischen Verschiebungen des Oberbaus unter einem stehenden Zug entsprechen sehr gut experimentellen Ergebnissen und Ergebnissen die mit bestehenden konventionellen Verfahren berechnet wurden. Damit ist einerseits der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Untergrundmodells erbracht. Zum anderen gilt jedoch auch, daß für diese Problemstellung die bestehenden konventionellen Methoden und das hier vorgestellte Modell äquivalent sind.
- Die Starrkörpereigenfrequenzen des Fahrzeuges (Vertikal Wagenkasten, Vertikal und Rollen Laufwerkrahmen) werden nicht von der Art des Untergrundmodells beeinflusst.
- Die höheren Eigenwerte werden in dem Sinne durch das Untergrundmodell beeinflusst, daß die Eigenwerte bei Berücksichtigung eines realistischen Modells generell ansteigen (Erhöhung der Steifigkeit) und daß je nach Eigenform eine Zunahme (z.B. bei der phasengleichen Radsatzquerschwingung) oder eine Abnahme (z.B. bei der Querbewegung des Laufwerkrahmens) der modalen Dämpfung auftritt.
- Bei Berücksichtigung der Koppelleffekte durch die Wellenausbreitung im Untergrund können instabile Eigenwerte - dies bedeutet aufklingende Schwingungen- auftreten.

Obgleich die durchgeführten Berechnungen nicht im Sinne einer umfassenden Analyse des Gesamtsystems "Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund" zu verstehen sind, ist aus den erzielten Ergebnissen bereits zu erkennen, daß die Analyse der gekoppelten Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik einen wesentlichen Beitrag zur Bestimmung der dynamischen Fahrwegbeanspruchung, der Untergrundbelastung sowie zur Untersuchung der Laufstabilität des Fahrzeuges leisten kann. Weitere Untersuchungen zur systematischen Variation von Einflußparametern sowie zur Generalisierung des Oberbaumoduls erscheinen deshalb angezeigt.

Schlagwörter

MKS-Systeme, Bodendynamik, Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik, Feste Fahrbahn, Erschütterungsausbreitung

Abstract

In recent investigations of vehicle-track systems of high-speed trains only little efforts were made to include the characteristics of the subsoil. It was the aim of this research project to incorporate a more realistic and sophisticated model of the subsoil into the program-code MEDYNA. These efforts resulted in the development of a so-called "Oberbaumodul" which consists of the rails, the pads between rails and sleepers, the sleepers themselves and the subsoil which is modelled by an elastic halfspace. Contrary to other models, this model has the advantage of including the wave propagation phenomena in the subsoil. In order to verify this new model first computations were carried out, using the data of the German high-speed train ICE. Following results were obtained:

- The behaviour of the track is mainly influenced by the stiffness of the subsoil. A comparison of the computed results of the static deflection of the track with experimental results and results achieved by means of conventional theories show very good agreement. This agreement demonstrates that the modul works very well and that in order to compute the static displacement conventional theories give satisfactory results, too.

- The rigid-body eigenfrequencies (the vertical mode of the car-body and the vertical and torsional mode of the bogie-frame) are not influenced by the model of the subsoil.
- Higher eigenfrequencies are influenced by the model of the subsoil in that way that by using the coupled subsoil model the eigenfrequencies tend to increase (due to increasing stiffness) and the modal damping values tend to increase (lateral in-phase movement of the bogie-wheels) or decrease (lateral movement of the bogie-frame) in dependence of the modal form.
- If the coupled subsoil model is used non-stable eigenfrequencies may occur. This leads to increasing vibrations.

Although the main aim of the study was the incorporation of the "Oberbaumodul" into the program-code MEDYNA, the results obtained so far show that the analysis of the coupled train-track-subsoil system can contribute considerably to the determination of the dynamic loading of the track and the subsoil as well as to the investigation of the stability of the train itself. Therefore, further investigations of the systematic variation of influence parameters and of the generalization of the "Oberbaumodul" seem to be useful and important.

key words:

MKS-systems, soil-dynamic, dynamic of train-track systems, concrete slab, propagation of vibration

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	7
2. Beschreibung der Dynamik des Untergrundes	10
2.1 Allgemeines	10
2.2 Systembeschreibung und Diskussion der Ergebnisse	11
2.3 Verknüpfung der Teilsysteme	17
2.4 Auswahl der Schwellenfreiheitsgrade	19
2.5 Homogenisierung der Bodendaten	21
3. Der Mehrkörper-Algorithmus MEDYNA	24
4. Integration des Oberbau-Moduls in MEDYNA	27
4.1 Allgemeines	27
4.2 Elastische Schienen und deren Behandlung	33
4.3 Der Oberbaumodul	38
4.4 Einbinden des Oberbau-Moduls in die Hauptroutinen von MEDYNA	41
5. Berechnung von Eigenwerten	45
5.1 Allgemeines	45
5.2 Das Fahrzeugmodell	46
5.3 Ergebnisse des Beispiel-Modells ohne Untergrund	48
5.4 Ergebnisse des Beispiel-Modells mit Untergrund	51
5.5 Instabile Eigenformen	62
5.6 Einfluß der elastischen Zwischenlage	70
6. Berechnen von Frequenzgängen	73
6.1 Allgemeines	73
6.2 Integration in MEDYNA und Arten der Anregung	74
6.3 Rechenergebnisse	77
7. Zusammenfassung	81
Literatur	85
Anhang 1: Beispielberechnung für einen elastischen Balken	89
Anhang 2: Beispieldatensatz	93
Danksagung	112

1. Einleitung

Die enge wirtschaftliche Verflechtung und Arbeitsteilung unserer Zeit bedingt Verkehrssysteme, die Personen und Güter schnell, sicher und komfortabel transportieren können. Da der Straßenverkehr in zunehmenden Maße wirtschaftliche und ökologische Folgeschäden nach sich zieht, sind Alternativen dringend vonnöten. Als eine Alternative bietet sich der Schienenverkehr an, wenn es gelingt die Attraktivität dieses Verkehrssystems durch Steigerung der Reise- und Transportgeschwindigkeit zu erhöhen. Zur Erreichung dieses Zieles fördert der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) seit Anfang der siebziger Jahre die Entwicklung eines Hochgeschwindigkeitszuges.

Besondere Bedeutung kommt bei diesen Untersuchungen dem dynamischen Verhalten der Fahrbahn dieser Züge sowie der Wechselwirkung zwischen Zug und Fahrbahn zu. Erste Messungen am Gleisrost zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens von Einzelschwellen und zur Ermittlung der Größenordnung der Untergrundkoppelung der Schwellen durch die Wellenausbreitung im Boden wurden von Rücker/1/ durchgeführt. Weitere Messungen dieser Art folgten von Prange/3/ und Perger/8/. Die unter anderem aus diesen Messungen resultierenden Ansätze für die Rechenmodelle zur Beschreibung der gemessenen Reaktionen von Einzelschwellen und der Schwellenkoppelung wurden auf der Basis von "Halbraummodellen" von Prange /3/ und Rücker/5/ durchgeführt. Der Vergleich der auf der Basis dieser Modelle gewonnenen Ergebnisse mit den vorher durchgeführten Messungen ergab gute bis sehr gute Übereinstimmung (Rücker/6/ und Prange/3/).

Mit den auf dieser Grundlage erarbeiteten rechentechnischen Methoden wurde der Einfluß des als **elastischer Halbraum modellierten Untergrundes** auf das dynamische Verhalten des Eisenbahn-Oberbaus untersucht. Dies führte zur Entwicklung des Programmsystems INTACT,

Rücker/6/, mit dem sowohl die Wellenausbreitung im Untergrund wie auch die Dynamik konkreter auf der Bodenoberfläche aufliegender Systeme, wie z.B. eines Schienen-Schwellensystemes, des Gleisrostes, in allen Freiheitsgraden des Raumes unter beliebigem Kraftangriff berechnet werden kann.

Neuere Untersuchungen am Teilsystem **Fahrzeug-Fahrweg** (vom Wagenkasten bis zu den Schienen) wurden seit 1973 -jedoch ohne die Bodendynamik- z.B. an der Technischen Universität Berlin von Knothe /16/, Kik/17/ und Kohl /14/ durchgeführt. Grundlage für solche Untersuchungen waren immer sogenannte Mehrkörper-Algorithmen, die in der Lage sind, die Bewegungsgleichungen unterschiedlich gekoppelter, beliebig im Raum liegender Körper zu generieren.

Das im Rahmen mehrerer BMFT-Vorhaben zur Analyse und Auslegung von Schienenfahrzeugen konzipierte Programm MEDYNA (= MEhrkörper DYNAmik) ist ein solcher Mehrkörper-System-Algorithmus, auch MKS-Algorithmus genannt (Wallrapp /9/). In MEDYNA wurden im Rahmen dieses Vorhabens die aus der Untergrund/Oberbaudynamik erarbeiteten Ergebnisse in Form des Programmes INTACT eingebaut. Durch die Zusammenschaltung der beiden Programme INTACT und MEDYNA wurden die bis jetzt getrennt geführten Bemühungen zur Entwicklung von Rechenprogrammen für die Fahrzeugdynamik und für die Untergrund- und Oberbaudynamik vereinigt. Der dadurch entstandene Programmmodul stellt die notwendige Voraussetzung für weitere durchzuführende Untersuchungen zur Dynamik des gesamten Fahrzeuges auf dem elastischen Fahrweg dar.

Die hier vorgestellte Arbeit gliedert sich in zwei Teile. In Teil I wird die Phänomenologie der Grunddynamik mit der zugehörigen Ermittlung frequenzabhängiger Bodensteifigkeits- und Bodendämpfungsmatrizen auf der Basis des Programmsystems INTACT behandelt (siehe Kapitel 2). Dies wird nur in allgemeiner Form durchgeführt. Für eine genauere Beschreibung der zugehörigen Theorie wird auf den Bericht von Rücker /6/ verwiesen.

Teil II bezieht sich auf die Implementation der frequenzabhängigen Untergrundmatrizen mit seinen über den Boden gekoppelten Schwellen in das MKS-Programmsystem MEDYNA. Dabei entstand ein **Oberbaumodul**, der aus zwei, als elastische Balken modellierten Schienen, den darunter liegenden Schwellen sowie dem Untergrund besteht.

Zur Verifizierung dieses neuentwickelten Programmteiles von MEDYNA wurden die Eigenwerte und die Eigenformen sowie die Frequenzgänge von ausgewählten Punkten eines ICE-Reisezugwagens berechnet. Diese Berechnung kann auch als charakteristisches Beispiel angesehen werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Kapitel 5 und 6 dargestellt.

Die Beiträge der Autoren zu diesem Bericht gliedern sich wie folgt: Die Beschreibung der Modellierung des Oberbaus, dessen Berechnung und die Diskussion der Ergebnisse (Kap. 2) wurden von W. Rücker durchgeführt. Die MEDYNA-spezifischen Programm- und Berichtsteile (Kap. 3 und 4) sowie sämtliche ICE-Berechnungen in den Kapiteln 5 und 6 sind C. Kohl zuzuordnen. Die Kapitel 5 bis 7 wurden von C. Kohl und W. Rücker gemeinsam verfasst. Die gesamte Überarbeitung, einschließlich Texterstellung und Layout wurde von beiden Autoren gemeinsam durchgeführt. Zu erwähnen ist noch, daß R. Rohrman den Verbindungsmodul für den Datentransfer zwischen den Programmen INTACT und MEDYNA programmiert und in /20/ beschrieben hat.

2. Beschreibung der Dynamik des Untergrundes

2.1 Allgemeines

Die Oberbau-Untergrunddynamik beschäftigt sich innerhalb der Problematik der Berechnung des gekoppelten Gesamtsystems "Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund" (Bild 2.1) mit der Modellierung und der Berechnung des Fahrweges sowie mit dem Schwingungsverhalten des Bodens. Da der Fahrweg auch in den Modellen zur Fahrzeugdynamik berücksichtigt wird, liegt das Schwergewicht der Betrachtung jedoch bei der Modellierung des Untergrundes.

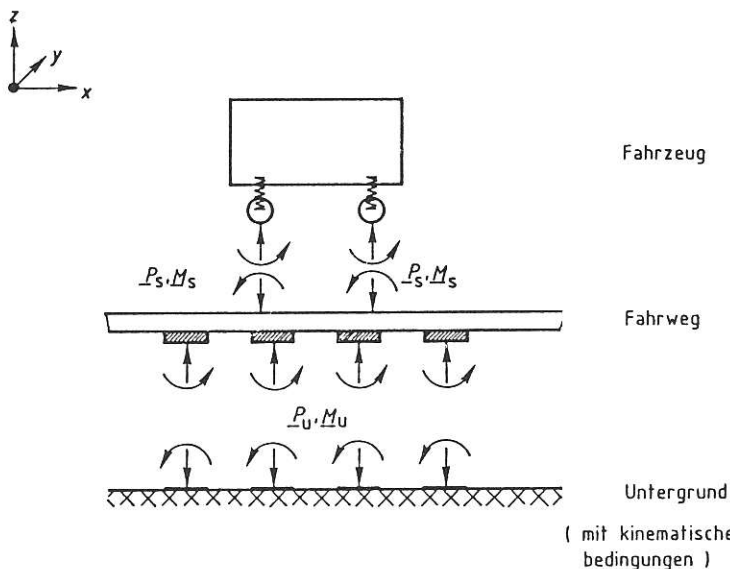


Bild 2.1:

Untersuchtes Gesamtsystem:
In Teilsysteme -Fahrzeug,
Fahrweg, Untergrund-
gegliedert

(Zeichnung aus /7/)

Bei der Wahl eines geeigneten mathematischen Modells für den Untergrund ist es sinnvoll, sich an den physikalischen Realitäten zu orientieren. (Eine andere Auswahlstrategie könnte z.B. leichte Handhabbarkeit des Modells sein). Drei wesentliche Eigenschaften zeichnen das natürliche System "Untergrund" aus:

1. Bei dynamischer Belastung finden Wellenausbreitungsvorgänge an der Oberfläche und im Inneren statt. Damit sind alle betrachteten Punkte des Systems miteinander gekoppelt.
2. Durch die Wellenausbreitungsvorgänge wird einem dynamisch belasteten System -z.B. dem System

Fahrzeug-Fahrbahn- fortwährend Energie entzogen.
Das System ist also stark gedämpft.

3. Die Materialkonstanten des Stoffes "Boden" sind in starker Weise vom Dehnungs- und Spannungsniveau abhängig.

Die beiden ersten wesentlichen Systemeigenschaften können nur mit einem Kontinuumsmodell, einem sogenannten Halbraum, beschrieben werden. Innerhalb dieser Untersuchung wird deshalb zunächst in einem ersten Schritt ein homogener Halbraum betrachtet. Die materiellen Eigenschaften dieses Systems werden durch den Schubmodul G , die Poissonzahl ν , die Dichte ρ und die Materialdämpfung D beschrieben. Das Materialverhalten ist linear-elastisch und die -vernachlässigbare- Materialdämpfung ist hysteretisch. Die beiden letzteren Voraussetzungen können bei dem Dehnungsniveau, das unter einem fahrenden Zug auftritt, als experimentell gesichert angesehen werden. Die genannte dritte wesentliche Eigenschaft der materiellen Inhomogenität kann näherungsweise durch Einführung eines frequenzabhängigen Schubmoduls $G(f)$ (s. auch /18/) berücksichtigt werden.

2.2 Systembeschreibung und Diskussion der Ergebnisse

In der weiteren Erarbeitung eines Modells zur Berechnung der Dynamik der Fahrbahn schnellfahrender Züge wird das Gesamtsystem entsprechend Bild 2.1 in Teilsysteme zerlegt. Als Schnittstelle der beiden Teilsysteme "Fahrweg" und "Untergrund" wird die Kontaktfläche zwischen den Schwellen bzw. der Festen Fahrbahn und dem Untergrund definiert. Für den hier untersuchten Fall eines Schwellensystems hat man dann folgendes System zu betrachten (Bild 2.2): An der Bodenoberfläche befinden sich N starre masselose Flächen, die zunächst durch stationäre harmonische Kräfte und Momente p belastet werden, die die Reaktionskräfte q in den Kontaktflächen zwischen den masselosen Schwellen und dem Untergrund hervorrufen.

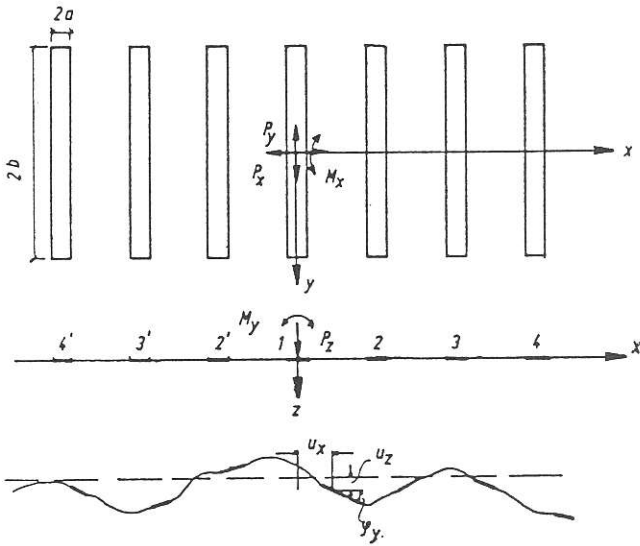


Bild 2.2:
Schwellensystem auf Untergrund
mit signifikanten Bewegungs-
und Belastungsmoden

Die äußeren Störkräfte und Momente \underline{p} , die den Reaktionskräften \underline{q} äquivalent sind,

$$\underline{q} = (P_{xi}, P_{yi}, P_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}), \quad (2.1)$$

erzeugen Starrkörperbewegungen \underline{u} der Schwellen

$$\underline{u} = (u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}, \phi_{xi}, \phi_{yi}, \phi_{zi}). \quad (2.2)$$

Den Zusammenhang zwischen Kräften und Verschiebungen erhält man mit Hilfe einer Untergrundsteifigkeitsmatrix \underline{C}_B zu

$$\underline{q} = \underline{C}_B \underline{u}. \quad (2.3)$$

In den obigen Gleichungen bezeichnet $i=1 \dots N$ den Laufindex über die einzelnen Schwellen. Die Indizes x, y und z beziehen sich auf die Koordinatenrichtungen.

Die $6N \times 6N$ Steifigkeitsmatrix \underline{C}_B erhält man nach Rucker/6/ aus der Lösung eines gemischten Randwertproblems. Dieses Lösungsverfahren ist Bestandteil des Programmsystems INTACT.

Schreibt man Gleichung (2.3) in Matrixform vollständig aus, so ergibt sich folgende Gestalt, wobei z.B. die Matrixelemente \underline{c}_{xx} selbst wieder Matrizen vom Rang $N \times N$ sind:

$$\begin{bmatrix} P_{xi} \\ P_{yi} \\ P_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{c}_{xx} & \underline{c}_{xy} & \underline{c}_{xz} & \underline{c}_{x\phi x} & \underline{c}_{x\phi y} & \underline{c}_{x\phi z} \\ & \underline{c}_{yy} & \underline{c}_{yz} & \underline{c}_{y\phi x} & \underline{c}_{y\phi y} & \underline{c}_{y\phi z} \\ & & \underline{c}_{zz} & \underline{c}_{z\phi x} & \underline{c}_{z\phi y} & \underline{c}_{z\phi z} \\ & \text{symm.} & & \underline{c}_{\phi x\phi x} & \underline{c}_{\phi x\phi y} & \underline{c}_{\phi x\phi z} \\ & & & & \underline{c}_{\phi y\phi y} & \underline{c}_{\phi y\phi z} \\ & & & & & \underline{c}_{\phi z\phi z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{xi} \\ w_{yi} \\ w_{zi} \\ \phi_{xi} \\ \phi_{yi} \\ \phi_{zi} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

(Zeichnung aus /7/)

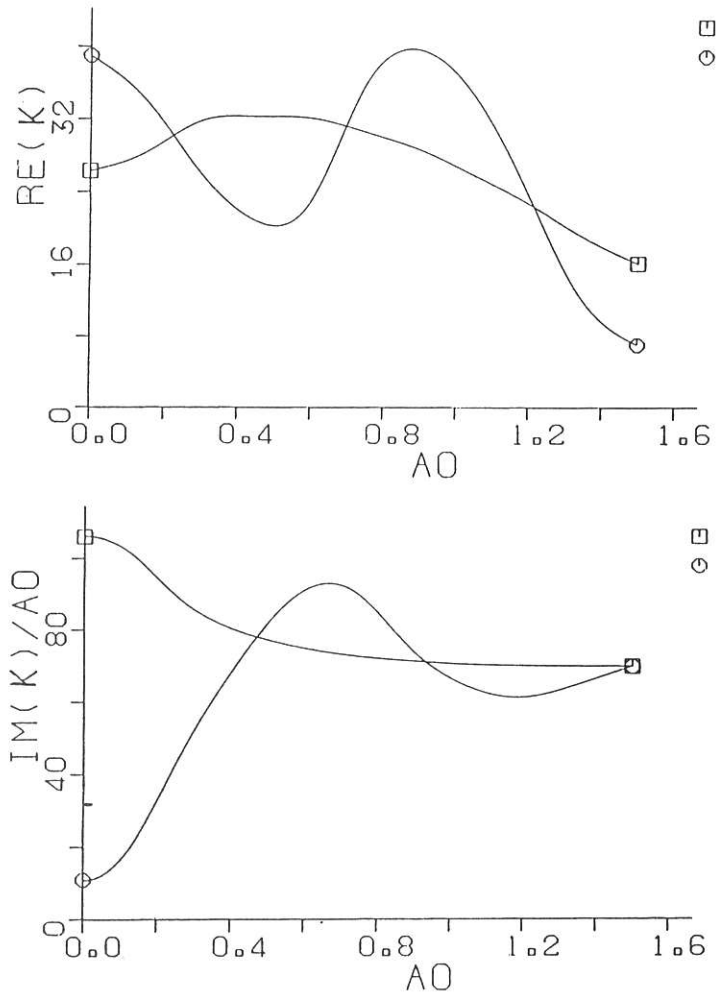
Die Matrix \underline{C}_B weist nun einige Besonderheiten auf. Diese sind:

1. Die Elemente c_{ij} der Matrix sind frequenzabhängig; die Beschreibung dieser Abhängigkeit erfolgt durch einen dimensionslosen Frequenzparameter $a_0 = a \Omega / v_S$, wobei a die halbe Schwellenbreite, Ω die Erregerfrequenz und v_S die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle bedeuten.

Bild 2.3 :

Vertikale Steifigkeit und Dämpfung für Systeme mit

- 1 Schwelle und
- 7 Schwellen



In den Bildern 2.3 und 2.4 sind die Real- und Imaginärteile der komplexen vertikalen Steifigkeit und der komplexen horizontalen Steifigkeit für zwei Systeme, bestehend aus einer Schwelle und sieben Schwellen, aufgetragen. Man sieht, daß für eine Einzelschwelle die Frequenzabhängigkeit nicht so gravierend ist. Mit zunehmender Schwellenanzahl erfolgt jedoch eine Oszillation um die Kennlinie einer Einzelschwelle, wobei maximale Abweichungen bis 500 % auftreten.

Von praktischer Relevanz im Sinne der Stabilität des Systems ist, daß mit zunehmender Schwellenanzahl der

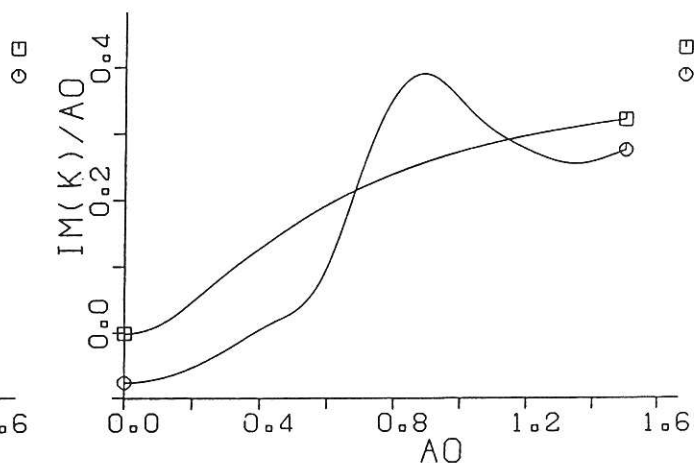
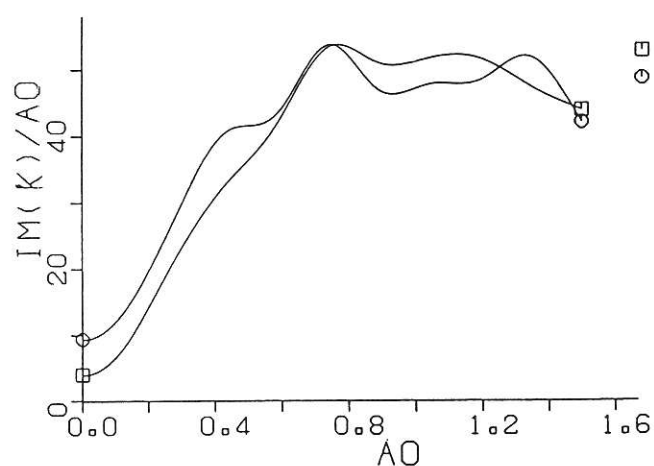
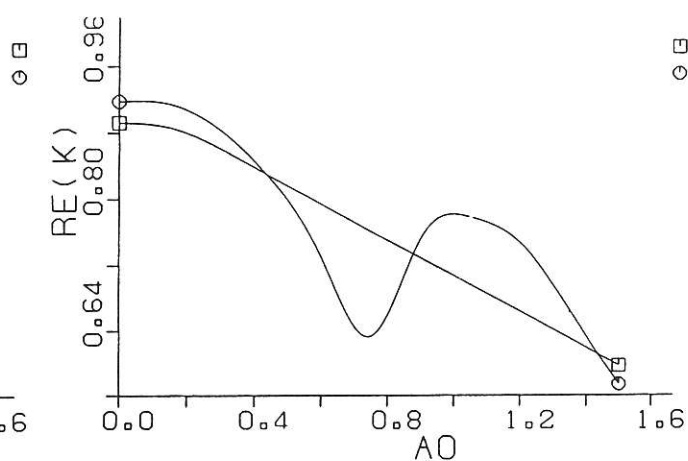
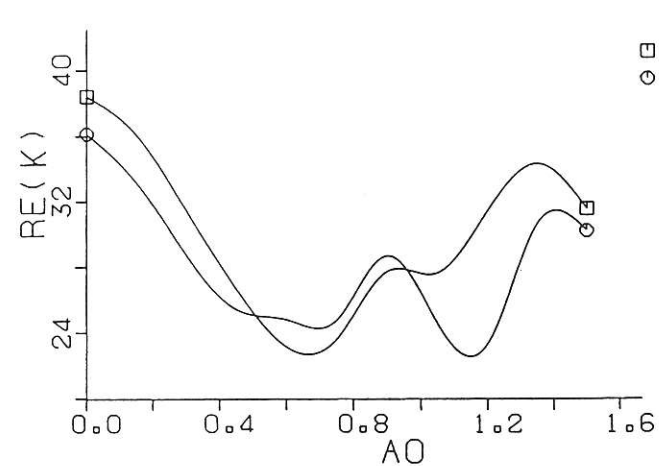


Bild 2.4 :

Horizontale Steifigkeit und Dämpfung für Systeme mit

- 1 Schwelle und
- 7 Schwellen

Bild 2.5 :

Rotations-Steifigkeit und -Dämpfung für Systeme mit

- 1 Schwelle und
- 7 Schwellen

Imaginärteil -dieser kann im Vorgriff auf Kapitel 2.2 als Dämpfung identifiziert werden- im niedrigen Frequenzbereich bis etwa $a_0 = 0.5$ erheblich reduziert wird.

2. Innerhalb ein und derselben Schwelle sind die horizontalen Bewegungsmoden immer mit den zugehörigen Rotationen und umgekehrt verknüpft (Bild 2.5). Das heißt, eine Einzelschwelle kann sich nicht verdrehen, ohne gleichzeitig eine horizontale Bewegung zu erfahren. Die Ursache für dieses Phänomen ergibt sich daraus, daß die Oberflächenwelle gleichzeitig horizontale und vertikale Verschiebungsanteile besitzt.

3. Durch die Wellenausbreitungsvorgänge im Untergrund tritt eine Koppelung sämtlicher Freiheitsgrade

sämtlicher Schwellen ein. Die Art und Größe dieses **Wechselwirkungseffektes** soll anhand des Amplitudenverhaltens massebehafteter "Schwellen-Untergrund"-Systeme gezeigt werden. Bei dem untersuchten System handelt es sich um ein 7-Schwellensystem/18/, wobei nur die mittlere Schwelle belastet wurde. In Bild 2.6 ist das Ergebnis für die Vertikaldynamik und in Bild 2.7 für die Horizontaldynamik dargestellt. In beiden Fällen ist zu erkennen, daß eine Folge lokaler Maxima vorhanden sind, deren Verlauf mit zunehmender Schwellenanzahl schärfer wird und deren Amplitudenwerte größer werden. Die Frequenzen $f_j \approx v_s/d$, an denen diese lokale Maxima auftreten, werden von dem Verhältnis Scherwellengeschwindigkeit v_s zu Schwellenabstand d festgelegt.

Vergleicht man die Amplitudenwerte der unbelasteten Schwellen mit denjenigen der belasteten Schwelle,

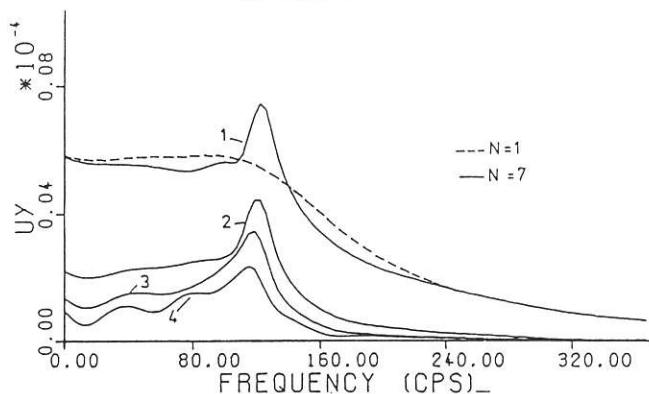
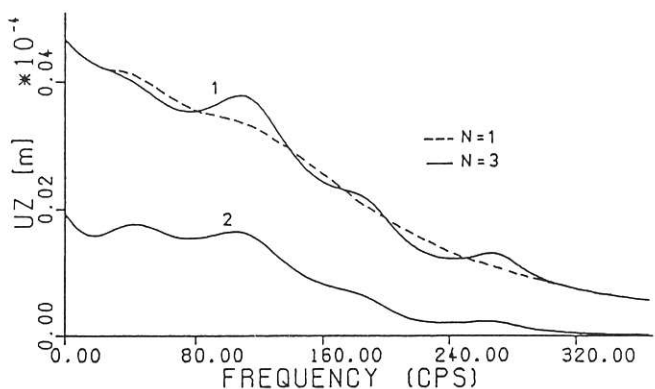
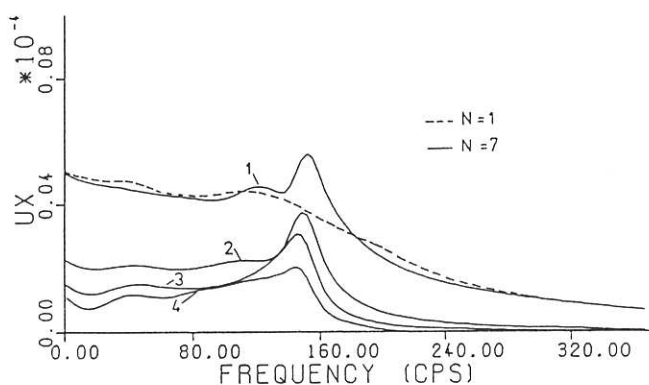
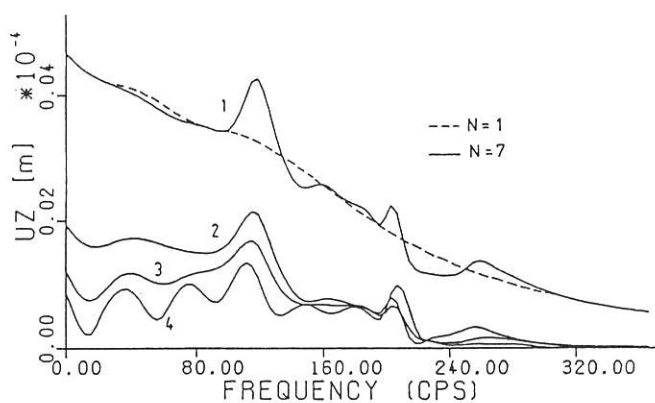


Bild 2.6 :

Amplitudenverlauf der vertikalen Verschiebung infolge vertikaler Belastung und Systeme mit 1, 3 und 7 massebehafteten Schwellen

Bild 2.7 :

Amplitudenverläufe der horizontalen Verschiebungen infolge horizontaler Belastung und Systeme mit 1, 3 und 7 massebehafteten Schwellen

so ergeben sich im vertikalen Fall Werte von 40 %, 25 % und 20 % für die zweite, dritte und vierte Schwelle. Die Koppelung über den Boden ist damit von gleicher Größenordnung und somit von gleichem Einfluß wie eine Koppelung über die Schienen. Weiter ist zu erkennen, daß ab etwa 250 Hz die Amplitudenwerte sehr klein werden, so daß der Frequenzbereich über 250 Hz im allgemeinen ohne Bedeutung bei der Untersuchung des mechanischen Schwingungsverhaltens des Fahrzeuges und des Fahrweges ist.

