

ISBN 3-88314-825-3

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

# **Forschungsbericht 155**

**Zur Entstehung und Ausbreitung  
von Schienenverkehrserschütterungen:  
Theoretische Untersuchungen und Messungen  
am Hochgeschwindigkeitszug  
Intercity Experimental**

von Dr.-Ing. Lutz Auersch

Oktober 1988

194 Seiten, 112 Abbildungen

### D a n k s a g u n g

An erster Stelle möchte ich Herrn S. Said danken, der für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Messungen am Intercity Experimental verantwortlich war. Meinem Laborleiter Herrn Dr. W. Rücker danke ich dafür, daß ich dieses interessante Forschungsvorhaben bearbeiten durfte, und für die Entwicklung und Bereitstellung der Meß- und Auswertetechnik. Für letzteres danke ich ebenfalls meinen Kollegen Herrn N. Semrau und M. Manjock, sowie den Herren H. Hebener, U. Schmidt und W. Schmid, den beiden letztgenannten auch für die Mitwirkung bei den Messungen.

Allen Kollegen der Rechenstelle danke ich für den Aufbau und die Bereitstellung der Rechnerleistungen, sowie den Kollegen von BAM 7.1, die an der Entstehung dieses Berichtes mitgewirkt haben, namentlich der Zeichnerin Frau B. Nisch und Frau R. Denaro danke ich für das Schreiben des Textes.

Schließlich danke ich den Mitarbeitern der Deutschen Bundesbahn, die uns die Messungen am Intercity Experimental ermöglicht und uns vor Ort unterstützt haben, und dem Bundesministerium für Forschung und Technologie für die finanzielle Förderung, die mir seit 1979 die Beschäftigung mit dem Thema Schienenverkehrserschütterungen ermöglichte.

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 © 1988 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

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung hat sich in den vergangenen 10 Jahren sehr intensiv mit dynamischen Problemen des Schienenverkehrs in einer Reihe von Forschungsvorhaben beschäftigt. Der Bericht gibt einen Überblick über diese Aktivitäten und stellt neuere Ergebnisse insbesondere zur Erschütterungsproblematik, damit verbunden auch Ergebnisse zur Fahrzeugdynamik und zur Fahrweg- und Untergrundbelastung dar. Es werden einerseits allgemeine Aussagen zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen abgeleitet, andererseits die Erschütterungen bei Versuchsfahrten des Hochgeschwindigkeitszuges Intercity Experimental gemessen und unter Berücksichtigung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik umfassend nachgerechnet (simuliert). Theorie und Messungen ergeben übereinstimmend wichtige Folgerungen für den Hochgeschwindigkeitsverkehr.

Im einzelnen werden verschiedene Erschütterungsursachen untersucht und die Größe der anregenden Kräfte abgeschätzt. Zur Erschütterungsausbreitung im Boden wird ausgehend von der Gesetzmäßigkeit für den homogenen elastischen Halbraum der Einfluß der Materialdämpfung (hysteretisch, nichtlinear), der Breitbandigkeit und der Impulsartigkeit der Anregung und der Inhomogenität des Bodens diskutiert. Das Amplituden-Abstands-Gesetz für Schienenverkehrsererschütterungen, die durch eine Anzahl über die gesamte Zuglänge verteilter Lasten entstehen, wird bestimmt.

Während der Versuchs- und Rekordfahrten des Intercity Experimental auf der Neubaustrecke bei Würzburg wurden die Schwingungen des Fahrwegs und die Erschütterungen in der Umgebung bei Geschwindigkeiten zwischen 20 und 300 km/h gemessen. Die Untergrundeigenschaften des Meßortes wurden durch harmonische Wellenfeldmessungen bestimmt. Mit diesen Untergrundeigenschaften und Fahrweg- und Fahrzeugdaten werden die gemessenen Zugvorbeifahrten vollständig simuliert. Dazu wird zunächst die dynamische Nachgiebigkeit des Systems Fahrweg-Untergrund berechnet, wobei das vorhandene Schottergleis mit einer festen Fahrbahn verglichen wird und auch die Nachgiebigkeitsunterschiede durch die diskrete Schienenstützung bestimmt werden. Die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit wird mit dem Fahrzeugverhalten zur Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik verknüpft. Es wird die Anregung durch Gleis-, Schienen- und Radsatzunregelmäßigkeiten (Wegerregung) und die Anregung durch die Steifigkeitsschwankungen des Fahrwegs mit der Schwellenabstandsfrequenz (Parametererregung) behandelt. Die dynamischen Achslasten werden in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ermittelt. Schließlich werden die Bodenschwingungen in verschiedenen Entfernungen zum Gleis, die sich bei Vorbeifahrt dieser Lasten ergeben, berechnet.

Die sehr gute Übereinstimmung der Rechen- und Meßergebnisse bestätigt die Brauchbarkeit der theoretischen Modelle, insbesondere auch die Anwendung der Elastizitätstheorie auf den Untergrund (Halbraumtheorie). Folgende wesentliche Aussagen ergaben sich übereinstimmend aus Theorie und Messung:

- Die Parametererregung durch die mit der Schwellenabstandsfrequenz schwankende Fahrwegsteifigkeit ist ein wesentlicher Bestandteil der Erschütterungen in der Umgebung.
- Die statischen Achslasten (Eigengewicht des Zuges) führen nur in der unmittelbaren Gleisnähe zu merklichen Schwingungen, für den Fahrweg selbst sind sie allerdings der dominierende Anteil.
- Bei der Steigerung der Fahrgeschwindigkeit wird ein Teil der Anregungsfrequenzen proportional zur Geschwindigkeit verschoben, die Erschütterungsamplituden nehmen bis etwa 200 km/h zu und bleiben bei höheren Fahrgeschwindigkeiten in etwa konstant.
- Für die Erklärung dieser Ergebnisse ist die Wechselwirkung des Fahrzeugs mit der Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit und insbesondere die Radsatz-Untergrund-Eigenfrequenz wesentlich.
- Die bei den Versuchs- und Rekordfahrten des Intercity Experimental gemessenen Erschütterungen in der Umgebung sind nicht stärker, zum Teil auch kleiner als die von Regelzügen im Nah- und Fernverkehr verursachten Erschütterungen.

Die vorgestellten Methoden und Ergebnisse ermöglichen eine fundierte Prognose der Erschütterungen bei der Planung von Neubaustrecken, bei Steigerung der Reisegeschwindigkeit oder bei Erhöhung der Achslasten. Die Bestimmung der dynamischen Lasten aus der gekoppelten Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik ermöglicht auch Rückschlüsse auf die Fahrweg- und Untergrundbeanspruchung. Die Ergebnisse können einen Beitrag bei der Optimierung von Fahrweg und Fahrzeugkomponenten leisten. Eine Anwendung auf neue Fahrwegformen (feste Fahrbahn, aufgeständerter Fahrweg) oder andere Bahnsysteme (Nah-, Fern- und Hochgeschwindigkeitsmagnetbahnen) ist möglich und wünschenswert.

## Summary

The BAM made a lot of research work about dynamics of railway traffic during the last decade. This report gives a short review of these activities and shows current results about train induced vibrations and in context with it also results about vehicle dynamics and about track and underground loading. It consists on one side of theoretical and numerical work about excitation and propagation of train induced vibrations and on the other side of measurements on the German high speed train "Intercity Experimental".

In detail different excitations are examined. The wave propagation through the soil is calculated on the base of half-space theory. The influence of material damping (hysteric, nonlinear), of broadband or impulse excitation combined with inhomogeneous soil is discussed. The attenuation law for railway traffic, caused by a number of stochastic loads acting on the train's length, is stated.

On occasion of test and record runs of the "Intercity Experimental" (speed ranging between 20 and 300 km/h) the vibrations of the track and of the soil 3 to 100 meters apart from the track could be measured. The soil properties at that place were established by harmonic wavefield measurements. On base of these soil properties, together with track and vehicle data, the measured ICE-train runs are completely simulated:

First the dynamic compliance of the track-subsoil system is evaluated, covering ballasted and unballasted tracks and the local differences caused by the discrete rail support. The track- subsoil compliance is coupled with the vehicle dynamics to study different excitations as track-, rail- or wheelset irregularities and excitation by the time varying trackstiffness with sleeper distance frequency. The dynamic axle loads are evaluated in dependence on the speed of the train. At last the vibrations of the soil at some points apart from the track, caused by these moving loads, are calculated.

The very good agreement of calculated and measured results proves the usefulness of the theoretical models, in particular the elastic halfspace theory of the soil. There are the following essentials resulting from theory as well as from measurements:

- The parametric excitation caused by the time-varying track-stiffness (sleeper distance frequency) is a main part of the environmental vibrations.
- The static axle-loads (weight of train) are the main cause of the track vibrations, but they are only observable in the vicinity of the track.

Distant from the track their contribution to the vibrational amplitude is negligible.

- An increase of the speed of the train gives a proportional rise of some frequencies of excitation, the amplitudes increase up to 200 km/h and are mainly constant at higher speeds.
- To explain this important result the interaction of vehicle, track and subsoil, in particular the wheelset-subsoil-eigenfrequency, must be considered.
- The vibration measured during the test and record runs of the Intercity Experimental are not stronger or even smaller than the vibration usually measured in local or long-distance railway traffic.

environmental effects of high speed trains / train induced vibrations / vehicle dynamics / track dynamics / soil dynamics / wave propagation / coupled vehicle-track-soil-system / time varying track-soil-stiffness of ballasted and unballasted track / sleeper distance excitation / moving loads / stochastic loads / attenuation laws / critical and uncritical speeds

Erschütterungen / Schienenverkehr / Hochgeschwindigkeitszüge / Fahrzeugdynamik / Fahrwegdynamik / Bodendynamik / Wellenausbreitung / Kopplung des Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Systems / Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit von Schottergleis und fester Fahrbahn / Schwellenabstandsanzregung / Parametererregung / bewegte Lasten / stochastische Lasten / Amplituden-Abstands-Gesetze / kritische und unkritische Fahrgeschwindigkeiten

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
1. Überblick über die Forschungsarbeiten der BAM zum Problembereich „Dynamik im Schienenverkehr	9
2. Thema und Gliederung des vorliegenden Berichts	11
Literaturverzeichnis	12
<b>Teil I Zur Entstehung von Schienenverkehrserschütterungen</b>	<b>13</b>
1. Einführung in die Fragestellung	13
2. Darstellungsmöglichkeiten für die Erregung	13
3. Anregungsmechanismen bei Schienenverkehr	17
4. Charakterisierung der Erregung	20
5. Relevanz einzelner Anregungsanteile, Quantifizierung	26
6. Zusammenfassung	38
<b>Teil II Zur Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen</b>	<b>39</b>
1. Einleitung und Zielsetzung	40
2. Besonderheiten der Erregung durch Zugverkehr	42
3. Die elementaren Lastfälle und die zur Ableitung der Abnahmegesetze verwendeten Methoden	44
3.1 Punkt- und Linienlast	44
3.2 Berücksichtigung der hysteretischen Materialdämpfung des Bodens	44
3.3 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei deterministischen und stochastischen Streckenlasten („Superpositionsverfahren“)	46
3.4 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei harmonischen Lasten, die über ein starres Fundament in den Boden eingeleitet werden	47
4. Einflüsse auf das Amplituden-Abstands-Gesetz	49
4.1 Zerstreuung durch regellose Schwankungen der Bodeneigenschaften	49
4.2 Nichtlineare Dämpfung des Bodens	49
4.3 Impulsartige Anregung	50
4.4 Abhängigkeit von der betrachteten Amplitudengröße	52
4.5 Dämpfungswirkung bei breitbandiger Anregung	54
4.6 Übersicht über die in Abschnitt 4 abgeleiteten Amplituden-Abstand-Gesetze	57
5. Die Schwingungsausbreitung bei einer gleichphasigen Streckenlast	58
5.1 Berechnung mit dem Superpositionsverfahren	58
5.2 Berechnung mit dem Wechselwirkungsverfahren	63
6. Gesetzmäßigkeiten bei stochastischer Lastverteilung über die Zuglänge	67
6.1 Simulationsrechnungen mit zufällig erzeugten Phasen	67
6.2 Eine theoretische Grundlage zur Ableitung der „stochastischen Abnahmegesetze“	71
6.3 Berechnung der gemittelten Abnahmegesetze	72
6.4 Ein explizites Amplituden-Abstands-Gesetz für stochastische Anregung	76
6.5 Einfluß bestimmter Korrelationen zwischen den Quellen, der veränderlichen Anregungsorte während der Vorbeifahrt und der Materialdämpfung	77
7. Zusammenfassung	83
Anhang A	
Ein Verfahren zur Berechnung des Schwingungsverhaltens starrer Fundamente auf dem Boden	84
Anhang B	
Das Amplituden-Abstands-Gesetz für eine stochastische Streckenlast	86
Literatur zu den Teilen I und II	87

<b>Teil III Fahrweg-, Untergrund- und Erschütterungsmessungen bei Versuchsfahrten des Intercity Experimental</b>	<b>89</b>
1. Einleitung	89
2. Umfang des Meßprogramms	90
3. Ergebnisse zum Untergrund	93
4. Ergebnisse zum Fahrweg	99
5. Ergebnisse zu den Erschütterungen in der Umgebung	102
5.1 Zeitverlauf und Frequenzinhalt	102
5.2 Amplituden in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Zuglänge, Abnahmegesetz	105
Anlage A1 — A4 Meßort, Meßpunktanordnung, Daten zum ICE	111
Anlage B Meßergebnisse zum Fahrweg	114
Anlage C1 — C2 Meßergebnisse zur Umgebung	118
<b>Teil IV Nachrechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik und der Erschütterungen in der Umgebung</b>	<b>137</b>
1. Das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Umgebung	138
2. Elemente der Berechnung von Fahrzeug, Fahrweg, Untergrund und Erschütterungsausbreitung	141
2.1 Die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit	141
2.1.1 Ergebnisse für eine Schwelle, ein Schottergleis und eine feste Fahrbahn	141
2.1.2 Einfluß der diskreten Schienenstützpunkte und der Fahrgeschwindigkeit	144
2.2 Berechnung der dynamischen Last aus der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik	146
2.2.1 Das Fahrzeugverhalten	146
2.2.2 Die Kopplung von Fahrzeug und Fahrweg-Untergrund unter Berücksichtigung der Schwellenabstandsanregung (Parametererregung)	147
2.2.3 Die dynamische Last bei hohen Fahrgeschwindigkeiten	151
2.3 Die Erschütterungsausbreitung bei bewegten Lasten	153
2.3.1 Die Lastverteilung durch die Schwellen	153
2.3.2 Ausbreitungsgesetze für eine Punktlast	155
2.3.3 Die Simulation von Zugvorbeifahrten	155
2.4 Die Fahrwegverformung bei bewegten Lasten	157
2.4.1 Das klassische Fahrwegmodell ohne Untergrundkopplung — der gebettete Balken	158
2.4.2 Der Einfluß der Untergrundkopplung bei hohen Fahrgeschwindigkeiten	160
2.4.3 Diskussion „kritischer“ Fahrgeschwindigkeiten	167
3. Nachrechnung der Versuchsfahrten des Hochgeschwindigkeitszuges Intercity Experimental (ICE) und Vergleich mit den Meßergebnissen	170
3.1 Die Fahrwegbewegungen	170
3.2 Die Erschütterungen in der Umgebung	173
3.3 Der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit	179
4. Schlußfolgerungen aus den Meß- und Rechenergebnissen	181
4.1 Schwingungsmessungen an Schienenverkehrswegen — charakteristische Auswirkungen bewegter Lastgruppen	181
4.2 Erschütterungen durch Schienenverkehr, insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten	182
4.3 Der Einfluß der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik	183
4.4 Anwendung der Ergebnisse: Ursachenklärung, Optimierung und Prognose	183
Anhang A Rechenergebnisse zur Erschütterungsausbreitung	185

## 1. Überblick über die Forschungsarbeiten der BAM zum Problembereich "Dynamik im Schienenverkehr"

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung beschäftigt sich seit etwa zehn Jahren mit dynamischen Problemen verschiedener Bahnsysteme wie Untergrund-, Nahverkehrs- und Hochgeschwindigkeitsbahnen. Im Vordergrund stehen dabei die Themen

- dynamisches Verhalten des Untergrundes unter einem Gleis,
- dynamische Eigenschaften des Fahrwegs auf dem Untergrund,
- Erschütterungsausbreitung in die Umgebung,

es wird aber auch das Verhalten des Fahrzeugs mit in Betracht gezogen.

Die Forschungsarbeiten wurden im wesentlichen vom Bundesministerium für Forschung und Technologie in den beiden Programmen "Lärminderung in Städten und Gemeinden" (Nahverkehr) und "Rad/Schiene" (Hochgeschwindigkeitsfernverkehr) gefördert. In der folgenden Übersicht sind die Vorhaben stichpunktartig aufgeführt:

Jahr	Thema	Bericht	Förderung
1975-78	Tunnelschwingungen, U-Bahnerschütterungen	/18/	ERP
1978-81	Untergrunddynamik	/19/	BMFT, Rad/Schiene
1981-82	Erschütterungen Nahverkehr	/3/	BMFT, Nahverkehr
1982-85	Fahrweg-Untergrund-Dynamik Erschütterungen Fernverkehr	/22/, /6/	BMFT, Rad/Schiene
1983-86	Erschütterungen Nahverkehr	/7/	BMFT, Nahverkehr
1985-88	Erschütterungen Hochgeschwindigkeitsverkehr		BMFT, Rad/Schiene
1986-88	Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik (MEDYNA-BAM)	/14/	BMFT, Rad/Schiene
1986-88	Erschütterungsübertragung U-Bahn - Gebäude		BMFT, Nahverkehr

Die Arbeiten im Rad/Schiene-Programm waren mit dem Institut für Boden- und Felsmechanik in Karlsruhe abgestimmt /11/, /17/. Es sind weitere Vorhaben zur Inspektion und Überwachung von Fahrwegstrukturen (Brücken, Tunnel) mit dynamischen Methoden und insbesondere zur Anwendung der Ergebnisse und Methoden bei der Optimierung von Fahrweg und Fahrzeug und bei der Planung von Neubaustrassen geplant.

Bei den Untersuchungen wurden jeweils parallel theoretisch/rechentechnische und meßtechnische Methoden angewandt und die Ergebnisse miteinander verglichen:

Auf der rechentechnischen Seite wird für das Fahrzeug das Programmsystem MEDYNA (Mehrkörperdynamik) benutzt und weiterentwickelt /14/, für den Fahrweg wird u.a. eine kombinierte Finite-Element- und Randelementmethode

zur Berechnung starrer und flexibler Strukturen auf dem Boden verwendet /9/, wobei der Anteil des Untergrundes mit der Halbraummethode berechnet wird /20/. Die Erschütterungsausbreitung durch einen inhomogenen Boden wird mit der Finiten-Element-Methode behandelt, die auch eine zweidimensionale Modellierung des Fahrwegs (Tunnel, Einschnitt, Damm) gestattet /18/.

Auf der meßtechnischen Seite werden die Erschütterungen des Bodens (und benachbarter Gebäude) und das Schwingungsverhalten des Fahrwegs aufgezeichnet und rechnergestützt ausgewertet. Die Bodenkennwerte des Meßorts werden mit Hilfe der Schwinger- und der Impulstechnik, zum Teil auch aufwendiger mit der Cross-Hole-Technik bestimmt. Mit einem Schwinger werden auch Fahrwegstrukturen (Tunnel, Eisenbahnbrücken) angeregt und ihr modales Verhalten untersucht.

Durch Messungen am Fahrweg bei ortsfester harmonischer Anregung durch die servohydraulische Belastungseinrichtung des Oberbaumeßwagens konnten die theoretischen Ergebnisse zur Nachgiebigkeit des Untergrundes und zur Kopplung benachbarter Schwellen durch den Untergrund bestätigt werden /19/, /17/. Das Fahrwegverhalten bei Zugüberfahrten ist für verschiedene Oberbauformen (u. a. auch für die feste Fahrbahn) auf einer Teststrecke bei Dachau-Karlsfeld gemessen worden /6/.