Bei der Horizontaldynamik erhält man für den Kopplungsgrad Werte von 45 %, 32 % und 25 % für die x-Richtung und 39 %, 23 % und 15 % für die y-Richtung. Die lokalen Maxima sind hier nicht so scharf ausgeprägt wie bei der Vertikaldynamik. Im Vergleich beider Horizontalmoden zeigt sich, daß die Amplitudenmaxima bei der x-Mode bei höheren Frequenzen liegen und daß die Amplituden der x-Mode generell kleiner sind als die der y-Verschiebung. Interessant ist weiter, daß die größten Absolutwerte aller 3 Verschiebungsmoden bei der y-Mode auftreten (siehe hierzu auch Prange/3/).

Von Rücker wurde in /6/ gezeigt, daß es genügt aus dem "unendlich" langen Schienen-Schwellen-System ein Gleisstück mit $N=7$ Schwellen zu betrachten, da bereits mit diesem 7-Schwellen-System alle wesentlichen Koppeleffekte, sowohl hinsichtlich der Rückwirkung benachbarter Schwellen auf die Freiheitsgrade einer Einzelchwelle als auch die Auswirkung der Belastung einer Schwelle auf die Freiheitsgrade aller anderen Schwellen hinreichend gut beschrieben werden können. Die mit dem Programm INTACT berechneten komplexen Bodensteifigkeitsmatrizen sind somit die Basis des innerhalb dieses Vorhabens entwickelten Untergrundmoduls. Vor der Verwendung dieser Daten ist jedoch noch zu klären, wie das Modell des Untergrundes mathematisch mit dem Modell des Fahrzeuges und des Fahrweges verknüpft wird und wie aus den Daten des endlichen 7-Schwellen-Systems eine Steifigkeitsbeziehung für ein beliebig langes Gleis bzw. für ein "unendlich" langes Gleis

evaluiert werden kann. Dies wird im folgenden beschrieben.

2.3 Verknüpfung der Teilsysteme

Das zu betrachtende Gesamtsystem besteht aus den Teilsystemen Fahrzeug-Fahrweg und dem Untergrund. Das Teilsystem "Fahrzeug-Fahrweg" wird z.B. durch die Differentialgleichung

$$\underline{M} \ddot{\underline{x}} + \underline{D} \dot{\underline{x}} + \underline{K} \underline{x} = \underline{p} \quad (2.5)$$

und das dynamische Verhalten des Untergrundes durch

$$\underline{C}_B \underline{u} = \underline{q} \quad (2.6)$$

beschrieben. In Gleichung 2.5 ist

- M die reelle Massenmatrix Fahrzeug/Fahrweg
- D die reelle Dämpfungsmatrix Fahrzeug/Fahrweg
- K die reelle Steifigkeitsmatrix Fahrzeug/Fahrweg

$\ddot{\underline{x}}, \dot{\underline{x}}, \underline{x}$ sind die reellen Freiheitsgradvektoren der Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Wege des Fahrzeuges/Fahrweges und

\underline{p} ist der äußere Lastvektor.

In Gleichung 2.6 ist

$\underline{C}_B(\Omega) = \underline{C}_1(\Omega) + i \underline{C}_2(\Omega)$ die komplexe frequenzabhängige Steifigkeitsmatrix des Untergrundes,

$\underline{u} = \underline{u}_1 + i \underline{u}_2$ der komplexe Verschiebungsvektor des Untergrundes und

$\underline{q} = \underline{q}_1 + i \underline{q}_2$ ist der komplexe Lastvektor.

Die beiden Teilsysteme werden zusammengefügt, indem Kraftgleichgewicht in den entsprechenden gemeinsamen Freiheitsgraden, das sind im allgemeinen die Schwellenfreiheitsgrade, gefordert wird. Zur formalen Verknüpfung wird unter der Voraussetzung, daß das Fahrzeug-Fahrweg-Modell die Schwellenfreiheitsgrade bereits enthält, zunächst die Bodensteifigkeitsmatrix \underline{C}_B und die Vektoren \underline{u} und \underline{q} auf den Rang der Matrizen \underline{K} , \underline{M} und \underline{D} erweitert. Man erhält dann

$$\underline{C}_B \underline{x} = \underline{q}_g, \quad (2.7)$$

wobei der Index g auf das Gesamtsystem "Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund" hinweist.

Eine mathematisch äquivalente Darstellung der beiden Gleichungen 2.5 und 2.6 erhält man durch den harmonischen Ansatz

$$\underline{x} = \underline{x}_0 e^{i\Omega t} \quad (2.8)$$

für die Verschiebungsvektoren des Systems Fahrzeug-/Fahrweg. Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ergeben sich dann zu

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= \underline{x}_0 i \Omega e^{i\Omega t} \\ \ddot{\underline{x}} &= -\underline{x}_0 \Omega^2 e^{i\Omega t} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Die Forderung nach Kraftgleichgewicht $\underline{p} = -\underline{q}$ zwischen den beiden Teilsystemen führt schließlich zu der Gleichung für das Gesamtsystem

$$(-\underline{M} \Omega^2 + i \Omega (\underline{D} + \underline{D}_B/\Omega) + (\underline{K} + \underline{K}_B)) \underline{x}_0 = \underline{p}_0 \quad (2.10)$$

Durch Koeffizientenvergleich der Gleichung 2.10 mit den Gleichungen 2.5 und 2.6 ist zu sehen, daß sich die komplexe Steifigkeitsmatrix \underline{C}_B des Bodens durch die beiden reellen Matrizen

$$\underline{K}_B(\Omega) = \text{Re}(\underline{C}_B) \quad (2.11a)$$

$$\underline{D}_B(\Omega) = \text{Im}(\underline{C}_B) / \Omega \quad (2.11b)$$

darstellen läßt. Der Imaginärteil von \underline{C}_B charakterisiert also die frequenzabhängige Dämpfungsmatrix $\underline{D}_B(\Omega)$, die jedoch nicht als Materialdämpfung des Bodens, sondern als Dämpfung infolge der Abstrahlung der Schwingungsenergie in den unendlichen Halbraum zu verstehen ist. Entsprechend ist der Realteil $\underline{K}_B(\Omega)$ von \underline{C}_B in diesem Sinne eine frequenzabhängige Steifigkeitsmatrix.

Die mit Hilfe des Programmsystems INTACT vorab berechneten frequenzabhängigen Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen können im gegenwärtigen Stadium bis zu einer dimensionslosen Frequenz von

$$a_0 = a * \Omega / v_s = 1,5 \quad (2.12)$$

benutzt werden. In Gleichung (2.12) bedeuten

a	(m)	halbe Schwellenbreite
Ω	(1/s)	Kreisanregungsfrequenz
v_S	(m/s)	Scherwellengeschwindigkeit des Bodens.

Unter einem Eisenbahngleis sind Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Scherwelle -diese charakterisiert die Bodensteifigkeit über die Beziehung

$$G = v_S^2 \rho, \quad (2.13)$$

von etwa 300 m/s realistisch. Mit $a=0.13$ m und der genannten Geschwindigkeit errechnet sich aus Gleichung 2.12 eine maximal erfassbare Frequenz von etwa 550 Hz.

Sollen Rechnungen mit Frequenzen von $\omega_0 > 1.5$ durchgeführt werden, so werden im gegenwärtigen Implementierungsstand die Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen für $\omega_0 = 1.5$ benutzt. Von dieser Extrapolation werden im wesentlichen nur die Elemente der Steifigkeitsmatrix stärker im Sinne von Fehlern beeinflusst, da die Dämpfungsmatrix in diesem Bereich nahezu linear von der Frequenz abhängig ist. Da in diesem Hochfrequenzbereich das Systemverhalten zudem überwiegend nur noch von den Massen und den Dämpfungen bestimmt wird, ist im allgemeinen der durch die Extrapolation in den Steifigkeiten bedingte Fehler ohne Bedeutung.

2.4 Auswahl der Schwellenfreiheitsgrade

Wie in Kapitel 2.1 besprochen und gezeigt, sind für ein allgemeines System mit allgemeiner räumlicher Belastung sämtliche Freiheitsgrade aller Schwellen miteinander gekoppelt. Mathematisch drückt sich dieser Zusammenhang in einer vollen Besetzung der Strukturmatrix \underline{C}_B aus. In der praktischen Berechnung erweist sich jedoch eine vollbesetzte Matrix als sehr nachteilig, da hierbei die erforderlichen Rechenzeiten sehr stark anwachsen. Dieser Nachteil kann jedoch umgangen werden, wenn gewisse Symmetrien des Systems und der Belastung ausgenutzt werden. In diesem Falle entkoppeln sich je nach Belastungs-Freiheitsgrad-Kombination gewisse Freiheitsgrade oder sind sogar identisch Null

(ausschließlich aus Symmetriegründen!). Damit kann der erforderliche Rechenaufwand um ein Vielfaches reduziert werden.

Zu beachten ist jedoch, daß bei Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften nur **bestimmte** Freiheitsgradkombinationen zulässig sind. In der Vorabberechnung mit dem Programmsystem INTACT wurden insgesamt sieben wichtige Freiheitsgrad-Kombinationen definiert und berechnet und die Ergebnisse in Form von Submatrizen der komplexen Steifigkeitsmatrix \underline{C}_B abgespeichert. Dabei ergibt sich die Anzahl der Submatrizen aus der Anzahl der betrachteten Freiheitsgrade einer Schwelle, und zwar je eine pro Freiheitsgrad und wegen Symmetriebedingungen je eine pro Freiheitsgradkoppelung zu einem anderen Freiheitsgrad.

In Tabelle 2.1 sind die Freiheitsgrad-Kombinationen für die sieben betrachteten Fälle zusammengestellt. Neben einer Arbeitskennung (= KENN) und einer Symmetriekennung (= NSYM) ist dort auch die Anzahl der sich ergebenden Submatrizen angegeben. Es ist anzumerken, daß sich im gegenwärtigen Bearbeitungsstand keine anderen Belastungsfälle als die angegebenen Fälle berechnen lassen. Es sei jedoch betont, daß die genannten Einschränkungen ausschließlich aus Rechenzeitgründen

Freiheitsgrade	1	2	3	4	5	6	7
w_x	0	0	0	1	0	1	1
w_y	0	0	0	0	1	0	1
w_z	1	1	1	0	0	1	0
ϕ_x	1	0	0	0	0	0	0
ϕ_y	1	0	1	0	0	1	0
ϕ_z	0	0	0	0	0	0	1
Anzahl d. Submatrizen	6	1	3	1	1	6	6
KENN	1	1	1	2	3	5	6
NSYM	0	1	-1	0	0	-1	0

Tabelle 2.1:
Mögliche Freiheitsgrad-Kombinationen für die Schwellen

eingeführt wurden und nicht prinzipieller Natur sind. Fallenerweiterungen sind jederzeit möglich, obgleich diese Erweiterungen der Entwicklung eines INTACT-unabhängigen Untergrundmoduls vorbehalten sein sollten.

2.5 Homogenisierung der Bodendaten

Die vorliegenden Steifigkeitsmatrizen des Untergrundes sind mit einem 7-Starrschwellen-System errechnet worden. Um jedoch Systeme mit einer Schwellenanzahl größer als 7 berechnen zu können, ist es notwendig, die vorliegenden Ergebnisse zu generalisieren.

In Bild 2.8 sind die frequenzabhängigen Steifigkeits- und Dämpfungsfunktionen der einzelnen Schwellen eines 7-Schwellen-Systems dargestellt.

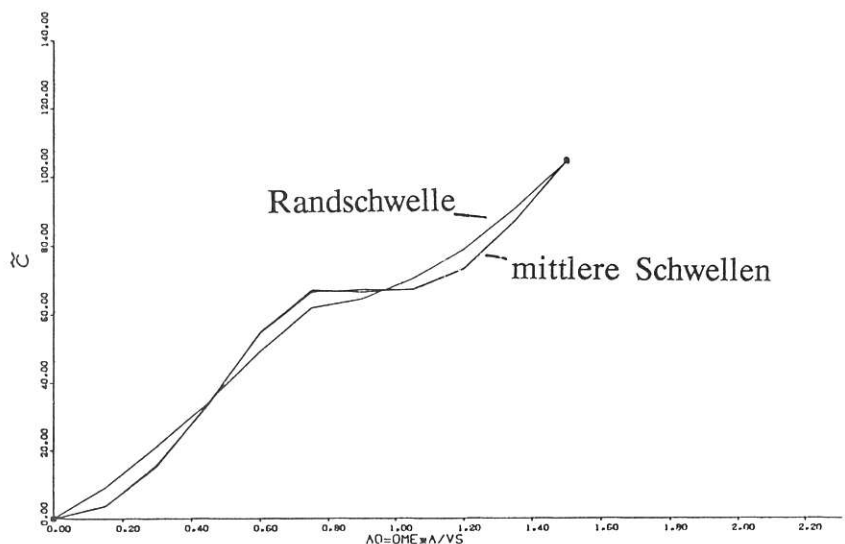
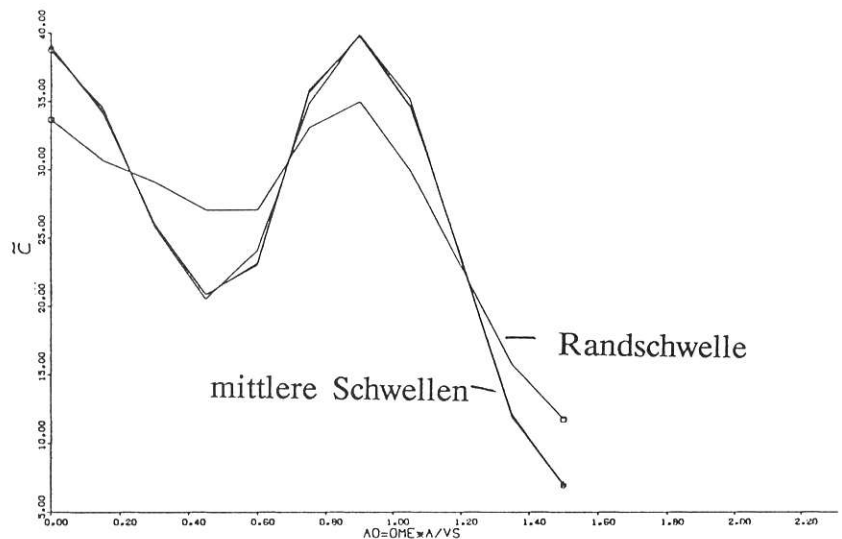


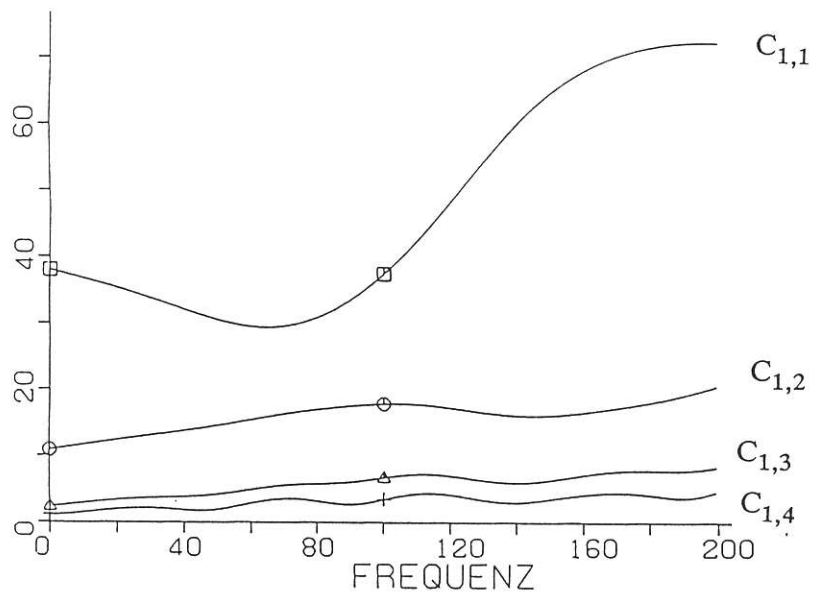
Bild 2.8:

Vertikal-Steifigkeits-
und Dämpfungsverlauf
der Einzelschwellen des
7-Schwellensystems
 $C_{zz} (u_z; u_x; \Phi_y)$

zwischen den Schwellen, die weiter als 5 Schwellen auseinanderliegen, - z.B. die Koppelung zwischen Schwelle 1 und Schwelle 6- nicht berücksichtigt werden können.

Bild 2.10:

Größenordnung der Vertikalsteifigkeiten für das Diagonalglied und die ersten drei Nebendiagonalglieder



Die Vernachlässigung dieser Matrix-Elemente wird jedoch für vertretbar gehalten, weil deren Einfluß auf das Gesamtsystem bei vergleichbaren Problemen vernachlässigbar klein ist (siehe Rucker/1/ und Bild 2.10).

Die oben besprochene Methode wird auch auf diejenigen Submatrizen angewendet, die die Koppelung der Bewegungsmoden innerhalb der jeweiligen Schwelle (z.B. horizontale Verschiebung mit der zugeordneten Verdrehung) beschreiben.

Nach Durchführung dieser Operationen haben die ansonsten voll besetzten Matrizen eine Bandstruktur mit einer Bandbreite von maximal 9 Elementen. Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß dieses vereinfachte Verfahren ausschließlich aus Gründen der Rechenzeitoptimierung eingeführt worden ist. Die Begründung für die Gültigkeit dieser Vereinfachungen folgt aus den Ergebnissen der exakten Berechnung.

3. Der Mehrkörper-Algorithmus MEDYNA

Im Rahmen mehrerer vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderter Forschungsvorhaben entstand etwa 1980 bis 1985 das Rechen-Programm MEDYNA (MEhrkörper-DYNAmik) zur Analyse und Auslegung von spurgeführten Fahrzeugen. Das Programm wurde zur Berechnung der Dynamik von Schienenfahrzeugen konzipiert und kann durch seine allgemeingültige Formulierung auch für viele andere Anwendungen der Dynamik benutzt werden. Möglich sind die Berechnungen von konstruktions- und auslegungstechnisch relevanten Parametern von Mehrkörper-Modellen bezüglich

- der statischen Lage,
- der Stabilität,
- des Frequenzverhaltens,
- des Komfortverhaltens von Fahrzeugen,
- des Kurvenverhaltens von Schienenfahrzeugen
- sowie des Zeitverhaltens.

Ein wesentlicher Vorteil des Programmes ist die automatische Generierung der dynamischen Bewegungsgleichungen des Systems aus den Modellvorgaben des Anwenders. Damit entfällt die zeitraubende Aufstellung des Gleichungssystems durch den Entwickler. Die Gleichungen werden für kleine Relativbewegungen von starren oder elastischen Körpern formuliert. Man nennt das auch einen **linearen MKS-Formalismus**.

Die dynamischen Interaktionen zwischen den einzelnen Körpern werden durch Verbindungselemente hergestellt, die in einem Katalog des Programmes geführt werden. Hier sind auch nichtlineare Koppelglieder definiert wie z.B. ein nichtlineares Rad-Schiene-Verbindungsele-

ment. Das bedeutet, daß der lineare MKS-Formalismus bezüglich der geometrischen Verhältnisse auch nicht-linear sein kann.

Der erwähnte Katalog hat im einzelnen folgende Konstruktionselemente:

- Koppelstange
- Zwangsbedingung
- nichtlineares Rad-Schiene-Verbindungselement
- lineares Rad-Schiene-Verbindungselement
- lineare Steifigkeit
- lineare Dreh-Steifigkeit
- lineare viskose Dämpfung
- lineare viskose Dreh-Dämpfung
- Reihenschaltung von linearer Steifigkeit und Dämpfung
- Reihenschaltung von linearer Dreh-Steifigkeit und Dreh-Dämpfung
- Kompaktes Verbindungselement
- Selbst definierte Verbindungselemente (User-Routinen)

Alle Körper können beliebig untereinander und zu einem bewegten Referenzsystem hin (s. auch Wallrapp/9/) mit den Verbindungselementen gekoppelt werden.

Auf das in MEDYNA mit Körpern und Verbindungen definierte Modell können Anregungen als externe Kräfte wirken. Die Anregungen sind als

- Zeit- oder Wegfunktionen,
- stochastische Prozesse
- oder als zeitlich und/oder örtlich versetzte harmonische Anregungsfunktionen

wählbar. Für die Auswertung der Ergebnisse können sämtliche Zustandsgrößen des Modells (Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Kräfte auf Körper, Kräfte in Verbindungselementen ...) sowie bei der Berechnung der Stochastik auch die Komfort-Kriterien für Fahrzeuge (Wz-Ziffern) ausgegeben werden.

Im folgenden ist der typische MEDYNA-Berechnungsgang, wie er sich für die hier benutzten Modelle ergibt, aufgeführt. In dieser Aufstellung sind die Programmteile, in denen der Oberbau vertreten ist, mit einem Stern (*) gekennzeichnet. Diese Programmteile werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

1. Einlesen der Körper- und Massendaten.
 - 1.1 Einlesen und Berechnen der elastischen Eigenformen der Schienen. (*)
 - 1.2 Einlesen der Oberbaudaten. (*)
2. Einlesen der Daten der Verbindungselemente.
3. Fahrzeuggeschwindigkeit definieren.
4. Schnelldrehende Rotoren definieren (z.B. die Radsätze).
5. Äußere Anregungen definieren.
6. Ausgabegrößen (Ausgänge) definieren.
7. Statische Gleichgewichtslage berechnen.
8. Matrizenaufbau der Systemmatrizen. (*)
9. Berechnen der Eigenwerte und Eigenformen.
10. Berechnen des Frequenzganges. (*)

4. Integration des Oberbau-Moduls in MEDYNA

4.1 Allgemeines

Das allgemeine Ziel der Entwicklung des Oberbau-Moduls besteht in der Koppelung der beiden Programmsysteme MEDYNA und INTACT. Die in Kapitel 2 beschriebenen, mit dem Programmsystem INTACT berechenbaren Ergebnisse -Beschreibung des Untergrundes in Form von frequenzabhängigen Steifigkeiten und Dämpfungen unter den einzelnen Schwellen- sind in MEDYNA für die weitere Verwertung (Berechnung und Auswertung) in Form eines Oberbaumoduls einzubauen. Aufgabe dieses Moduls ist es, einige oberbauspezifische Modelldefinitionen und Berechnungen unter Berücksichtigung des MEDYNA-Formalismus durchzuführen sowie die vorab berechneten frequenzabhängigen Untergrundparameter in die MEDYNA-spezifischen Systemmatrizen (Steifigkeits-, Dämpfungs- und Anregungsmatrix) einzuordnen.

Das Modell des Oberbaus wird innerhalb von MEDYNA mit folgenden Komponenten definiert:

- lineare Rad/Schiene-Verbindungselemente
- 2 elastische Schienen
- n Schwellen
- 2 mal n Kompaktelemente (61-er Elemente) als Verbindung zwischen den elastischen Schienen und den Schwellen. (Ein Kompaktelement ist ein Verbindungselement mit je 6 Steifigkeiten und Dämpfungen in Richtung der 6 möglichen Starrkörperfreiheitsgrade der verbundenen Körper).
- n Kompaktelemente (61-er Elemente) als Verbindung zwischen den Schwellen und dem Inertialsystem (Boden).

Diese MEDYNA-Komponenten werden zunächst -wie sonst auch im Programm- im Modelldatensatz bzw. als Dialogeingabe definiert und mit Parametern versorgt. Ausnahmen sind hier allerdings die elastischen Schie-

nen, die über ein spezielles Unterprogramm ihre Daten erhalten. Im weiteren Verlauf der Berechnungen werden dann die vorab berechneten Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen des Untergrundes in die Kompaktelemente zwischen Schwelle und Untergrund (hier Inertialsystem) sowie in die Systemmatrizen des System "Fahrzeug-Fahrweg" einsortiert.

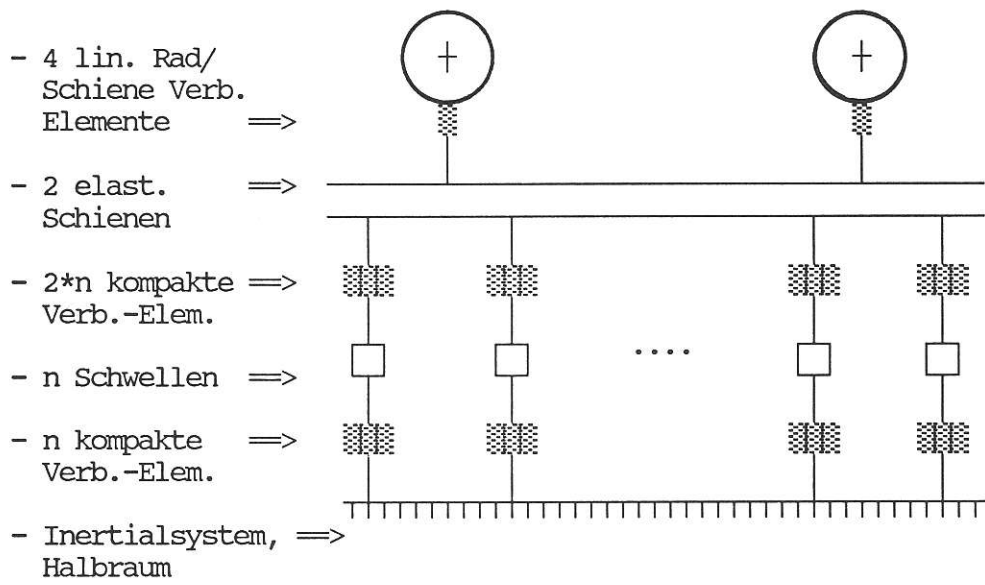


Bild 4.1 :
Schematisches Modell des Oberbaumoduls mit seinen Komponenten

Neben der Frequenzabhängigkeit der Untergrund-Parameter -und damit auch der Frequenzabhängigkeit der Systemmatrizen- ergibt sich für den Oberbaumodul noch eine weitere MEDYNA-unspezifische Eigenschaft: Die Kopplungen zwischen mehreren Körpern -hier den Schwellen über die Kompaktelemente zum Boden, die die Schwellenkopplung des Boden-Halbraumes repräsentieren- werden nicht über die Geometrie der definierten Verbindungselemente hergeleitet, sondern sind fest in den vorab berechneten Untergrund-Matrizen des Programmes INTACT vorgegeben (siehe Kapitel 2.1). Diese Matrizen werden unter Beachtung der in MEDYNA vorgegebenen Freiheitsgraddefinition direkt in die Systemmatrizen eingetragen.

Der so beschriebene und realisierte Oberbau-Modul für das Programm MEDYNA hat bezüglich seiner Leistungs-

merkmale einige Besonderheiten und Einschränkungen, die sich einerseits auf die elastischen Schienen und andererseits auf die vorab berechneten Untergrund-Matrizen beziehen:

- Die elastischen Schienen sind unverzweigte, ebene und ungedämpfte Stabwerke.
- Unterschiedliche elastische Schwingungs-Moden (Art der elastischen Freiheitsgrade) der Schienen können nur entkoppelt berücksichtigt werden.
- Die Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen des Bodens sind nur mit einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0,25$ berechnet worden.
- Der Schwellenabstand ist wegen der Vorabrechnung aus dem Programm INTACT auf $d = 0.6$ m festgelegt.
- Koppelungen zwischen den Bewegungsmoden (Freiheitsgrade) der Schwellen sind bezüglich der Bodenparameter auf die in Kapitel 2 erläuterten Fälle beschränkt.

Die Struktur des Oberbaumoduls ist programmtechnisch eng an die drei von ihm zu leistenden Funktionen angelehnt. Diese drei Funktionen sind im einzelnen:

1. Einlesebereich

Einlesen der benötigten Parameter für die elastischen Schienen und den Halbraum. Vorabrechnung der Eigenformen der elastischen Schienen. Abspeichern der Werte in die MEDYNA-Interface-Ausgabe-Datei (Programmteil RKONFI von MEDYNA)

2. Matrizenaufbau

Einlesen der frequenzabhängigen Untergrundmatrizen. Einsortieren dieser Matrizen in die MEDYNA-Systemmatrizen und in die Parameterfelder der Verbindungselemente zum Untergrund (Programmteil RGEKSY von MEDYNA)

3. Berechnen des Frequenzganges

Einlesen der frequenzabhängigen Untergrundmatrizen. Aufaddieren der Steifigkeits- und Dämpfungs-

inkremente aus einem Frequenzschritt in die MEDY-NA-Systemmatrizen innerhalb der Frequenzschleife (Programmteil RFREQU von MEDYNA)

Die sich aus diesen Funktionen ergebende Programmstruktur ist in den Bildern 4.2 bis 4.5 schematisch dargestellt.

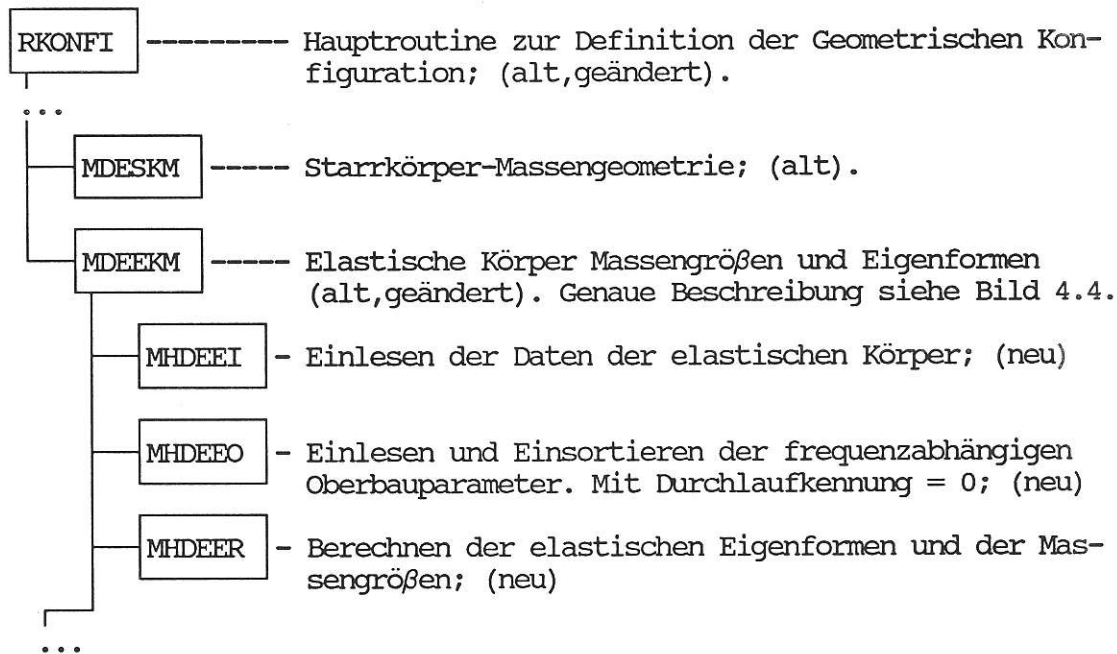


Bild 4.2 :

Flußdiagramm für den Oberbaumodul mit den angesprochenen Unterprogrammen des Einleseteils im Hauptprogramm RKONFI

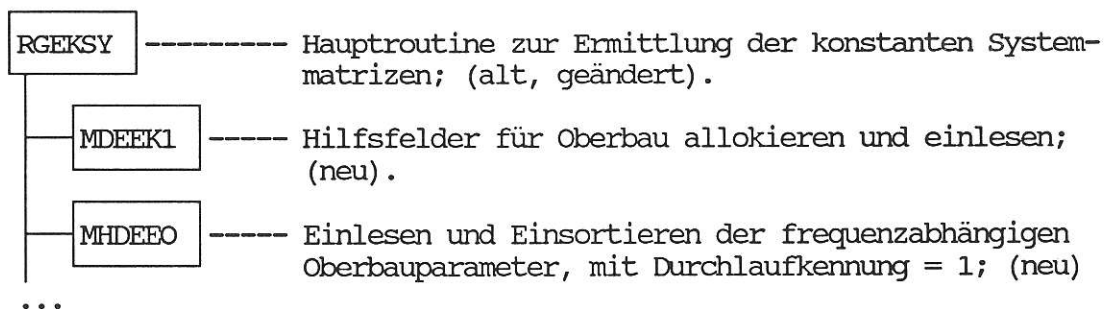


Bild 4.3 :

Flußdiagramm für den Oberbaumodul mit den angesprochenen Unterprogrammen im Programmteil RGEKSY zum Aufbau der Systemmatrizen

Zum Abschluß sollen hier noch einige Besonderheiten und Einschränkungen des Programms aufgeführt werden:

- Da die Untergrundmatrizen frequenzabhängig sind, entsteht bei der Berechnung der Eigenfrequenzen

und Eigenformen des Gesamtsystems ein sogenanntes "implizites Eigenwertproblem". Dies bedeutet für die praktische Berechnung, daß zunächst eine Frequenz vorgeschätzt werden muß. Für diese Frequenz sind dann die entsprechenden Parameter der Unter-

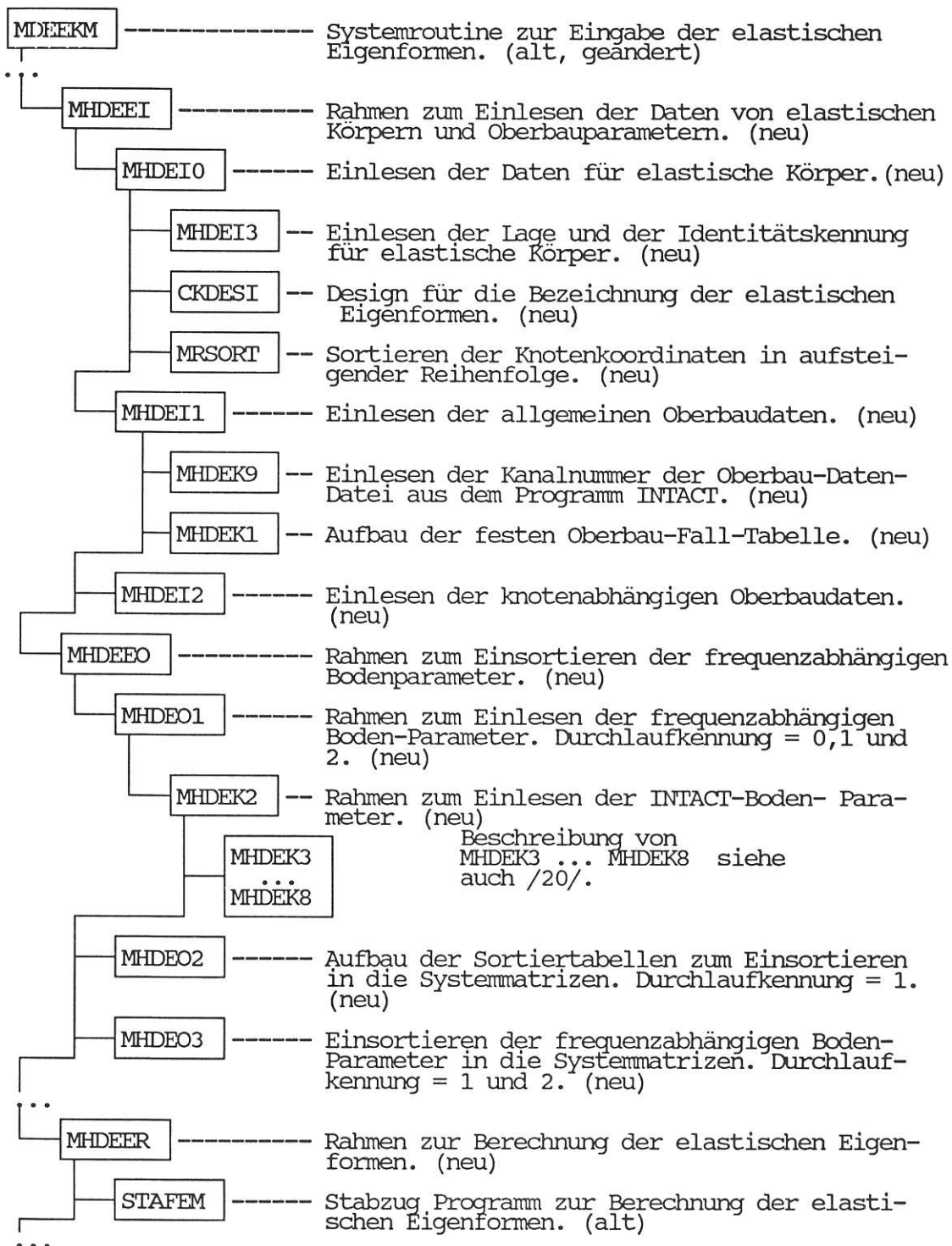


Bild 4.4 :
Flußdiagramm für die Behandlung der Oberbaudaten im Programmteil MDEEKM zum Einlesen der Daten der elastischen Körper

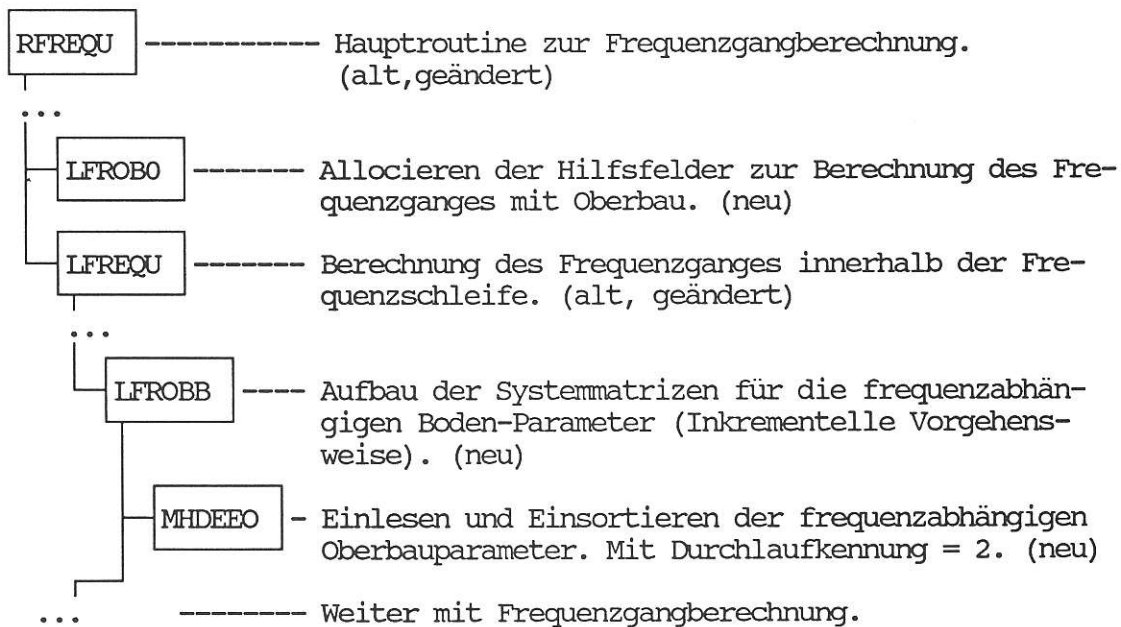


Bild 4.5 :

Flußdiagramm für den Programmteil zur Frequenzgangberechnung mit Oberbaudynamik.

grundmatrizen in die MEDYNA-Systemmatrizen einzutragen und das Eigenwertproblem zu lösen. Weichen die ermittelten Eigenwerte von der vorgeschätzten Frequenz signifikant ab, dann ist die Prozedur mit einer neuen Schätzung auf der Basis des vorher ermittelten Eigenwertes zu wiederholen.

- Da die Bodenkopplungen über die Kompaktelemente zwischen Schiene und Boden aus Gründen der erforderlichen Rechenzeit nicht in den MEDYNA-Unterprogrammen für die Kompaktelemente, sondern in einem schnelleren, neu programmierten Programmteil, abgehandelt werden, haben andere MEDYNA-Hauptprogramme keinen Zugriff auf die Koppelglieder zwischen den Schwellen. Das wirkt sich dann z.B. bei den Problemen wie "Integration im Zeitbereich" oder "Berechnen der statischen Gleichgewichtslage" in der Weise aus, daß diese in der vorliegenden Programmversion nur ohne die Option für den gekoppelten Boden-Halbraum behandelt werden können.
- Das Berechnen neuer Lagen des Fahrzeugs auf dem Gleis, z.B. die Verschiebung in Fahrtrichtung ist in der vorliegenden Version noch nicht automatisiert möglich und muß im Modelldatensatz manuell durchgeführt werden.

4.2 Elastische Schienen und deren Behandlung

Das Programm MEDYNA benötigt für die spätere Berechnung der elastischen Körper

- die Bezeichner (Namen) der elastischen Eigenformen,

- die generalisierten Massen $M_{i,gen}$ (Kg) die auf den Wert der Gesamtmasse des Balkens gesetzt werden,

- die generalisierten Steifigkeiten

$$C_{i,gen} = \Omega_i^2 * M_{i,gen} \quad (N/m)$$

- die Massenkopplungsterme der elastischen Eigenformen zu den Starrkörper-Freiheitsgraden des Balkens,

$$A_i = K \int \phi_i \, dm \quad (kg) \quad \text{und}$$

$$B_i = K \int \phi_i \, c_S \, dm \quad (kgm)$$

- und die auf die Knotenkoordinaten umgerechneten Werte der elastischen Eigenformen.

In den oben angegebenen Beziehungen bezeichnet i die Nummer der Eigenform ϕ und c_S ist der Schwerpunktabstand.

In der uns vorliegenden Programmversion MEDYNA 4.1 wurden diese Daten in der Hauptroutine zur Berechnung von elastischen Stabwerken (Hauptroutine RELFAW) berechnet. Es zeigte sich aber, daß der notwendige Datenaustausch mit dem übrigen Programm nicht implementiert war. Es war lediglich möglich, die modalen Daten der elastischen Körper über einen Ergebnisausdruck abzufragen, diese umzurechnen und dann nochmals per Hand in MEDYNA einzugeben.

Da dieses Verfahren sehr umständlich und unzweckmäßig im praktischen Gebrauch ist, mußte eine Prozedur zur

Berechnung der dynamischen Parameter der elastischen Schienen programmiert werden. Der dazu nötige Programmteil wird im folgenden beschrieben:

Die Struktur des zur Berechnung der elastischen Eigenformen entwickelten Programmes läßt sich grob in die Teile "Eingabe" und "Berechnung" unterteilen.

- In der Eingabeprozedur werden die notwendigen Daten für den elastischen Balken eingelesen und in der Interface-Ausgabe Datei ("IA-Datei") abgespeichert.
- In der Berechnungsprozedur wird aus den eingelesenen Daten und den Knotenkoordinaten des elastischen Balkens ein Stabwerk modelliert. Diese Daten werden dann an das Standard MEDYNA-Programm STAFEM weitergegeben, das letztlich die Eigenwerte und Eigenformen eines beliebigen "Finiten-Elemente-Stabwerkes" ermittelt. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Berechnung werden neben den generalisierten Steifigkeiten und Massen auch die Knotenverschiebungen infolge der elastischen Eigenformen sowie die Massenkopplungsterme zwischen den einzelnen elastischen Moden und den Starrkörper-Freiheitsgraden berechnet (siehe oben). Diese Daten werden in die entsprechenden Felder von MEDYNA übertragen und im weiteren Verlauf auf der IA-Datei abgespeichert.

Auf die Beschreibung der "Eingabeprozedur" soll hier noch etwas genauer eingegangen werden. Dazu sind noch einige Begriffsbestimmungen und Voraussetzungen für die Eingabe notwendig.

In den vorlaufenden MEDYNA-Eingaberoutinen wurden bereits grundlegende Informationen über die elastischen Körper eingegeben:

- Es wurden diejenigen Körper definiert, die als elastische Körper anzusehen sind. Damit steht die wichtige Dimensionierungs-Information über die Anzahl der elastischen Knotenkoordinaten zur Verfügung.

- Es wird die Anzahl der modalen elastischen Freiheitsgrade, die dem Körper insgesamt zugebilligt werden, bestimmt. Anzumerken ist, daß innerhalb des MEDYNA-Algorithmus ein elastischer Körper nicht "von sich aus" alle möglichen elastischen Freiheitsgrade besitzt, sondern daß dem Körper die Anzahl, die Art und die Ordnung der elastischen Freiheitsgrade vom Benutzer zugeordnet werden müssen. Das hat unter Umständen zur Folge, daß Fehler beim Modellieren gemacht werden. Es ist also gerade bei der Zubilligung von Freiheitsgraden in MKS-Programmen das Fachwissen des verantwortlichen Ingenieurs gefragt.

- Die Information, ob der elastische Körper dem Oberbaumodul zuzuordnen ist.

Neben diesen Informationen sind für die elastischen Schienen noch weitere Informationen notwendig, die durch die folgenden 9 Punkte beschrieben werden:

I. Schwingungsart:

Die grundlegendste Information über den elastischen Körper, nach der sich auch bestimmte Design- und Sortieralgorithmen innerhalb von MEDYNA richten, ist die Art der gewählten Schwingung. Im Rahmen der Anzahl der vorgegebenen elastischen Eigenformen (siehe oben) können folgende unterschiedliche (allerdings entkoppelte) Schwingungsarten gewählt werden:

1. Insgesamt 6 Biegeschwingungs-Arten in längs-, quer- oder vertikaler Richtung mit der Balkenachse je in einer von zwei zur Schwingungsrichtung orthogonalen Achse. Beispielsweise kann bei einer vertikalen Schwingung u_z die Balkenachse in der horizontalen Ebene entweder in x- oder in y-Richtung liegen.

2. Torsions-Schwingungen in 3 Richtungen.

3. Longitudinal-Schwingungen in 3 Richtungen.

II. Ordnung der elastischen Eigenformen:

Vom Benutzer wählbar ist außerdem die Ordnung der einzelnen elastischen Eigenform. Damit ist es möglich, nur für die Analyse relevante Eigenmoden anzuwählen. Zum Beispiel werden bei vielen Problemen nur die symmetrischen Eigenformen in erkennbaren Größenordnungen angesprochen oder die Anregung ist so geartet, daß nur spezielle Eigenformen angeregt werden können.

III. Bezeichner:

In MEDYNA wird eine Schwingung des elastischen Balkens durch einen Namen -Bezeichner genannt- beschrieben. Der Bezeichner enthält Informationen wie Ordnung der Eigenform, Schwingungsart, Körper, Nummer und Körperbezeichnung und kann nach dem Vorschlag des Programmes oder auch beliebig gewählt werden.

IV. Stab-Element-Daten:

Für die nach aufsteigenden Werten sortierten Knotenkoordinaten werden die bis zum nächsten Knoten geltenden Element-Balkendaten, -das sind Elastizitätsmodul, polares Flächenträgheitsmoment und Massenbelegung- eingegeben.

V. Zusätzliche Knoten-Element-Daten:

Für jeden Knoten können zusätzliche Federn, Massen, Zwangsbedingungen oder Knotenzuweisungen definiert werden. Diese zusätzlichen Parameter wirken sich auf die charakteristischen Beschreibungsgrößen (generalisierte Steifigkeit und Masse) und damit auch auf die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Balkens aus. Nach unseren Erfahrungen empfiehlt es sich die Eigenfrequenzen und Eigenformen nicht aus einem durch zusätzliche Federn und Massen beaufschlagten elastischen Balken, sondern aus dem Modell eines schwach gefesselten (frei schwingenden) Balken unter Auslassung der Starrkörper-Eigenformen zu bestimmen. Damit die Starrkörper-Eigenformen identifiziert werden können, wurde eine Hilfsroutine installiert.

VI. Äußere Kräfte und Momente:

Als zusätzliche -für die Berechnung der elastischen Eigenformen des Balkens nicht relevante Daten- können äußere Kräfte und Momente in einzelnen Elementknoten eingegeben werden. Da das Gleichungssystem des elastischen Balken bei Berücksichtigung dieser Kräfte nichtsingulär wird, ergibt sich dadurch die Möglichkeit, im Bedarfsfall diejenigen Eigenformen auszuwählen, die den größten Anteil an der durch die äußeren Lasten entstehenden Gesamtform der Schwingung beinhalten. Eine automatische Identifizierungshilfe für die relevanten Eigenformen ist implementiert.

VII. Sonderfälle:

Für den Benutzer stehen neben der Eingabe aller Stab-spezifischen Werte noch zwei Spezialfälle zur Eingabe-beerleichterung zur Verfügung:

1. Homogener Stab:

In diesem Fall wird bei der Eingabe nur einmal nach längebezogenen Parametern des Balkens wie Elastizitätsmodul, polares Flächenträgheitsmoment und Massebelegung gefragt.

2. Standardfall:

Der Standardfall beinhaltet folgende Bedingungen:

- Alle Eigenformen haben die gleiche Schwingungsart
- Die Ordnung der Eigenformen wird von einem Anfangswert bis zum Endwert kontinuierlich hochgezählt
- Der Sonderfall "Homogener Stab" ist eingeschaltet
- Als Elastizitätsmodul wird prinzipiell der E-Modul von Stahl mit $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$ angesetzt
- Das polare Flächenträgheitsmoment berechnet sich aus dem rechteckigen Querschnitt, der sich aus den maximalen und minimalen Knotenkoordinaten des elastischen Balkens ergibt.

$$I_p = b * h / 12$$

b = Breite des Balkens

h = Höhe des Balkens

- Die Massenbelegung ergibt sich aus der Gesamtmasse geteilt durch die Balkenlänge
- Es wird ein schwach gefesselter (frei schwingender) Balken berechnet.
- Die Bezeichner werden vom Programm generiert.

VIII. Besonderheiten:

Einige Besonderheiten im Programm erleichtern den Umgang mit der Eingabe der Daten des elastischen Balkens, die je nach Knotenanzahl unter Umständen einen erheblichen Umfang beanspruchen können. So wird z.B. eine eigene Einlese- und Konvertierungs-Routine für INTEGER- und REAL-Daten benutzt, die als Besonderheit eine Übernahme Einzelner, im vorherigen Eingabesatz benutzter Daten, aufzuweisen hat. Dabei werden die Daten des vorhergehenden Balken-Elementes als Voreinstellung übernommen. Das ist im Zusammenhang mit der elementweisen Eingabe der Balkendaten in einem Einlesesatz ein wichtiges Hilfsmittel zur Generierung des Modelldatensatzes.

IX. Endebehandlung:

Alle Eingabedaten werden auf der Interface-Ausgabe-Datei (IA-Datei) abgespeichert und stehen bei Neustart des Programmes wieder zur Verfügung. Dieses Vorgehen entspricht den üblichen Eingabekonventionen von MEDYNA.

4.3 Der Oberbaumodul

Der Oberbau-Modul besteht -wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben- aus den Elementen: elastische Schiene, Schwelle, lineares Rad/Schiene-Verbindungselement und kompaktes Verbindungselement. Die kompakten Verbindungselemente liegen zwischen Schiene und Schwelle sowie zwischen Schwelle und Untergrund (siehe auch Bild 4.1).

Die Aufgaben derjenigen Programmteile, die den Oberbaumodul verwalten, bestehen zunächst darin, eine sogenannte Oberbautabelle anzulegen, die den Bezug zwischen den Untergrundmatrizen und den von MEDYNA definierten Körpern und Verbindungen herstellt. Weiterhin werden in diesem Berechnungsteil die Untergrundmatrizen in Abhängigkeit von der Frequenz aus einer Tabelle (vorabberechnete "Direct-Access-Datei") ausgelesen und mit Hilfe der Oberbautabelle in die MEDYNA-spezifischen Parameterfelder und Matrizen eingeordnet.

Der Oberbau-Modul wurde im Hinblick auf seine spätere Verwendbarkeit und Erweiterbarkeit so programmiert, daß möglichst viele unterschiedliche Untergrundsituationen erfaßt werden können. So ist es z.B. möglich, neben dem in Kapitel 2 beschriebenen "homogenen Halbraum" auch inhomogene Halbräume mit Randwertproblematik zu behandeln. Dies wird durch Einzelbehandlung der Rad-Schiene-Elemente und den darunter liegenden Schwellen erreicht, die bezüglich ihrer Verbindungselemente zum Untergrund zu einem Sub-Halbraum zusammengefasst werden können. Beim homogenen Halbraum dagegen werden alle zum Oberbau gehörenden Schwellen und deren Kopplungen untereinander und zum Untergrund zu einem einzigen Halbraum-Element zusammengefaßt.

Die oben erwähnte Oberbautabelle ist knotenweise sortiert, wobei sich die Nummerierung an der Knotennummerierung der elastischen Schiene orientiert. Zu jedem Knoten werden die Informationen für die angeschlossenen Elemente in folgender Form abgespeichert:

- Status der Verbindung:
 1. Verbindung nach oben zum Mehrkörper-Modell
 2. Verbindung nach unten zur Schwelle
 3. Verbindung nach unten zum Untergrund
 4. Keine Verbindung bzgl. Oberbau
- Nummer des angeschlossenen Körpers (Schwelle oder Rad-Schiene-Element)
- Nummer des Verbindungselementes für die linke Schiene (Kompaktelement oder Rad-Schiene-Element)

- Nummer des Verbindungselementes für die rechte Schiene (Kompaktelement oder Rad-Schiene-Element)
- Nummer des Verbindungselementes von der Schwelle zum Untergrund
- Nummer des Sub-Halbraum-Elementes, das an den Oberbau angeschlossen werden soll
- Laufende Nummer der Schwelle des Sub-Halbraum-Elementes
- Bei überlappenden Sub-Halbraum-Elementen gibt es eine zusätzliche Information über die Nummer des überlappenden Sub-Halbraum-Elementes
- Laufende Nummer der Schwelle für das überlappende Sub-Halbraum-Element
- Nummer des Anschlußpunktes der nächsten Schwelle

Aus der vorliegenden Zusammenstellung ist bereits ersichtlich, daß es prinzipiell möglich ist, überlappende Subhalbraum-Elemente zu behandeln. Das ist bei inhomogenen Böden wichtig, die dann pro Rad-Schiene-Verbindungselement unterschiedlich definiert werden können. In diesem Fall werden die sich überlappenden Bodenbereiche in den Überlappungszonen linear ineinander übergeführt.

Ein anderer Aspekt der Einzelbehandlung von Untergrundelementen ist die Möglichkeit der Definition einer unterschiedlichen Anzahl von Schwellen. Man kann dann schrittweise die Anzahl der Schwellen unter einem Rad-Schiene-Element erhöhen und so die sich einstellenden Phänomene analysieren. In diesem Fall werden die nicht zum Halbraum gehörenden Schwellen bzw. deren Verbindungselemente zum Boden mit einer bestimmten Voreinstellung in den Parametern (Steifigkeit und Dämpfung) belegt.

Wie oben ausgeführt, liegen die vorabberechneten und nachfolgend homogenisierten Parametermatrizen des Untergrundes für einen gewissen Frequenzbereich auf

einer DIRECT-ACCESS-Datei vor. Zur Übergabe an MEDYNA werden in Abhängigkeit eines vorgegebenen Freiheitsgradvektors entsprechend Tabelle 2.1 und einer vorgegebenen Frequenz zunächst die Daten zweier, der vorgegebenen Frequenz benachbarten, Frequenzen aus der Datei ausgelesen. Die genauen Daten für die vorgegebene Frequenz werden dann durch Interpolation ermittelt und in Form von Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen an MEDYNA übergeben. Die Prozedur hierfür wurde von R. Rohrman programmiert und ist in /20/ beschrieben.

4.4 Einbinden des Oberbaumoduls in die Hauptroutinen von MEDYNA

Nach Eingabe und Aufbereitung aller Körper-, Massen-, und Verbindungsdaten können prinzipiell die Systemmatrizen aufgestellt werden. Die Systemmatrizen bestehen aus den Massen-, -dämpfungs-, und -steifigkeitsmatrizen sowie aus der Zwangsmatrix (zur Reduzierung der Systemordnung) und der Matrix der rechten Seite (Anregungsvektor).

Im Falle von elastischen Körpern, wie z.B. den Schienen, kann das "Zusammenfügen" der elastischen Körper mit den starren Körpern nur im Sinne von generalisierten Freiheitsgraden erfolgen. Für elastische Körper sind dies die sogenannten modalen Freiheitsgrade, die durch die Eigenfrequenzen und Eigenformen beschrieben werden. Vor der Assemblierung der einzelnen Teilmatrizen, sowie der Einfügung der Untergrundmatrizen in die Gesamtmatrizen müssen deshalb vorab die Eigenfrequenzen und Eigenformen der elastischen **Schienen** ermittelt werden. Nach Durchführung dieser Operation sind die einzelnen Eigenformen bis auf einen konstanten Faktor für jede Eigenform bestimmt. Diese Faktoren werden aus der statischen Gleichgewichtslage ermittelt, die mit Hilfe der MEDYNA-Hauptroutine RNEUKO berechnet werden kann.

Das dynamische Verhalten des Oberbaues wirkt sich in den Systemsteifigkeits- und Systemdämpfungsmatrizen

sowie in den rechten Seiten, den Anregungsvektoren, aus. Die Massenmatrix wird nur über Massenterme der elastischen Eigenformen der Schiene beeinflusst. Diese werden jedoch im Normalfall nur einmal für den freischwingenden Balken aufgestellt. Im Falle der Berechnung der Eigenwerte und Eigenformen des Gesamtsystems (Kap. 5) brauchen die rechten Seiten nicht aufgestellt zu werden, da es sich um ein homogenes Problem handelt. Da der modalen Analyse im allgemeinen jedoch eine Analyse unter dynamischer Anregung folgt (z.B. eine Frequenzgangberechnung), werden die rechten Seiten im Zuge der Aufstellung der Gesamtmatrizen stets mitaufgebaut.

Das Einsortieren der Elemente der Untergrundmatrizen in die Systemmatrizen von MEDYNA erfolgt sowohl für die Steifigkeiten und Dämpfungen wie auch für die Anregungen in gleicher Weise. Es sind jedoch je nach Analysezweck zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zu unterscheiden:

1. Setzen der Matrizen:

Dies wird im Falle der Eigenwertanalyse durchgeführt. Dabei werden die Untergrundparameter direkt in die Systemmatrizen eingesetzt. Bei dieser Vorgehensweise werden zuerst die **Boden-Koppelparameter** zwischen den Schwellen -bis zur gewünschten Anzahl der Nebendiagonalen (ND=1 - Diagonalglied, ND=2 - linke und rechte Nebendiagonale, ... ND=5)- in die Systemmatrizen eingetragen. Danach werden die Steifigkeits- und Dämpfungswerte des Bodens unter den einzelnen Schwellen (Diagonalelemente) -repräsentiert durch die Kompaktelemente zwischen Boden und Schwelle ohne Kopplung- in das Parameterfeld für die Kompaktelemente eingetragen. Später sortiert MEDYNA dann diese Werte mit den üblichen System-Routinen in die Gesamtsystemmatrizen ein. Dieses Vorgehen wird beim allgemeinen Systemaufbau in der MEDYNA Hauptroutine RGEKSY verfolgt.

2. Inkrementelle Vorgehensweise.

Die inkrementelle Vorgehensweise wird bei der Frequenzgang-Berechnung angewendet. Hierbei werden

Inkrementale der frequenzabhängigen Untergrundmatrizen nach jeder Frequenzänderung auf die "alten" Werte der Systemmatrizen aufaddiert. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß nur diejenigen Freiheitsgrade in den Systemmatrizen behandelt werden müssen, die geänderte Untergrundparameter beinhalten. Das sind im Normalfall die Freiheitsgrade der Schwellen. Da in diesem Fall die rechenzeitintensiven MEDYNA-Standard-Routinen für die Verbindungselemente nicht angesprochen werden, ergibt sich für dieses Verfahren eine erhebliche Rechenzeiterparnis. Von weiterem Vorteil im Sinne von Rechenzeiterparnis ist, daß in diesem Anwendungsfall die Multiplikationen von Steifigkeits- und Dämpfungsmatrix mit der invertierten Massenmatrix und die Koordinatentransformation mit der Zwangsmatrix nur für die Untergrund-Submatrix durchgeführt werden muß. Neben den aufgeführten Manipulationen der Gesamtsystemmatrix müssen dann nur noch für jeden Frequenzschritt die Parameterwerte in den Parameterfeldern für die Schwellen/Boden-Verbindungselemente aktualisiert werden.

Wie in Kapitel 4.1 bereits bemerkt, entsteht bei Berücksichtigung des Untergrundes ein sogenanntes "implizites" Eigenwertproblem. Zur Lösung dieses impliziten Eigenwertproblem bedarf es, da die Matrizen des Untergrundes selbst frequenzabhängig sind, in jedem Fall einer Vorschätzung der relevanten Arbeitsfrequenz. Hierzu werden zwei Strategien angewendet:

Verfahren 1: Anregungsfrequenzen

Die erste Auswahlstrategie orientiert sich an relevanten Anregungsfrequenzen. Eine relevante Anregungsfrequenz ist die sogenannte Schwellenabstandsfrequenz Ω , die sich in folgender Weise

$$\Omega = V * 2 * \pi / d \quad (1/s)$$

aus der Fahrgeschwindigkeit V und dem Schwellenabstand d berechnen läßt. Mit der für diese Frequenz geltenden Bodensteifigkeiten und Bodendämpfungen wird die Eigenwertanalyse durchgeführt.

Die sich bei Anwendung dieses Verfahrens konkret ergebenden vertikalen Steifigkeits- und Dämpfungsparameter für die Kompaktelemente zwischen Boden und Schwelle sowie die Koppelungsparameter zwischen den Schwellen sind in Bild 4.7 für eine Boden-Scherwellengeschwindigkeit von 300 m/s dargestellt. Dabei ist auch die sich aus dem Schwellenabstand von $d = 0.6$ m ergebende Geschwindigkeit mit eingetragen.