Bei den Arbeiten zur Erschütterungsproblematik wurden die Bereiche Emission (Erschütterungsursachen, Quellstärken), Transmission (Ausbreitung durch den Boden) und Immission (Erschütterungsübertragung in Gebäude) unterschieden. Mit einem Finite-Element-Rechenprogramm, das die unendliche Ausdehnung des Bodens durch geeignete Randelemente erfassen kann, wurde der Einfluß der Bodensteifigkeit, von Schichtungen, der Dämpfung des Bodens, des Oberbaus, der Trassenlage im Einschnitt, auf dem Damm oder im Tunnel (bei Variation der Tunnelkonstruktion) jeweils auf die Erschütterungsstärke untersucht /18/, /4/. Zusätzlich wurden die Ausbreitungsgesetze, das heißt die Amplituden-Abstands-Beziehungen für verschiedene Anregungsarten und Lastverteilungen berechnet und gemessen und miteinander verglichen /7/. Aus Erschütterungsmessungen in der Umgebung wurden Erregerspektren für verschiedene Zugtypen des Nah-, Fern-, Güter- und U-Bahnverkehrs ermittelt, und zwar für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten und zum Teil auch für Fahrten in der Kurve oder über eine Weiche /3/, /6/. Dabei wird ebenfalls das Rechenverfahren eingesetzt, um mit Hilfe der am Meßort ermittelten Bodeneigenschaften und der jeweiligen Trassengeometrie die Übertragungsfunktionen zwischen den Erregerkräften und den Schwingantworten der Meßpunkte zu berechnen. Die Ergebnisse zur Emission, Ausbreitung und Immission wurden in einem vereinfachten Erschütterungsprognoseprogramm miteinander verknüpft.

## 2. Thema und Gliederung des vorliegenden Berichts

Der vorliegende Bericht beschränkt sich thematisch auf das Problem der Erschütterungen in der Umgebung von Bahntrassen. Nachdem in den BAM-Forschungsberichten /4/ und /5/ Ergebnisse zur Erschütterungsausbreitung durch den Boden und zur Erschütterungsimmission in Gebäuden veröffentlicht wurden, die prinzipiell auf alle Arten von Erschütterungsquellen wie Verkehr, Maschinen, Rammungen und Sprengungen anwendbar sind, werden in diesem Bericht die charakteristischen Merkmale von Schienenverkehrserschütterungen (Entstehung und spezifische Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten) behandelt. Der Bericht enthält sowohl Ergebnisse aus der Nahverkehrsforschung (Teil I und II mit eigenem Literaturverzeichnis, Zitate in eckigen Klammern [ ]) als auch aktuelle Ergebnisse der Rad/Schiene-Forschung (Teil III und IV).

Aus den umfangreichen Meßergebnissen wurden die Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental ausgewählt, die in Teil III dargestellt und in Teil IV mit sehr detaillierten Berechnungen verglichen werden. Hinsichtlich der weiteren Meßergebnisse (u. a. zu den Erregerspektren verschiedener Zugarten, zur festen Fahrbahn, zu den Ausbreitungsgesetzen) muß auf die jeweiligen Berichte verwiesen werden /3/, /6/, /7/.

Die theoretischen Ergebnisse sind in den Teilen I, II und IV dargestellt. Dabei werden in Teil I die Entstehung der Verkehrserschütterungen und die Relevanz verschiedener Anregungsursachen, in Teil II die spezifischen Ausbreitungsgesetze bei Schienenverkehr jeweils allgemein diskutiert und mit vereinfachten Parameterstudien untersucht. In Teil IV werden diese Ergebnisse verfeinert und - insbesondere um die Ergebnisse der Rad/Schiene-Forschung zur Fahrweg-Untergrund-Dynamik - erweitert, so daß die gemessenen Schwingungen bei den ICE-Versuchsfahrten mit sehr guter Übereinstimmung nachgerechnet werden können. Die dazu notwendigen Lösungsschritte

- dynamische Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit,
- dynamische Last aus der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik insbesondere
- Lösung für die Parametererregung aus diskreter Schienenstützung im Schwellenabstand,
- Erschütterungsausbreitung bei bewegten Lasten

werden in diesem Zusammenhang ausführlich beschrieben. Die mitgeteilten Rechenergebnisse haben exemplarischen Charakter, sie gelten für die bei den Versuchsfahrten vorgefundenen Untergrund-, Fahrweg- und Fahrzeugeigenschaften. Zusammen mit den Meßergebnissen ergeben sich eine Reihe von allgemeineren Schlußfolgerungen, die im letzten Abschnitt des Teils IV zusammengefaßt sind. Die Auswertung der dargestellten Methoden für andere Untergrund-, Fahrweg- oder Fahrzeugkonstellationen wird teilweise angedeutet (z. B. feste Fahrbahn), ist aber im wesentlichen zukünftigen Forschungsvorhaben und Anwendungen (z. B. Planung von Neubaustrecken) vorbehalten.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Arbeitsgemeinschaft Schwingungsausbreitung: Schwingungsausbreitung an Schienenverkehrswegen. Ingenieur-Geologisches Institut Niedermeyer, Landesgewerbeanstalt Nürnberg, Müller-BBM, 1981.
- /2/ L. Auersch: Wellenausbreitung durch eine Bodenschicht. Bautechnik 58, Heft 7, S. 229-236, 1981.
- /3/ L. Auersch, F. Krüger: Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Nahverkehrs in Geländeneiveau. Bericht 9 des BMFT Forschungsprogramms "Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden - Teilprogramm Schienennahverkehr", STUVA Köln, BAM Berlin, 1983.
- /4/ L. Auersch: Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden. BAM-Forschungsbericht 92, Berlin, 1983.
- /5/ L. Auersch: Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen. BAM-Forschungsbericht 108, Berlin, 1984.
- /6/ L. Auersch, H. Hebener, W. Rücker: Prognosemodell für die Erschütterungsausbreitung schnellfahrender Züge. Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben TV 8214, BAM Berlin, 1985.
- /7/ L. Auersch, H. Hebener, W. Rücker: Erschütterungen infolge Schienennahverkehr - theoretische und meßtechnische Untersuchungen zur Emission zur Ausbreitung durch den Boden und zur Übertragung in Gebäude. Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben TV 8329, BAM Berlin, 1986.
- /8/ L. Auersch, R. Rohrman, W. Rücker, S. Said: Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Umgebung: Theoretische, rechen- und meßtechnische Untersuchungen. VDI-Berichte 635, S. 59-87, 1987.
- /9/ L. Auersch: Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen. BAM-Forschungsbericht 151, Berlin, 1988.
- /10/ C. Behnke: Erschütterungsuntersuchungen bei Sprengungen und anderen Energiequellen. Vortrag, Berlin, 1987.
- /11/ G. Gudehus und Mitarbeiter: Probleme des Erd- und Grundbaus für das Rad/Schiene-System bis zur Grenzggeschwindigkeit. Vorstudie: BMFT TV 7642, Karlsruhe, 1977.
- /12/ G. Hölzl, G. Fischer: Körperschall- bzw. Erschütterungsausbreitung an oberirdischen Schienenverkehrswegen. Eisenbahntechnische Rundschau 34, Heft 6, S. 469-477, 1985.
- /13/ K. Klotter: Technische Schwingungslehre I. Springer, Berlin, 1951.
- /14/ C. Kohl, R. Rohrman: Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA. Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben TV 8603, BAM Berlin, 1988.
- /15/ J. Korb: Parametererregung beim Rad-Schiene-System. VDI-Berichte 381, S. 99-104, 1980.
- /16/ K. Popp, R. Bogacz: Dynamik und Bewegungsstabilität von Zug-Gleis-Systemen. VDI-Berichte 510, S. 197-204, 1984.
- /17/ B. Prange, G. Huber, T. Triantafyllidis: Dynamisches Rückwirkungsmodell des Gleisoberbaus. Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben TV 7815 B, Karlsruhe, 1982.
- /18/ W. Rücker: Ermittlung der Schwingungsanregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung. Dissertation, TU Berlin, 1979.
- /19/ W. Rücker: Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund. BAM-Forschungsbericht 78, Berlin, 1981.
- /20/ W. Rücker: Dynamic behaviour of rigid foundations of arbitrary shape on a halfspace. Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol. 10, S. 675-690, 1982.
- /21/ W. Rücker: Dynamic interaction of a railroad-bed with the subsoil. Proc. of Soil Dynamics and Earthq. Eng., Southampton, S. 435-448, 1982.
- /22/ R. Rohrman: Dynamisches Verhalten eines Schienen-Schwellen-Verbundes auf elastischem Halbraum. Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben TV 8214, BAM Berlin, 1986.
- /23/ S. Said: Erschütterungsmessungen bei Versuchsfahrten des Intercity Experimental (ICE) auf der Neubaustrecke bei Würzburg. Bericht zum BMFT-Vorhaben TV 8214, BAM Berlin, 1987.
- /24/ S. Said: Messungen der Fahrwegschwingungen und der Erschütterungen bei Versuchsfahrten des Intercity Experimental. Bericht zum BMFT-Vorhaben TV 8214, BAM Berlin, 1988.

# Teil I Zur Entstehung von Schienenverkehrserschütterungen

---

Inhalt	Seite
<b>Teil I Zur Entstehung von Schienenverkehrserschütterungen</b>	13
1. Einführung in die Fragestellung	13
2. Darstellungsmöglichkeiten für die Erregung	13
3. Anregungsmechanismen bei Schienenverkehr	17
4. Charakterisierung der Erregung	20
5. Relevanz einzelner Anregungsanteile, Quantifizierung	26
6. Zusammenfassung	38

---

## 1. Einführung in die Fragestellung

Das Gesamtproblem der Erschütterungen durch Schienenverkehr umfaßt die Bereiche (Bild 1) Emission, Ausbreitung durch den Boden (Transmission) und die Weiterleitung in Gebäude (Immission). Die Trennung des Problembereiches Emission von der Transmission ist nicht so eindeutig wie bei der Immission. Man kann den Oberbau vom Boden trennen und die auf den Boden wirkenden Schnittspannungen als die Emissionsgrößen betrachten. Einfacher - zumindest von der Anzahl der Unbekannten - ist es, die Trennung zwischen Fahrzeug und Fahrweg zu wählen und die Kontaktkräfte zwischen Rad und Schiene als die Emissionsgrößen anzusehen.

Die in Teil I und II dargestellten Untersuchungen dienen dem Zweck, ein verbessertes Prognosemodell für die in der Umgebung von Bahnlinien auftretenden Erschütterungen zu erarbeiten, das die Besonderheiten des Schienenverkehrs berücksichtigt. Dazu ist die räumliche Verteilung, der zeitliche Ablauf und die Bewegung der Last längs des Gleises zu betrachten. In diesem Berichtsteil werden zunächst die verschiedenen Beschreibungsmöglichkeiten der Erregung dargestellt (Abschnitt 2) und damit die Emissionsanteile der einzelnen Anregungsmechanismen, wie zum Beispiel Flachstellen des Rades oder Fahrbahnunebenheiten, charakterisiert (Abschnitt 3). Im vierten Abschnitt wird der transiente Charakter der Erregung infolge der Bewegung der Last längs des Gleises und dessen Auswirkung auf die Schwingantworten in der Umgebung untersucht. Außerdem werden für einzelne Anregungsanteile Korrelationen zwischen den Kräften von verschiedenen Rädern festgestellt. Diese Eigenschaften bestimmen die Ausbreitungscharakteristik der Erschütterungen. Schließlich wird im fünften Abschnitt die Relevanz

einzelner Anregungsanteile untersucht. Dazu werden zunächst an einfachen Fahrzeug-Fahrweg-Modellen einige grundsätzliche Tendenzen bei der Umsetzung von Schienen- oder Radflächenstörungen in dynamische Radkräfte behandelt. Auf dieser Basis können näherungsweise Angaben über die Größe der dynamischen Kräfte, die durch bestimmte Störungen entstehen, gemacht werden.

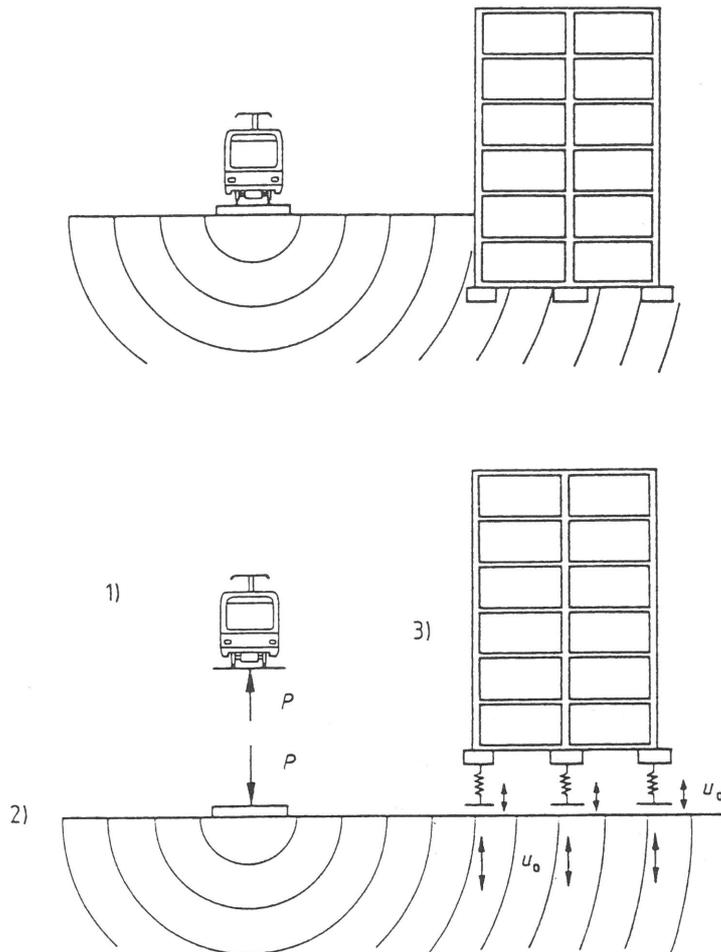


Bild 1

Erschütterungen infolge Schienenbahnverkehr

Gliederung in die Teilprobleme

- 1) Emission durch das Fahrzeug,
- 2) Transmission durch den Boden und
- 3) Immission in Gebäuden

## 2. Darstellungsmöglichkeiten für die Erregung

Man kann den Erregerprozeß Zugverkehr durch verschiedene Größen und in Abhängigkeit von verschiedenen "Koordinaten" darstellen, z.B. als Verschiebung einer Schwelle

$$u = u(x=x_0, t)$$

in Abhängigkeit von der Zeit und (bei Betrachtung mehrerer Schwellen) des Ortes

oder als Kontaktkraft eines Rades mit der Schiene

$$P_j = P_j(t).$$

Als Emissionsgrößen kommen Bewegungsgrößen (Verschiebung, Schwinggeschwindigkeit, Schwingbeschleunigung) oder Kraftgrößen (Kräfte, Linienkräfte, Spannungen) in Betracht, wobei die Kraftgrößen vorzuziehen sind, da sie zumindest in erster Näherung nicht von Untergrundeigenschaften abhängen und damit für die Erregung charakteristischer sind als Bewegungsgrößen, die unmittelbar von der Nachgiebigkeit des Oberbau-Boden-Systems abhängen. Bei den Kraftgrößen stehen noch einmal verschiedene tatsächliche (innere) Kräfte je nach Lage der Schnittstelle oder aber fiktive Ersatzkräfte zur Wahl. Man hat die Kontaktkraft zwischen Rad und Schiene, die Kraft, die zwischen Schwelle und Schotterbett wirkt, und die Spannungen zwischen Schotterbett und Untergrund.

Bei der Beschreibung der räumlichen Verteilung und der Zeitcharakteristik gibt es jeweils zwei Alternativen. Die räumliche Verteilung kann in einem ortsfesten (fahrwegfesten) Koordinatensystem  $x, y$  oder in einem mit dem Zug mitbewegten Koordinatensystem  $\xi, \eta$  beschrieben werden. Dabei soll  $x$  in Fahrtrichtung zählen, so daß der Zusammenhang

$$\xi = x - vt \quad \text{und}$$

$$\eta = y$$

( $v$  ist die Fahrgeschwindigkeit des Zuges)

zwischen den Koordinaten besteht. Die Zeitcharakteristik kann im Zeitbereich oder im Frequenzbereich, das heißt durch Spektren beschrieben werden. Es soll hier bereits darauf hingewiesen werden, daß die Zeitcharakteristik je nach Wahl der Ortskoordinaten sehr unterschiedlich aussehen kann. So ist der Zugverkehr im ortsfesten Bezugssystem ein transienter Prozeß, im mitbewegten Bezugssystem dagegen ein stationärer Prozeß. Als Extrembeispiel stelle man sich eine bewegte konstante Punktkraft vor: im mitbewegten System ist der Kraftzeitverlauf konstant, für einen ortsfesten Punkt, der überfahren wird, ist der Kraftzeitverlauf ein (unendlich) kurzer Impuls. Schließlich sei an

den Doppler-Effekt erinnert: Bewegt sich eine harmonische Quelle auf einen Beobachter zu, so ist für diesen die Frequenz höher, wenn die Quelle sich wegbewegt tiefer, als die Frequenz der Quelle.

Zum Abschluß sollen einige wichtige Beschreibungsmöglichkeiten aufgelistet werden:

- $u(x,t)$  - Verschiebung (Durchbiegung) der Schiene,
- $u(\xi,t)$  - Verschiebung der Schiene, mitbewegte Biegelinie,
- $u(x_k,t)$  - Verschiebung einer (der k-ten) Schwelle,
- $P_j(t)$  bzw.  $P(\xi_j,t)$  - dynamische Radlast, das ist die Kraft, die zwischen Rad und Schiene wirkt,
- $P(x_k,t)$  - Kraft, die auf die k-te Schwelle wirkt,
- $\sigma(x,t)$  - Spannungen, die vom Oberbau auf den Untergrund übertragen werden,
- $\sigma(\xi,t)$  - desgleichen im mitbewegten Koordinatensystem.

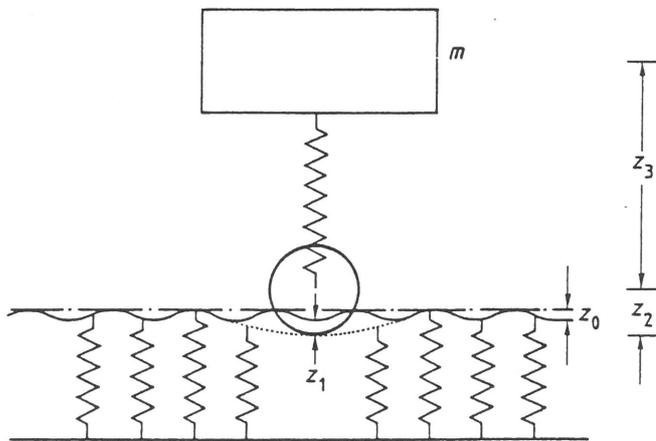


Bild 2  
Ein einfaches Fahrzeug-  
Fahrweg-Modell, Kinematik

### 3. Anregungsmechanismen bei Schienenverkehr

Folgende Anregungsursachen müssen in Betracht gezogen werden:

- Schwingungen des Wagenkastens (Heben, Nicken, Wanken)
- Schwingungen der Achsen und Drehgestelle,
- Beschleunigungen und Verzögerungen des Zuges,
- Beschleunigungen durch die Trassenführung (Kurven, Neigungsänderungen),
- Unterschiedliche Nachgiebigkeit der Schiene unter dem Rad, insbesondere durch den
- Schwellenabstand,
- Schienenunebenheiten (Schienenwellen),
- Stöße an Weichen,
- unrunde Räder (Flachstellen),
- Unwuchten der Räder,
- statische Einsenkung unter dem Eigengewicht,
- Abfolge der Räder (Achskonfiguration),
- Schwingungen und Unwuchten des Antriebssystems.

Man kann sich zunächst den Anregungsvorgang im mitbewegten Bezugssystem verdeutlichen, indem man die Kontaktkraft zwischen Rad und Schiene betrachtet. Bild 2 zeigt dazu ein stark vereinfachtes Zug-Untergrund-Modell. Um die Anregungsursachen zu beschreiben, reicht es hier aus, den Schwerpunktsatz und die kinematischen Zusammenhänge heranzuziehen. Auf den Zug angewendet, besagt der Schwerpunktsatz, daß die Kontaktkraft  $P$  zwischen Rad und Schiene gleich der Zugmasse  $m$  mal der Schwerpunktsbeschleunigung  $\ddot{x}_S$  des Zuges zuzüglich der eingepprägten Kräfte  $P_e$  ist

$$P = m\ddot{x}_S + P_e.$$

Als eingepprägte Kraft wirkt das Eigengewicht, und auch die Störkräfte des Motors (Unwuchten) sollen als eingepprägte Kräfte eingeordnet werden. Alle weiteren Anregungsprozesse spiegeln sich in der Bewegung des Schwerpunktes wieder. Die Lage des Schwerpunktes

$$z_S = z_0(x=vt) + z_1(x,P) + z_2(\omega t) + z_3(z_k)$$

setzt sich zusammen aus

- $z_0(x=vt)$  - der Ausgangslage der Schiene,
- $z_1(x,P)$  - der Verschiebung der Schiene durch die Last des Zuges,
- $z_2(\omega t)$  - den Abstand Schiene-Radschwerpunkt und
- $z_3(z_k)$  - der relativen Lage des Schwerpunktes zur Radachse.

Es ergibt sich eine gewisse Systematik der Anregung:

Führung: Zu  $z_0$  gehören die Beschleunigungen durch die Trassenführung und die Schienenunebenheiten.

Fahrweg: Die Verschiebung der Schiene  $z_1$  kann man vereinfacht als ortsabhängige Nachgiebigkeit  $N(x)$  der Schiene multipliziert mit der dynamischen Last  $P$  ansehen

$$z_1 = N(x=vt) P(t).$$

In  $z_1$  steckt also unmittelbar ein Lastanteil durch die diskrete Stützung der Schienen im Abstand der Schwellen.

Räder: Mit  $z_2$  werden die Unrundheiten (Flachstellen) und die Unwuchten der Räder erfaßt.

Fahrzeug:  $z_3$  gibt die Einflüsse der Fahrzeugschwingungen wieder. Der Fahrzeugschwerpunkt bewegt sich relativ zu den Rädern aufgrund verschiedener Federwege und Kräfte bzw. letztendlich aufgrund der dynamischen Last  $P$ . Die Abhängigkeit  $z_3(z_k)$  deutet an, daß man das Fahrzeug vereinfacht als Starrkörpersystem ansehen kann und somit die Lage des Gesamtschwerpunktes von den Teilkörperschwerpunkten  $z_k$  abhängt.

Es läßt sich noch eine weitere Unterscheidung der Anregungsvorgänge vornehmen. Es gibt primäre Anregungen, die bei einem völlig starren System auftreten würden, und sekundäre Anregungen, die erst durch die Eigendynamik des Systems oder eines Teilsystems entstehen und die nur bei schon vorhandenen Störungen (primären Anregungen) entstehen können. Als gleichwertiges Unterscheidungsmerkmal kann man betrachten, ob die Störgröße von der dynamischen Last selbst abhängig ist (sekundär) oder nicht (primär). Primäre Anregungen (Ursachen) sind die Führungsbeschleunigungen (Trassen- und Schienenprofil), der Fahrweganteil aus Schwellenabstand und Eigengewicht, die beiden Radanteile aus Unrundheit und Unwucht und natürlich das Eigengewicht und die Antriebsunwuchten. Sekundäre Anregungen (Wirkungen) sind die Fahrzeuganteile und die Fahrwegverformung unter der dynamischen Last. Das eigentlich gegensätzliche Begriffspaar Anregungen - Wirkung erklärt sich daraus, daß letztlich die Last  $P$  als Anregung des Bodens gesucht ist, die Last sich aber andererseits als Auswirkungen der Systemschwingungen des Fahrzeugs und des Fahrwegs ergibt.

Das Zusammenwirken der primären und sekundären Anregung kann man sich an einem einfachen Beispiel klarmachen, die Überfahrt eines Rades über eine Schienenunebenheit (Bild 3). Im Moment der Überfahrt wird die Unebenheit durch die Federung aufgefangen, dafür ergeben sich aber Eigenschwingungen des Fahrzeuges im Anschluß an die Überfahrt. Verallgemeinert bedeutet dies:

Wenn die Primärstörungen örtlich oder zeitlich singular sind, werden sie zunächst durch die Verformbarkeit des Systems teilweise kompensiert, die Sekundärstörungen sind dann jedoch langanhaltendere Vorgänge, in denen die Eigenfrequenzen des Systems hervortreten. Für beliebige (anhaltende) Primärstörungen läßt sich immerhin noch sagen, daß durch sie Sekundärstörungen hervorgerufen werden, die die Primärstörungen entschärfen (glätten) und in Richtung der Eigenfrequenzen des Systems transformieren.

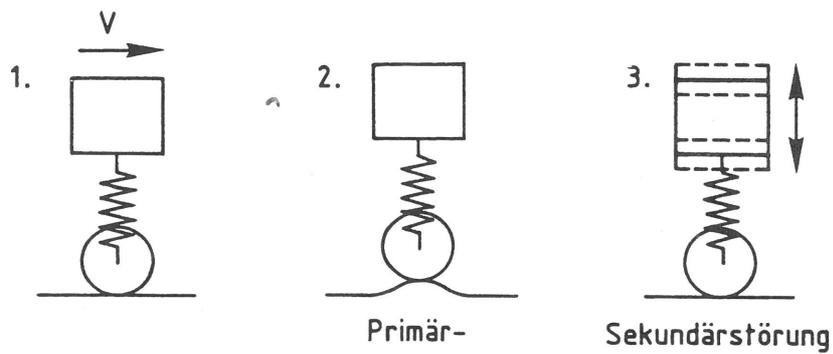


Bild 3

Primär- und Sekundärstörung am Beispiel der Überfahrt über eine Schienenunebenheit

#### 4. Charakterisierung der Erregung

Die Kräfte, die von den einzelnen Rädern auf das Gleis übertragen werden, sind Zufallsgrößen. Sie setzen sich aus einer Vielzahl von Anteilen zusammen, die mehr oder minder stark streuen. Relativ regelmäßig dürften die Anteile aus der Periodizität der Schienenstützung und der Unrundheit der Räder sein, während die Störungen durch Gleislagefehler völlig regellos sind. Bestimmte Anteile sind an einen Ort (Streckenabschnitt) gebunden, wie z.B. die Beschleunigungen bei Kurveneinfahrt, Stöße an Weichen, plötzlicher Wechsel des Untergrundes oder das Abbremsen an Haltepunkten. Schließt man solche speziellen Ursachen aus, so ist die Anregung ein stationärer stochastischer Prozeß. Die Kräfte der einzelnen Räder sind nicht völlig unkorreliert.

- So sind bei den Schwingungsformen des Fahrzeugaufbaus oder des Drehgestells oder der Achse jeweils die Kräfte eines Wagens, eines Drehgestells oder einer Achse korreliert, eventuell sogar gleich.
- Die periodische Anregung durch die Unrundheit der einzelnen Räder stehen in einem festen Phasenverhältnis.
- Die Störungen durch den Fahrweg (Gleislage, Schienenprofil) werden in regelmäßigen Zeitabständen von ähnlichen Systemen (Rädern, Drehgestellen, Wagen) überfahren, so daß die dabei entstehenden Kräfte sich auch gleichen müßten. Vom Zug aus gesehen heißt das, daß die dynamischen Radlasten infolge der Fahrwegstörungen sich mit bestimmten Verzögerungszeiten an den einzelnen Achsen wiederholen.

Genaueren Aufschluß über den Anregungsprozeß könnten Simulationsrechnungen mit Fahrzeug-Fahrweg-Modellen, die im Rahmen der Rad/Schiene-Forschung entwickelt wurden (z.B. [2]), geben. Es müßten die Radkräfte bei definierten Störungen berechnet werden. Dies würde auch die Anteile der einzelnen Erregerursachen quantifizieren. Eine Messung der Radkräfte, z.B. mit Dehnungsmeßstreifen auf dem Rad, ist sehr aufwendig, siehe der Überblick in [3]. Die Messung an der Schiene oder an einer Schwelle ergibt den Kraft-Zeit-Verlauf für einen ortsfesten Beobachter, der sich grundlegend von dem sich mitbewegenden Anregungsprozeß unterscheidet.

Für die Berechnung der Erschütterungsausbreitung ist von Bedeutung, wie sich die Eigenschaften der Anregung auf die Umgebung auswirken. Die Umgebung beobachtet eine Zugvorbeifahrt, also einen transienten Vorgang, während die Anregung vom Zug aus betrachtet im Normalfall als stationär angesehen werden kann. Diese Veränderung der zeitlichen Charakteristik beruht auf der Tatsache, daß die Erschütterungen mit der Entfernung von der Quelle abnehmen. Der Zusammenhang soll hier abgeleitet und an einem einfachen Beispiel veranschaulicht werden.

Der Ausgangspunkt ist die bekannte Darstellung der Schwingantwort (hier der Schwingweg  $u$  eines Bodenpunktes in der Entfernung  $x$  von der Bahntrasse) als Duhamelintegral über die Anregung (hier die Kraft  $P$ ) und die Stoßantwort  $g(t)$  des Systems

$$u(t) = \int_{-\infty}^t g(t-\tau) P(\tau) d\tau .$$

Da sich die Quelle bewegt, hängt die Stoßantwort noch vom jeweiligen Abstand  $r(\tau)$  zwischen Anregungsort und Beobachterstandpunkt ab

$$u(t) = \int_{-\infty}^t g(t-\tau, r(\tau)) P(\tau) d\tau .$$

Die Stoßantwort für den homogenen elastischen Boden ist im wesentlichen ein unendlich kurzer, beidseitiger Rayleighwellenimpuls  $\tilde{\delta}(t)$

$$g(t,r) \approx A\tilde{\delta}(t - \frac{r}{v_R}) \frac{1}{\sqrt{r}} ,$$

der mit einer der Laufzeit der Rayleighwelle entsprechenden Verzögerung und mit einer Amplitudenabnahme von  $1/\sqrt{r}$  beim Beobachter eintrifft. Für die Schwingantwort auf eine beliebige Wanderlast  $P(\tau)$

$$u(t) \approx \int_{-\infty}^t A\tilde{\delta}(t - \frac{r(\tau)}{v_R} - \tau) \frac{1}{\sqrt{r(\tau)}} P(\tau) d\tau$$

bedeutet das, daß der Kraftverlauf durch den Faktor  $1/\sqrt{r(\tau)}$  transformiert wird (transienter Charakter)

$$\tilde{P}(\tau) = 1/\sqrt{r(\tau)} P(\tau)$$

und daß der Zeitverlauf beim Näherkommen der Quelle gestaucht und nach der Vorbeifahrt gedehnt wird (Dopplereffekt).

Für Simulationsrechnungen kann man die Tatsache ausnutzen, daß man zu jedem Anregungszeitpunkt  $\tilde{t}$  einen Empfangszeitpunkt  $t = \tilde{t} + r(\tilde{t})/v_R$  hat. Nach der Berechnung von  $r(\tilde{t})$  und  $t(\tilde{t})$  wird der Zeitverlauf lediglich mit  $1/\sqrt{r(\tilde{t})}$  bewertet und im neuen Zeitmaßstab zusammengesetzt. Als Beispiel sind auf diese Weise die Schwingantworten in 5 bis 50 m Entfernung von der Trasse für eine mit  $v = 60$  km/h vorbeifahrende harmonische Einzelkraft

$$P(t) = P_0 \sin \omega t , \quad \omega = 2\pi \cdot 20 \text{ Hz}$$

berechnet worden (Bild 4). Die Vorbeifahrt der Last ist deutlich nur in 5 m Entfernung durch ein Maximum bei  $t \approx 0$ s zu erkennen, während in Entfernungen ab 15 m die Vorbeifahrt innerhalb des Zeitausschnitts von 2 Sekunden praktisch nicht zu bemerken ist.

Der Einfluß der Vorbeifahrt einzelner Achsen ist nach diesem Ergebnis also auf die unmittelbare Umgebung der Trasse beschränkt. Wie stark dieser Einfluß allerdings dort sein kann, demonstriert ein in [4] referiertes Ergebnis: Es wurde die Überfahrt einer Lok an einer Schwelle gemessen (Bild 5). Dem gemessenen Spektrum wird ein berechnetes Spektrum gegenübergestellt, das nur den Anregungsanteil enthält, der sich aus der Bewegung des Eigengewichts, also der statischen Last ergibt. Dazu wurde die Einsenkungslinie des Schotteroberbaus unter den Achslasten berechnet, mit der Fahrgeschwindigkeit in den Zeitverlauf für eine Schwelle umgerechnet und schließlich fouriertransformiert. Die Übereinstimmung der beiden Spektren im Frequenzbereich von 5 bis 100 Hz ist sehr gut. Offensichtlich bildet hier die Überfahrt der einzelnen Achsen den alles überragenden Anteil. Prinzipiell ist die statische Kraft (das Fahrzeuggewicht) sicherlich größer als die dynamische Kraft. Durch den stark transienten (stoßartigen) Charakter, den die Last für die Schwelle bekommt, besteht der Gewichtsanteil auch aus höherfrequenten Anteilen, so daß er nicht mehr von den anderen dynamischen Anteilen zu trennen ist. Wegen seiner Größe prägt dann der Gewichtsanteil das Spektrum der Schwellenschwingungen. Die Dominanz des Gewichtsanteils wird in dem zitierten Beispiel verstärkt durch die hohe Zuggeschwindigkeit von 250 km/h. Um diesen Einfluß der Zuggeschwindigkeit auf den transienten Charakter der Last zu demonstrieren, wurden in Bild 6 auch die Schwingantworten der Umgebung bei einer mit 250 km/h bewegten harmonischen Last berechnet.

Für den Schienennahverkehr mit deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten wird allerdings aus den Ergebnissen in Bild 4 abgeleitet, daß die Erschütterungen in der Umgebung im wesentlichen die stationäre Anregung widerspiegeln, die sich auch für den mitbewegten Beobachter vom Zug aus ergeben. Der transiente Charakter einzelner Radvorbeifahrten und des Eigengewichts ist praktisch nur am Gleis bemerkbar. Diese Tatsache ergibt auch die Legitimation, bei den Berechnungen zur Ausbreitung der Erschütterungen die Bewegtheit der Last zu vernachlässigen und z.B. die über die Zuglänge verteilte stationäre Last als ortsfeste Erregung zu betrachten.

In dieser Betrachtungsweise ist das Zuggewicht eine rein statische Last und damit in den Schwingungen und insbesondere in den Schwinggeschwindigkeiten der Umgebung nicht enthalten. Als Konsequenz ergibt sich daraus, daß die Messung der Erschütterungsanregung direkt am Gleis unter Umständen - wie zum Beispiel bei so starker Dominanz des Gewichtsanteils wie bei den zitierten Messungen - für die Schwingungen der Umgebung irrelevant ist, während auf der anderen Seite die Messung der Schwingantworten in einiger Entfernung vom Gleis im Prinzip, wenn man die Ausbreitungscharakteristik des Bodens kennt, die "richtige", das heißt die mitbewegte Erregung liefert.

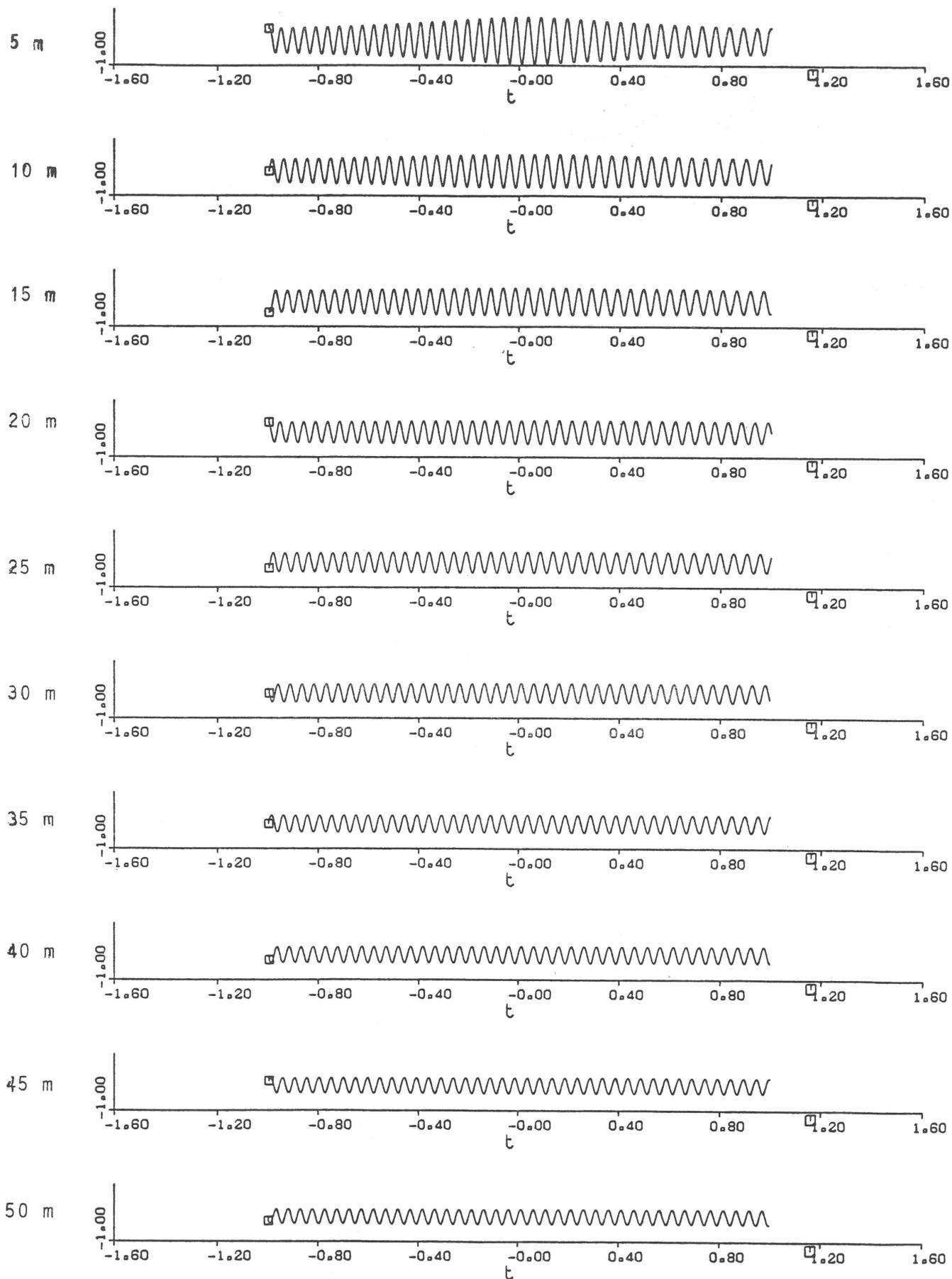


Bild 4

Schwingantworten des Bodens auf eine mit  $v = 60 \text{ km/h}$  vorbeifahrende harmonische Punktlast

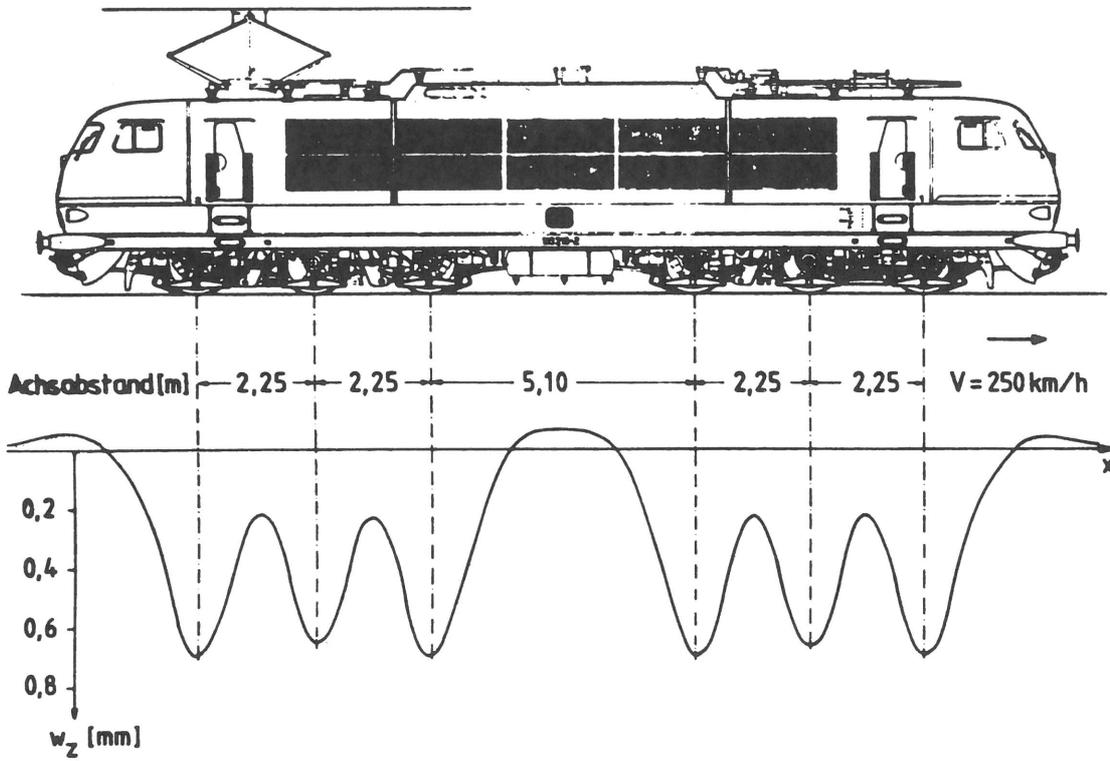
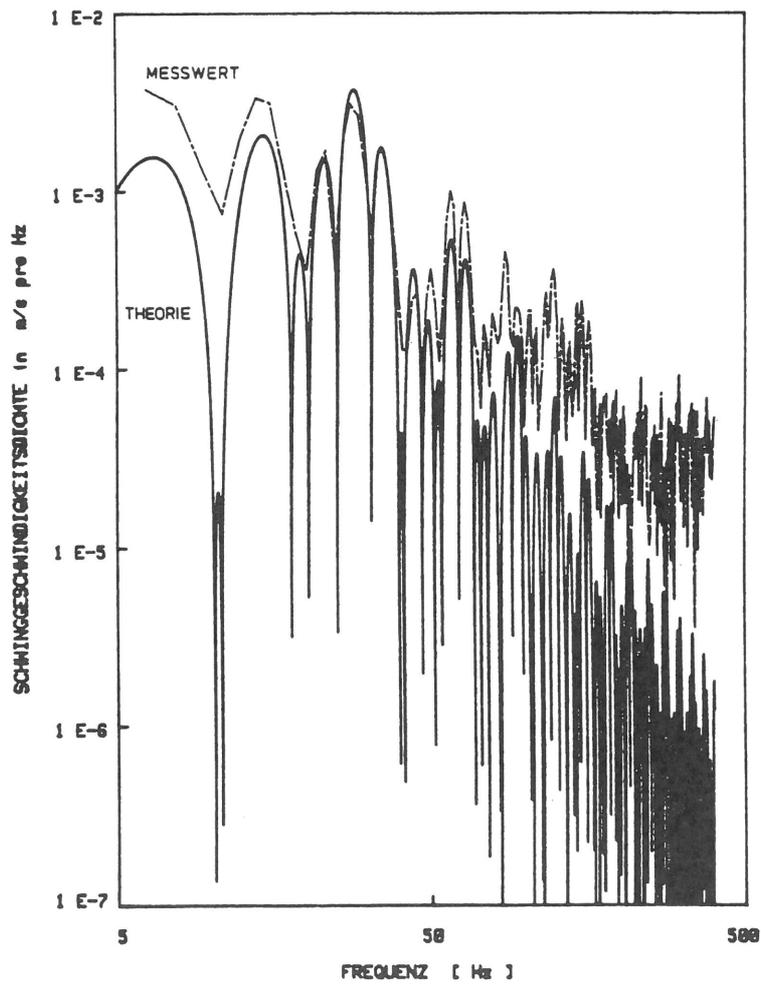