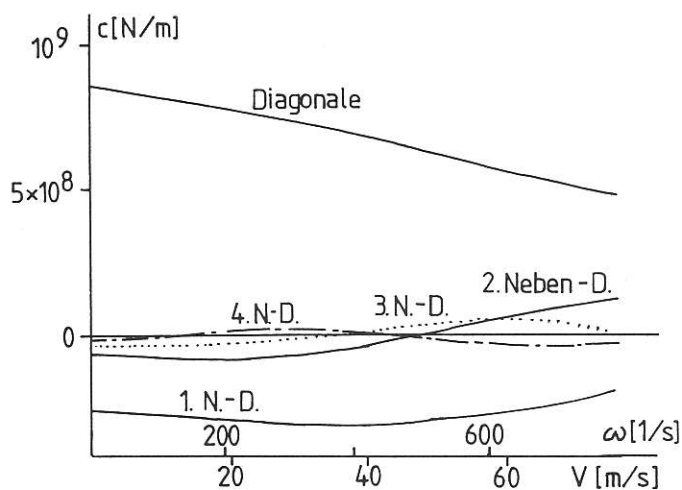


Bild 4.7a :
Vertikale Boden-Schwellen-Steifigkeiten und Schwellen-Koppelglieder für eine Scherwellengeschwindigkeit $v_s = 300$ (m/s)

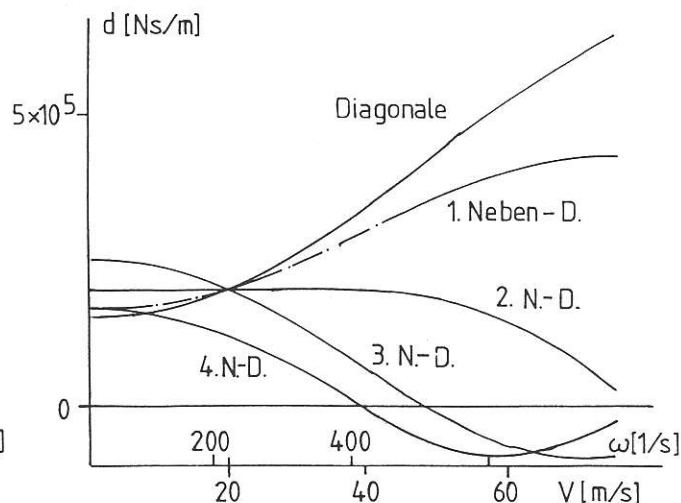


Bild 4.7b :
Vertikale Boden-Schwellen-Dämpfungen und Schwellen-Koppelglieder für eine Scherwellengeschwindigkeit von $v_s = 300$ (m/s)

Verfahren 2: Resonanzfrequenzen

Das Auswahlkriterium der zweiten Strategie orientiert sich an charakteristischen Eigenfrequenzen des Systems "Fahrzeug-Fahrbahn". Als charakteristische Eigenfrequenzen werden solche angesehen, bei der der Untergrund eine dominierende Rolle spielt. Dies sind im allgemeinen die Fahrbahn-Untergrundeigenfrequenzen

$$f_U = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k_B/m_F}$$

mit k_B , der Bodensteifigkeit
 m_F , der Fahrbahnmasse

bzw. die Radsatz-Fahrbahn-Untergrundeigenfrequenz

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_B}{m_R}}$$

wobei m_R die Fahrbahn und Radsatzmasse ist.

Für reale Böden liegen diese Frequenzen zwischen

$$70 < f_U < 300 \text{ Hz}$$

und $30 < f_R < 150 \text{ Hz.}$

5. Berechnung von Eigenwerten

5.1 Allgemeines

Im Sinne einer zusammenfassenden Darstellung und zur besseren Verständlichkeit der nachfolgenden Ergebnisse sind im folgenden die einzelnen Schritte des Rechenablaufs nochmals dargestellt. Diejenigen Teile auf die sich der Oberbau auswirkt, sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet.

1. Einlesen der Körper- und Massendaten.
 - 1.1 Einlesen und Berechnen der elastischen Eigenformen der **Schienen**. (*)
 - 1.2 Einlesen der Oberbaudaten. (*)
2. Einlesen der Daten der Verbindungselemente.
3. Fahrzeuggeschwindigkeit definieren.
4. Schnelldrehene Rotoren definieren (z.B. die Radsätze).
5. Äußere Anregungen definieren.
6. Ausgabegrößen (Ausgänge) definieren.
7. Statische Gleichgewichtslage berechnen.
8. Matrizenaufbau der Systemmatrizen. (*)
9. Berechnen der Eigenwerte und Eigenformen des **Gesamtsystems**.
10. Berechnen des Frequenzganges. (*)

Im nachfolgenden werden Ergebnisse beschrieben, die sich auf die Ermittlung von Eigenwerten und Eigenformen des Fahrzeuges und der Fahrbahn beziehen. Da ein wesentliches Ziel dieser Arbeit jedoch darin besteht, den Einfluß des Untergrundes sowie die Art seiner Modellierung (mit und ohne Bodenkoppelung) zu untersuchen, werden nur diejenigen Eigenformen näher beschrieben, die vom Einfluß des Untergrundes beeinflusst werden. Dies sind i.a. die Eigenformen der Fahrbahn.

Insgesamt wurden 3 verschiedene Untergrundmodelle untersucht. Dies sind:

- elastisch gelagertes Fahrzeug (ohne Schienen, Pads und Schwellen)
- Fahrzeug auf Oberbau und ungekoppeltem Halbraum
- Fahrzeug auf Oberbau und gekoppeltem Halbraum

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in folgender Form:

1. Eigenfrequenzen des Fahrzeuges und der Fahrbahn mit modaler Dämpfung und Interpretation der Schwingungsformen mit Darstellung ausgewählter Eigenformen bei einer niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeit von 2 m/s.
2. Wurzelortskurven zur Stabilitätsbetrachtung und zur Ermittlung von Grenzgeschwindigkeiten. Bei der Berechnung wurde das in Kapitel 4.4 beschriebene Verfahren 1 der Anregungsfrequenzen benutzt.

5.2. Das Fahrzeugmodell

Das der Berechnung zugrunde gelegte Fahrzeug ist ein modifizierter ICE-Reisezugwagen der Deutschen Bundesbahn. Das Fahrzeug wird im Modell durch den Wagenkasten (mit halber Wagenkastenmasse) sowie dem Laufdrehgestell und 2 Radsätzen beschrieben. Der Oberbau wurde mit 2 elastischen Schienen und 21 Schwellen modelliert. Für das Laufdrehgestell und die Radsätze sind die horizontalen und vertikalen Freiheitsgrade zugelassen. Die restlichen Körper besitzen nur vertikale Freiheitsgrade.

Das Fahrzeug steht symmetrisch zwischen den Schwellen auf den elastischen Schienen, d.h. die mittelste Schwelle liegt unter dem Drehgestellmittelpunkt. Es werden die symmetrischen und die antimetrischen elastischen Freiheitsgrade der vertikalen Verformung der Schienen berücksichtigt (insgesamt 22 elastische Freiheitsgrade pro Schiene).

Durch die Festlegung der Freiheitsgrade wird auch

bestimmt, welche Probleme analysiert werden sollen. Im betrachteten Fall soll aus der Eigenwertanalyse die Grenzgeschwindigkeit des horizontalen Schwingungssystems sowie die Eigenformen des vertikalen Systems und aus der Frequenzgangsanalyse die Schwingungsantworten auf vertikale Anregung errechnet werden.

Die Radsätze werden im Radaufstandpunkt als quasilinearisierte Verbindungselemente definiert (siehe Mauer /12/). Die linearisierten Koeffizienten für das verwendete Modell wurden aus einem nichtlinearen Geometrie-Programm (CSGEO von W.Kik, siehe /22/) mit harmonischer Linearisierung ermittelt. Auf die Theorie zur linearen bzw. quasilinearen Radsatzdynamik wird hier nicht eingegangen. Wir verweisen dazu auf die entsprechende Literatur, z.B. Knothe, Kik in /16/; Moelle, Mauer, Schmidt in /19/ oder Kik in /17/.

Folgende Daten wurden der Berechnung zugrunde gelegt, wobei die mit einem Stern (*) gekennzeichneten Daten dem Oberbau zuzuordnen sind.

MASSEN:

Halber Wagenkasten :	16500 Kg		
Laufwerkrahmen :	2830 Kg		
Radsatz :	1750 Kg		
Schiene	208 kg	49 Kg/m (*)	
Schwelle	340 Kg	(*)	

(Quelle: interne Daten)

SEKUNDÄRFESSELUNG:

(zwischen Wagenkasten und Laufwerkrahmen)

	x	y	z	
Steifigkeit	10^5	10^5	$3 \cdot 10^5$	(N/m)
Dämpfung	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	(Ns/m)
Drehsteifigkeit	$8.5 \cdot 10^5$			(Nm/rad)

(Quelle: interne Daten)

PRIMÄRFESSELUNG:

(zwischen Laufwerkrahmen und Radsatz)

	x	y	z	
Steifigkeit	$6.2 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^7$	10^6	(N/m)
Dämpfung	10^3	10^3	$2 \cdot 10^4$	(Ns/m)
Drehsteifigkeit			$7 \cdot 10^3$	(Nm/rad)

(Quelle: interne Daten)

RADSATZ (LINKS/RECHTS):

Profil : S1002
Querverschiebung : 2.6 (mm)
Wendewinkel : 0
Berührungspunktskoordinaten y:-/+0.0123; z: -0.5007 (m)
Drehwinkel um x-Achse : -/+ 0.0248 (rad)
Laufkreisabstand : 1.5 (m)
Laufkreisradius : 0.4999 (m)
Äquivalenter Radkrümmungsradius : 0.2848
Äquivalente Berührungspunktsneigung : 0.0423
Reibbeiwert : 0.4

SCHIENE:

Profil : UIC60
Spurweite : 1435 (mm)
Einbauneigung : 0.025
Äquivalenter Schienenkrümmungsradius : 0.2217 (m)
Polares Trägheitsmoment I_{py} : $1.8 \cdot 10^{-5}$ (m⁴)
Elastizitätsmodul : $2.1 \cdot 10^{11}$ (N/m²)
Massebelegung : 49 (Kg/m)
Schienenlänge : 12 (m)
(Quelle: aus /22/ und /7/)

Schwelle

Masse : 340 (Kg)
Schwellenabstand : 0.6 (m)
(Quelle: aus /7/)

PAD:

zwischen Schiene und Schwelle : (*)

Vertikalsteifigkeit : $6.0 \cdot 10^7$ (N/m) (*)
Vertikaldämpfung : $6.3 \cdot 10^4$ (Ns/m) (*)
(Quelle: aus /21/)

In einer zusätzlichen Berechnung wurden die PAD-Steifigkeiten besonders hoch mit $6.4 \cdot 10^9$ (N/m) angesetzt, damit die Einflüsse der Untergrundsteifigkeiten in den Rechenergebnissen klar zum Vorschein kommen.

5.3 Ergebnisse des Beispielmodells ohne Untergrund

Bei diesem ersten Beispiel wird das in Kapitel 5.2 beschriebene Modell des Fahrzeugs ohne elastische

Schienen und ohne Schwellen dahingehend modifiziert, daß unter jedem der 4 Rad/Schiene-Verbindungselemente ein Gleisstück modelliert wird, das auf einer elastischen Bettung ruht. Die Steifigkeits- und Dämpfungswerte der Bettung wurden aus den mit dem Programm INTACT berechneten Bodensteifigkeiten unter Zugrundelegung des statischen Falls ermittelt.

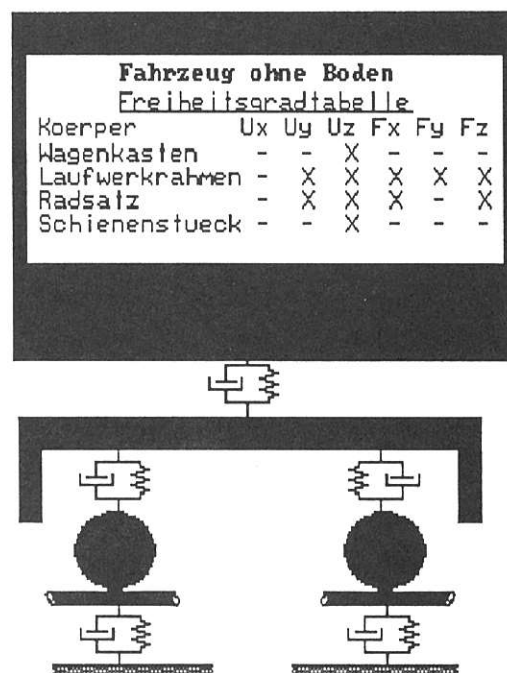
$$c_{z,\text{Boden}} = 4.2 * 10^8 \text{ (N/m)}$$

$$d_{z,\text{Boden}} = 7.5 * 10^4 \text{ (Ns/m)}$$

Das Rechenmodell ist in schematischer Weise in Bild 5.1 dargestellt.

Bild 5.1 :

Schematisches Modell für die Berechnung des Fahrzeugs ohne Untergrund.



Zur Ermittlung des Eigenverhaltens werden die Eigenvektoren dieses Systems bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von $V = 2 \text{ m/s}$ ermittelt. In der nachfolgenden Tabelle sind die errechneten Eigenfrequenzen, die modalen Dämpfungen sowie die zugehörigen Schwingungsformen zusammengefasst.

Frequenz (Hz)	Dämpf.- maß	Schwingungsrichtung; Körper
0.90	0.17	UzWK Vertikal Wagenkasten
6.38	0.53	UzL Vertikal Laufwerkrahmen
9.84	0.78	FxL Rollen Laufwerkrahmen
26.78	0.15	UyL Quer Laufwerkrahmen
74.42	0.27	FzL Wenden Laufwerkrahmen

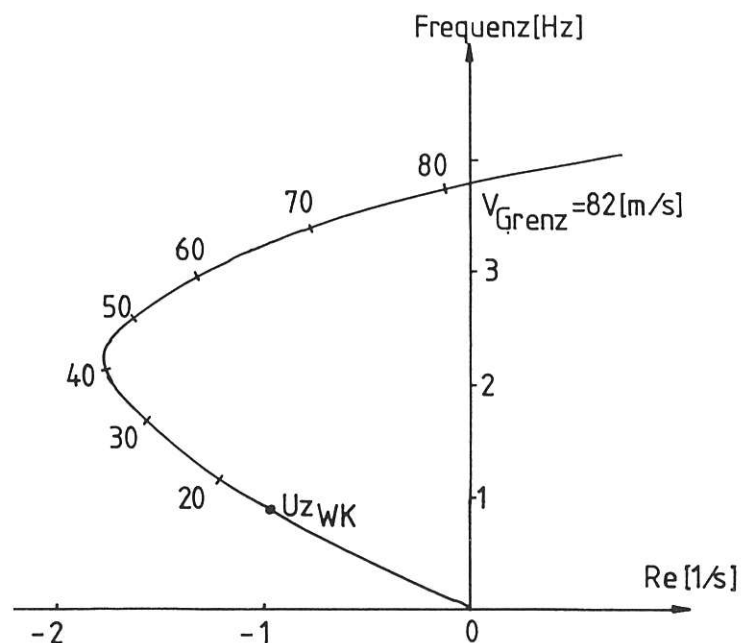
Es folgen diejenigen Radsatzeigenformen, die beim späteren Vergleich mit den Ergebnissen mit Berücksichtigung des Untergrundes von besonderer Bedeutung sind.

Frequenz (Hz)	Dämpf.- maß	Schwingungsrichtung; Körper
33.79	0.19	FxRg Rollbewegung der Radsätze in Gegenphase gekoppelt mit Wenden des Laufwerkrahmens.
45.90	0.06	FxRp Rollbewegung der Radsätze in Phase gegen den Laufwerkrahmen.
37.06	0.16	UzRg Vertikale gegenphasige Radsatzschwingungen mit Nicken des Laufwerkrahmens.
37.64	0.16	UzRp Gleichphasige Vertikalbewegung der Radsätze mit Tauchen des Laufwerkrahmens.

Die lineare Grenzgeschwindigkeit des Fahrzeuges läßt sich aus der Berechnung der sogenannten Wurzelortskurve ermitteln. Hierbei werden für verschiedene Geschwindigkeiten die Eigenwerte ermittelt und diese als Parameter der Fahrgeschwindigkeit in der komplexen Ebene dargestellt. Die Darstellung erfolgt in der Weise, daß auf der Abszisse der Realteil, der die Dämpfung der Eigenform beschreibt und auf der Ordinate der Imaginärteil, der die Eigenfrequenz repräsentiert, aufgetragen wird. Die Grenzgeschwindigkeit ergibt sich dort, wo die Realteile der Eigenwerte ein positives Vorzeichen - dies bedeutet eine aufklingende Schwingung- bekommen. Für das oben beschriebene System wurde die Ortskurve für Geschwindigkeiten von 2 bis 105 m/s berechnet und in Bild 5.2 dargestellt. Im betrachteten Fall ergibt sich eine Grenzgeschwindigkeit von $V_{\text{Grenz}} = 82 \text{ m/s} = 295 \text{ km/h}$. Hinzuzufügen ist, daß es sich hier nicht um die Grenzgeschwindigkeit des kompletten Fahrzeugs handelt. Es wurde lediglich die Grenzgeschwindigkeit des Laufwerkmodells ohne drehhemmende Sekundärfesselungen zum Wagenkasten berechnet.

Nach Kik in /7/ ist diese Betrachtung für vergleichende Berechnungen bestens geeignet. Bei Erweiterung des Modells durch Hinzunahme der Dynamik des Wagenkastens und des 2. Laufwerks ergibt sich nur dann eine Änderung der Grenzgeschwindigkeit, wenn auch die drehhemmenden Sekundärfesselungen eingebaut werden. In dieser Arbeit wird das Schwergewicht auf die Untersuchung des Einflusses des Untergrundes auf das Schwingungsverhalten des Fahrweges und des Fahrzeuges gelegt. Aus diesem Grunde wurde der Untergrund mit den Schwellen und Schienen sehr detailliert mit insgesamt 80 mechanischen Freiheitsgraden modelliert. Eine Erweiterung dieses Modells um weitere Freiheitsgrade zur Erfassung der Drehhemmung ist zwar ohne weiteres möglich, würde aber keine neue Aussagen hinsichtlich des Einflusses des Untergrundes liefern. Aus diesem Grunde wurde auf diese Modellerweiterung verzichtet.

Bild 5.2 :
 Wurzelortskurve des Modells:
 Elastisch gebettetes Fahrzeug
 ohne Schienen und Schwellen



5.4 Ergebnisse des Beispielmmodells mit Untergrund

Bei diesem Beispiel besteht das Modell aus dem oben beschriebenen Fahrzeug, den Schienen, den Pad-Elementen zwischen Schienen und Schwellen, den Schwellen sowie dem Untergrund. Das so beschriebene System ist in schematischer Form in Bild 5.3 dargestellt.

Zur Überprüfung, inwieweit es notwendig ist, die Kopplung der Schwellen über den Untergrund im Modell zu

berücksichtigen, wurden die folgenden beiden Systeme näher untersucht.

Fahrzeug mit Oberbau Freiheitsgradtabelle							
Koerper	Ux	Uy	Uz	Fx	Fy	Fz	elastisch
Wagenkasten	-	-	X	-	-	-	
Laufwerkrahmen	-	X	X	X	X	X	
2 Radsaetze	-	X	X	X	-	X	
2 el. Schienen	-	-	X	-	-	-	22
2 Schwellen	-	-	X	-	-	-	

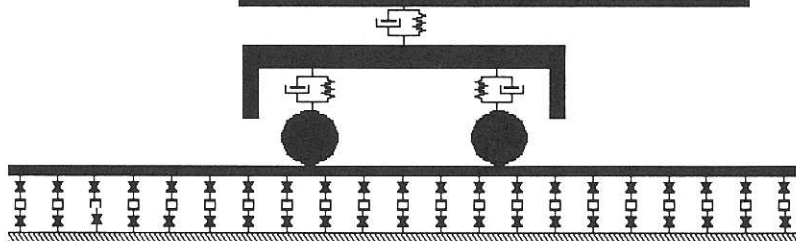


Bild 5.3 :

Schematisches Modell des Fahrzeugs mit Oberbau und Untergrund

System 1: Keine Bodenkopplung

In diesem Fall wird die Bodenkopplung nicht berücksichtigt. Das Modell enthält nur die vertikalen Steifigkeiten (Diagonalelemente) unter den Schwellen. Entsprechend den INTACT-Ergebnissen werden diese Steifigkeiten als frequenzabhängig betrachtet.

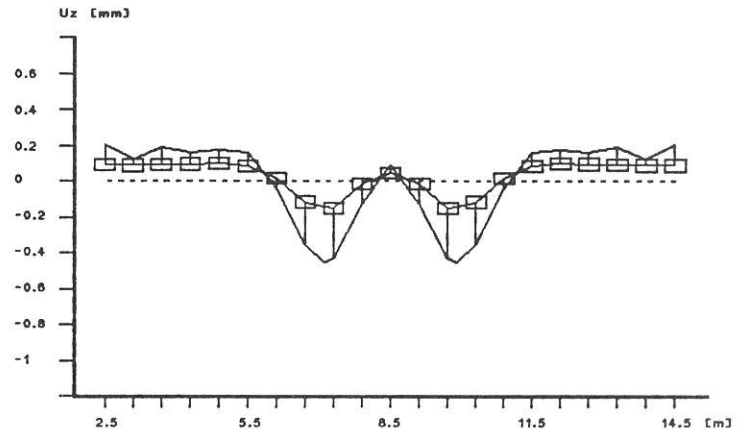
System 2: Mit Bodenkopplung

Die Koppelung der Schwellen durch den Untergrund wird hier bis zur vierten benachbarten Schwelle berücksichtigt. Die Sub-Matrix zur Beschreibung der Freiheitsgrade der Schwellen besitzt in diesem Falle eine Bandbreite von 9 Elementen.

Als erstes Ergebnis der Berechnung ist in Bild 5.4 die statische Gleichgewichtslage dargestellt. Zur Berechnung wurde hierbei das Modell ohne Untergrundkoppelung herangezogen. Es ergibt sich eine statische Durchbiegung der elastischen Schiene von ca. 0.6 Millimeter. Die Schwelleneinsenkung in den Boden beträgt 0.3 Millimeter. Diese Werte entsprechen sehr gut gemessenen Einsenkungswerten (siehe z.B. Eisenmann/21/). Die Form der Einsenkungslinie entspricht ebenfalls gemessenen Werten und korrespondiert gut mit konventionellen Berechnungsverfahren (z.B. elastisch gelagerter Balken). Für den statischen Fall ergibt sich also eine gute Übereinstimmung mit anderen Theorien und Messungen.

Bild 5.4 :

Statische Gleichgewichtslage der Schwellen unter dem mittig stehenden Laufdrehgestell.



Verformungslinie der elastischen Schienen und vertikale Lage der Schwellen auf dem Boden nach Ermittlung der statischen Gleichgewichtslage. PAD-Steifigkeit: $6 \cdot 10^7$ [N/m]

Für die anderen beiden betrachteten Fälle -ohne und mit Bodenkoppelung- wurde entsprechend dem vorher in Kapitel 5.1 dargestellten Beispiel ebenfalls eine Eigenwertanalyse durchgeführt. Als Ergebnis dieser Analyse werden im folgenden die wichtigsten Eigenformen für die beiden Modellfälle dargestellt. In diesen Eigenformbildern sind zum einen die Beiträge der Starrkörperfreiheitsgrade und zum anderen die sich aus den elastischen Moden der Schiene ergebenden Biegelinien zu sehen. Alle Verschiebungen sind auf den Betrag 1 des dominierenden Freiheitsgrades normiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt nach dem Schema:

- Im oberen Teil des Bildes sind schematisch die Beiträge der Fahrzeugfreiheitsgrade von "Radsatz vorne und hinten", (R_v und R_h , als Sechseck), "Laufwerkrahmen", (L , als Viereck), Wagenkasten (WK , als Kreuz) und "Schiene links und rechts", (S_l und S_r , als Balken) dargestellt. Im linken Teil des Bildes sind die Querbewegungen, in der Mitte die Vertikalbewegungen und im rechten Teil die Verdrehungen zu sehen.
- Im unteren Teil des Bildes sind die Beiträge der vertikalen Freiheitsgrade zur Gesamtverformung der Schwellen aufgezeichnet. Schließlich ist die Gesamtform der elastischen Biegelinie der Schienen im untersten Teil des Bildes zu sehen. (die gestrichelte Linie ist die rechte Schiene)

Diese Art der Darstellung gilt prinzipiell für alle gezeigten Schwingungsformen. Zusätzlich zu dieser Darstellung sind die berechneten Eigenwerte, ihre modalen Dämpfungen sowie die Interpretation der zugehörigen Schwingungsformen in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

System 1: Ohne Bodenkopplung

Frequenz (Hz)	Dämpf.- maß	Schwingungsrichtung;Körper
0.90	0.17	UzWK Vertikal Wagenkasten
6.39	0.53	UzL Vertikal Laufwerkrahmen
9.82	0.78	FxL Rollen Laufwerkrahmen

Bis hierher entsprechen die Eigenformen denen des Fahrzeugs ohne Oberbau (siehe Kapitel 5.1).

Die weiteren Eigenformen des Gesamtsystems, an denen die elastischen Eigenformen der **Schienen** mitbeteiligt sind, werden im nachfolgenden diskutiert und sind in den Bildern 5.5a bis 5.5f dargestellt.

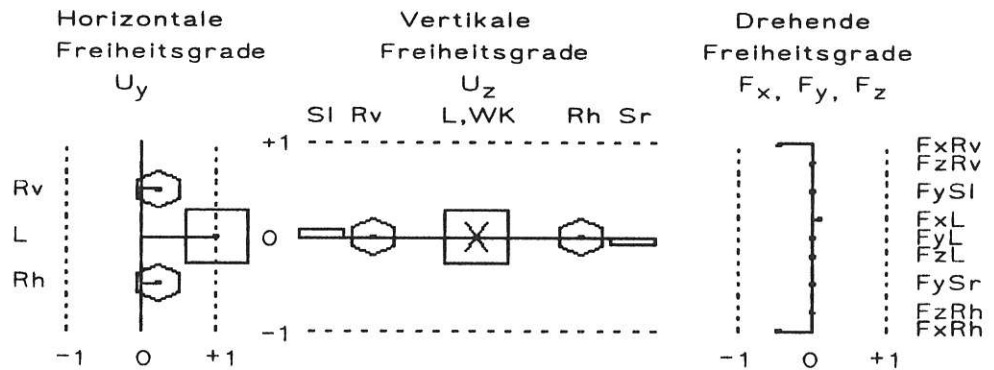
Bezeichnung der Eigenform: UyL

Bei dieser in Bild 5.5a dargestellten Eigenform handelt es sich um die **Querbewegung des Laufwerkrahmens zusammen mit den Radsätzen** (siehe Kennzeichnung im oberen Teil des Bildes). Die Eigenfrequenz beträgt $f_e = 34.41$ Hz und das Dämpfungsmaß ist 0.05. Diese Eigenfrequenz ist verglichen mit derjenigen des Modells 1 (elastisch gelagertes Fahrzeug ohne Berücksichtigung der Schienen, Pads und Schwellen) um etwa 8 Hz höher. Die Ursache hierfür liegt in der steifigkeitsintegrierenden Wirkung der elastischen Schienen über die Kopplung zu den Rollbewegungen der Radsätze.

Die vertikalen Starrkörperbewegungen der Schienen sind zueinander gegenphasig und wirken gegen die Rollbewegung der Radsätze. Mit der Bezeichnung "Rollbewegung" ist das Verdrehen des Radsatzes um die Schienenlängs-

achse mit gleichzeitiger Querbewegung gemeint. Die elastischen Biegelinien der Schienen sind betragsmäßig gleich, um 180 Grad phasenverschoben und wenig ausgeprägt. An der Gesamtverformung sind die elastischen Moden 15, 17 und 19 beteiligt.

Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs



Vertikale Schwellenfreiheitsgrade

elastische Biegelinien der Schienen

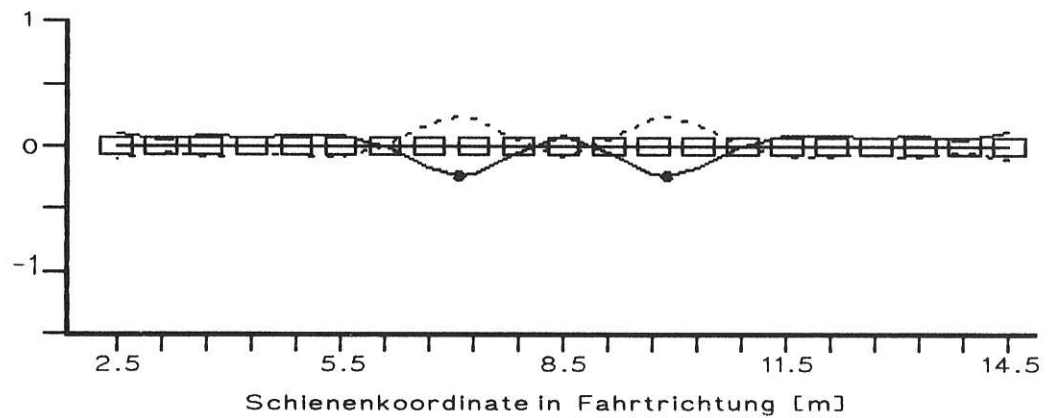


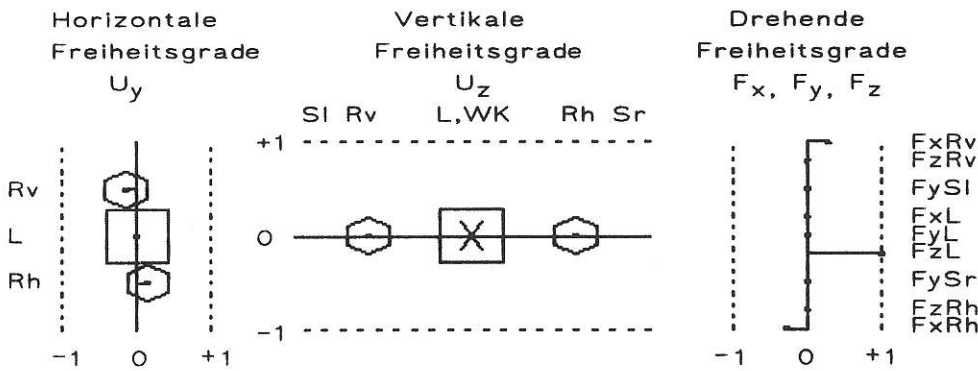
Bild 5.5a :

Darstellung der Eigenform U_{yL}

Bezeichnung der Eigenform: FzL

Die Eigenform dieser Bewegungsmode ist in Bild 5.5b dargestellt. Wie aus der Abbildung im linken oberen Teil des Bildes erkannt werden kann, handelt es sich bei dieser Mode mit der Eigenfrequenz von 75.84 Hz und dem Dämpfungsmaß von 0.26 um das **Wenden des Laufwerkrahmens**. Die elastischen Eigenformen der Schienen sind am Bewegungsablauf kaum beteiligt. Die Bewegung entspricht der des elastisch gelagerten Fahrzeugs.

Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs



Vertikale Schwellenfreiheitsgrade
elastische Biegelinien der Schienen

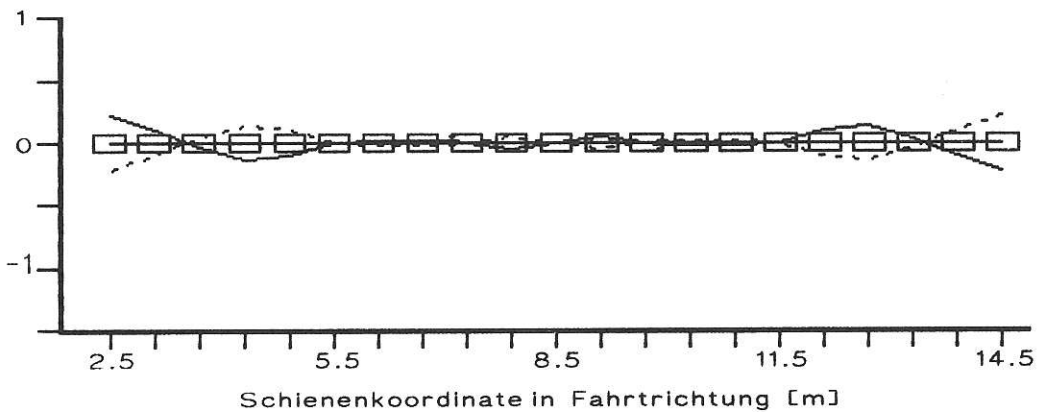


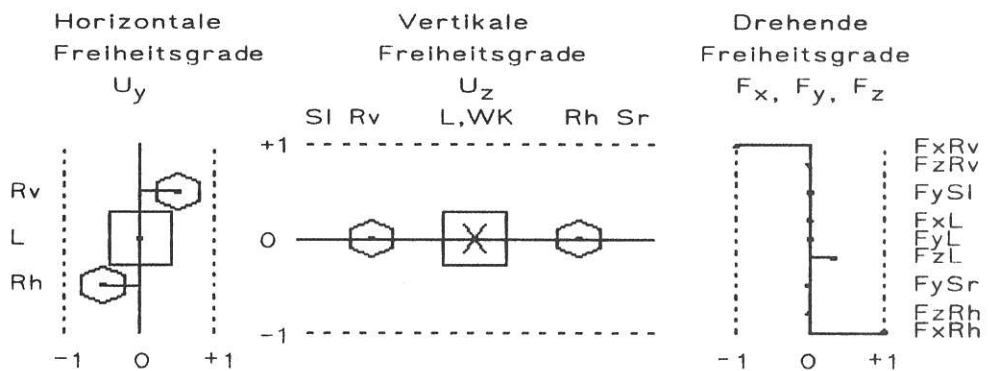
Bild 5.5b :

Darstellung der Eigenform FzL

Bezeichnung der Eigenform: FxRg

Bei dieser in Bild 5.5c dargestellten Eigenform handelt es sich um eine **gegenphasige Rollbewegung** der beiden **Radsätze**, verbunden mit einer betragsmäßig kleinen Wende-komponente des Laufwerkrahmens. Die Eigenfrequenz beträgt $f_e = 49.21$ Hz und das Dämpfungsmaß ist 0.2. Die Biegelinien der Schienen links und rechts sind antimetrisch und führen außerhalb der Radaufstandspunkte zu erheblichen Bewegungen in den elastischen Schienenmoden 2 und 6. Die Schwellen sind an der Bewegung nicht beteiligt.

Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs



Vertikale Schwellenfreiheitsgrade

elastische Biegelinien der Schienen

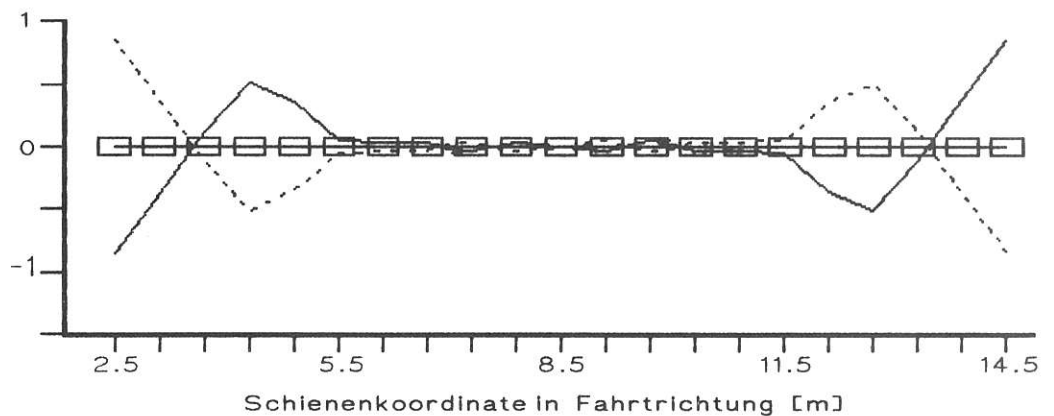


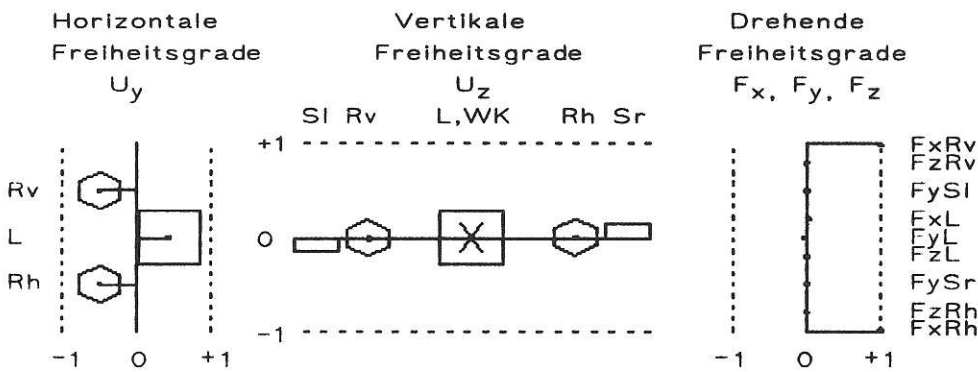
Bild 5.5c :

Darstellung der Eigenform FxRg

Bezeichnung der Eigenform: FxRp

Bei dieser Bewegungsform mit einer Eigenfrequenz von $f_e = 55.40$ Hz und einem Dämpfungsmaß von 0.12 handelt es sich um eine **phasengleiche Rollbewegung der Radsätze mit Querverschiebung** der Radsätze gegen die Querbewegung des Laufwerkrahmens. Die linken und rechten Schienen wirken gegenphasig gegen die Rollbewegung der Radsätze und die elastische Linie ist gut ausgeprägt, wobei die elastischen Moden 1 und 3 die wesentlichsten Beiträge zu der Gesamtverformung liefern. Die Schwellen verharren bei dieser Bewegungsform ebenfalls in Ruhe.

Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs



Vertikale Schwellenfreiheitsgrade
elastische Biegelinien der Schienen

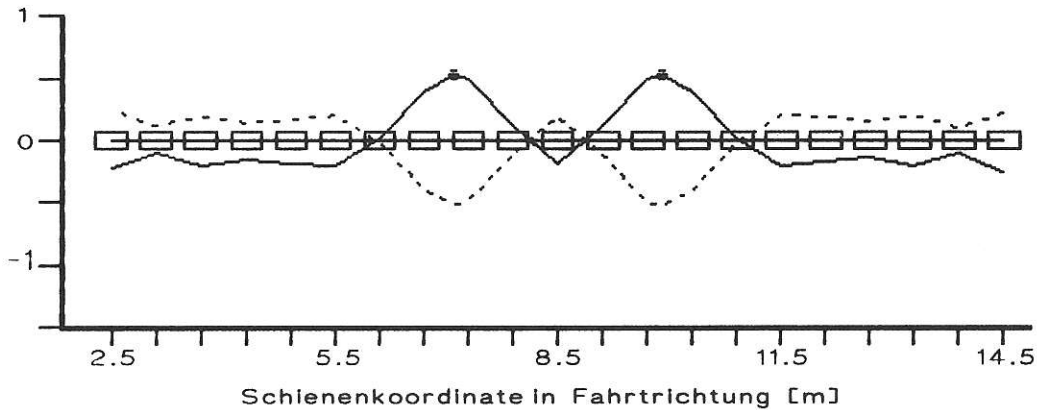
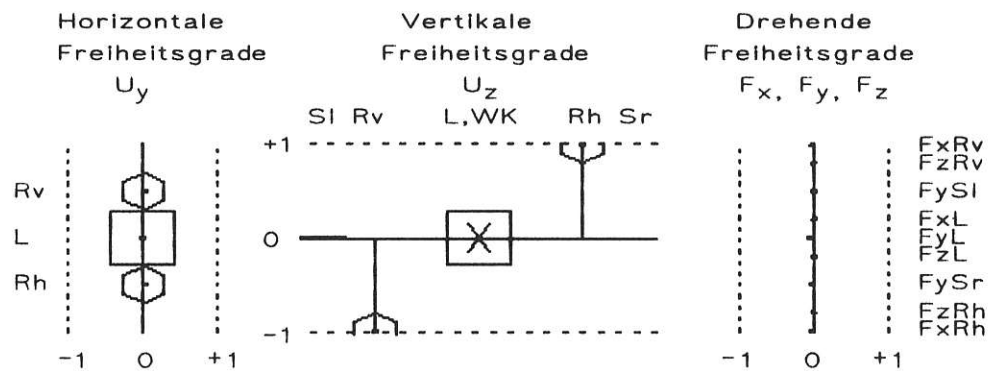


Bild 5.5d :
Darstellung der Eigenform FxRp

Bezeichnung der Eigenform: UzRg

Diese Eigenform schwingt in einer Eigenfrequenz von 55.48 Hz mit einem Dämpfungsmaß von 0.16. Die Bewegung ist eine **gegenphasige Vertikalschwingung der Radsätze**. Die elastische Schiene bleibt im Radaufstandspunkt ruhig und schwingt vor und hinter dem Drehgestell vorwiegend in den elastischen Moden 2 und 6. Die Schwellen sind hier ebenfalls an der Schwingung beteiligt und bewegen sich in Gegenphase zu den elastischen Schienen, jedoch parallel zu den Bewegungen der Radsätze.

Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs



Vertikale Schwellenfreiheitsgrade
elastische Biegelinien der Schienen

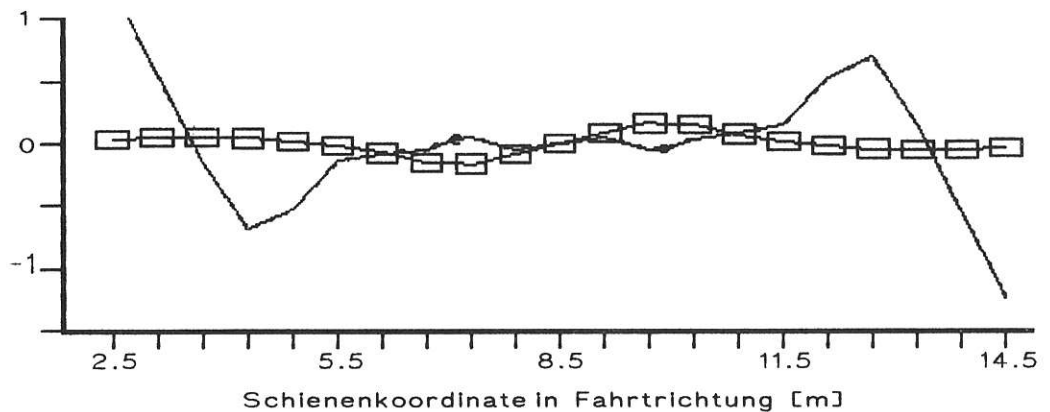
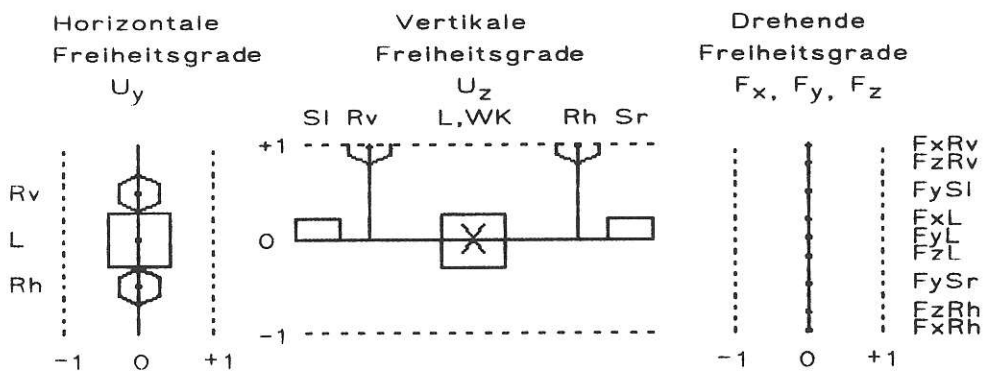


Bild 5.5e :
Darstellung der Eigenform UzRg

Bezeichnung der Eigenform: UzRp

Diese vertikale Eigenform schwingt mit einer Eigenfrequenz von 57.11 Hz, wobei die Schwingung mit einem Dämpfungsmaß von 0.15 bedämpft wird. Es handelt sich um eine **gleichphasige Radsatzschwingung**, an der die **Schienen** und der **Untergrund** beteiligt sind. Die Bewegung der elastischen Biegelinie der Schienen bildet sich in den elastischen Moden 1, 3, 5, 7 und 9 aus.

Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs



Vertikale Schwellenfreiheitsgrade

elastische Biegelinien der Schienen

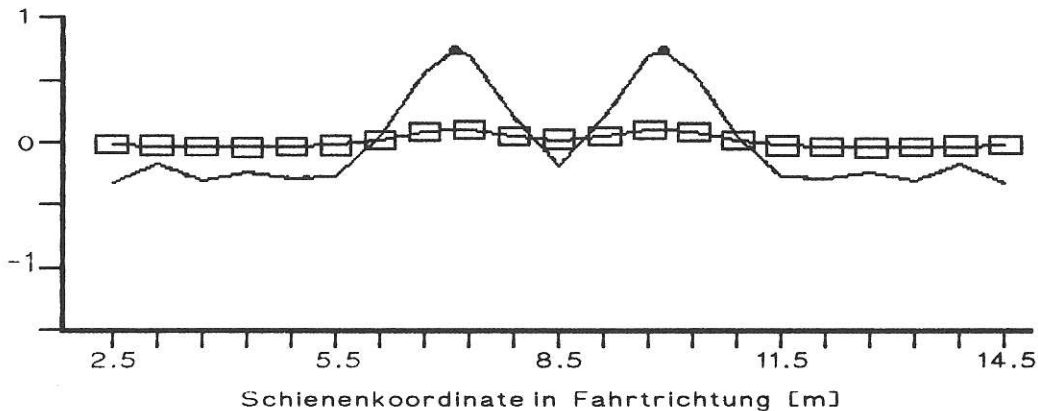


Bild 5.5f :

Darstellung der Eigenform UzRp

Vergleicht man die berechneten vier möglichen Radsatz-eigenformen unter Berücksichtigung des Untergrundes mit den Ergebnissen des elastisch gebetteten Fahrzeuges (siehe Kap. 5.1), so wird deutlich, daß die Eigenfrequenzen insgesamt um etwa 10 bis 20 Hz höher liegen. Dies ist zu erwarten, da die elastischen Schienen stark an den Radsatzeigenformen beteiligt sind und eine Versteifung über die benachbarten Schwellen zum Boden hin darstellen.

Die Dämpfungen der betrachteten Radsatzeigenformen sind bei den beiden berechneten Modellen fast identisch mit Ausnahme der Eigenform, die die gegenphasige Rollbewegung der Radsätze beschreibt. Für diese Eigenform verdoppelt sich die Dämpfung. Hieraus kann aber nicht gefolgert werden, daß der Untergrund mit seiner hohen Dämpfung für die Radsatzeigenformen keine Rolle spielt. Der geringe Einfluß der Dämpfung des Untergrundes auf diese Eigenformen resultiert ausschließlich daher, daß diese für eine Fahrgeschwindigkeit von 2 km/h, entsprechend einer Anregungsfrequenz von ca. 3 Hz, ermittelt wurden. In diesem niedrigen Frequenzbereich ist die Abstrahlungsdämpfung des Untergrundes sehr gering (siehe hierzu auch die Abbildungen in Kapitel 2).

Neben den dargestellten Eigenformen existieren entsprechend den Freiheitsgraden, die dem Modell gegeben wurden, noch eine Vielzahl weiterer Eigenfrequenzen und Eigenformen. Bei dem Modell mit Berücksichtigung des Untergrundes sind dies weitere 58 Eigenwerte. Diese liegen im Frequenzbereich zwischen 226 Hz und 1350 Hz und beschreiben die relativ hochfrequenten elastischen Schienenbewegungen, bei denen die Fahrzeugfreiheitsgrade kaum noch beteiligt sind. Diese Eigenformen sind alle stabil.

System 2: Mit Bodenkopplung

Frequenz (Hz)	Dämpf.- maß	Schwingungsrichtung; Körper
0.90	0.17	UzWK Vertikal Wagenkasten
6.39	0.53	UzL Vertikal Laufwerkrahmen
9.82	0.78	FxL Rollen Laufwerkrahmen
34.41	0.09	UyL Quer Laufwerkrahmen
75.84	0.26	FzL Wenden Laufwerkrahmen
49.21	0.20	FxRg Radsatzrollen in Gegenphase
55.40	0.12	FxRp Radsatzrollen in Gleichphase
53.76	0.17	UzRg Vertikal Radsatz in Gegenphase
57.29	0.20	UzRp Vertikal Radsatz in Gleichphase

Die Eigenwerte und Eigenformen entsprechen denen des Fahrzeugs ohne Berücksichtigung der Bodenkopplung.

Die relativ hochfrequenten und teilweise instabilen elastischen Schieneneigenformen, bei denen die Fahrzeugfreiheitsgrade kaum noch beteiligt sind, beginnen bei etwa 180 Hz und reichen wie beim Modell ohne Untergrundkoppelung bis etwa 1350 Hz. Sie werden im nachfolgenden Kapitel 5.5 näher erläutert.

Wie bei der Untersuchung des Modells ohne Berücksichtigung des Untergrundes wurde auch hier bei dem Modell mit Untergrundkoppelung die Wurzelortskurve im Geschwindigkeitsbereich 2 bis 105 m/s berechnet und daraus die Grenzgeschwindigkeit ermittelt. Das Ergebnis ist in Bild 5.6 dargestellt. Die dort ablesbare Grenzgeschwindigkeit beträgt $v_{\text{Grenz}} = 82 \text{ m/s}$, entsprechend 295 km/h. Der Vergleich mit dem vorher ermittelten Wert zeigt, daß die lineare Grenzgeschwindigkeit in den betrachteten Fällen nicht von den Untergrundeigenschaften beeinflusst wird.

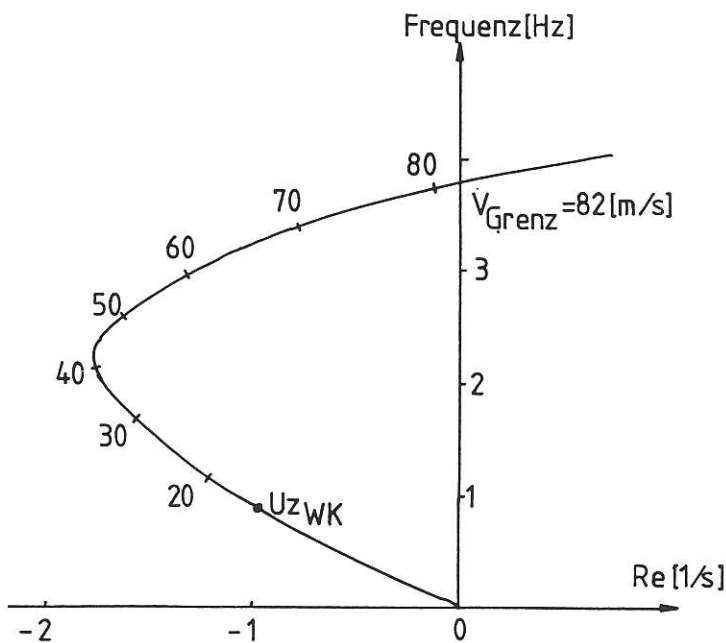


Bild 5.6 :
Wurzelortskurve des Modells:
Fahrzeug mit Untergrund

5.5 Instabile Eigenwerte

Als das wesentlichste Ergebnis für das Modell mit Untergrundkoppelung ist festzuhalten, daß es Oberbau-Eigenwerte mit positivem Realteil -also instabile Eigenwerte- gibt. Diese Eigenwerte tauchen nur dann auf, wenn in den Steifigkeitsmatrizen des Untergrundes die Schwellenkoppelungen über den Untergrund mit berück-

sichtigt werden. Als zweite Voraussetzung für die Instabilität wurde das Vorhandensein der elastischen Schienen ausgemacht. Bei einer Betrachtung des Bodens mit Schwellen und Schwellenkoppelungen, jedoch ohne Berücksichtigung der elastischen Schienen, ergaben sich keine instabilen Eigenwerte.

Die durchgeführte Berechnung ergab, daß insgesamt 9 instabile Eigenwerte (positiver Realteil) im Frequenzbereich von 180 Hz bis 290 Hz auftreten. Die zugehörigen Eigenformen sind in den nachfolgenden Bildern 5.6a bis 5.6i dargestellt. Sie sind in ihren dominanten Bewegungen immer mit elastischen Moden der Schienen verbunden und werden damit auch charakterisiert.

In der nachfolgenden Tabelle 5.1 sind alle instabilen Eigenformen zusammengestellt. Darauf hinzuweisen ist, daß sich ab der 9. elastischen Eigenform instabile Eigenwerte erst bei Fahrzeuggeschwindigkeiten ab 37 m/s ergeben. In den Fällen der Eigenformen 9 bis 12 wurde deshalb bei der Berechnung die Identifizierungsgeschwindigkeit auf 42 m/s gelegt.

Wie aus den dargestellten Bildern zu erkennen ist, schwingen die elastischen Schienen vorwiegend in den bezeichneten Eigenformen, wobei das Fahrzeug in Ruhe

Eigenw.- Realteil (1/s)	Eigenw.- Imagin.- teil (1/s)	Dominierende elastische Schienen Eigenform	Instabil im Geschwindigkeits- bereich von | bis (m/s)	
bei V = 2 (m/s)				
310	1313	4. el.	0	15
583	1270	5. el.	0	28
605	1321	6. el.	0	31
392	1446	7. el.	0	32
161	1538	8. el.	0	37
bei V = 42 (m/s)				
1	1473	9. el.	38	43
62	1595	10. el.	38	58
63	1707	11. el.	37	62
10	1786	12. el.	41	63

Tabelle 5.1:
Instabile Eigenwerte

ist. Dabei zeigt sich, daß Schwellen und Schienen im allgemeinen eine gleichphasige Bewegung durchführen. Lediglich in den elastischen Moden 4 und 12 ist eine zu den Schwellen gegenphasig verlaufende Schienenbewegung zu sehen.

Zu einem tieferen Verständnis dieser Schwingungsvorgänge gelangt man, wenn man die Koppelsteifigkeiten und -dämpfungen des Bodens zwischen den einzelnen Schwellen näher betrachtet. Diese Koppelparameter sind in Bild 4.7a und 4.7b für den hier betrachteten Boden (Scherwellengeschwindigkeit $v_s = 300 \text{ m/s}$) über der sich aus der Fahrzeuggeschwindigkeit ergebenden Anregungsfrequenz dargestellt. Der Verlauf der Koppelparameter über der Fahrzeuggeschwindigkeit soll nun in Bezug zu den elastischen Eigenformen der Schienen gesetzt werden.

Die elastischen Eigenformen der Schienen werden durch die elastischen Eigenschaften und Trägheitseigenschaften der Schienen und durch die Anzahl der Auflagerpunkte, den Schwellen, bestimmt. Die Ordnung der **dominanten** elastischen Eigenform erhält man, indem man die Gesamtanzahl der im Rechenmodell berücksichtigten Schwellen (hier 22 Schwellen) durch die Anzahl der beteiligten Schwellen dividiert. In Tabelle 5.2 sind diese Ordnungen bis zur fünften beteiligten Schwelle zusammengefasst.

Die Anzahl der beteiligten Schwellen wird durch die Anzahl der Schwellen, die über den Untergrund als gekoppelt angenommen werden, beschrieben. Mathematisch drückt sich dies in der Anzahl der **Nebendiagonalen** in der Steifigkeitsmatrix des Untergrundes aus.

Nummer der Nebendiagonale	Beteiligte Schwellen	Dominante elast. Schienenform
0	1	22
1	2	11
2	3	7
3	4	5-6
4	5	4-5

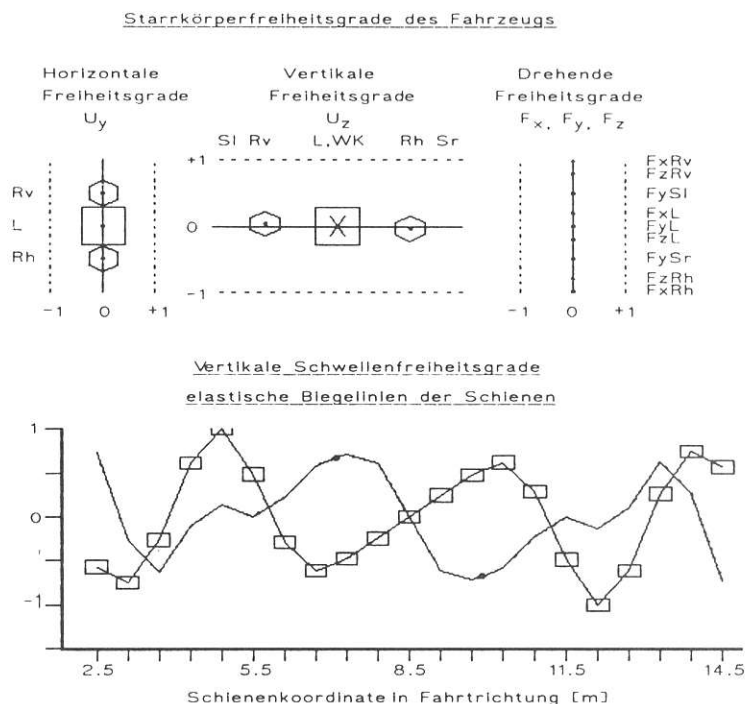
Tabelle 5.2:
Ordnungen der dominanten elastischen Schieneneigenformen

Betrachtet man die in den Bildern 4.7a und 4.7b dargestellten Steifigkeitsverläufe, dann erkennt man, daß zumindestens für die instabilen Eigenmoden Nr. 4 bis 7, die negativen Steifigkeitswerte für das entsprechende Nebendiagonalglied -aus der sich die instabilen Tendenzen für die ungedämpften elastischen Schienen ergeben- bei etwa denjenigen Fahrzeuggeschwindigkeiten positiv werden, bei denen auch die entsprechenden elastischen Eigenwerte der Schienen wieder stabil werden.

Zum Beispiel wird das mit der 4. elastischen Schienen-eigenform zusammenhängende 4. Nebendiagonalglied der Koppelsteifigkeit bei 15 m/s positiv. Das ist auch die Anregungsgeschwindigkeit, bei der die 4. elastische Eigenform stabil zu werden beginnt. Derselbe Effekt tritt beim 3. Nebendiagonalglied mit den zugehörigen elastischen Schienenmoden 5 bis 7 bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von etwa 30 m/s auf.

Bei den höheren instabilen elastischen Schieneneigenformen ist diese Tendenz zwar auch noch vorhanden, aber nicht mehr in dieser ausgeprägten Form zu sehen. Hier wären vergleichende Berechnungen mit verschiedenen Bodenkopplungsmodellen angebracht.

Bild 5.7a :
Darstellung der
Eigenform "4. elastische
Schienenform".



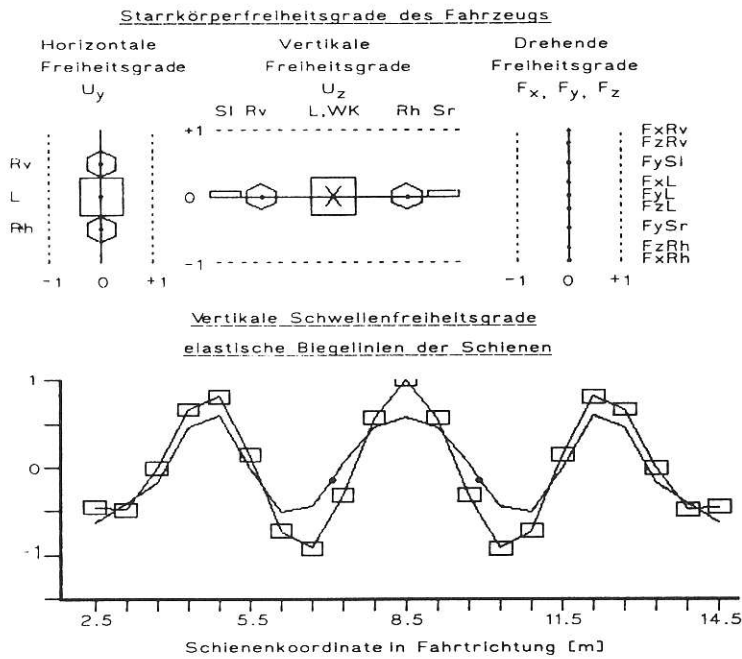


Bild 5.7b :

Darstellung der Eigenform "5. elastische Schieneneigenform".

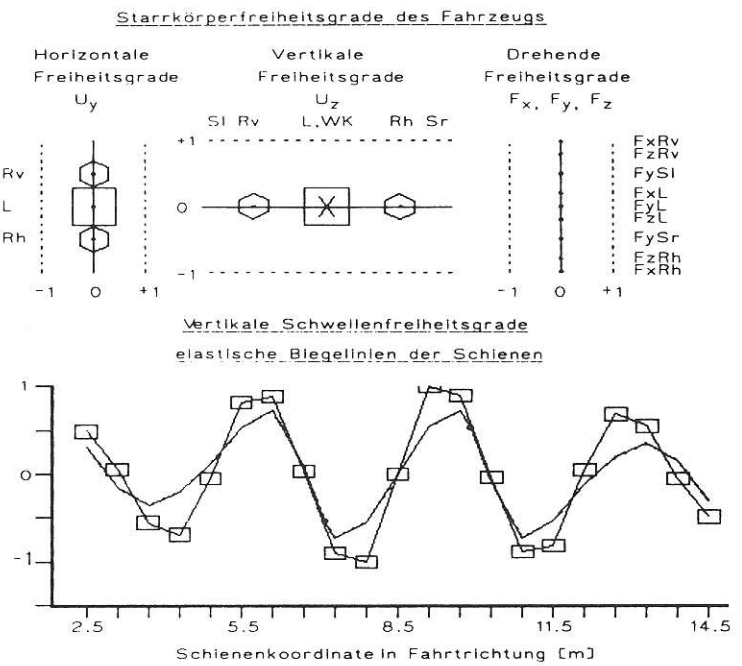


Bild 5.7c :

Darstellung der Eigenform "6. elastische Schieneneigenform".

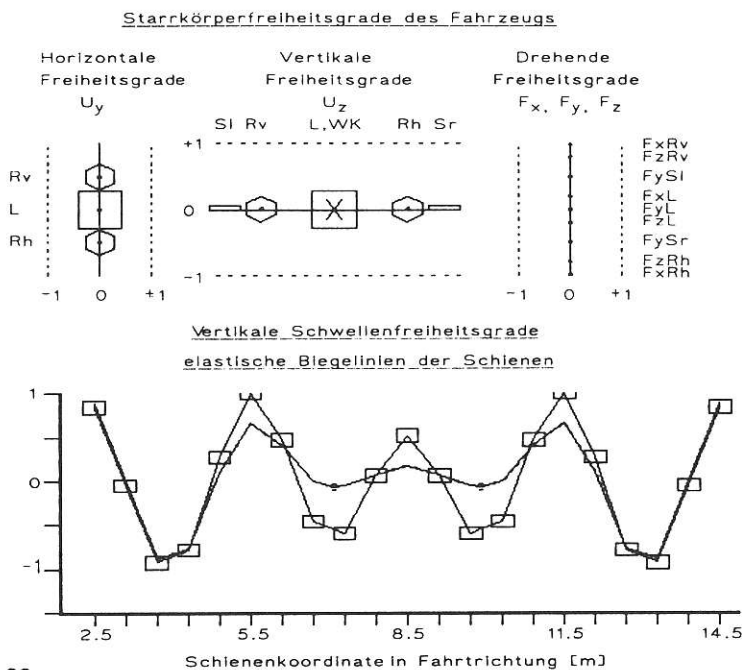


Bild 5.7d :

Darstellung der Eigenform "7. elastische Schieneneigenform".