Bild 5  
 Überfahrt einer LOK 103  $v = 250$  km/h  
 Einsenkungslinie bei Schotteroberbau (oben),  
 Amplituden einer Schwelle (unten)



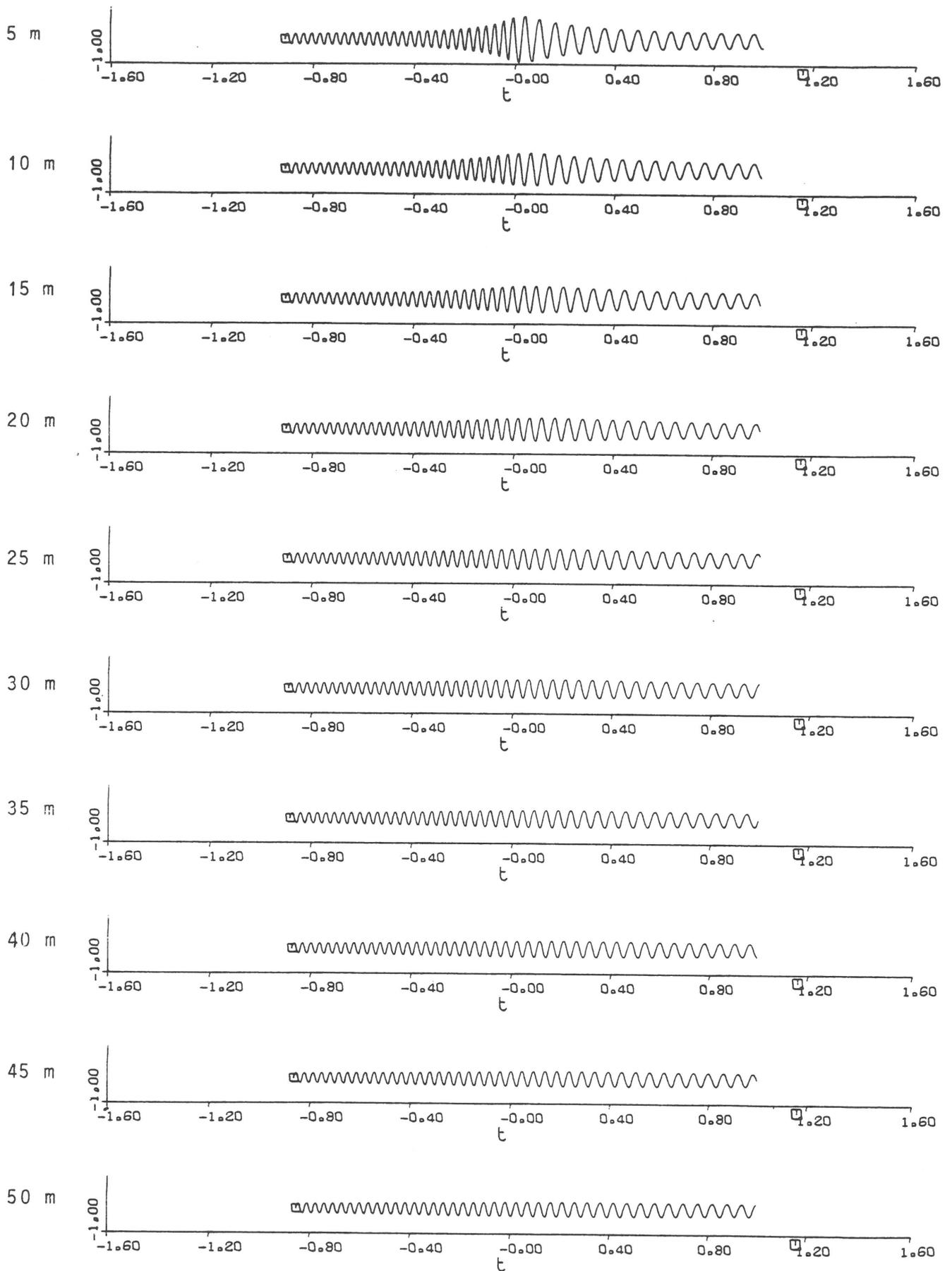


Bild 6

Schwingantworten des Bodens auf eine mit  $v = 250 \text{ km/h}$  vorbeifahrende harmonische Punktlast

## 5. Relevanz einzelner Anregungsanteile, Quantifizierung

Um einzelne Anregungsanteile zu quantifizieren, wird ein einfaches Fahrzeugmodell (Bild 7) betrachtet. Es handelt sich um einen Zwei-Massen-Schwinger, der aus ungefederter (Drehgestell-) und abgefederter (Wagenkasten-) Masse besteht. Zwischen Wagenkasten und Drehgestell wirken lineare Federn und Dämpfer, das Rad rollt über einen elastischen Fahrweg, der durch eine Feder berücksichtigt wird. Als Anregung wirken Fahrbahnunregelmäßigkeiten, das heißt die Höhenlage  $s(x)$  der unverformten Schiene ist zugleich der Unterschied zwischen dem Schwingweg  $z_1$  des Rades und der Zusammendrückung der Fahrbahnfeder und geht somit als Wegerregung in die Schwingungsgleichung ein. Diese Anregung ist mechanisch äquivalent zu der anschaulicheren Fußpunkterregung unterhalb der Fahrbahnfeder. Die dimensionslosen Parameter dieses Systems sind

-  $\mu = \frac{m_1}{m_2}$  das Verhältnis von ungefederter zu abgefederter Masse,

-  $\kappa = \frac{K}{c}$  das Verhältnis von Fahrbahnsteifigkeit zur Federsteifigkeit zwischen Wagenkasten und Drehgestell,

-  $D = \frac{r}{2\sqrt{cm_2}}$  das Dämpfungsmaß für die Wagenkastenschwingungen,

und bei Betrachtung harmonischer Störgrößen:

-  $\eta = \frac{f}{f_0}$  das Verhältnis der Anregungsfrequenz zur Eigenfrequenz

$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m_2}}$  des ungedämpft gelagerten Wagenkastens.

Als Ergebnis wird die dynamische Auflagerkraft  $P$  berechnet, und zwar ebenfalls dimensionslos im Verhältnis zur Trägheitskraft  $m\ddot{s}$ , die sich bei Anregung eines starren Fahrzeugs ( $m = m_1 + m_2$ ) auf starrer Fahrbahn ergeben würde.

Es wurde ein Parametersatz für eine Diesel- oder E-Lok aus dem Buch von Fryba [5] entnommen, aus dem auch die Anregung für dieses einfache Modell stammt. Ausgehend von diesem Parametersatz

$\mu = 0,25$  ,  $\kappa = 50$  ,  $D = 0,3$

wurden die einzelnen Parameter variiert (Bilder 8 bis 10). Es ergibt sich folgendes Schwingungsverhalten: Unterhalb der Wagenkasteneigenfrequenz ( $\eta < 1$ ) folgen beide Massen den Fahrbahnunregelmäßigkeiten, so daß  $P/m\ddot{s} = 1$ . Für höhere Frequenzen wird dieses Verhältnis kleiner und erreicht den Wert  $P/m\ddot{s}$

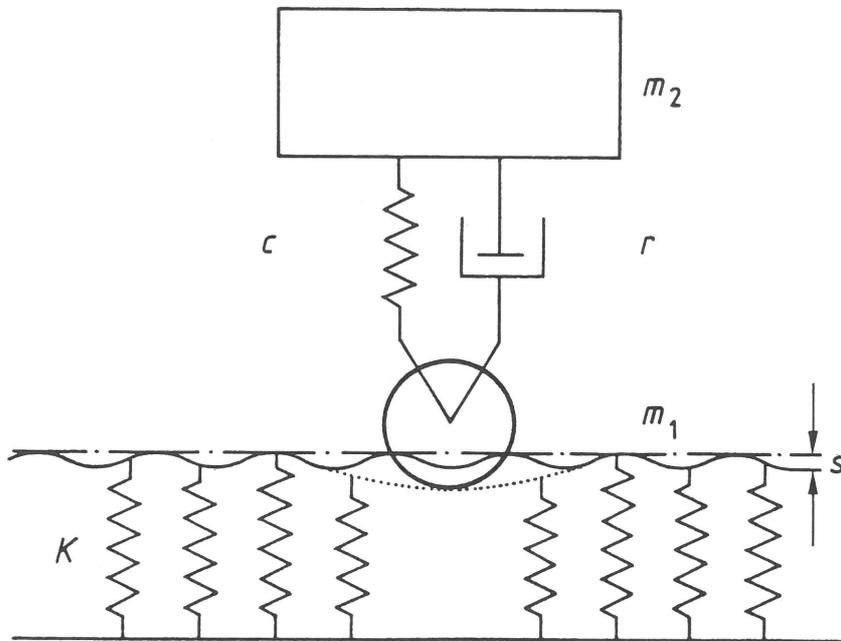


Bild 7

Ein einfaches Fahrzeug-Fahrweg-Modell zur Berechnung der dynamischen Aufstandskraft

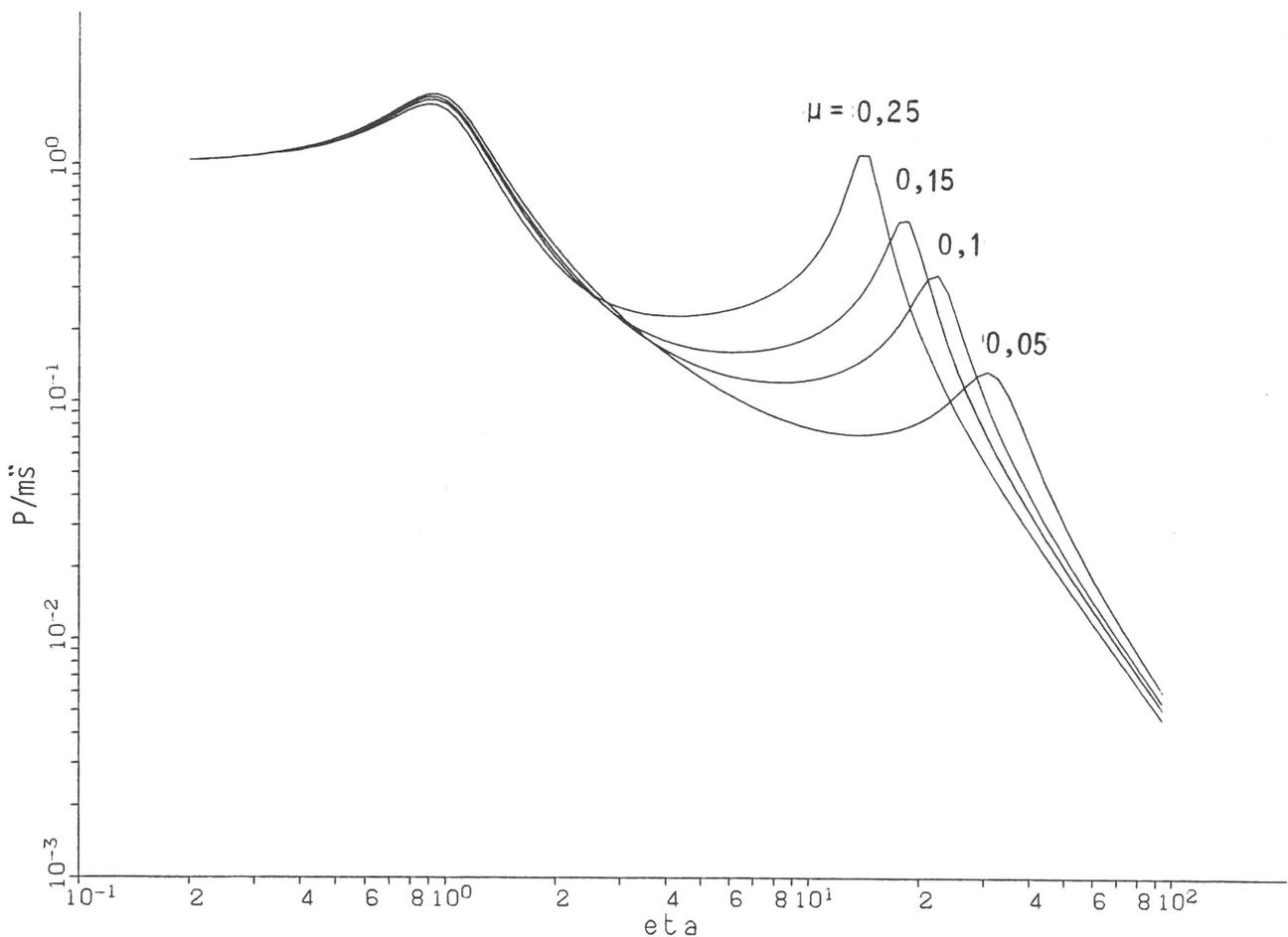


Bild 8

Dynamische Aufstandskraft im Verhältnis zur Störbeschleunigung, Amplitudenfrequenzgänge des Zwei-Massen-Fahrzeugmodells, Variation des Masseverhältnisses  $\mu$  ( $\kappa=50$ ,  $D=0,3$ )

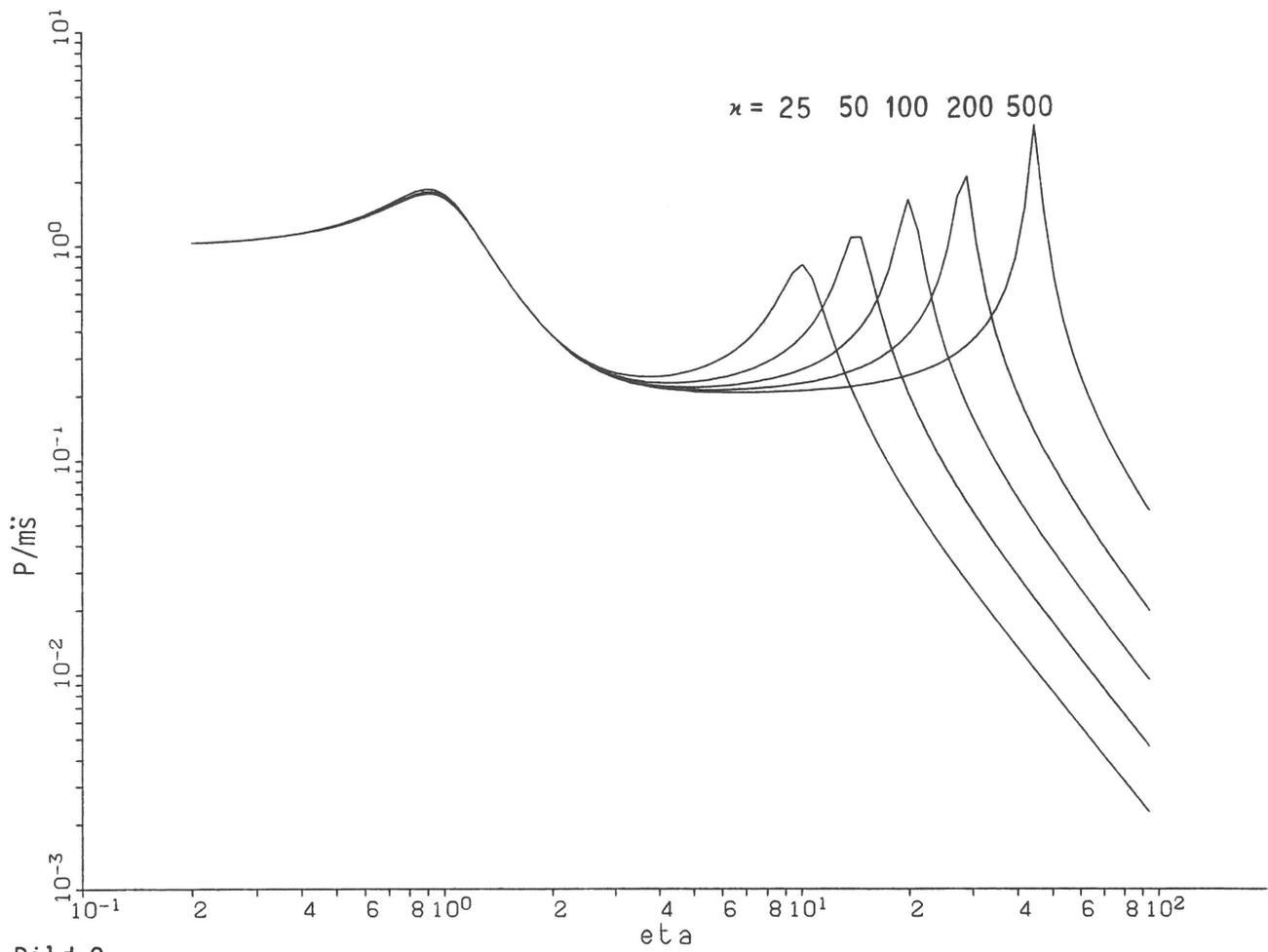


Bild 9  
 Variation des Steifigkeitsverhältnisses  $\kappa$  ( $\mu = 0,25$ ;  $D = 0,3$ )

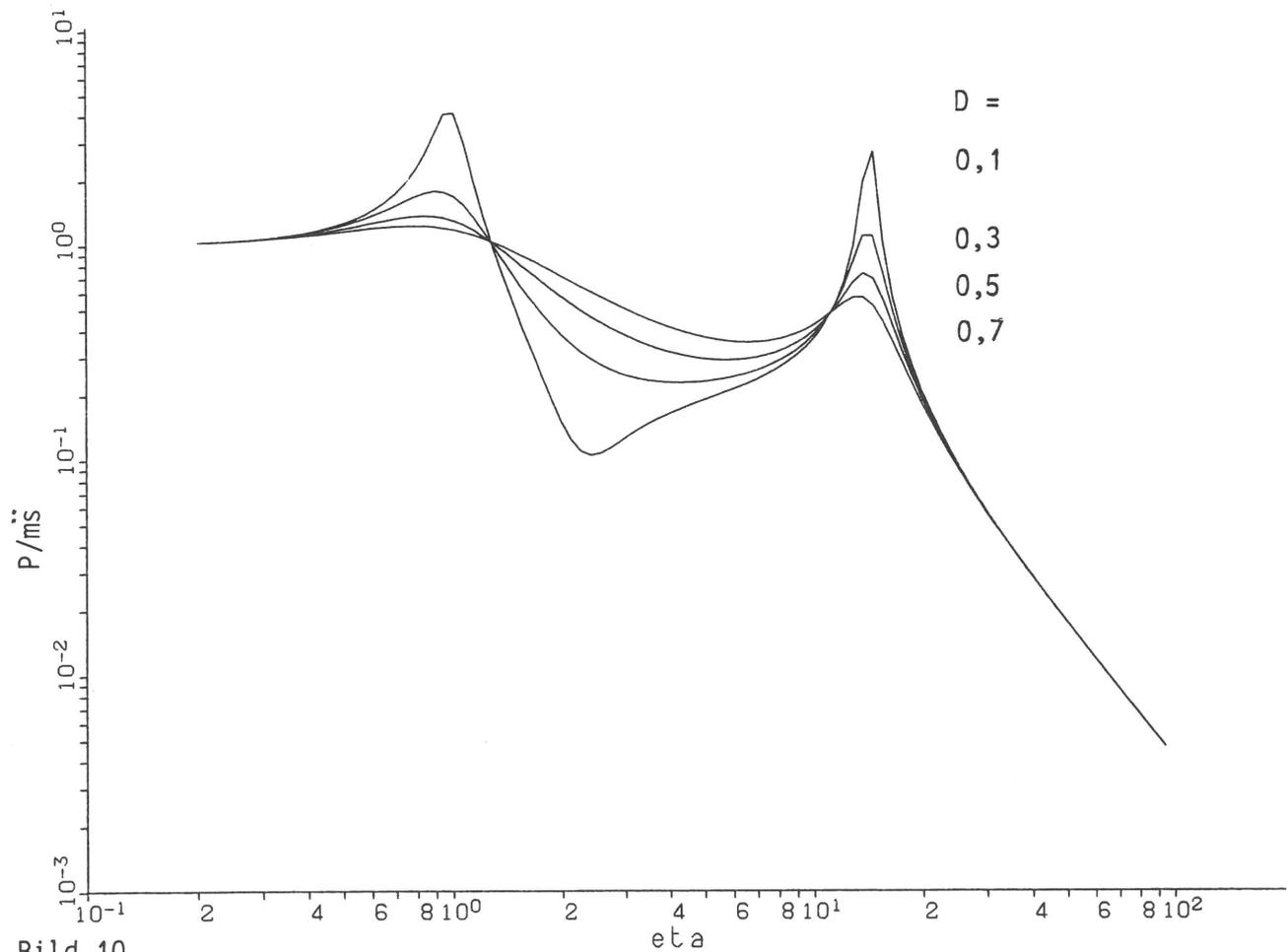


Bild 10  
 Variation der Dämpfung  $D$  ( $\mu = 0,25$ ;  $\kappa = 50$ )

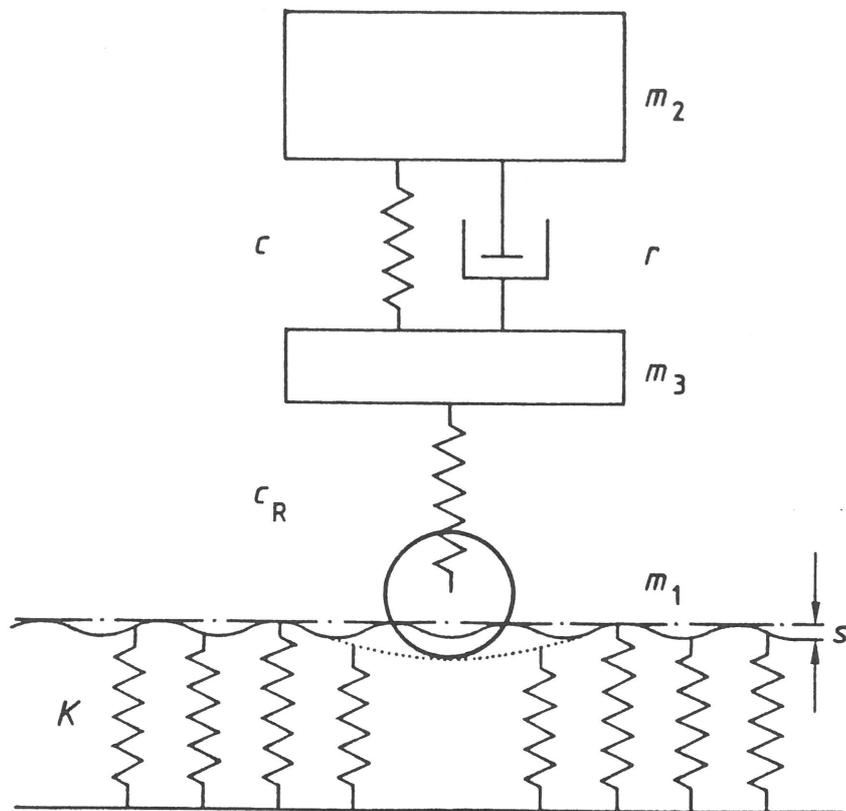


Bild 11  
Das Drei-Massen-Fahrzeugmodell auf nachgiebigem Fahrweg

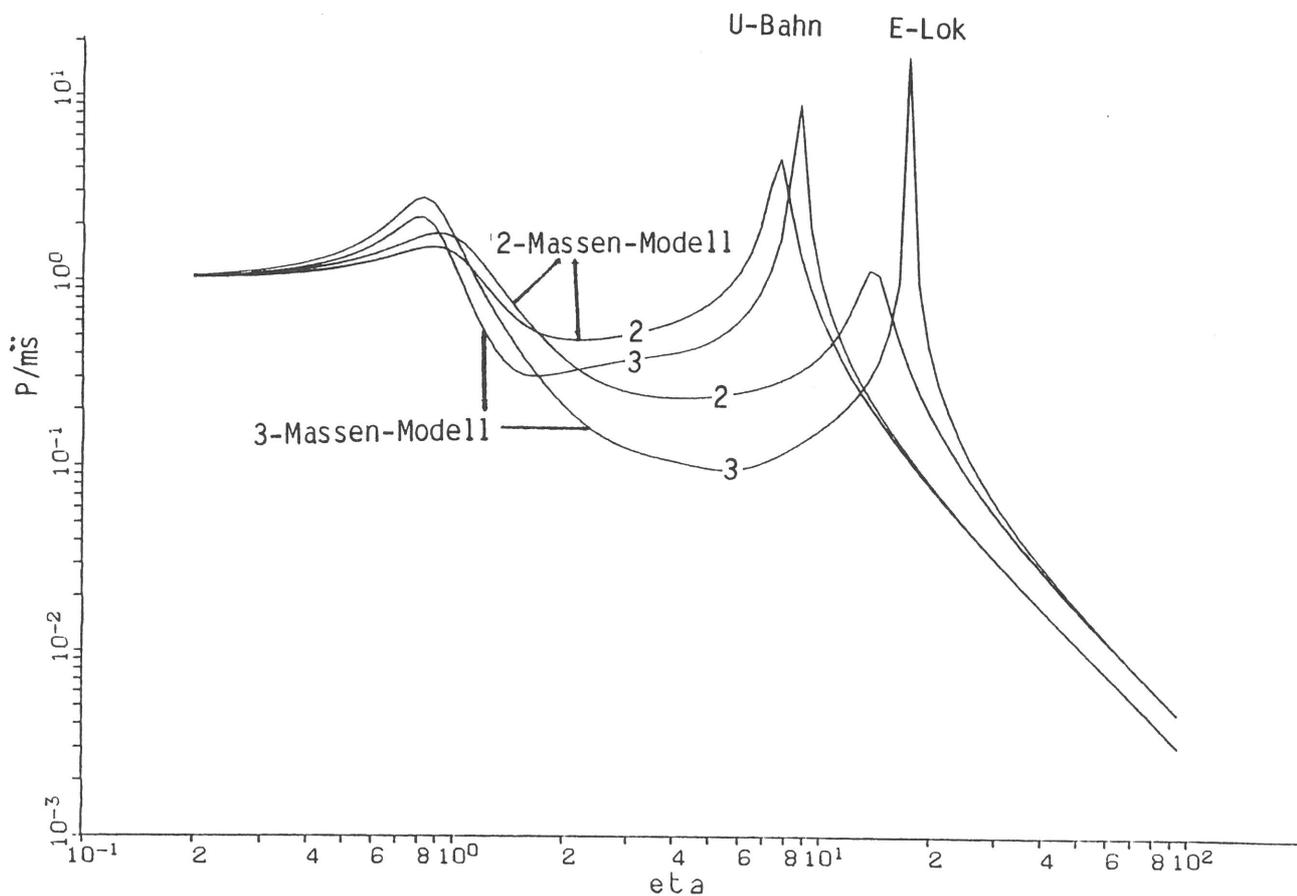


Bild 12  
Dynamische Aufstandskraft im Verhältnis zur Störbeschleunigung, Amplitudenfrequenzgänge des Zwei- und des Drei-Massen-Modells im Vergleich

U-Bahn  $\mu_1 = 0,7$  ;  $\mu_2 = 0,2$  ;  $\kappa_1 = 50$  ;  $\kappa_2 = 2,5$  ;  $D = 0,3$

E-Lok  $\mu_1 = 0,17$  ;  $\mu_2 = 0,5$  ;  $\kappa_1 = 50$  ;  $\kappa_2 = 2,5$  ;  $D = 0,3$

=  $m_1/m$ . Das heißt  $P = m_1 \ddot{s}$ , die Kraft entspricht nur noch der Trägheitskraft der ungefederten Masse. Dies wird auch besonders deutlich bei der Variation des Massenverhältnisses (Bild 8). Die zweite Eigenfrequenz ist durch die Nachgiebigkeit der Fahrbahn bestimmt, so wie dies aus der Variation des Steifigkeitsverhältnisses hervorgeht (Bild 9). In ihr schwingt im wesentlichen die ungefederte Masse gegen die Fahrbahnfeder, wogegen die Wagenkastenfederung vernachlässigbar klein ist. Lediglich die Wagenkastendämpfung macht sich durch die Beschränkung der Resonanzhöhe bemerkbar. Oberhalb dieser Eigenfrequenz fällt das Kraftverhältnis  $P/m\ddot{s}$  mit  $\eta^2$  ab. Das heißt die Kraft ist proportional zur Störung  $s$ , die Massen bewegen sich annähernd ohne Höhenänderung über die Fahrbahn, wobei die Störung mit der Kraft  $P = Ks(t)$  nach unten gegen die Fahrbahnsteifigkeit  $K$  weggedrückt wird. In Bild 10 ist schließlich der Einfluß der Dämpfung dargestellt. Sie bestimmt einerseits die Resonanzüberhöhungen beider Eigenfrequenzen, andererseits den Abfall der bezogenen Kraft zwischen den beiden Resonanzen. Geringere Dämpfung ergibt einen schnelleren Abfall. Für die kleinste berechnete Dämpfung  $D = 0,1$  wird die Kraft sogar kleiner als die Trägheitskraft der ungefederten Masse, da die abgefederte und die ungefederte Masse gegenphasig schwingen.

Um dieses sehr einfache Modell etwas abzusichern, wurde zum Vergleich auch ein 3-Massen-Modell (Bild 11) berechnet, das auch die Federung der Radsätze im Drehgestellrahmen berücksichtigt. Dazu stand ein Datensatz für einen U-Bahnwagen der Berliner BVG zur Verfügung. Gegenüber dem 2-Massen-Modell kommen die beiden Parameter

- $\mu_2 = \frac{m_3}{m_1}$  Verhältnis der Masse des Drehgestellrahmens zur Masse der Radsätze und
- $\kappa_2 = \frac{c_R}{c}$  Verhältnis der Federkonstanten von Radsatz und Drehgestellrahmen.

Der Parametersatz für den U-Bahnwagen ist

$$\mu_1 = \mu = 0,7 \quad , \quad \kappa_1 = \kappa = 50 \quad , \quad D = 0,3 \quad ,$$

$$\mu_2 = 0,2 \quad , \quad \kappa_2 = 2,5 \quad .$$

Außerdem wird auch das Modell der Lokomotive mit dem gleichen Steifigkeitsverhältnis  $\kappa_2 = 2,5$  und dem Massenverhältnis  $\mu_2 = 0,5$  erweitert. Der geringere Wert  $\mu_2 = 0,2$  beim U-Bahnwagen kommt von der großen ungefederten Masse  $\mu_1$ , in der der Motorblock, der direkt auf den Radsätzen abgestützt ist, enthalten ist. Bild 12 zeigt jeweils den Vergleich zwischen dem 2-Massen- und dem 3-Massen-Modell. In den dargestellten Frequenzgängen der dynamischen Auflagerkraft macht sich die doppelte Federung nur wenig bemerkbar. Es gibt keine zusätzliche Resonanzstelle, auch für die (hier nicht dargestellte)

Schwingung des Drehgestellrahmens ergibt sich keine Resonanzüberhöhung bei der dritten Eigenfrequenz ( $\eta_3 \approx 5$ ). Die zweifache Abfederung hat vielmehr ähnliche Auswirkungen wie eine Verminderung der Dämpfung (vergleiche Bild 10). Die Resonanzen werden verstärkt und die Werte im Frequenzbereich zwischen den Resonanzen sind kleiner. Diese Ähnlichkeit beruht darauf, daß auch hier wie beim schwachgedämpften 2-Massen-System eine zusätzliche Phasendrehung durch den Drehgestellrahmen dazu führt, daß sich die Trägheitskräfte zum Teil kompensieren können. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß bei der Lok oberhalb der "Drehgestellrahmeneigenfrequenz" ( $\eta_3 \approx 5$ ) nur noch die halbe ( $\mu_2 = 0,5!$ ) Drehgestellmasse der Anregung  $s(t)$  folgt.

Um diese Ergebnisse für eine Abschätzung der Erregerkräfte zu benutzen, muß der Frequenzmaßstab noch konkretisiert werden. Die Wagenkasteneigenfrequenz, auf die die Frequenzen bezogen sind, liegt zwischen 2 und 4 Hz, für den berechneten U-Bahnwagen zum Beispiel bei 2,56 Hz. Die berechneten "Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenzen" liegen demnach zwischen 30 und 90 Hz je nach Steifigkeit des Untergrundes und der Größe der ungefederten Masse. Da beim berechneten U-Bahnwagen der Motorblock zur ungefederten Masse gehört, liegt hier diese Eigenfrequenz mit 24 Hz sehr niedrig.

Die dynamischen Radlasten infolge von Unebenheiten lassen sich nun für den mittleren Frequenzbereich zwischen etwa 5 und 30 Hz durch die Trägheitskraft der mit der Störung  $s(t)$  mitgehenden ungefederten Fahrzeugmasse abschätzen

$$P \approx m_1 \ddot{s} = m_1 s_0 \omega^2 .$$

Nimmt man als Beispiel eine Unebenheit

$$\begin{aligned} s_0 &= 0,05 \text{ mm mit} \\ f &= 30 \text{ Hz an und} \\ m_1 &= 2 \cdot 10^3 \text{ kg,} \end{aligned}$$

so ergibt sich eine Kraft von

$$P = 3,6 \text{ kN.}$$

Liegt die Anregungsfrequenz höher als die "Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenz", dann wird die Störung im wesentlichen durch ein Wegdrücken der Fahrbahn aufgefangen und als dynamische Last wirkt die dazu benötigte Kraft

$$P = K s .$$

Für eine Unebenheit von

$$\begin{aligned} s_0 &= 0,05 \text{ mm und mit} \\ K &= 100 \text{ kN/mm} \end{aligned}$$

ergibt das

$$P = 5 \text{ kN.}$$

Für den betrachteten U-Bahnwagen bedeutet dies einen dynamischen Lastanteil von ungefähr 10 % gegenüber der statischen Achslast. Unebenheitsamplituden des Rades oder der Schienen von 0,05 mm, das heißt Differenzen von einem Zehntel Millimeter können schon als deutliche Störungen angesehen werden. (Schätzt man die resultierenden Erschütterungen in der Umgebung grob ab - 15 m Entfernung, Lockerboden mit  $v_s = 200$  m/s -, so kommt man auf Schwinggeschwindigkeiten von 0,2 mm/s, das ist durchaus ein typischer Meßwert für Schienenverkehrsmessungen.)

Als nächstes sollen die Erregerkraftanteile aus den Schwankungen der Fahrbahnnachgiebigkeit betrachtet werden, die sich einerseits durch die diskrete Stützung der Schiene auf den Schwellen und andererseits durch Unregelmäßigkeiten im Schotterbett ergeben. Streng genommen müßte unter diesen Umständen das System Fahrzeug-Fahrbahn als ein Schwingungssystem mit zeitveränderlichen Parametern betrachtet werden. In dem einfachen System (Bild 7) zum Beispiel wäre die Federkonstante  $K$  der Fahrbahn durch  $K(t)$  zu ersetzen. Solche Systeme werden in manchen Fällen schon durch die Parameterschwankungen zu Schwingungen angeregt. Auch ohne äußere Anregung werden bei kleinen Anfangsstörungen Schwingungen angefacht, das System ist instabil. Diese Parametererregung des Rad-Schiene-Systems wurde in [6] untersucht, mit dem Ergebnis, daß Instabilitäten erst bei Geschwindigkeiten von 300 km/h auftreten können. Für niedrige Geschwindigkeiten besteht der Haupteffekt der Parameterschwankung in dem Zusammenwirken mit dem Eigengewicht des Zuges. Die dabei auftretenden dynamischen Kräfte sollen nun ebenfalls mit dem einfachen Fahrzeugmodell abgeschätzt werden. Die Fahrbahnfedersteifigkeit  $K(t)$  wird zerlegt in den konstanten mittleren Anteil  $K_1$  und den Schwankungsanteil  $K_2(t)$ . Die Differentialgleichung für die ungedeferte Fahrzeugmasse lautet

$$m_1 \ddot{z}_1 + K(t) z_1 = G,$$

wobei  $G$  das Gewicht des Zuges ist und die weiche Kopplung an den Wagenkasten zur besseren Übersichtlichkeit weggelassen ist. Subtrahiert man von  $z_1$  die mittlere statische Nulllage  $z_0 = G/K_1$ , so lautet die Differentialgleichung für die neue Koordinate  $z = z_1 - z_0$

$$m_1 \ddot{z} + K(t) z = G - K(t) z_0 = -G K_2(t)/K_1.$$

Die rechte Seite entspricht einer Wegerregung mit

$$s(t) = -G K_2(t)/K_1^2.$$

Dies ist gerade die Schwankung  $\delta$  der statischen Einsenkung der Schiene (in erster Näherung für kleine Schwankungen  $K_2/K_1$ ):

$$z_{0+\delta} = \frac{G}{K_1 - K_2}$$

$$z_{0-\delta} = \frac{G}{K_1 + K_2}$$

$$2\delta = G \frac{K_1 + K_2 - (K_1 - K_2)}{K_1^2 - K_2^2} \approx 2G K_2 / K_1^2.$$

Zur Abschätzung der dynamischen Kräfte kann man nun in erster Näherung das Fahrzeugmodell mit konstanten Parametern heranziehen. Die Frequenz der Störung hängt von der Fahrgeschwindigkeit  $v$  und dem Stützpunktabstand  $l$  ab -  $f = v/l$  - und beträgt für

$v = 30 \text{ km/h}$	$f = 12,5 \text{ Hz}$
$v = 50 \text{ km/h}$	$f = 21 \text{ Hz}$
$v = 70 \text{ km/h}$	$f = 30 \text{ Hz}$
$v = 100 \text{ km/h}$	$f = 42 \text{ Hz}$

( $l = 0,65 \text{ m}$ ). Für die Amplitude der Störung, das ist die zusätzliche Einsenkung der Schiene zwischen den Schwellen, werden in [7] Werte von  $2\delta = 0,05 \dots 0,1 \text{ mm}$  angegeben. Die Kraftamplitude wächst zunächst mit der Frequenz, das heißt zugleich mit der Fahrgeschwindigkeit an. Bei  $70 \text{ km/h}$  bzw.  $30 \text{ Hz}$  ergibt sich analog zur Betrachtung bei den Unebenheiten

$$P = m_1 s_0 \omega^2 = 1,8 \dots 3,6 \text{ kN}.$$

Bei Frequenzen oberhalb der "Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenz" wird der maximale Wert

$$P = K s = 2,5 \dots 5 \text{ kN}$$

erreicht. Dieser Frequenzbereich dürfte mit den Fahrgeschwindigkeiten des Schienennahverkehrs kaum erreicht werden. Bemerkenswert ist immerhin, daß diese obere Grenze

$$P = K s = \frac{K_2}{K_1} G = \frac{\delta}{z_0} G$$

vom Verhältniswert der zusätzlichen Steifigkeit zur mittleren Steifigkeit bzw. der (halben) Sekundärdurchbiegung zur Durchbiegung der Schiene abhängt. Für höhere Zuggeschwindigkeiten bedeutet das, daß durch eine Vergrößerung der statischen Einsenkung z.B. durch hochelastische Schienenlager und damit einer Verkleinerung dieses Verhältniswertes die Erregerkraft infolge diskreter Schienenstützung vermindert werden kann, so wie dies in [7] vorgeschlagen wird. Dem Aufsatz [7] entnimmt man auch Werte für  $\delta/z_0$  von bis zu  $5\%$ , das heißt der dynamische Lastanteil aus der diskreten Stützung kann mit maximal  $5\%$  der statischen Achslast abgeschätzt werden. (Es soll zusätzlich noch erwähnt werden, daß diese Abschätzung  $P \leq G K_2/K_1$  auch unmittelbar aus der Überlegung gewonnen werden kann, daß das Rad sich für hohe Frequenzen annähernd in konstanter Höhenlage  $z_0 = G/K_1$  bewegt. Die Auflagerkraft berechnet sich dann allein aus

$$P = K(t) z_0 = (K_1 + K_2(t)) z_0 = G + K_2(t) z_0 .$$

Der dynamische Anteil ist demnach

$$P_{\text{dyn}} = K_2 z_0 = \frac{K_2}{K_1} G .)$$

Die Anregung durch die diskrete Schienenstützung besitzt eine herausragende Eigenschaft: Sie ist die einzige Anregungskomponente, wenn man einmal vom statischen bzw. im Nahbereich transient wirkenden Eigengewicht absieht, die in jedem Fall vorhanden sein muß. Sie ist keine Störung, sondern eine auch bei idealem Fahrzeug- und Fahrwegzustand vorhandene, konstruktionsbedingte Eigenschaft. Sie muß sich prinzipiell an jedem Ort und unter verschiedenen Bedingungen, sofern sie nicht von größeren Störungen überlagert ist, in Messungen wiederfinden lassen. In [8] wurde dieser Anregung größere Bedeutung beigemessen, und sie konnte bei allen gemessenen Fahrgeschwindigkeiten nachgewiesen werden.