Bild 5.7e :
 Darstellung der Eigenform
 "8. elastische
 Schieneneigenform".

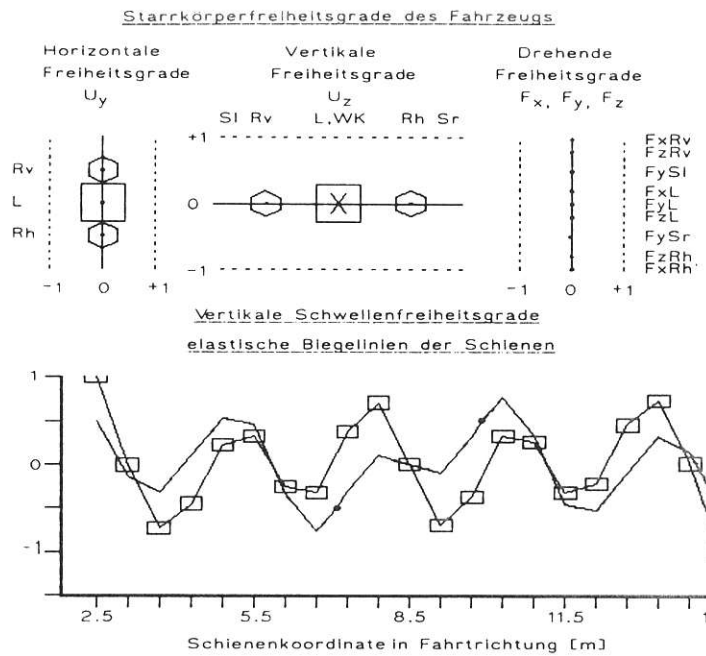


Bild 5.7f :
 Darstellung der Eigenform
 "9. elastische
 Schieneneigenform".

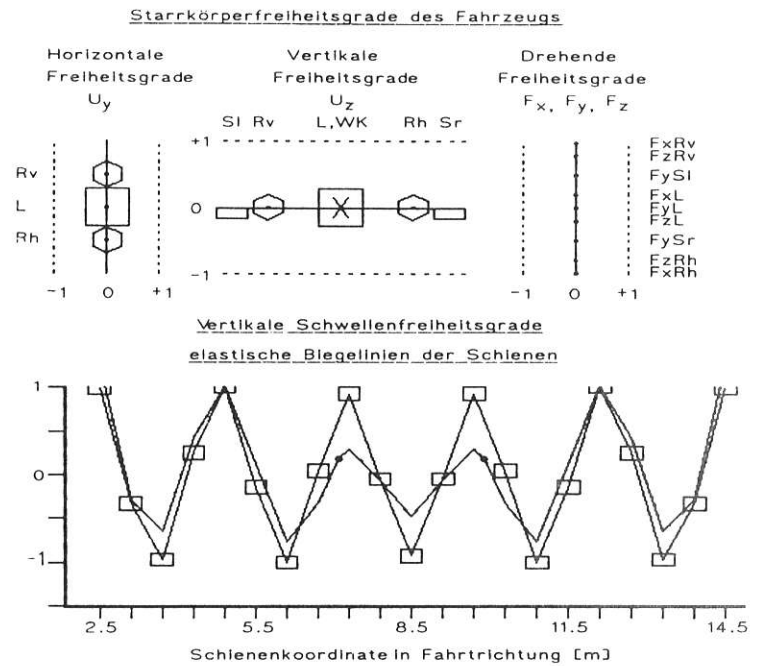
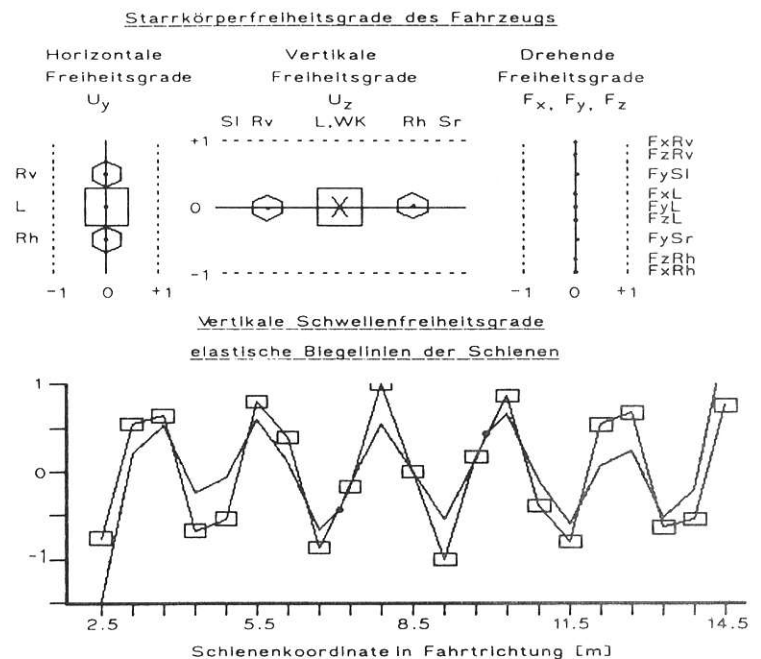


Bild 5.7g :
 Darstellung der Eigenform
 "10. elastische
 Schieneneigenform".



Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs

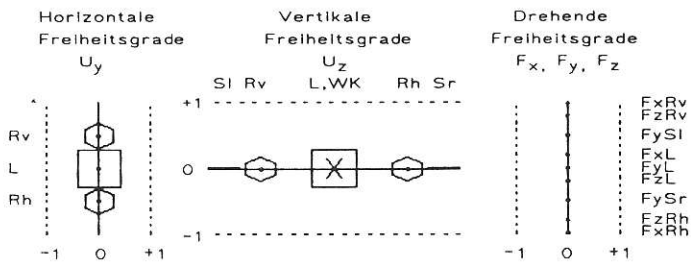
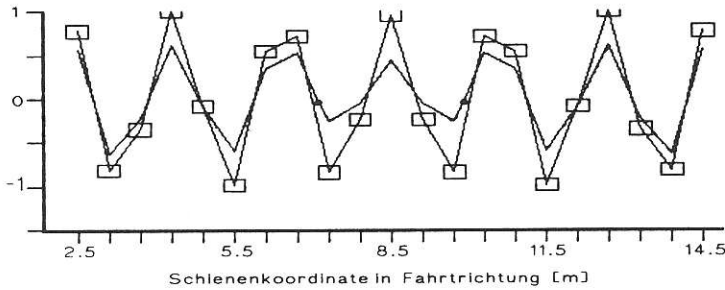


Bild 5.7h :

Darstellung der Eigenform "11. elastische Schieneneigenform".

Vertikale Schwellenfreiheitsgrade
elastische Biegelinien der Schienen



Starrkörperfreiheitsgrade des Fahrzeugs

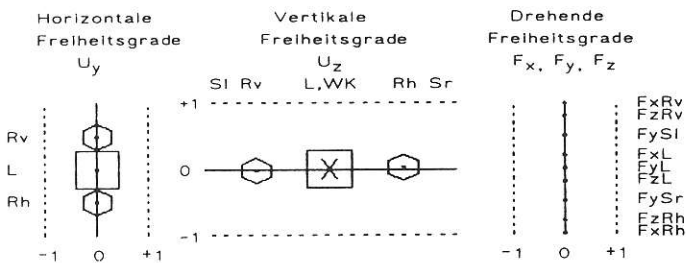
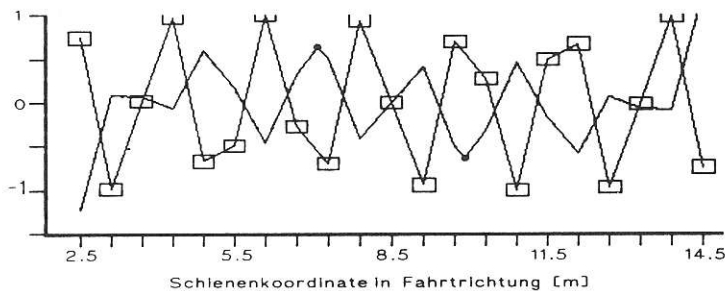


Bild 5.7i :

Darstellung der Eigenform "12. elastische Schieneneigenform".

Vertikale Schwellenfreiheitsgrade
elastische Biegelinien der Schienen



Neben der Charakterisierung der instabilen Eigenformen wurde ferner das Eigenwertverhalten bei steigender Fahrzeuggeschwindigkeit näher untersucht. Die zugehörigen Wurzelortskurven sind in Bild 5.8a und 5.8b dargestellt. Aus der Verfolgung der instabilen Eigenwerte ergibt sich zunächst eine mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit stabilisierende Tendenz für die Schieneneigenmoden 4 bis 8. Das heißt, daß die Eigenwerte, die bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten einen positiven Realteil besitzen, also instabil sind,

sich mit zunehmenden Fahrgeschwindigkeiten in Richtung der negativen Achse bewegen, also zunehmend stabiler werden. Die stabile Phase ist ab ca. 35 m/s erreicht. Ab 40 m/s bis zu 60 m/s tauchen dann noch vier weitere instabile Eigenformen auf (9. bis 12. elastische). Die zugehörigen Schwingfrequenzen liegen zwischen 240 Hz und 290 Hz und sind somit relativ hoch.

Bild 5.8a :
Wurzelortskurven der instabilen Eigenwerte des Fahrzeugs mit Schwellenkopplung.

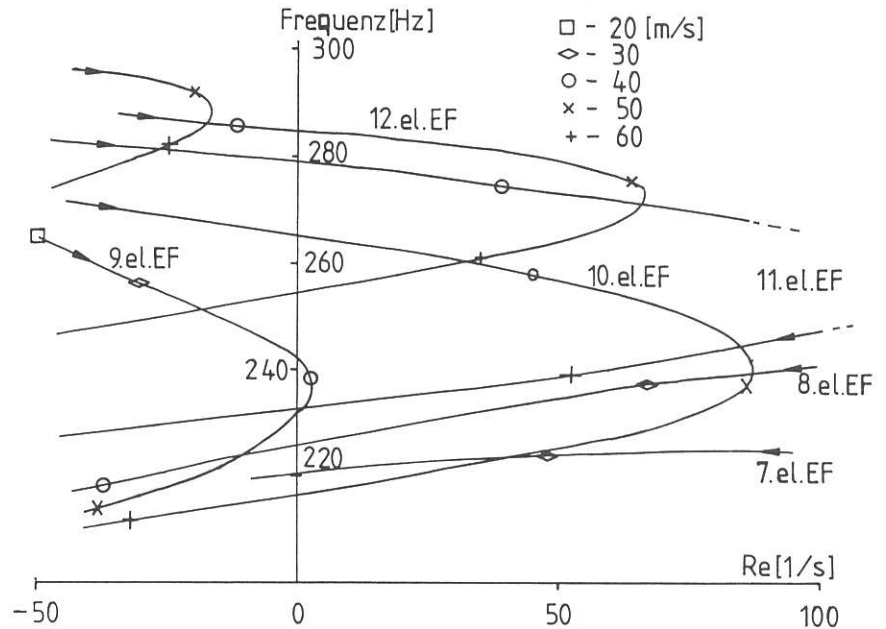
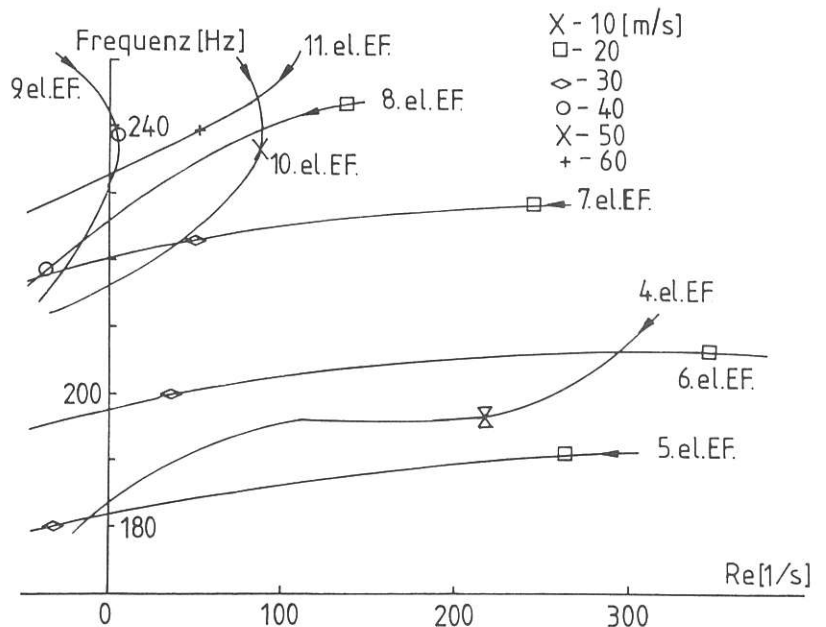


Bild 5.8b :
Wurzelortskurven der instabilen Eigenwerte des Fahrzeugs mit Schwellenkopplung.



Die sich aus den Eigenwerten der instabilen Eigenformen ergebenden Wellenlängen sind in Bild 5.9 zu sehen. Bei der Ermittlung der Wellenlängen geht man zunächst davon aus, daß das Fahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit über das instabil schwingende Gleis fährt. Hierbei wird der Boden mit der sich aus der

Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Schwellenabstand ergebenden Frequenz angeregt und antwortet, bedingt durch die Schwellenkopplungen infolge der Wellenausbreitung im Untergrund, mit einer instabilen Schienen-Eigenform. Die sich aus der instabilen Schwingfrequenz und der Fahrzeuggeschwindigkeit ergebenden Wellenlängen werden dann über der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen. Als Ergebnis dieser Rechenoperationen ergeben sich signifikante Wellenlängen von 2 bis 14 cm.

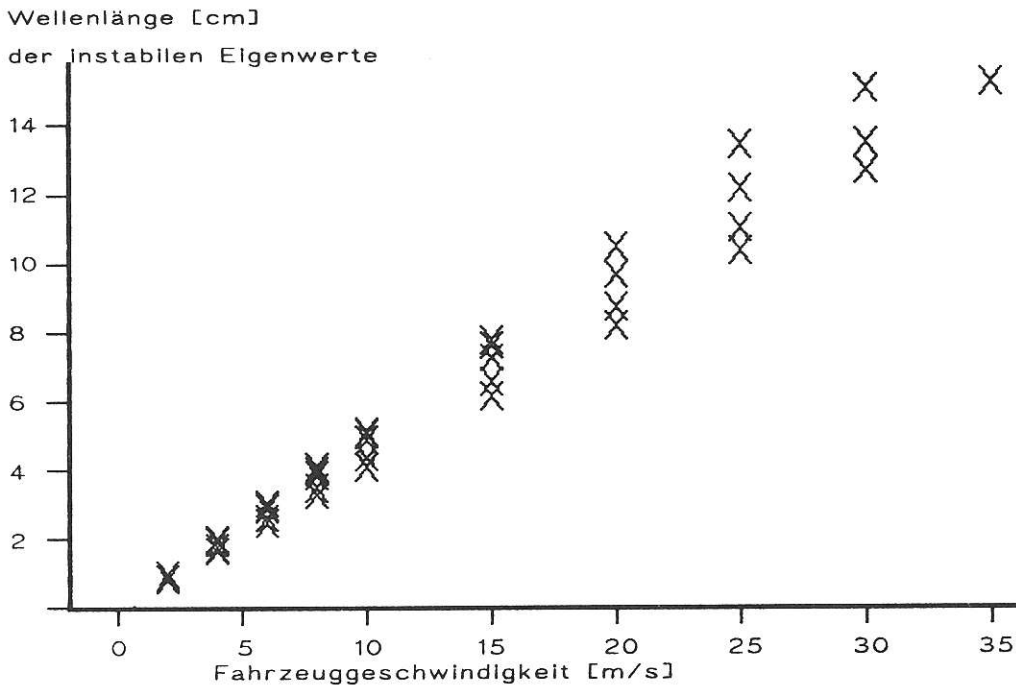


Bild 5.9 :

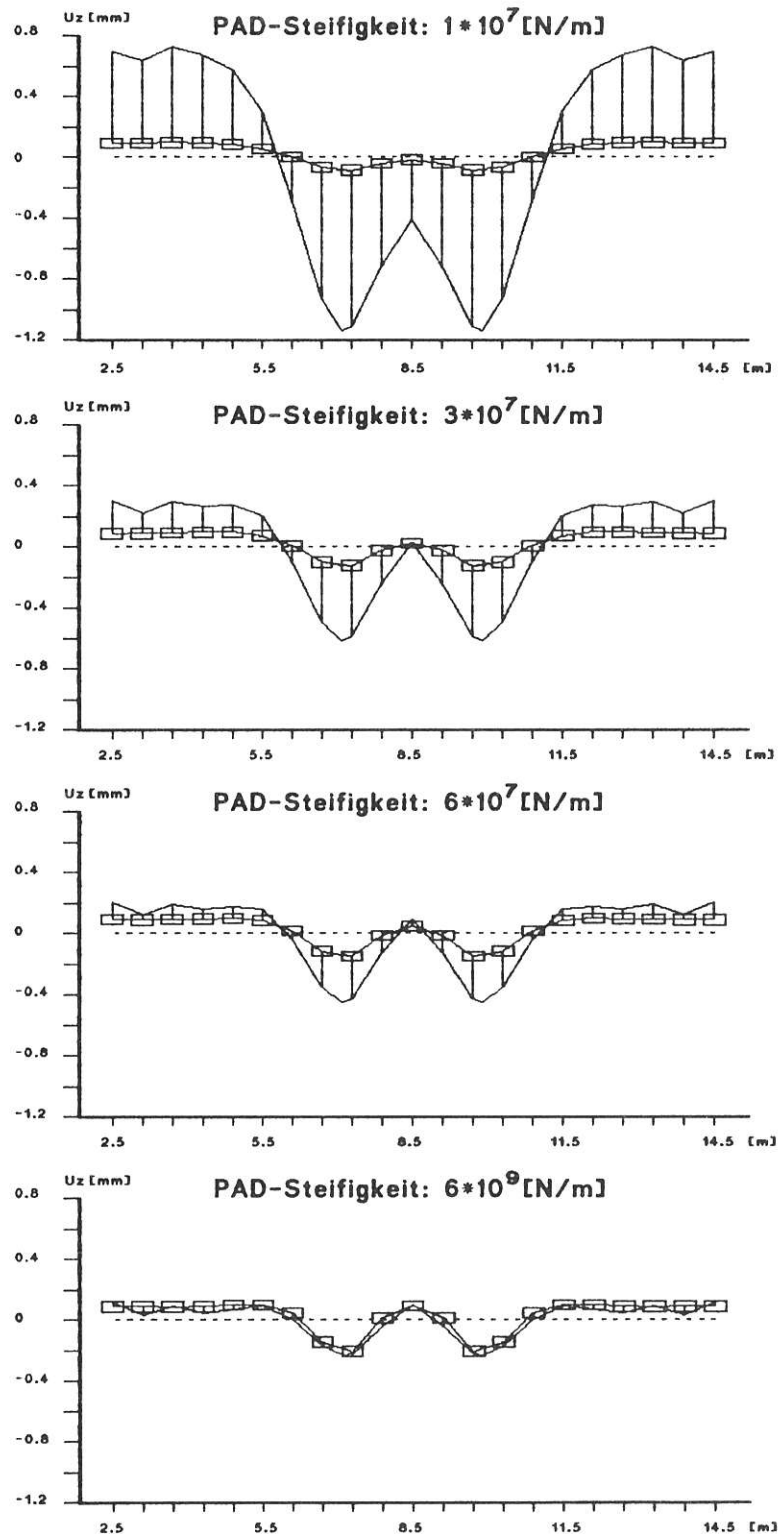
Wellenlängen der instabilen Eigenwerte des Fahrzeugs mit Bodenkopplungen über der Fahrzeuggeschwindigkeit.

5.6 Einfluß der elastischen Zwischenlage (PAD-Element)

Um die Wirkung der Steifigkeit der elastischen Zwischenlage zwischen Schiene und Schwelle, dem PAD-Element, aufzuzeigen, wurden Berechnungen der statischen Gleichgewichtslage mit unterschiedlichen Steifigkeiten des PAD-Elementes durchgeführt. Das Ergebnis ist in Bild 5.10 dargestellt. Gezeichnet sind die elastischen Verformungen der Schienen und der Schwellen. Man erkennt, daß bei weichem PAD die Hauptverformung und damit auch die Hauptlasten durch die Schienen aufgenommen werden. Mit zunehmender Steifigkeit des PAD-Elementes gleichen sich die Verschiebungen der Schie-

Bild 5.10:

Vertikalbewegungen der elastischen Schienen in der statischen Gleichgewichtslage



nen und Schwellen immer mehr an, wobei die Schwellenverschiebungen zu- und die Schienenbewegungen abnehmen. Mit zunehmender Steifigkeit des PAD-Elementes wird dadurch auch der Untergrund stärker belastet.

Für den Fall "hartes PAD" ($c_z = 6.4 \cdot 10^9$) wurde eine komplette Berechnung mit Ermittlung der Eigenformen, Wurzelortskurven und Frequenzgängen durchgeführt. Die einzelnen Ergebnisse werden hier nicht vorgestellt, da

sie qualitativ den oben mitgeteilten Ergebnissen äquivalent sind. Quantitativ herausragende Ergebnisse sind jedoch die Erhöhung der Radsatzvertikalschwingfrequenzen auf 110 Hz und das Auftreten von instabilen Eigenwerten mit Beteiligung der Radsatzvertikalschwingungen. Instabile Eigenfrequenzen treten wie im oben diskutierten Fall dann auf, wenn die Schwellenkopplung über den Untergrund im Rechenmodell berücksichtigt wird. Damit liegen die ersten instabilen Eigenwerte bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten im Bereich von 130 Hz. Es läßt sich also erkennen, daß durch ein PAD-Element mit großer Steifigkeit das Fahrzeug fester zum Boden hin gekoppelt wird und die "lastverteilenden" Eigenschaften der elastischen Schiene reduziert werden.

6. Berechnung von Frequenzgängen

6.1 Allgemeines

Die Analyse der Eigenschaften eines mechanischen Systems kann auf verschiedene Weise erfolgen. Die Wahl der jeweiligen Methode wird dabei im allgemeinen von dem Untersuchungsziel bestimmt. Ist man z.B. am prinzipiellen Systemverhalten sowie an der Auffindung von möglichen Instabilitäten -aufklingende Schwingungen- interessiert, dann ist die Ermittlung der Eigenwerte und Eigenformen durch eine Modalanalyse das geeignete Verfahren. Dies wurde für verschiedene Modelle der Fahrbahn und des Fahrzeuges in Kapitel 5 durchgeführt. Durch die Ermittlung der Eigenwerte und Eigenformen ist aber zunächst noch nicht festgelegt, inwieweit die einzelnen Eigenwerte und Eigenformen zur Antwort auf bestimmte Anregungen beitragen. In diesem Fall sind weitere Berechnungen erforderlich.

Ist man am direkten Antwortverhalten eines Systems auf bestimmte Anregungen interessiert, dann erfolgt die Analyse im allgemeinen im Frequenzraum. Das, das Systemverhalten beschreibende Differentialgleichungssystem

$$\underline{\mathbf{M}} \underline{\mathbf{u}}(t) + \underline{\mathbf{D}} \underline{\mathbf{u}}(t) + \underline{\mathbf{K}} \underline{\mathbf{u}}(t) = \underline{\mathbf{p}}(t) \quad (6.1)$$

wird hierbei zunächst durch eine Integraltransformation -z.B. Fourier oder Laplace- in den Frequenzraum transformiert. Wird obige Gleichung z.B. Laplacetransformiert dann erhält man

$$(\underline{\mathbf{M}} s^2 + \underline{\mathbf{D}} s + \underline{\mathbf{K}}) \underline{\mathbf{y}}(s) = \underline{\mathbf{p}}(s). \quad (6.2)$$

mit den Anfangsbedingungen $\underline{\mathbf{y}}(0) = \underline{\dot{\mathbf{y}}}(0) = 0$. Der Parameter

$$s = \beta + i \Omega, \quad (6.3)$$

mit

$$\begin{aligned} \beta & \text{ Abklingkonstante (Dämpfung)} \\ \Omega & \text{ Kreisfrequenz} \end{aligned}$$

wird als Laplaceparameter bezeichnet. Durch die Transformation wurde also aus einer Differentialgleichung eine algebraische Gleichung, die mit üblichen Gleichungslösungsverfahren in einfacher Weise für jede Frequenz gelöst werden kann.

Durch die Verfügbarkeit sehr schneller Transformationsalgorithmen, wie z.B. der Fast Fourier Transformation (FFT), kann, nachdem die Lösung im Frequenzbereich ermittelt wurde, sehr schnell auch die Lösung im Zeitbereich berechnet werden.

Eine Berechnung im Frequenzbereich ist insbesondere dann von Vorteil, wenn wie im vorliegenden Fall, die Systemmatrizen frequenzabhängig sind. Anders wie bei der Berechnung der Eigenwerte und Eigenformen in Kapitel 5, werden bei der Berechnung im Frequenzraum immer die richtigen Systemwerte verwendet.

Von weiterem Vorteil ist, daß die Systemantworten unter mehreren Anregungen gleichzeitig ermittelt werden können. Gibt man z.B. als Anregung eine Einheitslast oder Einheitsverschiebung vor, dann erhält man den Frequenzgang des Systems, aus dem unmittelbar die Lage von Eigenfrequenzen, ihre Dämpfung sowie, durch die Größe der Amplitude, ihre Wertigkeit in der Gesamtantwort erkannt werden kann. Die frequenzabhängigen Antworten auf andere Anregungen erhält man dann, indem man den Frequenzgang mit den Fourier- oder Laplacetransformierten Erregerverläufen multipliziert.

6.2 Einbau in MEDYNA und Arten der Anregung

Die Berechnung von Frequenzgängen erfolgt innerhalb von MEDYNA mit der Hauptroutine RFREQU. Entsprechend Gleichung 6.2 braucht unter "normalen" Bedingungen nur die mit dem quadrierten Transformationsparameter s multiplizierte Massenmatrix \underline{M} und die linear mit s multiplizierte Dämpfungsmatrix \underline{D} in jedem Frequenzschritt verändert zu werden. Im vorliegenden Fall sind aber zusätzlich die Steifigkeits- und Dämpfungsmatri-

zen des Untergrundes frequenzabhängig. Damit ist es erforderlich, daß in jedem Frequenzschritt die gesamte Systemmatrix neu aufgebaut wird. Um die Rechenzeit zum Aufbau der Matrizen in akzeptablen Grenzen zu halten, wird hierbei folgendermaßen vorgegangen:

1. Der Aufbau der Systemmatrizen in jedem Frequenzschritt erfolgt inkrementell (siehe auch Kapitel 4.4). Hierbei werden vorab ermittelte Steifigkeitswerte der frequenzabhängigen Untergrundmatrizen inkrementell mit der Zwangsmatrix und der invertierten Massenmatrix multipliziert und nach jeder Frequenzänderung auf die "alten" Werte der Systemmatrizen aufaddiert.
2. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß nur diejenigen Freiheitsgrade in den Systemmatrizen behandelt werden müssen, die geänderte Untergrundparameter beinhalten. Das sind im Normalfall die Freiheitsgrade der Schwellen. Da in diesem Fall die rechenzeitintensiven MEDYNA-Standard-Routinen für die Verbindungselemente nicht angesprochen werden, ergibt sich eine erhebliche Rechenzeiterparnis.

Nach Aufbau der Systemmatrix muß noch der frequenzabhängige Anregungsvektor bzw. allgemeiner die frequenzabhängige Anregungsmatrix $\mathbf{p}(s)$ spezifiziert werden. Auf der Grundlage der in MEDYNA implementierten Verfahren können prinzipiell zwei unterschiedliche Anregungsmechanismen gewählt werden. Diese sind:

1. **Phasenverschobene** Vertikalanregung der Rad/Schiene Verbindungselemente. Mit dieser Anregungsart werden im allgemeinen sogenannte "Gleislagefehler" simuliert. Das Programmsystem MEDYNA bietet insgesamt vier unterschiedliche Mechanismen von Gleislagefehlern zur Auswahl an:
 - Vertikalanregung der Radsätze
 - Queranregung der Radsätze
 - Rollanregung der Radsätze
 - Spurweitenanregung der Radsätze.

Bei dieser Anregungsart sind die Matrixelemente

der rechten Seite, die dem Untergrund zugeordnet sind, unbesetzt (siehe auch Gleichung 2.5 in Kapitel 2.2). Als Modell des Untergrundes werden hier sogenannte Subhalbräume angesetzt, die jeweils unter den Radsätzen angeordnet werden (siehe Kapitel 4.3).

2. **Phasengleiche** Vertikalanregung des Bodens. Diese Anregungsart könnte man auch als "Rütteltisch"-Anregung bezeichnen, da hierbei alle Schwellen durch den Untergrund gleichphasig angeregt werden. In diesem Falle sind die Untergrund-Submatrix-Elemente der rechten Seite besetzt. Das dynamische Verhalten des Untergrundes wird hier durch einen einzigen homogenen Halbraum beschrieben (siehe Kapitel 2 und 4.3)

Prinzipiell richtet sich die Auswahl der Anregungsart nach dem jeweiligen Untersuchungszweck. Insoweit existieren bei einer praktischen Berechnung keinerlei Präferenzen für die eine oder die andere Art. Da das Hauptziel dieser Arbeit jedoch in der Anbindung des Untergrundes an das Programmsystem MEDYNA sowie in der Kontrolle dieser Integration besteht, ergeben sich im vorliegenden Fall doch gewisse Präferenzen, die durch zur Zeit noch vorhandene programm-technische Zwänge ergänzt werden. Im folgenden werden einige Auswahlkriterien aus programmtechnischer und modelltechnischer Sicht diskutiert:

- Die Anregung mittels der Art "Gleislagefehler" ist aus programmtechnischer Sicht deshalb problematisch, weil das in MEDYNA benutzbare lineare Rad/Schiene-Verbindungselement im Zusammenhang mit den elastischen Schienen und der genannten Anregung nach unseren Erfahrungen noch nicht vollständig implementiert und getestet worden ist. Beim Aufbau der Systemmatrizen ohne Anregung war jedenfalls ein Fehler aufgetreten, der die Vermutung nahelegt, daß das lineare Rad/Schiene-Verbindungselement und elastische Körper in der uns vorliegenden Programmversion 4.1 noch nicht zusammenpassen.
- Aus modelltechnischer Sicht ist die Anregungsart

"Gleislagefehler" in Zusammenhang mit der Modellierung des Untergrundes mittels Subhalbräumen unter den Radsätzen als ideal anzusehen. Die Frequenzabhängigkeit des Untergrundes wirkt sich hier nur in den Beschreibungsmatrizen für die Rad/Schiene-Verbindungselementen und für die Subhalbräume selbst aus. Als Nachteil ist hierbei die inhomogene Struktur in den Untergrundmatrizen anzusehen, die zum einen die Systemmodellierung unübersichtlich und die Rechenergebnisse nicht klar überprüfbar und nicht eindeutig interpretierbar machen lassen. Die Ergebnisse einer gleichphasigen Anregung der Schwellen durch den Untergrund sind demgegenüber leichter interpretierbar und die Modellierung des Untergrundes mittels eines einzigen Halbraumes ist modelltechnisch einfacher durchzuführen.

6.3 Rechenergebnisse

Auf der Grundlage der oben mitgeteilten Diskussion der Vor- und Nachteile der zur Verfügung stehenden Anregungsarten wurden die im folgenden dargestellten Ergebnisse mit einer phasengleichen Anregung berechnet. Unter dieser Anregung wurden die Frequenzgänge einiger Systempunkte für alle drei betrachteten Beispiel-Modelle (siehe Kap. 5.1) im Frequenzbereich von 2 bis 400 Hz mit 100 logarithmisch gewichteten Frequenzschritten ermittelt. Als Fahrzeuggeschwindigkeit wurde 2 m/s angesetzt. Dargestellt und diskutiert werden im folgenden die Frequenzgänge des vorderen Radsatzes der drei Modelle.