Über die Erregerkräfte, die durch regellose Schwankungen der Fahrbahnsteifigkeit  $K$  zustandekommen, läßt sich mit obigen Ergebnissen zumindest sagen, daß auch sie maximal einen der relativen Steifigkeitsschwankung entsprechenden Eigengewichtsanteil mit Streuungen von 10 % und mehr ergeben. Für den Oberbau sind sicherlich große Zustandsschwankungen örtlich möglich (siehe zum Beispiel Nullsetzungen). Diese Schwankungen schlagen aber wegen der lastverteilenden Wirkung der Schiene nicht voll auf die Federsteifigkeit des Radaufstandspunktes durch, so daß die Auswirkungen der regellos streuenden Fahrbahnsteifigkeit auch nur in der Größenordnung von denen der Unebenheiten liegen. Charakteristisch ist allerdings, daß die damit verbundenen Störwellenlängen nur der Schwellenabstand und Vielfache davon sein können. Damit ist die Anregungsfrequenz durch die oben angegebenen Frequenzen je nach Fahrgeschwindigkeit begrenzt.

Bei den bisherigen Betrachtungen sind die Resonanzüberhöhungen bei den Eigenfrequenzen nicht berücksichtigt worden. Insbesondere bei der Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenz ergibt sich eine markante Spitze. Diese ist jedoch eine Folge der groben Modellierung der Fahrbahn als elastische Bettung. Tatsächlich besitzt die Fahrbahn auch Dämpfungseigenschaften, die hier kurz anhand der Feder- und Dämpferwerte einer Schwelle auf dem Untergrund (elastischer Halbraum) betrachtet werden: Das Verhältnis von Dämpfungs- zu Federkraft ist für ein flächengleiches starres Kreisfundament

$$\frac{r\omega}{K} = \frac{\omega R}{v_s} .$$

Für einen Lockerboden mit der Scherwellengeschwindigkeit  $v_s = 200 \text{ m/s}$  und

dem Fundamentradius  $R = 0,45$  für eine Schwelle bedeutet das, daß bei 70 Hz Dämpfungs- und Federkraft gleich groß sind. Dementsprechend liegt bei der Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenz bei etwa 35 Hz eine Dämpfung von  $D = 0,25$  und damit nur eine Resonanzüberhöhung um den Faktor 2 vor. Nach diesen Überlegungen ist also auch die Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenz ebenso wie die Eigenfrequenz des starren Wagenkastens so stark gedämpft, daß sie in der dynamischen Radlast kaum herausragen dürfte.

Eigenschwingungen, die sich in der Aufstandskraft und damit den Erschütterungen der Umgebung deutlich bemerkbar machen, können nur Eigenschwingungen mit geringer Dämpfung sein, also insbesondere elastische Eigenschwingungen von Fahrzeugteilen, bei denen hauptsächlich nur die sehr geringe Materialdämpfung wirkt. In [9] werden experimentell und rechnerisch die elastischen Eigenfrequenzen und Schwingformen des Wagenkastens untersucht. Für die erste Biegeeigenfrequenz des Wagenkastens (Bild 13) wird zum Beispiel der Wert 13 Hz angegeben: Die Bedeutung dieser Eigenfrequenz dürfte allerdings auch gering sein, da erstens die Trägheitskräfte sich zum großen Teil gegenseitig kompensieren und die resultierenden Auflagerkräfte dadurch klein bleiben und zweitens die Auflager annähernd in den Schwingungsknoten der Eigenform liegen und so die Störung die Eigenform kaum anregt. Anders verhält es sich bei der zweiten Biegeeigenfrequenz des Wagenkastens (Bild 13). Allerdings liegt dann die Frequenz so hoch, daß der Wagenkasten als dynamisch entkoppelt betrachtet werden kann und die Fahrbahnstörungen den Wagenkasten kaum noch erreichen. Elastische Eigenfrequenzen des Wagenkastens dürften demnach für die Erschütterungsanregung der Umgebung keine Rolle spielen. Schließlich sollen die Eigenschwingungen im Drehgestell betrachtet werden. Für den Frequenzbereich bis 100 Hz kommen nur noch Schwingungen der Achsen in Frage, die Eigenfrequenzen der Radscheibe liegen deutlich darüber (ab 400 Hz). Für die Biegeeigenschwingungen der Achsen werden häufiger (z.B. in [10]) Frequenzen um 60 Hz angegeben. Für diese Schwingungen sind alle Voraussetzungen für eine relevante Beteiligung an der Erschütterungsanregung gegeben: Direkte Anregung durch die Fahrbahnstörungen, geringe Dämpfung, einsinnige Trägheitskräfte. Lediglich die vergleichsweise geringe Masse lassen an der Bedeutung der Achsschwingungen zweifeln. Es werden jedoch häufig starke Schwingungsanteile im Frequenzbereich von 50 bis 70 Hz gemessen, die diesen Eigenfrequenzen zugeordnet werden (siehe zum Beispiel [8]).

Die Eigenschwingungen des Fahrzeugs wurden so ausführlich diskutiert, um aufzuzeigen, daß es nicht ausreicht, lediglich die Eigenfrequenz auszurechnen und mit den Frequenzbereichen, in denen große Schwingungsanteile gemessen werden, zu vergleichen. In vielen Fällen dürfte die Eigenschwingung ge-

nügend stark gedämpft sein, oder sie kann von den Fahrbahnstörungen kaum angeregt werden oder die Eigenschwingung bleibt ohne Auswirkung auf den Untergrund.

Ähnlich kritisch wie die Interpretation von Meßwerten durch Eigenfrequenzen ist die Betrachtung der Frequenzen, die sich aus Achsgeometrie und Fahrgeschwindigkeit formal berechnen lassen. Eine einzelne Schwelle erfährt bei der Überfahrt eines Zuges eine Impulsfolge, wobei der zeitliche Abstand der Impulse den Achsabständen entspricht und die Impulsdauer durch die Breite der Einsenkungslinie der Schiene gegeben ist. Im Frequenzgehalt spiegeln sich diese Merkmale der Impulsfolge folgendermaßen wider: Ein einzelner Impuls hat ein breitbandiges Spektrum, dessen Hauptteil im Bereich zwischen 0 Hz und etwa  $f = 3/2T$  liegt. Die Impulsdauer  $T$  beziehungsweise die Breite der Schieneneinsenkung legt also die Bandbreite des Spektrums fest. Bei den Frequenzen, die sich aus dem Achsabstand  $l$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v$  gemäß  $f = v/l$  ergeben, könnte man einen Spitzenwert erwarten. Es soll dazu noch einmal das im Abschnitt 4 angeführte Beispiel aus [4] betrachtet werden. Das Spektrum der Überfahrt einer Lokomotive mit 250 km/h (Bild 5) zeigt von 5 bis knapp 50 Hz annähernd gleich große Werte mit einzelnen Maxima, oberhalb von 50 Hz fällt es mit der Frequenz ab. Eines dieser Maxima (nicht das absolute Maximum) liegt etwa bei 30,9 Hz, der Frequenz, die dem Achsabstand  $l = 2,25$  m im Drehgestell entspricht. Dieses Maximum kommt dadurch zustande, daß in diesem Fall in relativ kurzer Zeit 6 Impulse im Abstand  $t = l/v$  entstehen, wobei sich die beiden Impulsgruppen der Drehgestelle auch noch annähernd phasenrichtig überlagern. Über die gesamte Zuglänge gesehen, ist die Impulsfolge weit zufälliger. Man hat nur zwei Impulse pro Drehgestell, wobei die Drehgestelle weiter voneinander entfernt liegen und sich außerdem die Impulsgruppen auch gegenphasig überlagern können. All dies spricht dafür, daß in den "Achs-Abstands-Frequenzen" keine herausragenden Schwingungsanteile auftreten. Wichtig ist vielmehr, daß durch die Breite der Schieneneinsenkung der wesentliche Frequenzbereich der Impulse eingegrenzt wird. In dem Beispiel liegt die Frequenzgrenze

$$f = 3/2T = 3v/2l = 42 \text{ Hz}$$

wegen der hohen Geschwindigkeit sehr hoch. Bei 50 km/h liegt der Frequenzgehalt unter 10 Hz. Die Breite der Schieneneinsenkung  $l = 2,5$  m stimmt im übrigen mit dem kleinsten Achsabstand (dem Abstand im Drehgestell) annähernd überein, so daß die Frequenzen, die aus der Achsgeometrie abgeleitet werden, immer in dem wesentlichen Frequenzbereich der Impulse liegen. Die Erläuterungen sollen jedoch zeigen, daß es sich im wesentlichen um ein breitbandiges Impulsspektrum und nicht um Schwingungen in den "Achs-Abstands-Frequen-

zen" handelt. Wie bereits im Abschnitt 4 dargelegt, sind die Achsüberfahrten außerdem nur im Gleis und dessen unmittelbarer Umgebung zu beobachten.

In der bisherigen Diskussion wurde die Vertikaldynamik des Fahrzeugs betrachtet. Die Ergebnisse lassen sich prinzipiell auch auf die Querdynamik übertragen. Bei der Übertragung von Störungen von der Schiene auf das Fahrzeug sind allerdings einige Besonderheiten der Querdynamik zu beobachten:

- Die Nachgiebigkeit der Schiene ist wegen der Verformbarkeit des Schienenquerschnitts in Querrichtung größer als in der Vertikalen. (In [11] werden Meßergebnisse zitiert, bei denen die Nachgiebigkeit der Schiene zu 60 bis 90 % durch die Verformungen des Schienenquerschnitts bestimmt ist).
- Es existiert ein zusätzlicher Freiheitsgrad zwischen Schiene und Rad.

Diese beiden Merkmale führen dazu, daß horizontale Störungen weniger stark auf das Fahrzeug übertragen werden und damit die auf den Untergrund wirkenden Kräfte kleiner als bei gleich großer vertikaler Störung sind. Andererseits tritt in der Querdynamik eine zusätzliche tieffrequente Eigenschwingung (unter 5 Hz), der Sinuslauf der Radsätze, auf.

Bei der Kurvenfahrt wirken sich die der Querbeschleunigung entsprechenden Querkräfte so wie das Eigengewicht in der Vertikaldynamik aus: Im Nahbereich des Gleises als Querkraftimpulse, im Zusammenhang mit den Schwankungen der Fahrbahnnachgiebigkeit als periodische Erregung. Die auftretenden Querkräfte sind jedoch kleiner als die Vertikalkräfte.

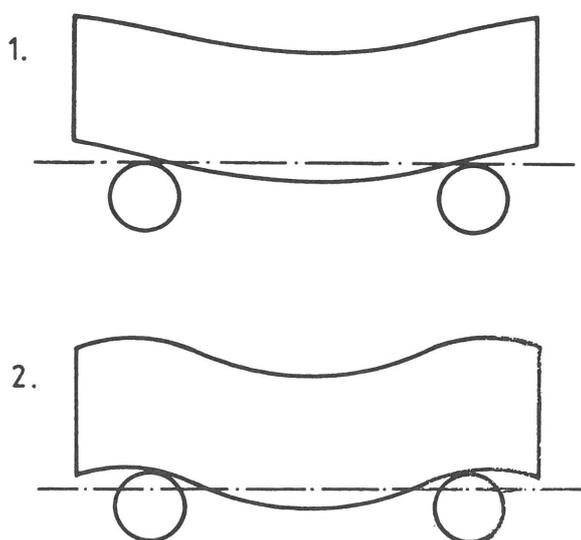


Bild 13  
1. und 2. Biegeeigenform  
des Wagenkastens

## 6. Zusammenfassung

Die Zusammenstellung der einzelnen Anteile der Erschütterungsanregung infolge Zugverkehr führt zur Konkretisierung des transienten und stochastischen Charakters der Erregung. Als Ergebnisse, die für die Berechnung der Ausbreitung durch den Boden benötigt werden, sind festzuhalten:

- bestimmte Korrelationen zwischen den Kräften einzelner Achsen,
- die Tatsache, daß der transiente Charakter, der sich durch die Vorbeifahrt des Zuges bzw. einzelner Achsen ergibt, nur für das Gleis und dessen unmittelbare Umgebung eine Rolle spielt.

Ein von dem Problem der Erschütterungsprognose losgelöster Abschnitt beschäftigt sich mit der Relevanz einzelner Anregungsanteile. Deren Größe wird basierend auf Rechnungen mit stark vereinfachten Fahrzeug-Fahrweg-Modellen näherungsweise abgeschätzt. Die Diskussion verschiedener Anregungsanteile führt auch zu einer Kritik der rein frequenzmäßigen Betrachtungsweise, bei der allein aufgrund der gleichen Frequenz ein Zusammenhang zwischen Meßergebnissen und theoretisch bestimmten Schwingungsformen hergestellt wird, ohne die Möglichkeit der Anregung und die tatsächliche Kraftwirkung auf den Untergrund zu untersuchen. Berechnungen mit verfeinerten Fahrzeug-Fahrweg-Modellen wären hierzu wünschenswert.

# Teil II Zur Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen

---

Inhalt	Seite
<b>Teil II Zur Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen</b>	<b>39</b>
1. Einleitung und Zielsetzung	40
2. Besonderheiten der Erregung durch Zugverkehr	42
3. Die elementaren Lastfälle und die zur Ableitung der Abnahmegesetze verwendeten Methoden	44
3.1 Punkt- und Linienlast	44
3.2 Berücksichtigung der hysteretischen Materialdämpfung des Bodens	44
3.3 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei deterministischen und stochastischen Streckenlasten („Superpositionsverfahren“)	46
3.4 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei harmonischen Lasten, die über ein starres Fundament in den Boden eingeleitet werden	47
4. Einflüsse auf das Amplituden-Abstands-Gesetz	49
4.1 Zerstreung durch regellose Schwankungen der Bodeneigenschaften	49
4.2 Nichtlineare Dämpfung des Bodens	49
4.3 Impulsartige Anregung	50
4.4 Abhängigkeit von der betrachteten Amplitudengröße	52
4.5 Dämpfungswirkung bei breitbandiger Anregung	54
4.6 Übersicht über die in Abschnitt 4 abgeleiteten Amplituden-Abstand-Gesetze	57
5. Die Schwingungsausbreitung bei einer gleichphasigen Streckenlast	58
5.1 Berechnung mit dem Superpositionsverfahren	58
5.2 Berechnung mit dem Wechselwirkungsverfahren	63
6. Gesetzmäßigkeiten bei stochastischer Lastverteilung über die Zuglänge	67
6.1 Simulationsrechnungen mit zufällig erzeugten Phasen	67
6.2 Eine theoretische Grundlage zur Ableitung der „stochastischen Abnahmegesetze“	71
6.3 Berechnung der gemittelten Abnahmegesetze	72
6.4 Ein explizites Amplituden-Abstands-Gesetz für stochastische Anregung	76
6.5 Einfluß bestimmter Korrelationen zwischen den Quellen, der veränderlichen Anregungsorte während der Vorbeifahrt und der Materialdämpfung	77
7. Zusammenfassung	83
Anhang A Ein Verfahren zur Berechnung des Schwingungsverhaltens starrer Fundamente auf dem Boden	84
Anhang B Das Amplituden-Abstands-Gesetz für eine stochastische Streckenlast	86
Literatur zu den Teilen I und II	87

---

## 1. Einleitung und Zielsetzung

Im vorangegangenen Forschungsvorhaben "Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Stadtverkehrs in Geländeneiveau" [1] waren der Einfluß von Bodeneigenschaften, wie Steifigkeit, Materialdämpfung, Schichtungen, Grundwasser, Einbauten, und Auswirkungen der Trassenführung (Damm, Einschnitt, Schwellenbreite) auf die Erschütterungsstärke in der Umgebung untersucht worden. Dabei war die Erregung sehr stark idealisiert worden (Bild 1): entweder als punktförmige Last oder als auf dem unendlich langen Gleis wirkende Linienlast. Die Auswirkungen der variierten Bodeneigenschaften waren jedoch für diese zwei sehr unterschiedlichen Lastfälle ähnlich, so daß für diese Betrachtungen eine genauere Modellierung der Belastung durch einen vorbeifahrenden Zug nicht notwendig war.

Für die Untersuchung der Ausbreitungscharakteristik, das heißt für die Amplitudenabnahme mit der Entfernung, ist die räumliche Verteilung der erregenden Kraft, die "Geometrie der Quelle", nicht mehr unerheblich. Im Gegenteil: Die Geometrie der Quelle bestimmt im wesentlichen das Abnahmegesetz, während alle berechneten Boden- und Trassensituationen mit Ausnahme der Materialdämpfung das Abnahmegesetz unbeeinflußt ließen. Bei einer Punktquelle nehmen die Amplituden (im Fernfeld) mit der Wurzel der Entfernung ab, bei einer unendlich langen Linienquelle nehmen die Amplituden überhaupt nicht ab. Beide Abnahmegesetze gelten für einen Boden ohne Materialdämpfung. Die Materialdämpfung bewirkt bei beiden Quellarten einen zusätzlichen exponentiellen Abnahmefaktor.

Die bisher entwickelte Erschütterungsprognose benutzt nur die beiden genannten extremen Quellgeometrien. Bei der Bestimmung der Erregung, die aus Messungen im Nahbereich der Trasse zurückgerechnet wird, wird auf die Vorstellung einer Linienquelle zurückgegriffen. Die berechneten Linienlastspektren müssen für die Erschütterungsprognose mit einem Abnahmegesetz verknüpft werden. Das naheliegende Linienlastgesetz kann nur bis zu einer bestimmten Entfernung sinnvoll sein, denn es enthält keine geometrische Abnahme, die man andererseits aber von der auf die Zuglänge begrenzten Quelle erwarten muß. Als zweite Möglichkeit wurde deshalb die Punktlastgesetzmäßigkeit für die Prognose herangezogen. Dazu wird die gesamte über die Zuglänge verteilte wirkende Kraft auf einen Punkt zusammengezogen. Die zu dieser Erregung berechneten Amplituden sind im Nahbereich des Gleises sicher zu groß, für große Entfernungen dürften sie jedoch stimmen.

Die bisher entwickelte Prognose stellt also jeweils zwei Werte zur Verfügung, wobei der Linienlastwert nur im Nahbereich und der Punktlastwert nur im Fernbereich sinnvoll ist. Um die Zweigleisigkeit der Prognose zu beseitigen, ist

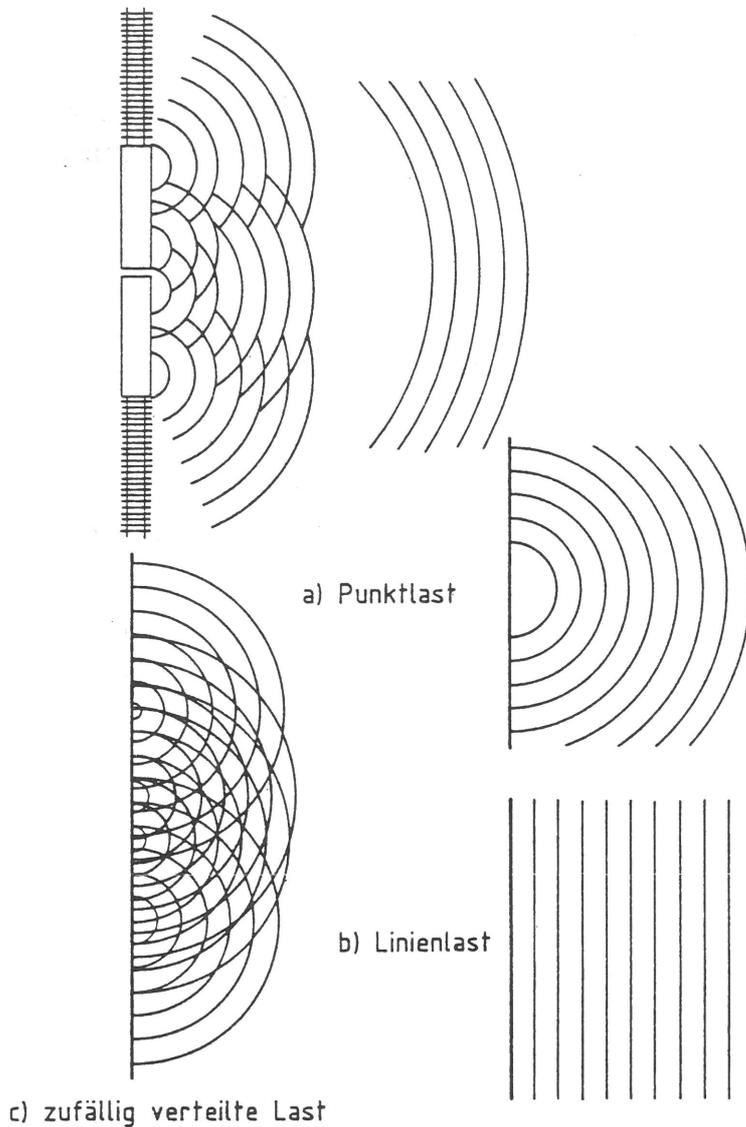


Bild 1  
Erschütterungsanregung durch Schienenverkehr und deren  
Idealisierung als a) Punkt-, b) Linien- und c) zufällig  
verteilte Last

das erste Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen zur Erschütterungsausbreitung, die theoretische Lücke zu schließen und die Abnahmegesetzmäßigkeit für eine über die Zuglänge verteilt wirkende Kraft zu bestimmen.

Weiterhin sollen zur Verbesserung der Prognose die Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten bei einer stochastisch über die Zuglänge bzw. auf die Achsen verteilten Last berechnet werden. Zur Absicherung der Prognose werden bestimmte Effekte untersucht, wie zum Beispiel die Abnahmegesetze bei stark impulsartiger Anregung, bei nichtlinearer Dämpfung und die Dämpfungswirkung bei breitbandiger Anregung. Diese Ergebnisse sollen den Vergleich zwischen der Theorie und den Meßergebnissen erleichtern. Aus dem Vergleich zwischen Theorie und Messungen soll dann später zusammen mit den Ergebnissen dieses Abschnittes "Theorie der Transmission" ein verbessertes Prognoseverfahren entwickelt werden.

## 2. Besonderheiten der Erregung durch Zugverkehr

Die Erregung setzt sich aus verschiedenen Anteilen, die im Teil I "Theorie der Emission" ausführlich diskutiert werden, zusammen. Für die Ausbreitungsberechnungen interessiert insbesondere folgende Charakterisierung:

- wandernde harmonische Punktlasten (Fahrzeugschwingungen),
- wandernde Impulsfolgen (Flachstellen der Räder),
- ortsfeste Impulsfolge (Achsüberfahrten an einer Fahrbahnrregularität).

Diese Lasten werden jeweils durch die Schienensteifigkeit über eine gewisse Gleislänge verteilt, die steifen Schwellen verteilen die Last über die Breite.

Diese Überlagerung der Lastanteile kann als wandernde stochastische Flächenlast aufgefaßt werden. Sie wird charakterisiert durch bestimmte Kreuzkorrelationen

- starke Korrelation über die Schwellenbreite,
- Korrelation über die Schienenlänge (einige Schwellen weit),
- Korrelation mit Verzögerungszeit (beim Überfahren bestimmter Fahrbahnrregularitäten)

und durch an den Radaufstandspunkten konzentrierten Leistungsdichten.

Diese Erregung führt an einem festen Beobachtungsort zu einer aufklingenden, eine bestimmte Zeit anhaltenden und schließlich abklingenden stochastischen Schwingung, die sich folgendermaßen charakterisieren läßt:

Je dichter sich der Beobachtungspunkt am Gleis befindet, desto schärfer ist die Vorbeifahrt der einzelnen Achsen zu erkennen. Die Vorbeifahrt des Zuges ist in diesem Fall mit einem ständigen Auf- und Abklingen der Schwingungen verbunden. In größerer Entfernung verwischen die Schwingungsanteile verschiedener Achsen und das Auf- und Abklingen der Schwingungen beim Herannahen und Entfernen des Zuges geschieht sehr langsam.

Im Teil I ist die Schwingungsantwort bei der Vorbeifahrt einer harmonischen Punktlast für verschiedene Entfernungen berechnet worden. Bild 2 zeigt noch einmal das Ergebnis. Da schon in 15 Metern Entfernung praktisch keine Amplitudenänderung mehr zu verzeichnen ist, wurde für die Ausbreitungsberechnungen darauf verzichtet, die Bewegung der Erschütterungsquelle zu berücksichtigen. Die Einflüsse der Anregung über die Zuglänge, der zufälligen Überlagerung der einzelnen Achsanteile oder der Impulshaftigkeit werden an ortsfesten Quellen untersucht und berechnet. Bei dem im nächsten Abschnitt be-

schriebenen Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung beliebiger (deterministischer oder stochastischer) Streckenlasten besteht allerdings die Möglichkeit, die Schwingantworten für verschiedene Stellungen der Erregung (des Zuges) zu berechnen und aus deren Überlagerung die Antwort während einer Vorbeifahrt zu ermitteln.

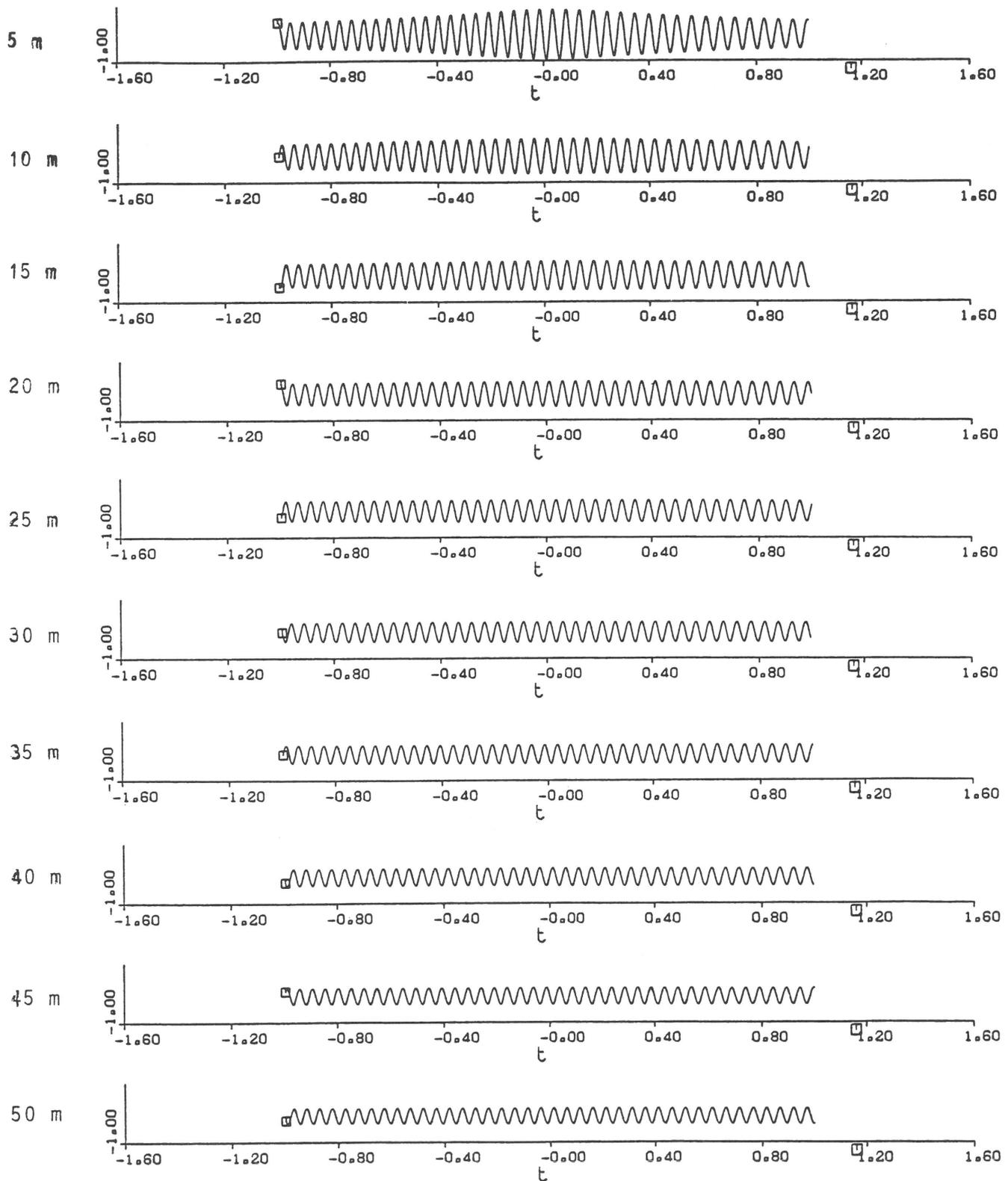


Bild 2

Schwingantworten des Bodens auf eine mit  $v = 60 \text{ km/h}$  vorbeifahrende harmonische Punktlast

3. Die elementaren Lastfälle und die zur Ableitung der Abnahmegesetze verwendeten Methoden

### 3.1 Punkt- und Linienlast

Für den homogenen, isotrop elastischen Halbraum als Bodenmodell und harmonischer (allgemeiner auch stationärer) Anregung existieren die analytischen Lösungen von Lamb [12] mit den Fernfeldgesetzen

$$A = k \frac{1}{\sqrt{r}} \quad \text{für die Punktlast und}$$

$$A = k \quad \text{für die (unendlich lange) Linienlast.}$$

Dabei ist  $A$  die Schwingamplitude,  $r$  die Entfernung von der Quelle und  $k$  eine von  $r$  unabhängige Konstante.

Diese Gesetze lassen sich auch mit Hilfe einer Energiebetrachtung allein aus der Form der Wellenfronten ableiten:

Für ein elastisches Medium gilt die Energieerhaltung. Die in einer Wellenfront enthaltene Energie ist proportional dem Quadrat der Amplituden und proportional zur Fläche der Wellenfront

$$E \sim A^2 F \quad .$$

Bei einer Punktquelle hat man Zylinderwellen mit einer Fläche

$$F \sim r \quad .$$

Bei einer Linienquelle hat man ebene Wellen mit

$$F = \text{konst.}$$

Aus der Konstanz der Energie folgt damit

$$A \sim \frac{1}{\sqrt{F}} \sim \frac{1}{\sqrt{r}} \quad \text{für die Punktlast und}$$

$$A \sim 1 \quad (\text{konst}) \quad \text{für die Linienlast.}$$

### 3.2 Berücksichtigung der hysteretischen Materialdämpfung des Bodens

Man kann das Abnahmegesetz aus der Lambschen Lösung für den elastischen Boden ableiten, indem man den Schubmodul des Bodens komplex erweitert:

Ein hysteretisch gedämpfter Boden hat ein

$$G = G_0(1+2Di),$$

$D$  ist das Dämpfungsmaß und  $i$  die imaginäre Einheit. Entscheidend ist die Änderung des Terms der Lambschen Lösung, der die Phase enthält

$$u = A(r) e^{i\omega(t - \frac{r}{v_R})},$$

$\omega$  ist die Kreisfrequenz der Erregung,  $v_R$  die Rayleighwellengeschwindigkeit des Bodens. Beim gedämpften Boden wird die Rayleighwellengeschwindigkeit komplex

$$\frac{1}{v_R} \approx \sqrt{\frac{\rho}{G}} = \sqrt{\frac{\rho}{G_0}} \frac{1}{\sqrt{1+2Di}} \approx \frac{1}{v_{R0}} (1-Di),$$

die letzte Näherung gilt für kleine Dämpfungen. Für  $u$  gilt dann

$$u = A(r) e^{i\omega(t - \frac{r}{v_{R0}})} e^{-\frac{\omega r}{v_{R0}} D}$$

und für die Amplituden gilt

$$A = A_{\text{elastisch}}(r) e^{-\frac{\omega D}{v_{R0}} r}.$$

Der exponentielle Charakter des Dämpfungseinflusses läßt sich auch folgendermaßen ableiten:

Bei einer Linienlast gibt es keine geometrische Amplitudenabnahme. Die Amplitudenabnahme  $-dA/dr$  ist proportional zur Amplitude und zur Dämpfung  $-\frac{dA}{dr} = kDA$ .

Die Lösung dieser Differentialgleichung bekommt man durch Trennen der Variablen und Integration

$$\int \frac{dA}{A} = \int -kDdr$$

$$\ln \frac{A}{A_0} = -kD(r-r_0)$$

$$\frac{A}{A_0} = e^{-kD(r-r_0)}.$$

Möchte man bei der Ableitung geometrische und Materialdämpfungseinflüsse gleichzeitig erfassen, so kann man folgendermaßen verfahren:

Für einen elastischen Boden gilt

$$A^2 F = \text{konst.}$$

Daraus folgt

$$2 \frac{dA}{dr} AF + A^2 \frac{dF}{dr} = 0$$

$$-\frac{dA}{dr} = \frac{A}{2F} \frac{dF}{dr}.$$

Da immer mit einem ganzzahligen  $n$

$$F = k r^n$$

gilt, ist

$$\frac{dF}{dr} \frac{1}{F} = \frac{n}{r}$$

und

$$-\frac{dA}{dr} = \frac{n}{2} \frac{A}{r} = k_1 \frac{A}{r} .$$

Für eine Punktquelle ist  $n = 1$ ,  $k_1 = 1/2$ ,

für eine Linienquelle ist  $n = 0$ ,  $k_1 = 0$ .

Beim gedämpften Boden muß zu dieser geometrischen Abnahme noch die dämpfungsbedingte Abnahme hinzugefügt werden

$$-\frac{dA}{dr} = k_1 \frac{A}{r} + k_2 A .$$

Die Lösung der Differentialgleichung lautet

$$\int \frac{dA}{A} = -\int \frac{k_1}{r} dr - \int k_2 dr$$

$$n \frac{A}{A_0} = -k_1 \ln \frac{r}{r_0} - k_2(r-r_0)$$

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-k_1} e^{-k_2(r-r_0)} .$$

Dieses Ergebnis für den Einfluß der Materialdämpfung wurde auch durch Finite-Element-Rechnungen, die im Bericht [1] zum vorangehenden Forschungsvorhaben dokumentiert sind, bestätigt. Die Aussagen zur Punkt- und Linienlast wurden hier noch einmal wiederholt, um zwei elementare Methoden zu demonstrieren, mit denen Abnahmegesetze abgeleitet werden können und mit denen auch im 4. Abschnitt weitere Einflüsse auf das Abnahmegesetz untersucht werden sollen. Die beiden Methoden sind einerseits die Integration einer Differentialgleichung für den Zusammenhang zwischen Amplitude und Abstand und andererseits die unmittelbare Ausnutzung einer Energieaussage.

### 3.3 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei deterministischen und stochastischen Streckenlasten ("Superpositionsverfahren")

Als Anregung werden eine Anzahl von harmonischen Punktlasten betrachtet, die gleichmäßig über eine Strecke L verteilt sind. Die Strecke L steht senkrecht zur Beobachtungsrichtung, der "Meßachse".



Die Kraftamplituden  $P$  aller Quellen sind gleich groß und die Phase  $\varphi$  ist entweder für alle Quellen gleich ("deterministische Erregung") oder sie ist für alle Quellen verschieden und zufällig ("stochastische Erregung"), das heißt die Phasen werden als Zufallszahlen erzeugt.

Die Schwingungsamplituden in einiger Entfernung von der Quelle werden durch phasenrichtige Überlagerung der jeweiligen Punktlastlösungen berechnet. Dabei wird die Punktlastlösung für das Fernfeld

$$u_{ax} = \frac{P}{G} \frac{A_{ax}}{r} \sqrt{\frac{r\omega}{v_s}} e^{i(\varphi - \frac{\omega r}{v_r})}$$

mit dem jeweiligen Abstand

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

dem Schubmodul  $G$  des Bodens und der für den axialsymmetrischen Punktlastfall geltenden Konstante  $A_{ax}$  benutzt. Der konstante Faktor  $P A_{ax}/G$  fällt bei der anschließenden Normierung - entweder auf die Amplitude im Bezugsabstand  $r_0$ , die sich für eine Punktquelle mit der Amplitude  $P$  ergibt, oder auf die konstante Amplitude, die sich bei einer unendlich langen Linienlast mit gleicher Lastdichte  $n P/L$  ergibt - heraus. Um für die stochastische Anregung mit zufälligen Phasen zu sinnvollen Ergebnisse zu kommen, werden die Amplitudenfelder für eine gewisse, zu wählende Anzahl von Phasenrealisierungen quadratisch gemittelt.

### 3.4 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei harmonischen Lasten, die über ein starres Fundament in den Boden eingeleitet werden

Die Auswirkungen der Lastverteilung über eine größere Fläche (den vom Zug belasteten Gleisabschnitt) wird zusätzlich, neben der vereinfachten Berechnung mit dem Superpositionsverfahren, mit einem aufwendigeren Rechenprogramm ermittelt. Es wird die Amplitudenabnahme für den Fall berechnet, daß ein rechteckiges, langgestrecktes starres Fundament auf dem elastischen Halbraum aufliegt und durch eine vertikale Kraft angeregt wird. Diese Situation läßt sich mit dem Programm zur Berechnung der Wechselwirkung zwischen starren

Fundamenten und dem Boden untersuchen. Das Programm beziehungsweise das zugrundeliegende Verfahren wird, da es auch für die Teile "Theorie Emission" und "Theorie Immission" verwendet wird, im Anhang A beschrieben.

Damit sind die Methoden zur Bestimmung der Ausbreitungscharakteristik

- Energiebetrachtung,
- Integration der Amplituden-Abstands-Differentialgleichung,
- Superpositionsverfahren und
- "Wechselwirkungsverfahren"

beschrieben.

## 4. Einflüsse auf das Amplituden-Abstands-Gesetz

### 4.1 Zerstreuung durch regellose Schwankungen der Bodeneigenschaften

Der homogene Boden ist eine Fiktion, die notwendig war und für viele Probleme auch heute noch notwendig ist, um den Boden überhaupt in irgendeiner Weise berechnen zu können. Tatsächlich schwanken jedoch die Bodeneigenschaften sehr stark. Sofern die Schwankungen regelmäßig sind, es sich also um Schichtungen handelt, hatten die Finite-Element-Rechnungen im vorangegangenen Vorhaben gezeigt, daß in diesem Fall kaum Auswirkungen auf das Abnahmegesetz auftreten. Nur bei der extremen Situation einer Schicht auf völlig starrer Unterlage waren im Resonanzfall und im "unterkritischen" Frequenzbereich Abweichungen von der Punktlastgesetzmäßigkeit aufgetreten.

Bei regellosen Schwankungen der Bodeneigenschaften, die großflächig verteilt vorhanden sind, kann man folgendes erwarten: Bei jeder Änderung der Materialeigenschaften (genauer gesagt: des Wellenwiderstandes), die die Welle passiert, wird das Wellenfeld gestört und ein Teil der Welle beziehungsweise der Energie wird in das Innere des Halbraumes, in die Tiefe reflektiert. An der Bodenoberfläche wirkt sich diese Zerstreuung und Abstrahlung ins Innere als zusätzliche Amplitudenabnahme aus. Das Charakteristische dieser Amplitudenabnahme ist die Tatsache, daß umso mehr abgestrahlt wird, je größer die einlaufende Welle ist. Die durch die Schwankungen hervorgerufene zusätzliche Amplitudenabnahme ist also proportional zur Amplitude

$$-\frac{dA}{dr} = k_3 A.$$

Dies ist genau die gleiche Gesetzmäßigkeit wie für den hysteretisch gedämpften Boden. Die regellosen Schwankungen führen zu einem zusätzlichen exponentiellen Abnahmefaktor

$$\frac{A}{A_0} = \dots e^{-k_3(r-r_0)}.$$

Bei Messungen im Feld läßt sich dieser Abnahmefaktor nicht vom Materialdämpfungseinfluß trennen. Ein unregelmäßig aufgebaute Boden wirkt wie ein Boden mit stärkerer Dämpfung.