Bild 6.1 zeigt den Frequenzgang für ein elastisch gebettetes Fahrzeug (Modell 1). Die elastische Bettung in Form von Federn und Dämpfern ist hier direkt unter den 4 Radsätzen angeordnet. Dieses Modell wurde bisher in der Analyse von Rad/Schiene-Systemen verwendet. Der Frequenzgang entspricht im wesentlichen dem eines Ein-Massenschwingers; die Resonanzfrequenz liegt bei 37 Hz und entspricht der in Kapitel 5.3 mitgeteilten gleichphasigen Vertikaleigenfrequenz der Radsätze mit

Tauchen des Laufwerkrahmens. Weitere angeregte Eigenfrequenzen sind im Spektrum nicht zu erkennen. Im Vergleich mit den nachfolgenden Ergebnissen ist diese Schwingung am wenigsten gedämpft, obgleich die Überhöhung in der Resonanz mit einem Faktor von ca. 3,2 der Überhöhung des Modells 2 nahezu entspricht.

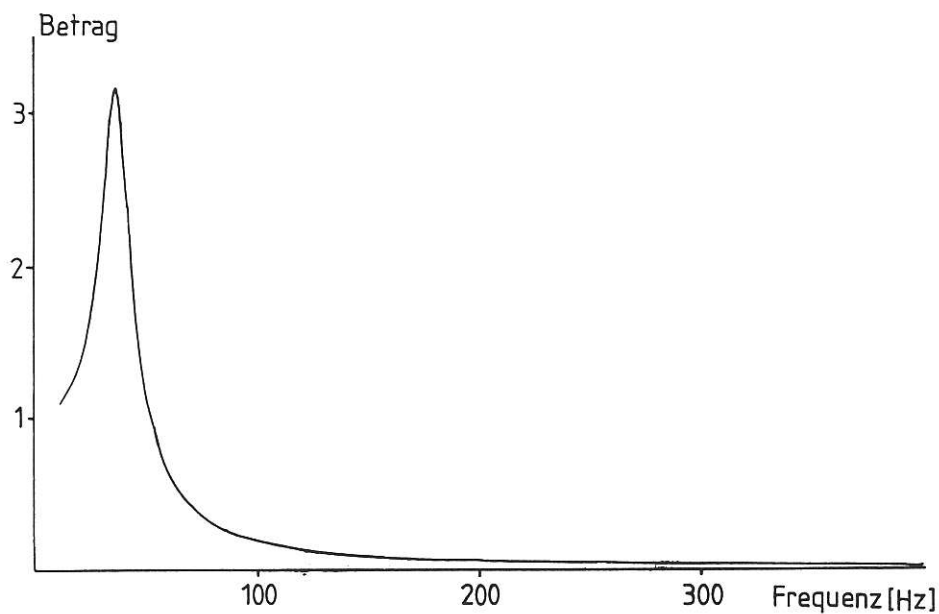


Bild 6.1:

Frequenzspektrum eines Radsatzpunktes des Modells des elastisch gelagerten Fahrzeuges (Modell 1)

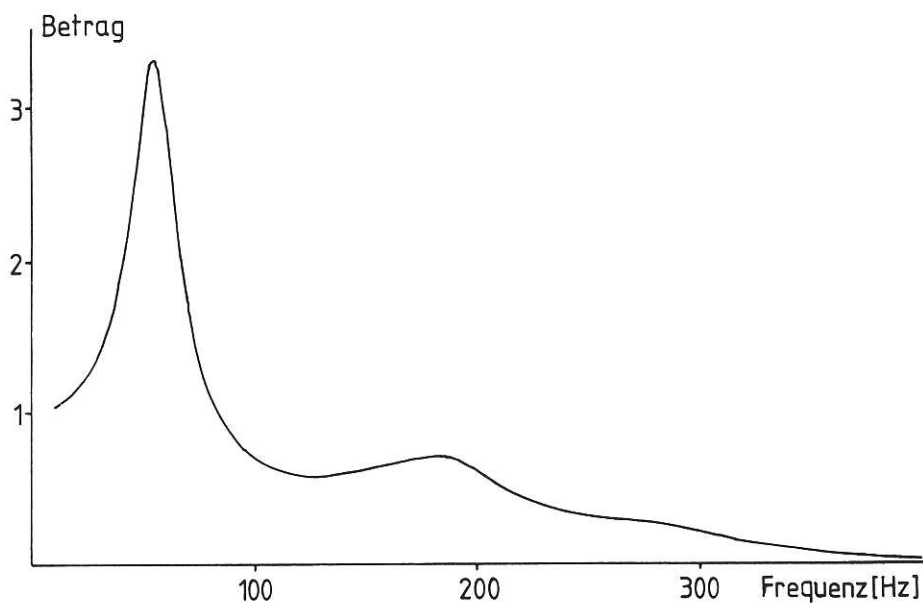


Bild 6.2:

Frequenzspektrum eines Radsatzpunktes des Modells des Fahrzeuges auf Oberbau und ungekoppeltem Untergrund (Modell 2)

In Bild 6.2 ist der Frequenzgang des Modells 2, das ist das Fahrzeug auf Oberbau und **ungekoppeltem** Untergrund, dargestellt. Durch die Berücksichtigung des Oberbaus, das ist hier im wesentlichen der versteifende Einfluß der über die Schienen gekoppelten Schwellen, liegt die vertikale Radsatzresonanz nunmehr bei etwa 57 Hz und entspricht somit ebenfalls der in Kapitel 5.4 errechneten gleichphasigen Radsatzschwingung mit Beteiligung der Schwellen und des Untergrundes. Die Überhöhung in der Resonanz beträgt etwa 3,25; die Resonanzschwingung ist aber etwas stärker bedämpft als diejenige des Modells 1. Verglichen mit dem Modell 1 ist das Schwingungsniveau bei diesem Modell 2 oberhalb der vertikalen Radsatzresonanz generell höher, wobei sich insbesondere um etwa 200 Hz weitere Resonanzen der elastischen Schienen auf den Schwellen und dem elastischem Untergrund ausbilden. Diese Schwingungen sind jedoch stark gedämpft.

Das in Bild 6.3 dargestellte Frequenzspektrums des Radsatzes für das Modell des Fahrzeuges mit Oberbau und **gekoppeltem** Untergrund weist von allen berechneten Modellen die signifikantesten Merkmale auf. Die vertikale Radsatzzeigenfrequenz liegt zwar, wie bei Modell

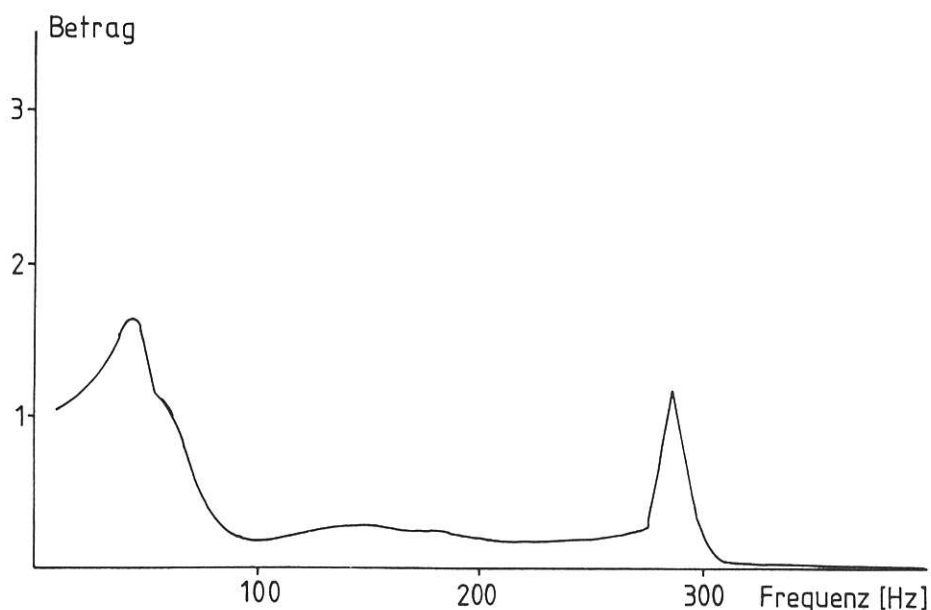


Bild 6.3:

Frequenzspektrum eines Radsatzpunktes des Modells des Fahrzeuges auf Oberbau und gekoppeltem Untergrund (Modell 3)

2, bei etwa 57 Hz und wird somit durch die Untergrundkoppelung nicht beeinflusst. Die Koppelung der Schwellen über den Untergrund bewirkt jedoch eine sehr starke Dämpfung dieser Resonanzschwingung. Die Überhöhung in der Resonanz beträgt jetzt nur noch etwa 1,7. Der Resonanzeinfluß der elastischen Biegeschwingungen der Schienen und Schwellen bei etwa 200 Hz ist noch zu erkennen; die Dämpfung ist aber noch höher als bei Modell 2. Damit liegt das Schwingungsniveau über der vertikalen Radsatzeigenfrequenz unter dem Niveau des Modells 2 und nähert sich wieder dem Niveau des Modells 1. Eine Ausnahme bildet hier der Bereich um etwa 290 Hz. Hier bildet sich eine Resonanzstelle aus, deren Dämpfung relativ klein ist. Bei einer Untersuchung des Eigenverhaltens traten instabile oder schwach gedämpfte Eigenwerte in diesem Bereich nicht auf. Das bedeutet, daß diese Resonanz allein aus der Untergrundkoppelung des Schienen-Schwellensystems und der Art der Anregung entsteht, wobei die Lage der Resonanzstelle im wesentlichen durch die Untergrundsteifigkeit und den Schwellenabstand (siehe auch Kapitel 2.1 und Bild 2.6) bestimmt wird.

7. Zusammenfassung

Seit 1978 sind im Rahmen der Rad-Schiene-Forschung des Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) zahlreiche Untersuchungen im Bereich der Untergrund/Oberbaudynamik sowie der Entwicklung von Berechnungsalgorithmen zur Analyse und Auslegung von neuartigen Schienenfahrzeugen erfolgreich abgeschlossen worden. Ziel dieser Untersuchungen war es, eine genauere Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Fahrbahnen von Eisenbahnen im Zuge der Erstellung des Streckennetzes für den Hochgeschwindigkeitszug ICE sowie für das Laufverhalten des ICE bei hohen Geschwindigkeiten zu erlangen.

Ziel dieses Projektes war es, die bisher getrennt geführten Bemühungen zur Fahrzeug- und Fahrwegdynamik erstmalig zu vereinen. Hierzu sollte die Dynamik des Untergrundes, die durch Wellenausbreitungsvorgänge charakterisiert ist, in geeigneter Form in dem MKS-Programmsystem MEDYNA implementiert werden. In ersten grundsätzlichen Berechnungen sollte weiterhin geprüft werden, ob es notwendig ist, das dynamische Verhalten des Untergrundes durch ein komplexes Modell, in dem die realen Kontinuumseigenschaften integriert sind, zu beschreiben.

Die Integration der Untergrunddynamik in MEDYNA führte zur Entwicklung eines Oberbaumoduls, der aus den elastischen Schienen, den Zwischenlagen zwischen Schienen und Schwellen, den Schwellen sowie dem eigentlichen Untergrund besteht. Dieser Modul wurde auf der Grundlage der MEDYNA-üblichen Konventionen entwickelt und kann somit wie ein übliches Element von MEDYNA angesprochen werden. Das dynamische Verhalten von auf dem Untergrund befindlichen Systemen -wie einem Schwellenrost mit grundsätzlich beliebig vielen Schwellen- wird mit dem Programmsystem INTACT berechnet. Im gegenwärtigen Entwicklungsstand des Oberbaumoduls ist es not-

wendig, die dynamischen Eigenschaften des Untergrundes durch eine Vorabberechnung mit INTACT zu ermitteln und die Ergebnisse in Form von frequenzabhängigen Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen an MEDYNA zu übergeben.

Zur Verifikation des neuentwickelten Oberbaumoduls wurden Eigenfrequenzen, Eigenformen und Frequenzgänge berechnet. Hierbei wurden drei verschiedene Modelle des gekoppelten Fahrzeug-Fahrbahn-Untergrund Systems betrachtet. Diese waren:

- Modell 1: ICE elastisch gelagert ohne Schwellen und Schienen
- Modell 2: ICE auf Oberbau und ungekoppeltem Untergrund
- Modell 3: ICE auf Oberbau und gekoppeltem Untergrund.

Im einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Die mit dem Oberbaumodul berechneten Schienenverformungen und statischen Einsenkungen der Schwellen unter einem stehenden Zug entsprechen sowohl betragsmäßig wie in der Form gemessenen Werten und korrespondieren ebenfalls gut mit aus konventionellen Berechnungsverfahren (elastische Bettung, Steifzifferverfahren) ermittelten Werten. Damit ist zunächst der Nachweis erbracht, daß der Obermodul fehlerfrei in MEDYNA implementiert wurde. Zum anderen ergibt sich hieraus die Folgerung, daß im statischen Falle die konventionellen Methoden und die hier vorgestellte komplexe Halbraummethode äquivalent sind.
2. Im Vergleich der Eigenwerte und Eigenformen der drei berechneten Modelle ergab sich, daß
 - die ersten 3 Starrkörpereigenwerte (Vertikal Wagenkasten, Vertikal und Rollen Laufwerkrahmen) mit den zugehörigen modalen Dämpfungen bei allen Rechenmodellen gleich sind. Diese sind also unbeeinflusst von der Art des Oberbau/Untergrundmodells.
 - die weiteren höherfrequenten Eigenwerte und Eigenformen (hier ab etwa 26 Hz), die mit der Quer-

bewegung des Laufwerkrahmens beginnen und in den durchgeführten Berechnungen mit den sehr hochfrequenten elastischen Schienenschwingungen über 1000 Hz enden, stark von der Art des Untergrundmodells, aber weniger von der Berücksichtigung der Koppelung der Schwellen durch den Untergrund abhängen. Der generelle Einfluß der Berücksichtigung eines ungekoppelten Oberbau/Untergrundmoduls hinsichtlich der Eigenwerte ist darin zu sehen, daß sich die Eigenwerte zu höheren Werten verschieben (versteifender Einfluß) und daß teilweise eine Reduzierung der Dämpfung (Querbewegung des Laufwerkrahmens) und teilweise eine Erhöhung der Dämpfung (phasengleiche Radsatzquerschwingung) eintritt.

- im Vergleich der Eigenwerte des ungekoppelten und gekoppelten Untergrundes keine Unterschiede zu erkennen sind. Ein gravierender Unterschied ist jedoch darin zu sehen, daß bei Berücksichtigung der Untergrundkoppelung zusätzliche instabile Eigenwerte -aufklingende Schwingungen- auftreten. Diese instabilen, im Frequenzbereich zwischen 180 und 300 Hz liegenden Eigenwerte, sind immer mit elastischen Schienenschwingungen verbunden. Von Bedeutung und Interesse ist, daß diese instabilen Eigenwerte insbesondere bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten auftreten und mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit (berechnet bis etwa 105 m/s) monoton in Richtung stabilem Verhalten wandern und schließlich stabil werden. Berechnet man aus der Fahrgeschwindigkeit und den Frequenzen, bei denen diese instabilen Eigenwerte auftreten, die zugehörigen Wellenlängen, so ergeben sich Werte von 2 cm bis 14 cm. Auf die in der Realität beobachteten Schienenwelligkeit mit Wellenlängen der genannten Größenordnung sei hier hingewiesen.

3. Im Vergleich der Frequenzgänge des elastisch gelagerten Fahrzeuges und des Fahrzeuges auf ungekoppeltem Oberbau ergeben sich als Haupteffekte die Verschiebung zu höheren Fahrzeug-Eigenfrequenzen und das Auftauchen von höherfrequenten (um 200 Hz),

stark gedämpften Eigenfrequenzen, die aus elastischen Biegeschwingungen der Schienen entstehen. Die Amplituden in der Hauptresonanz sind bei Modell 1 und Modell 2 praktisch gleich.

4. Im Vergleich der Frequenzgänge der Modelle mit ungekoppeltem und gekoppeltem Untergrund treten größere signifikante Abweichungen auf. Die Lage der Hauptresonanz ist zwar identisch, die Amplituden sind aber um ca. den Faktor 2 geringer. Die Kopplung der Schwellen durch den Untergrund bringt in diesem Falle also zusätzliche Dämpfung in das System. Die um 200 Hz auftretenden elastischen Schienenschwingungen sind ebenfalls stärker gedämpft. Zusätzlich treten bei Berücksichtigung der Untergrundkopplung jedoch weitere Resonanzen auf (hier bei etwa 290 Hz) deren Ursache in einer "Spuranpassung" von Wellenlängen im Untergrund und dem Schwellenabstand liegt und relativ geringe Dämpfung aufweisen.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß die durchgeführte Erweiterung des Programmsystems MEDYNA durch den komplexen Untergrundmodul auf der Basis eines Halbraummodells insbesondere bei der Analyse der Dynamik des Fahrzeuges und des Fahrweges durchaus sinnvoll und notwendig ist, da hieraus teils stabilisierende Effekte -Erhöhung der Dämpfung-, teils instabilisierende Effekte -wie instabile Eigenwerte und zusätzliche Resonanzen- erkannt und untersucht werden können. Für eine rein statische Untersuchung ist diese Erweiterung nicht notwendig.

Die hier durchgeführten Berechnungen sind nicht im Sinne einer umfassenden Analyse des Gesamtsystems Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund zu verstehen, sondern dienen nur dem Ziel zu erkennen, ob die Erweiterung mit dem Halbraummodell notwendig ist oder nicht. Da die erzielten ersten Ergebnisse diese Notwendigkeit klar bestätigen, erscheinen uns weitere grundsätzliche Arbeiten zur Analyse des Gesamtsystems unter Entwicklung eines von Vorlaufrechungen unabhängigen Oberbaumoduls für notwendig und von großer praktischer Relevanz.

LITERATUR:

/1/ RÜCKER, W.:

"Messung der Reaktionen mehrerer Schwellen, die über den Untergrund gekoppelt sind, infolge harmonischer Erregung einer starren Schwelle in verschiedenen Erregermoden." 4. Techn. Bericht zum R/S Vorhaben TV 78172, Teil D, 1980

/2/ PRANGE, B.:

"Mechanische und dynamische Parameter des Untergrundes Feld I", 1. Techn. Bericht zum R/S Vorhaben TV 78150, Teil B, 1979

/3/ PRANGE, B.:

Technische Berichte 2 - 3 zum R/S Vorhaben TV 78150, Teil B, 1980/81

/4/ ROHRMANN, R..; RÜCKER, W.:

"Dynamische Bodenkennwerte für Schotteroberbau aus der Halbraumtheorie" Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 36, Heft 9, 1987

/5/ RÜCKER, W.:

Technische Berichte 1 bis 3 zum R/S Vorhaben TV 78172, Teil D

/6/ RÜCKER, W.:

"Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellen-Systems mit dem Untergrund", BAM-Forschungsbericht 78, 1981

/7/ ROHRMANN, R., W. RÜCKER

"Dynamisches Verhalten eines Schienen-Schwellen-Verbundes auf elastischem Halbraum", 3. Techn. Bericht zum R/S Vorhaben TV 8214, 1986

/8/ PERGER, K.:

"Oberbaudynamik bei hohen Geschwindigkeiten" Techn.
Bericht zum R/S Vorhaben TV 7813, Teil B, 1982

/9/ WALLRAPP, O.; JASCHINSKI, A.:

"Dynamische Simulation mechanischer Systeme mit MEDYNA
- ein Rechenprogramm zur Analyse und Auslegung" ZEV-
-Glaser's Annalen 109 (1985) Nr.12, S. 463

/10/ WALLRAPP, O.; RICHTER, R.:

"Linearer Mehrkörper-Formalismus und Modelle für Ver-
bindungen" Bericht 4c zum ZFF Grundmodul, IB 515-
81-11, DFVLR, Oberpfaffenhofen (Oktober 1981)

/11/ WALLRAPP, O.:

"Die linearen Bewegungsgleichungen von elastischen
Mehrkörper-Fahrzeugen", Bericht 4b zum ZFF Grundmodul,
IB 515-80-4, DFVLR, Oberpfaffenhofen (Juni 1980)

/12/ MAUER, L.:

"Quasilineares Rad/Schiene Verbindungselement zum
Aufbau von Radsatz/Gleis-Modellen im Mehrkörper-For-
malismus" Bericht 5a zum ZFF Grundmodul, B 099006 -
EDS-042, 2.3000.01, MAN Neue-Technologie, EDS, München
(Mai 1983)

/13/ KIK, W.; STEINBORN, H:

"Quasistationärer Bogenlauf - Mathematisches Rad/
Schiene-Modell" ZFF- Bericht zum AP 23100 (Grundmo-
dul), Technische Universität Berlin, Institut für
Luft- und Raumfahrt, ILR Mitt. 112 (1982)

/14/ KOHL, C; GASCH, R.:

"Einfluß von tief- und hochabgestimmten Motoraufhängun-
gen auf das dynamische Verhalten eines Schnelltriebwa-
gens" Technische Universität Berlin, Institut für
Lust- und Baumfahrt, ILR Mitt. 75 (1980)

/15/ WALLRAPP, O.:

"Beschreibung einfacher Mehrkörper- Beispiele für
MEDYNA" DFVLR- Oberpfaffenhofen, Dok B06, Februar
1985.

/16/ KNOTHE, K.; KIK, W.:

LINDA I - Ein Programmsystem zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Schienenfahrzeugen" Technische Universität Berlin, ILR, ILR Bericht 11, 1976.

/17/ KIK, W.:

"Numerische Untersuchungen laufstabilisierender Maßnahmen an Eisenbahnfahrzeugen" TU Berlin, ILR, ILR-Bericht 46.

/18/ RÜCKER, W.:

"Dynamic Interaction of a Railroad-Bed with the subsoil", Soil Dynamics & Earthq. Eng. Conference, Southampton, 1982, Seite 435-448

/19/ MOELLE, D.; MAUER, L.; SCHMIDT, A.:

"Methoden der linearen und nichtlinearen Fahrzeugdynamik, dargestellt an Auslegungsrechnungen" VDI-Berichte Nr 510, 1984, S. 181 ff.

/20/ ROHRMANN, R.:

"Kopplung der Programmsysteme INTACT und MEDYNA für die Berechnung der Bodendynamik von Schienenfahrzeugen", Internes Papier, BAM 1988.

/21/ RIPKE, B.:

"Lateral- und Vertikalschwingungen einer auf diskreten Schwellen gelagerten Scheine unter harmonisch veränderlicher Einzellast", Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, ILR-Mitt. 190, 1987.

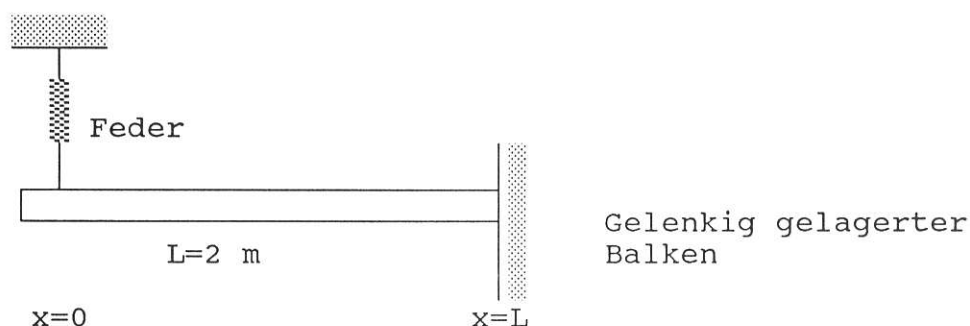
/22/ KIK, W.:

"CSGEO/RSGEO, ein Programm zur Berechnung von nichtlinearen Rad-Schiene-Geometriekonfigurationen", Ingenieurbüro Walter Kik in Berlin 41, 1988.

A N H A N G 1

Beispiel für die Berechnung eines elastischen Balkens und Überprüfung der im Programm MEDYNA errechneten Werte

Das im Programmpaket MEDYNA benutzte Eigenwertprogramm STAFEM und deren Schnittstellenparameter zum Hauptmodul sollen anhand eines einfachen Beispiels überprüft werden. Hierfür bietet sich ein Beispiel aus der Benutzer-Beschreibung von MEDYNA an /15/. Dieses Modell besteht aus einem homogenen, elastischen Balken, der auf einer Seite durch eine Feder gehalten wird, während sich an der anderen Seite ein Gelenk befindet.



Die Feder wird bei der Berechnung der Eigenformen des Balkens nicht berücksichtigt.

Homogene Lösung der Differentialgleichung des Balkens

$$(E I w''')'' + \mu \dot{w}' = 0 \quad (1)$$

Ansatz für die Zeitfunktion:

$$w(x,t) = W(x) \sin \Omega t \quad (2)$$

$$W'''' - \frac{\Omega^2 \mu}{EI} W = 0 \quad (3)$$

Ansatz für die Ortsfunktion:

$$W(x) = A e^{\alpha x} \quad (4)$$

$$\left(\alpha^4 - \frac{\Omega^2 \mu}{EI} \right) e^{\alpha x} = 0 \quad (5)$$

Lösung:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{\Omega^2 \mu}{EI}} \quad (6)$$

$$W(x) = A_1 \cosh(\alpha x) + A_2 \sinh(\alpha x) + A_3 \cos(\alpha x) + A_4 \sin(\alpha x)$$

$$W'(x) = \alpha (A_1 \sinh(\alpha x) + A_2 \cosh(\alpha x) - A_3 \sin(\alpha x) + A_4 \cos(\alpha x))$$

$$W''(x) = \alpha^2 (A_1 \cosh(\alpha x) + A_2 \sinh(\alpha x) - A_3 \cos(\alpha x) - A_4 \sin(\alpha x))$$

$$W'''(x) = \alpha^3 (A_1 \sinh(\alpha x) + A_2 \cosh(\alpha x) + A_3 \sin(\alpha x) - A_4 \cos(\alpha x))$$

Anpassung an die Randbedingungen:

$$\begin{aligned} 1) W''(0) &= 0 & 2) W'''(0) &= 0 \\ 3) W(L) &= 0 & 4) W''(L) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Aus 1) und 2) ergibt sich:

$$A_1 = A_3 \quad \text{und} \quad A_2 = A_4 \quad (9)$$

Aus 3) und 4) erhält man

$$\begin{aligned} A_1 \cos(\alpha L) + A_4 \sin(\alpha L) &= 0 \\ A_1 \cosh(\alpha L) + A_4 \sinh(\alpha L) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

mit der Bestimmungsgleichung für L

$$\cos(\alpha L) * \sinh(\alpha L) - \sin(\alpha L) * \cosh(\alpha L) = 0. \quad (11)$$

Die numerisch bestimmten Eigenwerte lauten

$$\begin{aligned} \alpha_1^+ &= \alpha_1 L = 3.9266 \\ \alpha_2^+ &= \alpha_2 L = 7.06858 \end{aligned} \quad (12)$$

Damit wird

$$\Omega_i = \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \left(\frac{\alpha_i^+}{L}\right)^2 \quad (13)$$

Aus (10) ergibt sich

$$\Gamma_i = \frac{A_4}{A_1} = - \frac{\cosh(\alpha_i L)}{\sinh(\alpha_i L)} = - \frac{\cos(\alpha_i L)}{\sin(\alpha_i L)} \quad (14)$$

Die Lösung lautet also

$$W_i(x) = A_1 (\cosh(\alpha_i x) + \cos(\alpha_i x) + \Gamma_i (\sinh(\alpha_i x) + \sin(\alpha_i x))) \quad (15)$$

$$W_i(x) = \alpha_i A_1 (\sinh(\alpha_i x) - \sin(\alpha_i x) + \Gamma_i (\cosh(\alpha_i x) + \cos(\alpha_i x)))$$

Das Integral über die Eigenformen lautet:

$$\bar{A} = \int_{x=0}^L W(x) \, dm$$

$$\bar{A}_i = \int_{x=0}^L W_i(x) \, \mu \, dx \quad (16)$$

$$\bar{A}_i = \frac{\mu A_1}{\alpha_i} (\sinh(\alpha_i x) + \sin(\alpha_i x) + \Gamma_i (\cosh(\alpha_i x) - \cos(\alpha_i x))) \quad (17)$$

Spezielle Zahlenwerte:

$$\frac{EI}{\mu} = 5.452 \quad \text{m}^4/\text{s}^2$$

$$L = 2 \quad \text{m}$$

$$\mu = 50 \quad \text{kg/m}$$

$$\Omega_1 = 9.0 \quad \text{s}^{-1}$$

$$\Omega_2 = 29.17 \quad \text{s}^{-1}$$

$$\Gamma_i = -1.0$$

$$\bar{A}_1 = 36.0$$

$$\bar{A}_2 = 20.8$$

$$W_1(x=0) = 2$$

$$W_2(x=0) = 2$$

$$W_1'(x=0) = 3.9$$

$$W_2'(x=0) = -7.06$$

$$W_1'(x=L) = 2.7$$

$$W_2'(x=L) = -5.0$$

Vergleich

Der Vergleich der diskret errechneten Werte mit den von MEDYNA errechneten Werten ergibt Übereinstimmung, wobei zu bemerken ist, daß im eingangs genannten Bericht /15/ andere Ableitungen ($W'(x)$) und andere Integralwerte ($\bar{A}_i = \text{doppelter Wert}$) benutzt werden.

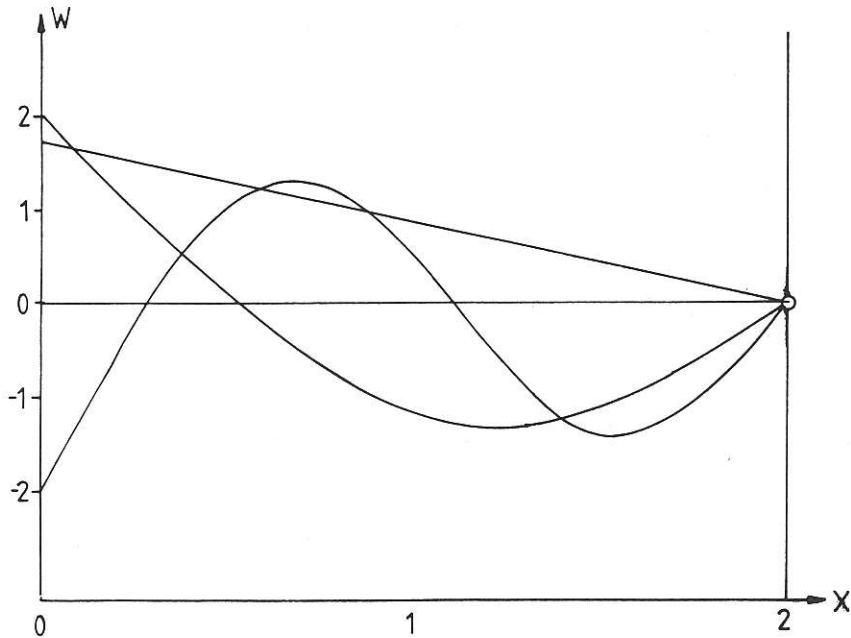


Bild A1:

Eigenformen des gelenkig gelagerten Balkens.

ANHANG 2:

Modelldatensatz für das Programm MEDYNA

```
*****
  Eingabe der Modellnummer
*****
1409
0 1          // Logbuch einschalten

*****
  Hauptroutine MODEL
*****
1 2          // HR1 MODELL R
'4/C.KOHL/BAM/2 SCHIE,22 EL-DOF/21 SCHW/OB:5-D/9.6./F/PAD-ST'

*****
  Hauptroutine KONFIG
*****
2 2          !!!!!!!!HR2KONFIG R
0.,0.,-9.81  !ERDBESCHLEUNIGUNG
0.,0.,0.,0,0.,0.,0.,0.,0.,0.  !REFERENZSYSTEM EO

-----
21          !KNOTENZAHL IN EO
  8.5 0. -.336 --- SCHWELLE BODEN ---
  9.1 0. -.336
  7.9 0. -.336
  9.7 0. -.336
  7.3 0. -.336 5
10.3 0. -.336
  6.7 0. -.336
10.9 0. -.336
  6.1 0. -.336
11.5 0. -.336 10
  5.5 0. -.336
12.1 0. -.336
  4.9 0. -.336
12.7 0. -.336
  4.3 0. -.336 15
13.3 0. -.336
  3.7 0. -.336
13.9 0. -.336
  3.1 0. -.336
14.5 0. -.336 20
  2.5 0. -.336
```

		!ZAHL DER KOERPER										
27												
'RADSATZ 1'	9.9	0.	0.46	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 1
'RADSATZ 2'	7.1	0.	0.46	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 2
'DREHGESTELL V'	8.5	0.	0.50	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 3
'WAGENKASTEN'	0.	0.	1.607	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 4
'SCHIENE L'	8.5	0.75	-0.068	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 5
'SCHIENE R'	8.5	-0.75	-0.068	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 6
'SCHWELLE 1'	8.5	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 7
'SCHWELLE 2'	9.1	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 8
'SCHWELLE 3'	7.9	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 9
'SCHWELLE 4'	9.7	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 10
'SCHWELLE 5'	7.3	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 11
'SCHWELLE 6'	10.3	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 12
'SCHWELLE 7'	6.7	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 13
'SCHWELLE 8'	10.9	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 14
'SCHWELLE 9'	6.1	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 15
'SCHWELLE 10'	11.5	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 16
'SCHWELLE 11'	5.5	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 17
'SCHWELLE 12'	12.1	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 18
'SCHWELLE 13'	4.9	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 19
'SCHWELLE 14'	12.7	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 20
'SCHWELLE 15'	4.3	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 21
'SCHWELLE 16'	13.3	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 22
'SCHWELLE 17'	3.7	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 23
'SCHWELLE 18'	13.9	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 24
'SCHWELLE 19'	3.1	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 25
'SCHWELLE 20'	14.5	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 26
'SCHWELLE 21'	2.5	0.0	-0.236	0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	! 27

0,1,1,1,0,1, 0,0		1	DOF, HILFSB., IDENT.
0,1,1,1,0,1, 0,0		2	
0,1,1,1,1,1, 0,0		3	
0,0,1,0,0,0, 0,0		4	
0 0 1 0 1 0 0 0	- SCHIENE LINKS -	5	
0 0 1 0 1 0 0 0	RECHTS	6	
0 0 1 0 0 0 0 0	- 1.SCHWELLE -	7	
0 0 1 0 0 0 0 7	2	8	
0 0 1 0 0 0 0 7	3	9	
0 0 1 0 0 0 0 7	4	10	
0 0 1 0 0 0 0 7	5	11	
0 0 1 0 0 0 0 7	6	12	
0 0 1 0 0 0 0 7	7	13	
0 0 1 0 0 0 0 7	8	14	
0 0 1 0 0 0 0 7	9	15	
0 0 1 0 0 0 0 7	10	16	
0 0 1 0 0 0 0 7	11	17	
0 0 1 0 0 0 0 7	12	18	
0 0 1 0 0 0 0 7	13	19	
0 0 1 0 0 0 0 7	14	20	
0 0 1 0 0 0 0 7	15	21	
0 0 1 0 0 0 0 7	16	22	
0 0 1 0 0 0 0 7	17	23	
0 0 1 0 0 0 0 7	18	24	
0 0 1 0 0 0 0 7	19	25	
0 0 1 0 0 0 0 7	20	26	
0 0 1 0 0 0 0 7	21	27	


```

-----
7,1,0,0,0                                KNOTEN, SCHWERP.
7,1,0,0,0
33,1,0,0,0
19,1,0,0,0
24 1  22 4 0    SCHIENE LINKS  KNANZ, NR-EO, ANZ-EL-DOF, OBB
24 1  22 4 0    RECHTS
 4  1   0 0 0    SCHWELLE
-----

```

```

-----
0.,0.,0.  ----- -1-  --- K1 --- RS 1 ---
0.,1.,0.           2
0.,-1.,0.          3
-1.4,1.,0.         4
-1.4,0.,1.         5
0., 0.75, .0       6
0.,-0.75, .0       7
-----

```

```

-----
0.,0.,0.  ----- -1-  --- K2 --- RS 2 ---
0.,1.,0.           2
0.,-1.,0.          3
1.4,-1.,0.         4
1.4,0.,-1.         5
0., 0.75, .0       6
0.,-0.75, .0       7
-----

```

```

-----
0.,0.,0.  ----- -1-  --- K3 --- LAUFWERKRAHMEN ---
.4,1.,-.04         2
.4,-1.,-.04        3
-.4,1.,-.04        4
-.4,-1.,-.04       5
1.4,2.,-.04        6
1.4,-2.,-.04       7
-1.4,2.,-.04       8
-1.4,-2.,-.04      9
1.4,1.,.42         10
1.4,-1.,.42        11
-1.4,1.,.42        12
-1.4,-1.,.42       13
1.4,1.,.42         14
1.4,-1.,.42        15
-1.4,1.,.42        16
-1.4,-1.,.42       17
0.,.95,0.          18
0.,-.95,0.         19
0.,0.,.25          20
0.,0.,.25          21
1.,.95,.25         22
1.,-.95,.25        23
-.225,0.,-.25     24
0.,.5,-.25        25
0.,0.,-.25        26
1.,0.,0.          27
-1.4 1.287 .37     28
-1.4 -1.287 .37   29
.75, -.42, .48    30
-.75, .42, .48   31
.55, 1.25, -.1    32
-.55, -1.25, -.1  33
-----

```

0.,0.,0.	-----	-1-	----	K4	----	WK	----
8.5, .95, 9.893							
8.5, -.95, 9.893							
8.5, .95, -.857							
8.5, -.95, -.857		5					
8.5, .95, -.857							
8.5, -.95, -.857							
8.725, 0., -1.357							
8.5, -.5, -1.357							
8.5, 0., -1.107		10					
8.5, 0., -1.107							
7.98, 1.287, -.737							
7.98, -1.287, -.737							
9.25, -1.27, -.627							
7.75, 1.27, -.627		15					
9.05, 1.25, -.757							
7.95, -1.25, -.757							
9.25, 1.27, -.627							
7.75, -1.27, -.627							

0.0,0.,0.	-----	1	----	K5	----	SCHIENE LINKS	----
1.4 0. 0.068		2		RS 1 L			
-1.4 0. 0.068		3		RS 2 L			
0.0 0. -0.068		4		1. SCHWELLE			
0.6 0. -0.068		5		2. SCHWELLE			
-0.6 0. -0.068		6		3. SCHWELLE			
1.2 0. -0.068		7		4. SCHWELLE			
-1.2 0. -0.068		8		5. SCHWELLE			
1.8 0. -0.068		9		6. SCHWELLE			
-1.8 0. -0.068		10		7. SCHWELLE			
2.4 0. -0.068		11		8. SCHWELLE			
-2.4 0. -0.068		12		9. SCHWELLE			
3.0 0. -0.068		13		10. SCHWELLE			
-3.0 0. -0.068		14		11. SCHWELLE			
3.6 0. -0.068		15		12. SCHWELLE			
-3.6 0. -0.068		16		13. SCHWELLE			
4.2 0. -0.068		17		14. SCHWELLE			
-4.2 0. -0.068		18		15. SCHWELLE			
4.8 0. -0.068		19		16. SCHWELLE			
-4.8 0. -0.068		20		17. SCHWELLE			
5.4 0. -0.068		21		18. SCHWELLE			
-5.4 0. -0.068		22		19. SCHWELLE			
6.0 0. -0.068		23		20. SCHWELLE			
-6.0 0. -0.068		24		21. SCHWELLE			

0.0,0.,0.	-----	1	----	K6	----	SCHIENE RECHTS	----
1.4 0. 0.068		2		RS 1 L			
-1.4 0. 0.068		3		RS 2 L			
0.0 0. -0.068		4		1. SCHWELLE			
0.6 0. -0.068		5		2. SCHWELLE			
-0.6 0. -0.068		6		3. SCHWELLE			
1.2 0. -0.068		7		4. SCHWELLE			

-1.2	0.	-0.068	8	5. SCHWELLE
1.8	0.	-0.068	9	6. SCHWELLE
-1.8	0.	-0.068	10	7. SCHWELLE
2.4	0.	-0.068	11	8. SCHWELLE
-2.4	0.	-0.068	12	9. SCHWELLE
3.0	0.	-0.068	13	10. SCHWELLE
-3.0	0.	-0.068	14	11. SCHWELLE
3.6	0.	-0.068	15	12. SCHWELLE
-3.6	0.	-0.068	16	13. SCHWELLE
4.2	0.	-0.068	17	14. SCHWELLE
-4.2	0.	-0.068	18	15. SCHWELLE
4.8	0.	-0.068	19	16. SCHWELLE
-4.8	0.	-0.068	20	17. SCHWELLE
5.4	0.	-0.068	21	18. SCHWELLE
-5.4	0.	-0.068	22	19. SCHWELLE
6.0	0.	-0.068	23	20. SCHWELLE
-6.0	0.	-0.068	24	21. SCHWELLE

0.	0.	0.	---	K7 BIS 27 : SCHWELLE	---
0.	0.75	0.1		SCHIENE L	
0.	-0.75	0.1			R
0.	0.0	-0.1		BODEN	

```

*****
1750.,950.,100.,950.      !-- MASEN --- RADSATZ VORNE
1742.,950.,100.,950.      !                RADSATZ HINTEN
2830.,1570.,1200.,2680.   !                LAUFWERKRAHMEN
16500. 35400. 791600. 791600. !                HALBER WAGENKASTEN
588. 1000. 10. 1000.      !                SCHIENE LINKS
588. 1000. 10. 1000.      !                SCHIENE RECHTS
340.  146.  6.6 24.7      !                SCHWELLEN
*****
1 1      -- FREQUENZ, LAGE --- OBERBAUDATEN ---
400 0 1200.0 0.0 ! IOM,IOMART, OM,DOM
2 0.0      ! ILAG,XLAG
0.001      ! DXLAG

```

```

5 3 0      -- UZ --- ELASTISCHE STRUKTUR ---
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

```

13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

N

2.1E11	1.8E-5	49.	5.0E2	.	-5440.	SCHWELLE 20
.	.	.	.	.	.	SCHWELLE 18
.	.	.	.	.	.	SCHWELLE 16
.	.	.	.	.	.	SCHWELLE 14
.	.	.	.	.	.	SCHWELLE 12
.	.	.	.	.	.	SCHWELLE 10
.	.	.	.	0.	-5440. !!	SCHWELLE 8
.	.	.	.	0.	-5440. !!	SCHWELLE 6
.	.	0.	00.	57200.	!!	RADSATZ 1
.	.	5.0E2	0.	-5440.	!!	SCHWELLE 4
.	.	.	.	.	!!	SCHWELLE 2
.	.	.	.	.	0 0 . 4	SCHW 1
.	.	.	.	.	!!	SCHWELLE 3
.	.	.	.	.	!!	SCHWELLE 5
.	.	0.	00.	57200.	!!	RADSATZ 2
.	.	5.0E2	0.	-5440.	!!	SCHWELLE 7
.	.	.	0.	-5440.	!!	SCHWELLE 9
.	.	5.0E2	0.	-5440.		SCHWELLE 11
.	.	5.0E2	0.	-5440.		SCHWELLE 13
.	.	5.0E2	0.	-5440.		SCHWELLE 15
.	.	5.0E2	0.	-5440.		SCHWELLE 17
.	.	5.0E2	0.	-5440.		SCHWELLE 19
.	.	5.0E2	0.	-5440.		SCHWELLE 21

--EINGABEN ZUM OBERBAUMODUL--

1 1 5 NOB, NOHOM, NOBAND
0 0 1 0 0 0 DOF: OBB
21 NSCHW
.6 .26 1.8E8 300. 0.75 0.25 --- A0, B, G, VS
0. 0. 0. 0. 0. 0. - SCHIENE/SCHELLE STEIFIGKEIT
0. 0. 0. 0. 0. 0. DAEMPfung
.35E10 .35E10 .18E9 0. 0. 0. - SCHWELLE/BODEN STEIFIGKEIT
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0. - DAEMPfung

0 !--- APK. ANFANG --- 1
1 1 --- R/S 2
1 2 --- 3

2	7	---	SCHWELLEN	4
2	8	---	2	5
2	9	---	3	6
2	10	---	4	7
2	11	---	5	8
2	12	---	6	9
2	13	---	7	10
2	14	---	8	11
2	15	---	9	12
2	16	---	10	13
2	17	---	11	14
2	18	---	12	15
2	19	---	13	16
2	20	---	14	17
2	21	---	15	18
2	22	---	16	19
2	23	---	17	20
2	24	---	18	21
2	25	---	19	22
2	26	---	20	23
2	27	---	21	24

HAUPTROUTINE VERBIN

3 2 == VERBINDUNGSELEMENTE ==

99

'RADSATZ 1 L CX+'	,1,2,3,2,0	1
'RADSATZ 1 R CX+'	,1,3,3,3,1	
'RADSATZ 1 L CY+'	,1,2,3,6,0	
'RADSATZ 1 R CY+'	,1,3,3,7,3	
'RADSATZ 1 L CZ+'	,1,2,3,10,0	5
'RADSATZ 1 R CZ+'	,1,3,3,11,5	
'RADSATZ 1 L DZ+'	,1,2,3,14,0	
'RADSATZ 1 R DZ+'	,1,3,3,15,7	
'RAD/SCHIENE 1 L'	,5,2,1,6,0	
'RAD/SCHIENE 1 R'	,6,2,1,7,9	10
'RADSATZ 2 L CX+'	,2,2,3,4,1	
'RADSATZ 2 R CX+'	,2,3,3,5,1	
'RADSATZ 2 L CY+'	,2,2,3,8,3	
'RADSATZ 2 R CY+'	,2,3,3,9,3	
'RADSATZ 2 L CZ+'	,2,2,3,12,5	15
'RADSATZ 2 R CZ+'	,2,3,3,13,5	
'RADSATZ 2 L DZ+'	,2,2,3,16,7	
'RADSATZ 2 R DZ+'	,2,3,3,17,7	
'RAD/SCHIENE 2 L'	,5,3,2,6,9	
'RAD/SCHIENE 2 R'	,6,3,2,7,9	20
'LUFTF. V L CX'	,3,22,4,6,0	
'LUFTF. V R CX'	,3,23,4,7,21	
'LUFTF. V L CY'	,3,20,4,4,0	
'LUFTF. V R CY'	,3,21,4,5,23	
'LUFTF. V L CZ'	,3,18,4,2,0	
'LUFTF. V R CZ'	,3,19,4,3,25	
'DREHZ. V CX'	,3,24,4,8,0	
'DREHZ. V CY'	,3,25,4,9,0	

'DREHZ. RCPZ',3,26,4,10,0
 'WANKST. V',3,27,4,11,0 30
 'V L DX ',3,28,4,12,0
 'V R DX ',3,29,4,13,31
 'V V DY R',3,30,4,14,0
 'V H DY L',3,31,4,15,33
 'V L DZ',3,32,4,16,0
 'V R DZ',3,33,4,17,35

'SCHW SCH L 1'	7	2	5	4	0	---	1.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 1'	7	3	6	4	0			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 1'	0	1	7	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 2'	8	2	5	5	37	40	2.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 2'	8	3	6	5	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 2'	0	2	8	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 3'	9	2	5	6	37		3.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 3'	9	3	6	6	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 3'	0	3	9	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 4'	10	2	5	7	37		4.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 4'	10	3	6	7	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 4'	0	4	10	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 5'	11	2	5	8	37		5.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 5'	11	3	6	8	38	50		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 5'	0	5	11	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 6'	12	2	5	9	37		6.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 6'	12	3	6	9	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 6'	0	6	12	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 7'	13	2	5	10	37		7.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 7'	13	3	6	10	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 7'	0	7	13	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 8'	14	2	5	11	37		8.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 8'	14	3	6	11	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 8'	0	8	14	4	0	60		BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L 9'	15	2	5	12	37		9.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R 9'	15	3	6	12	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 9'	0	9	15	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L10'	16	2	5	13	37		10.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R10'	16	3	6	13	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 10'	0	10	16	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L11'	17	2	5	14	37		11.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R11'	17	3	6	14	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 11'	0	11	17	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L12'	18	2	5	15	37	70	12.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R12'	18	3	6	15	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 12'	0	12	18	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L13'	19	2	5	16	37		13.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R13'	19	3	6	16	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 13'	0	13	19	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L14'	20	2	5	17	37		14.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R14'	20	3	6	17	38			SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 14'	0	14	20	4	0			BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L15'	21	2	5	18	37		15.	SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R15'	21	3	6	18	38	80		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 15'	0	15	21	4	0			BODEN - SCHWELLE

'SCHW SCH L16'	22	2	5	19	37		16. SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R16'	22	3	6	19	38		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 16'	0	16	22	4	0		BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L17'	23	2	5	20	37		17. SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R17'	23	3	6	20	38		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 17'	0	17	23	4	0		BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L18'	24	2	5	21	37		18. SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R18'	24	3	6	21	38		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 18'	0	18	24	4	0	90	BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L19'	25	2	5	22	37		19. SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R19'	25	3	6	22	38		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 19'	0	19	25	4	0		BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L20'	26	2	5	23	37		20. SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R20'	26	3	6	23	38		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 20'	0	20	26	4	0		BODEN - SCHWELLE
'SCHW SCH L21'	27	2	5	24	37		21. SCHWELLEN - SCHIENE LINKS ---
'SCHW SCH R21'	27	3	6	24	38		SCHWELLEN - SCHIENE RECHTS
'BOD SCHW 21'	0	21	27	4	0	99	BODEN - SCHWELLE

41,44 0 0	---	PRIM CX+	==	ART DER VERBINDUNG	==
0.					
0.					
41,44 0 0		CY+			
0.					
0.					
41 0 0 0		CZ+			
-4.7E4					
-4.7E4					
44 0 0 0		DZ+			
22 0 0 0	---	R/S 1.RADSATZ	---		
4,1.,0.,0.,0.,1.,0.					
0.,0.,-5.7E4					
4,1.,0.,0.,0.,1.,0.					
0.,0.,-5.7E4					
0.	---	PRIM CX+2	---		
0.					
0.		Y			
0.					
-4.7E4		Z			
-4.7E4					
4,1.,0.,0.,0.,1.,0.	---	R/S 2.RADSATZ	---		
0.,0.,-5.7E4					
4,1.,0.,0.,0.,1.,0.					
0.,0.,-5.7E4					
41 0 0 0	---	LUFTFEDER CX	---		
0.					
0.					
41 0 0 0		CY			
0.					
0.					
41 0 0 0					
-8.0937E4		CZ			
-8.0937E4					
41,44 0 0	---	DREHZAPFEN CX	---		

```

0.
41,0 0 0 0          CY
0.
42 0 0 0          CFZ
0.
42 0 0 0          --- WANKSTUETZE CFY ---
0.
44 0 0 0          --- FEDER LAENGS ---
44 0 0 0          --- SCHLINGER-DAEMPFER DY ---
44 0 0 0          --- SEKUNDAER-DAEMPFER DZ ---
61 0 0 0          --- SCHIENE-SCHWELLE LINKS ---
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
61 0 0 0          --- SCHIENE RECHTS ---
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
61 0 0 0          --- BODEN SCHWELLE ---
  4 1. 0. 0. 0. 1. 0.          1
    0. 0. -20.0E3 0. 0. 0.
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
61 0 0 0          --- BODEN SCHWELLE ---
  4 1. 0. 0. 0. 1. 0.          2
    0. 0. -20.0E3 0. 0. 0.
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
61 0 0 0          --- BODEN SCHWELLE ---
  4 1. 0. 0. 0. 1. 0.          3
    0. 0. -20.0E3 0. 0. 0.
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
61 0 0 0          --- BODEN SCHWELLE ---
  4 1. 0. 0. 0. 1. 0.          4
    0. 0. -20.0E3 0. 0. 0.
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
61 0 0 0          --- BODEN SCHWELLE ---
  4 1. 0. 0. 0. 1. 0.          5
    0. 0. -20.0E3 0. 0. 0.
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
61 0 0 0          --- BODEN SCHWELLE ---
  4 1. 0. 0. 0. 1. 0.          6
    0. 0. -20.0E3 0. 0. 0.
  4 1. 0. 0. 0. 1.
    0. 0. -10.0E3
  4 1. 0. 0. 0. 1.

```


0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	7
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	8
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	9
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	10
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	11
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	12
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	13
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	14
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	

0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	---- BODEN SCHWELLE ----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	15
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	---- BODEN SCHWELLE ----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	16
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	---- BODEN SCHWELLE ----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	17
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	---- BODEN SCHWELLE ----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	18
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	---- BODEN SCHWELLE ----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	19
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	---- BODEN SCHWELLE ----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	20
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
4 1. 0. 0. 0. 1.	
0. 0. -10.OE3	
61 0 0 0	---- BODEN SCHWELLE ----
4 1. 0. 0. 0. 1. 0.	21
0. 0. -20.OE3 0. 0. 0.	

 DATEN DER VERBINDUNGSELEMENTE

```

1          --- R/S-DATEN ---
2          --- NEU : KENNUNG - 0=STANDARD(JOLY) ; 1=ORE; 2=QUASILIN.
0.0026      AMPLITUDE BEI KENNUNG = 2 (4 ZEILEN FEHLEN)
0.0         LAENGSSCHLUPF
8.0E10,0.277,0.4 WEITER : G,NUE,MUE
-1         LINKS
1         RECHTS
-1
6.2E7      CX+ ----- PRIMAER ----- STEIFIGKEITEN -----
4.2E7      CY+          "
1.0E6      CZ+          "
1.0E5      CX          LUFTFEDER
1.0E5      CY          "
3.0E5      CZ          "
2.5E6      CX          DREHZ.
3.5E4      CY          "
7.0E3      CPFZ FZ ----- DREHSTEIFIGKEITEN -----
8.5E5      WANKST.
1.0E3      DX+ ----- PRIMAER ----- DAEMPFUNGEN -----
1.0E3      DY+          "
2.0E4      DZ+          "
1.0E3      DX          DREHZ.
2.0E5      V DX SCHLINGERDAEMPFER
2.0E4      DY          QUERDAEMPER          VERTIKAL/LUFTFEDER
2.0E4      DZ          LUFTFEDER
0. 0. 6.4E9 0. 0. 0. ---- 61-ER ELEM SCHIENE/SCHWELLE LINKS C..
0. 0. 6.3E4 0. 0. 0.                                     D..
0. 0. 6.4E9 0. 0. 0.                                     RECHTS C..
0. 0. 6.3E4 0. 0. 0.                                     D..
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  PARAMETER FUER SCHWELLE/BODEN, STEIFIGKEIT --
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.  DAEMPfung (SCHOTTER)
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 2 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 3 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 4 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 5 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 6 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 7 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 8 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 9 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 10 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 11 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0.  - 12 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
  
```

```

.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 13 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 14 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 15 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 16 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 17 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 18 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 19 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 20 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.
.35E8 .35E8 .18E9 0. 0. 0. - 21 -
.52E5 .52E5 .82E5 0. 0. 0.

```

```

*****
HAUPTROUTINE REFSYS
*****
4 2 .== HR REFSYS ==
'GERADEAUSFAHRT', 1,0
1,2.0

```

```

*****
HAUPTROUTINE ROTOR
*****
5 2 == HR ROTOR ==
2
'RADSATZ 1',1,2,0.,1.,0.,100.
.46
'RADSATZ 2',2,2,0.,1.,0.,100.
.46

```

```

*****
HAUPTROUTINE ANREG
*****
6 2 == HR ANREG ==
0
0 0 0 0. RS1 - H
0 0 0 0. V
0 0 0 0. R
0 0 0 0. RS2 - H
0 0 0 0. V
0 0 0 0. R
0 0 0 0. RS3 - H
0 0 0 0. V
0 0 0 0. R
0 0 0 0. RS4 - H
0 0 0 0. V

```

```

0 0 0 0.          R
0 0 0 0. EL 61 - 39 X  - 1 - 3 -  BODEN SCHWELLE ---
0 0 0 0.          Y
1 0 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 42 X  - 2 - 6 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 45 X  - 3 - 9 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 48 X  - 4 - 12 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 51 X  - 5 - 15 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 54 X  - 6 - 18 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 57 X  - 7 - 21 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 60 X  - 8 - 24 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 63 X  - 9 - 27 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0. EL 61 - 66 X  - 10 - 30 -
0 0 0 0.          Y

```

1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 69	X	- 11 -	33 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 72	X	- 12 -	36 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 75	X	- 13 -	39 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 78	X	- 14 -	40 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 81	X	- 15 -	41 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 84	X	- 16 -	42 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 87	X	- 17 -	43 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 90	X	- 18 -	44 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			
0 0 0 0.		FZ			
0 0 0 0.	EL 61 - 93	X	- 19 -	45 -	
0 0 0 0.		Y			
1 1 0 0.		Z			
0 0 0 0.		FX			
0 0 0 0.		FY			

```

0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0.  EL 61 - 96 X   - 20 - 46 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ
0 0 0 0.  EL 61 - 99 X   - 21 - 47 -
0 0 0 0.          Y
1 1 0 0.          Z
0 0 0 0.          FX
0 0 0 0.          FY
0 0 0 0.          FZ

```

'BODEN-WACKELN' 0. 1

HAUPTROUTINE AUSGANG

7 2 == HR AUSGANG ==

0

34 1 0 0

'EI1 - RS1' 0 1

'EI2 - RS1' 0

'EI3 - RS1' 0

'EI4 - RS1' 0

'EI5 - RS2' 0

'EI6 - RS2' 0

'EI7 - RS2' 0

'EI8 - RS2' 0

'EI9 - DR' 0

'EI10 - DR' 0 10

'EI11 - DR' 0

'EI12 - DR' 0

'EI13 - WK' 0

'EI14 - SL UZ' 0

'SL EL-3' 0

'SL EL-5' 0

'SL EL-7' 0

'SL EL-9' 0

'SL EL-11' 0

'SL EL-13' 0 20

'SL EL-17' 0

'SL EL-19' 0

'SL EL-21' 0

'SW 1' 0

'SW 2' 0

'SW 4' 0

'SW 6' 0

'SW 8' 0

'SW 10' 0

'SW 12' 0 30

'SW 14' 0

'SW 16' 0

'SW 18' 0

'SW 20' 0

0
2
1 1 1.
2 2 1.
3 3 1.
4 4 1.
5 5 1.
6 6 1.
7 7 1.
8 8 1.
9 9 1.
10 10 1.
11 11 1.
12 12 1.
13 13 1.
14 14 1.
15 15 1.
16 16 1.
17 17 1.
18 18 1.
19 19 1.
20 20 1.
21 21 1.
22 22 1.
23 23 1.
24 24 1.
25 25 1.
26 26 1.
27 27 1.
28 28 1.
29 29 1.
30 30 1.
31 31 1.
32 32 1.
33 33 1.
34 34 1.
Z
Z
0

```
*****  
  HAUPTROUTINE NEUKON  
*****  
32 2 == NEUKON ==  
  7 1  
  0 0  
  1 .001 .1 .01 5.  
0
```

```
*****  
  HAUPTROUTINE GEKSYS  
*****  
11 2 == GEKSYS GLEICHUNGSaufbau ==  
  1
```



```
*****
HAUPTROUTINE GEKAUS
*****
13 2 == AUSGANGS MATRIX AUFBAU ==
```

```
*****
HAUPTROUTINE EIWE
*****
21 2 == EIGENWERTE ==
0
0
Z
Z
Z
```

DANKSAGUNG

Es ist uns ein Bedürfnis dem Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) für die Förderung dieses Vorhabens zu danken. Zu Dank verpflichtet sind wir auch unserem Kollegen Rolf Rohrmann, der das Programm zur Übergabe der INTACT-Rechenergebnisse an MEDYNA erstellte.

- Nr. 58/1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feiblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmatrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereometrie. Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/(vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltritzneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmur Ledworski
- Nr. 83/1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982
Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ — Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983
Untersuchungen zur Zertallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983
Untersuchungen der Störerschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983
Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984
Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985
Zur Wirkung der Schrumpfbegrenzung auf den Schweißspannungszustand und das Sprüdbrechverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985
Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM I. R.) und Dr. Bernhard Kropp
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Anđex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützw
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)

- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985
Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985
Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung
Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht
- Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/1986
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzter und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/1986
Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Förberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/1986
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
von Dr. rer. nat. Dettlef Rennoch
- Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/1986
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas
- Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/1986 (vergriffen)
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst
- Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/1986
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X/1986
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 131/ISBN 3-88 314-585-8/1986
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 132/ISBN 3-88 314-595-5/1987
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
von Dipl.-Ing. Christian Herold und Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Vogdt
- Nr. 133/ISBN 3-88 314-609-9/1987 (vergriffen)
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
von Dipl.-Ing. Mathias Woydt und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 134/ISBN 3-88 314-615-3/1987
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
von Dr. Götz Andreae und Gottfried Niessen
- Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/1987
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
von Dipl.-Ing. Jörg Ludwig, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Mischke und Dipl.-Ing. Armin Ulrich
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
von Prof. Dr. rer. silv. Hans-Joachim Deppe und Klaus Schmidt
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Komponentensicherheit
Projektleiter: Dr. Dietmar Aurich
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
von Dipl.-Geol. Michael Dogunke und Dr.-Ing. Frank Buchhardt
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle.
von Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski und Sven-Peter Scholz
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Ing. Günter Krüger, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Dr. rer. nat. Sigrid von Zahn-Ullmann
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen
- zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Michael Weber, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr.-Ing. Jürgen Altes, Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhrer
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
von Dipl.-Ing. Wolfgang Schön und Dipl.-Ing. Michael Mallon
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
von Dipl.-Ing. Hans-Dieter Kleinschrodt
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
von Dipl.-Ing. Wilfried Müller
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988
Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhrer
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988
VG3D Zeichenprogramm für die Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch-Saworski
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
von Dr.-Ing. Günther Plauk, Dipl.-Ing. Günter Kretschmann, Dipl.-Ing. Rolf-G. Rohrmann
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander, Professor Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
von Dr. rer. nat. Konrad Breitkreutz, Dr. rer. nat. Rüdiger Uttech, Dr.-Ing. Kurt Haedecke
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
von Dr.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
von Dr.-Ing. Günter Klamrowski, Dipl.-Ing. Paul Neustupny, Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe, Ing. Klaus Schmidt und Dr.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dr.-Ing. Klaus Brandes
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht —
von Dr.-Ing. Rolf Wäsche und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6

von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989

Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten

von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989

Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen

von Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989

Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben

von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner

Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989

Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen

von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner, Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989

Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger

Rolf Helms, Bernd Jaenicke, Hartmut Wolter, Claus-Peter Bork

Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989

Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission.

Teil B: Textilien

von Dipl.-Chem. Petra Göbel, Dr.-Ing. Lothar Meckel, Dr. rer. nat. Wolfgang Schiller

Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989

Modelle für Stereologische Analysen

von Dr. rer. nat. Konrad Breitzkreutz

Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989

Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen

von Dipl.-Ing. Alkiviadis Mitakidis, Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990

Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels

von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dr.-Ing. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990

Integration der Untergrounddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)

von Dipl.-Ing. Christian Kohl, Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990

Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen

von Dr. rer. nat. Peter Studt, Dr. agr. Waltraut Kerner, Dr. Tin Win

**Bundesanstalt
für Materialforschung
und -prüfung (BAM)**

**Federal Institute
for Materials
Research and Testing**

**Institut Fédéral pour la
Recherche et l'Essai des
Materiaux**

Unter den Eichen 87
D-1000 Berlin 45

Telefon (030) 8104-1
Telex 183 261 bamb d
Telegramme BAM BERLIN

Telefax (030) 8 112 029
Teletex 2627-308 372=bamb

- **Berichte**
- **Gutachten**
- **Zulassungen**
- **Zertifikate**
- **Tagungspapiere**
- **Prüfungszeugnisse**
- **Prüfstellenanerkennungen**