### 4.2 Nichtlineare Dämpfung des Bodens

Die Dämpfung des Bodens hängt von der Amplitude ab. Für genügend kleine Amplituden hat die Dämpfung einen kleinen annähernd konstanten Wert. In einem bestimmten, für Verkehrserschütterungen durchaus relevanten Amplitudenbereich steigt die Dämpfung linear mit der Amplitude

$$D = k A .$$

Für größere Amplituden wird wieder ein bestimmter Grenzwert erreicht. Für den Fall (bestimmte Quelle, bestimmter Entfernungsbereich) der amplitudenproportionalen Dämpfung läßt sich ein qualitativ neues Abstandsgesetz für den Dämpfungseinfluß ableiten.

Dazu muß die im Abschnitt 3.2 hergeleitete Differentialgleichung modifiziert werden

$$-\frac{dA}{dr} = k_1 \frac{A}{r} + k_2 A^2 \quad .$$

Dabei wird die die Dämpfung D enthaltende Konstante  $k_2$  ersetzt durch  $k_2 A$  ( $k_2$  mit anderer Bedeutung und Dimension). Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{\alpha \frac{r}{r_0} + (1-\alpha) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{k_1}}$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{k_2 r_0 A_0}{1-k_1} \quad \left( = \frac{2\pi}{1-k_1} \frac{r_0}{\lambda_R} D_0 \right)$$

Dieses Abnahmegesetz läßt sich folgendermaßen charakterisieren: Für genügend große Entfernungen  $r$  überwiegt im Nenner der Term  $\alpha r/r_0$  und die Amplituden nehmen mit  $1/r$  ab, sowohl bei einer Punkt- als auch bei einer Linienquelle. Je größer die Amplitude  $A_0$  und damit die Dämpfung am Punkt  $r_0$ , desto eher wird dieses Abnahmegesetz erreicht. Dazu ein Zahlenbeispiel: Wenn die Dämpfung in einer Scherwellenlänge Entfernung von der Quelle 5 % beträgt, dann ist  $\alpha \approx 0,6$  und  $1-\alpha \approx 0,4$  und es dominiert schon von diesem Punkt ab die dämpfungsbedingte Abnahme mit  $1/r$ .

Bei Raumwellen mit  $k_1 = 1$  kann dieses Ergebnis für die amplitudenproportionale Dämpfung nicht angewendet werden. Stattdessen lautet die Lösung für Raumwellen

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-1} \frac{1}{1+\alpha \ln(r/r_0)}$$

$$\text{mit } \alpha = k_2 A_0 r_0 \quad \left( = \frac{2\pi r_0}{\lambda_R} D_0 \right) \quad .$$

#### 4.3 Impulsartige Anregung

Bei einer impulsartigen Erregung ist der zeitliche Verlauf der Schwingungen zu beachten. Ist der Boden dispersiv, das heißt er besitzt für verschiedene Frequenzen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, so dehnen sich die zeitlichen Schwingungsverläufe mit zunehmender Entfernung. Bei genügend

großen Entfernungen bzw. genügend kurzem Lastimpuls ist die Dauer der Schwingung annähernd proportional zur Entfernung.

Das Amplituden-Abstandsgesetz läßt sich mit dieser Information wieder aus einer Energiebetrachtung ableiten. Als Amplitude soll hier der Maximalwert des Zeitverlaufs bezeichnet werden. Die Energie verteilt sich nun beim Impuls nicht nur über die Fläche der Wellenfront, sondern auch über die Schwingungsdauer  $\Delta T$

$$E \sim A^2 F \Delta T.$$

Je nach Quellenart hat man ein  $n$  mit

$$F \sim r^n$$

und für  $\Delta T$  gilt nach dem oben gesagten

$$\Delta T \sim r.$$

Für die Amplituden folgt somit aus der Konstanz der Energie (bei verlustfreiem Medium)

$$A \sim r^{-(n+1)/2} .$$

Die Dispersion bewirkt also eine zusätzliche Amplitudenabnahme mit  $A \sim r^{-0,5}$ .

In [13] sind diese Zusammenhänge ausführlicher untersucht worden. Durch eine näherungsweise Übertragung der Halbraumlösung auch auf heterogene und damit dispersive Böden gelingt es, neben der Bestätigung des Abnahmegesetzes (für die Punktquelle  $A \sim r^{-1}$ ) auch die absoluten Amplituden für verschiedene Stärken der Heterogenität beziehungsweise der Dispersivität anzugeben.

Es muß noch einmal betont werden, daß die stärkere Amplitudenabnahme bei impulsförmiger Anregung nur für die Amplitude des zeitlichen Schwingungsverlaufs, vorsichtiger formuliert sogar nur für die Maximalamplituden des zeitlichen Schwingungsverlaufs gilt. Betrachtet man dagegen einzelne Frequenzanteile in den Spektren, so gilt für diese nur die Abnahme mit  $A \sim r^{-0,5}$ . Auch bei der Bildung des quadratischen Mittelwertes über den zeitlichen Schwingungsverlauf ergibt sich, wenn, wie bei Meßauswertungen üblich, für alle Meßpunkte der gleiche Zeitausschnitt zugrundegelegt wird, nur die Abnahme mit  $A \sim r^{-0,5}$ . Diese Problematik wird im folgenden Abschnitt etwas eingehender behandelt.

#### 4.4 Abhängigkeit von der betrachteten Amplitudengröße

Als mögliche Amplitudengrößen werden hier

- der zeitliche Maximalwert,
- der quadratische Mittelwert des zeitlichen Schwingungsverlaufs und
- einzelne Frequenzanteile aus den Spektren

betrachtet. Aus der Häufigkeitsverteilung der Amplituden ließen sich noch weitere statistische Kenngrößen (z.B. Medianwert, verschiedene Fraktile) ableiten. Der quadratische Mittelwert besitzt den Vorteil, daß er über die Parsevalsche Gleichung auch mit dem Frequenzspektrum verknüpft ist. Allgemein ausgedrückt gilt nämlich

$$\sum_{i=1}^n X_i^2(f) \sim \int_0^T x^2(t) dt \quad ,$$

das heißt, daß die Summe (das Integral) über die quadratischen Werte des Spektrums  $X(f)$  und des Zeitverlaufs  $x(t)$  zueinander proportional sind. Der Begriff Spektrum enthält noch verschiedene Möglichkeiten der Definition, die in der Praxis lediglich auf einen unterschiedlichen Normierungsfaktor hinauslaufen, der für die Betrachtung der Abnahmegesetze unerheblich ist. Natürlich muß man darauf achten, daß es sich beim Leistungsspektrum im Gegensatz zu einem linearen Spektrum schon um ein quadratisches Spektrum handelt und dementsprechend die Amplitudenabnahme auch doppelt so stark ist. Schließlich muß als letzte Unterscheidung auch die Wahl verschiedener physikalischer Größen bei der Ausbreitungsuntersuchung in Betracht gezogen werden. Es kann sich um Schwingwege, Schwinggeschwindigkeiten oder Schwingbeschleunigungen handeln.

Ein Teil der hier abgeleiteten Abnahmegesetze hängen von der Frequenz ab, so wie die Abnahme infolge der Materialdämpfung. Der Exponent der Exponentialfunktion ist proportional zur Frequenz, und dementsprechend ist die Abnahme für hohe Frequenzen stärker. Auch die im Abschnitt 5 dargestellten Abnahmegesetze für verteilte Lasten (Streckenlasten) sind frequenzabhängig. Diese Abnahmegesetze lassen sich nur durch die Analyse einzelner Frequenzanteile verifizieren, oder bei Verwendung eines monofrequenten Erregers, zum Beispiel eines Unwuchtschwingers. Die Analyse einzelner Frequenzanteile setzt allerdings voraus, daß es sich beim Boden um ein lineares Übertragungssystem handelt. Nur dann ist gewährleistet, daß die Übertragungsverhältnisse für eine Frequenz nicht durch die anderen Frequenzanteile beeinflußt werden. Als Gegenbeispiel soll dazu die schon in Abschnitt 4.2 betrachtete nichtlineare Dämpfung herangezogen werden. In einem gewissen Amplitudenbereich nimmt die Dämpfung mit kleiner werdenden Amplituden ab. Für die Stärke der Dämpfung ist aber nicht die Amplitude einer gerade untersuchten Frequenz, sondern die gesamte Amplitude, die Amplitude des zeitlichen Verlaufs, maßgeblich. Bei

der Analyse eines Frequenzgemischs wird in diesem Fall die Amplitudenabnahme eines Frequenzanteils auch von der Amplitudenabnahme der anderen Frequenzen abhängen. Zum Beispiel wird auch für eine tiefe Frequenz wegen der starken Abnahme der hohen Frequenzen und damit der Gesamtamplitude die Dämpfung stärker reduziert. Klare Ausbreitungsverhältnisse wird man bei nichtlinearer Dämpfung nur bei einer harmonischen Erregung erwarten können, sofern die Nichtlinearität nicht schon ausreicht, um die harmonische Schwingung in ein Frequenzgemisch zu verwandeln.

Für die Analyse einzelner Frequenzanteile bleibt also festzuhalten

- daß dies die geeignete Methode ist, um frequenzabhängige Abnahmegesetze zu erkennen und
- daß andererseits die Interpretation bei nichtlinearen Übertragungseigenschaften schwierig wird.

Bei der weiteren Betrachtung soll ein lineares Verhalten vorausgesetzt werden. Liefert nun die Auswertung der zeitlichen Schwingungsverläufe die gleichen Abnahmegesetze? Für den quadratischen Zeitmittelwert war am Anfang dieses Abschnitts ein Zusammenhang zum Spektrum der Schwingung genannt worden. Daraus geht hervor, daß selbstverständlich das gleiche Abnahmegesetz wie im Frequenzbereich gelten muß, wenn das Abnahmegesetz nicht frequenzabhängig ist. Hat man von der Frequenz abhängige Abnahmegesetze, so gilt für den quadratischen Zeitmittelwert ein gemittelttes Abnahmegesetz. Dabei sind die einzelnen Abnahmegesetze entsprechend dem Frequenzinhalt der Erregung gewichtet. Dominiert ein bestimmter Frequenzbereich, so wird sich auch im Zeitbereich das Abnahmegesetz dieser Frequenz herausbilden. Die Auswirkung dieser Mittelung bei breitbandiger Anregung wird in Abschnitt 4.5 für den Dämpfungseinfluß untersucht.

An dieser Stelle wird auch deutlich, inwiefern die Wahl der Meßgröße auf das Abnahmegesetz einen Einfluß hat. Die drei Größen Schwingweg, -geschwindigkeit und -beschleunigung unterscheiden sich im Frequenzbereich jeweils um den Faktor  $\omega$  der Kreisfrequenz. Bei einem gleichmäßigen breitbandigen Spektrum der Schwinggeschwindigkeiten dominieren im zugehörigen Spektrum des Schwingweges die tiefen Frequenzen und im Spektrum der Schwingbeschleunigungen dominieren die hohen Frequenzen. Bedenkt man dabei die verstärkte Wirkung der Materialdämpfung für hohe Frequenzen, so müßten die Schwingbeschleunigungen stärker als die Schwinggeschwindigkeiten und diese wiederum stärker als die Schwingwege abnehmen. In [14] wird ein entsprechendes Ergebnis genannt. Die angegebenen Potenzen 1,5, 2,5, 3,5 für Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind insgesamt allerdings sehr groß, was auf die vielfältigen Besonderheiten der untersuchten Situation (impulsartige Explo-

sionsbelastung mit starken plastischen und nichtlinearen Effekten) und die miteingerechnete Materialdämpfung zurückzuführen ist.

In den meisten Fällen wird man die Aussagen zum quadratischen Zeitmittelwert auch auf das Maximum des Zeitverlaufs, den Maximalwert übertragen können, da oft eine feste Korrelation zwischen Maximalwert und Mittelwert besteht. Der Maximalwert ist jedoch stärker zufälligen Schwankungen unterworfen, so daß man von den Mittelwerten eine deutlichere Ausbildung der Abnahmegesetzmäßigkeiten erwarten kann. Der Maximalwert wird jedoch oft bevorzugt, da er leichter zu ermitteln ist und meistens auch als Beurteilungskriterium für die Zulässigkeit oder Zumutbarkeit der Erschütterungen herangezogen wird.

Ein deutlicher Unterschied zwischen Maximalwert und Mittelwert tritt bei der Amplitudenabnahme einer impulsartigen Störung auf. Hier besitzen die Maximalamplituden ein eigenes Abnahmegesetz. Die in der Regel vorhandene Dispersion des Bodens verteilt den "Energieinhalt" des Impulses auf einen immer größeren Zeitraum. Dadurch wird der Maximalwert kleiner, nicht aber der quadratische Mittelwert. Auch für einen einzelnen Frequenzanteil hat die Dispersion, die frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit, keine Auswirkungen.

#### 4.5 Dämpfungswirkung bei breitbandiger Anregung

Die Auswirkung der Materialdämpfung auf eine breitbandige Anregung kann zunächst qualitativ folgendermaßen beschrieben werden: Aus dem ursprünglich gleichmäßigen Spektrum werden bei jedem Entfernungsschritt die höchsten Frequenzen herausgefiltert. Dadurch verschiebt sich der Schwerpunkt des Spektrums mit zunehmender Entfernung zu tieferen Frequenzen hin.

Was dies für die Amplituden im Zeitbereich bedeutet, kann mit der in Abschnitt 4.4 vorgeschlagenen Methode, der Mittelung der frequenzabhängigen Abnahmegesetze, quantifiziert werden. Der Mittelwert  $M(u^2)$  des Quadrates des zeitlichen Schwingungsverlaufs ist proportional dem Integral über das quadrierte Spektrum

$$M(u^2) \sim \int_0^{\infty} u_0^2(\omega) \left( e^{-\frac{\omega D}{VR}} r \right)^2 d\omega .$$

Dabei ist lediglich die dämpfungsbedingte exponentielle Abnahme berücksichtigt worden. Der geometrische Anteil ist frequenzunabhängig und beeinflußt deshalb die Integration nicht. Da eine gleichmäßige Anregung vorausgesetzt wird, fällt auch  $u_0^2(\omega)$  als Konstante weg. Es bleibt

$$M(u^2) \sim \int_0^{\infty} e^{-\frac{2Dr}{vR} \omega} \omega \, d\omega$$

$$= \frac{vR}{2Dr} \cdot$$

Für den quadratischen Mittelwert bedeutet das

$$M(u^2) \sim \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot$$

also eine Abnahme mit  $r^{-0,5}$  zusätzlich zur geometrischen Abnahme.

Das zur Berechnung der Streckenlast erstellte in Abschnitt 3.3 beschriebene Superpositionsprogramm wurde auch benutzt, um diesen Dämpfungseinfluß nachzurechnen. Bild 3 zeigt das Ergebnis für eine Punktquelle. Es werden die Ab-

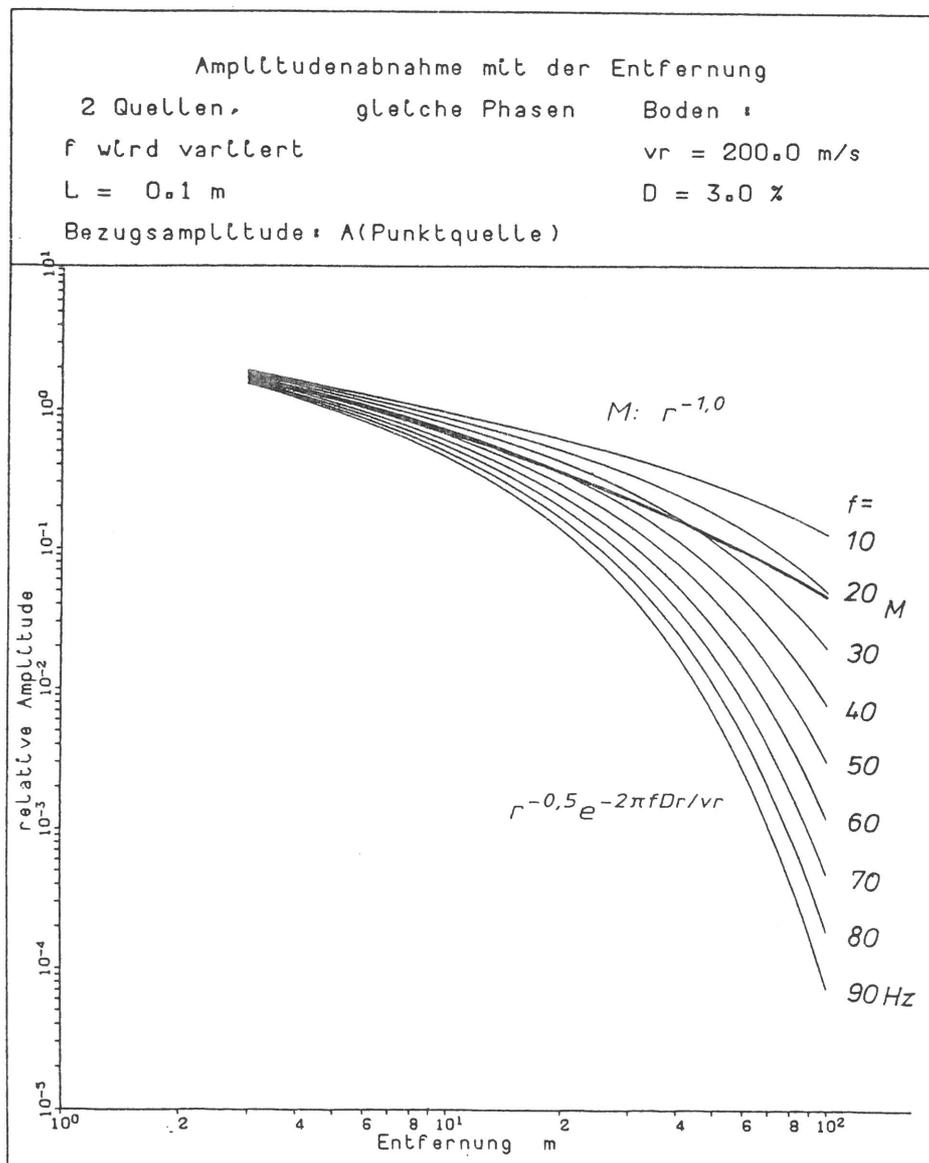


Bild 3

Dämpfungswirkung bei breitbandiger Anregung:  
 Amplitudenabnahme einzelner Frequenzanteile und des  
 quadratischen Mittelwertes

nahmegesetze für neun Frequenzen zwischen 10 und 90 Hz berechnet und zusammen mit dem daraus gebildeten quadratischen Mittelwert dargestellt. Die Asymptoten für  $r \rightarrow 0$  besitzen die Abnahme  $A \sim r^{-0,5}$ . Im Vergleich dazu erkennt man die stärkere Abnahme der gemittelten, das heißt also der gesamten Amplitude. In einem mittleren Entfernungsbereich zwischen etwa 10 und 30 Metern ist die Abnahme annähernd linear, das heißt sie folgt einem Potenzgesetz  $A \sim r^{-n}$  mit  $n = 0,93$ . Die Abweichungen im Nahbereich unter 10 Metern und im Bereich über 30 Metern vom theoretischen Ergebnis  $A \sim r^{-1}$  zeigen, wie wichtig die tatsächliche Breitbandigkeit des Spektrums ist: Im Nahbereich fehlen die hohen Frequenzen über 100 Hz mit starker Dämpfung, so daß auch der Mittelwert nur eine Abnahme mit  $r^{-0,5}$  zeigt. Im Bereich über 30 Metern dominiert die tiefste Frequenz 10 Hz und der Mittelwert folgt im wesentlichen dem zu 10 Hz gehörenden exponentiellen Gesetz. Hier fehlen die Frequenzen unterhalb von 10 Hz.

Am Beispiel einer breitbandigen Anregung lassen sich auch die in Abschnitt 4.4 genannten Unterschiede zwischen den physikalischen Größen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung konkretisieren. Geht man wieder davon aus, daß das Wegspektrum  $U_0(\omega)$  konstant ist, so ist das Geschwindigkeitsspektrum

$$\dot{U}_0(\omega) = i\omega U_0(\omega) \sim \omega$$

proportional zu  $\omega$  und das Beschleunigungsspektrum

$$\ddot{U}_0(\omega) = -\omega^2 U_0(\omega) \sim \omega^2$$

proportional zu  $\omega^2$ . Die entsprechenden Integrale für die quadratischen Mittelwerte ergeben

$$\begin{aligned} M(\dot{u}^2) &\sim U_0^2(\omega) \int_0^\infty \omega^2 e^{-\frac{2Dr}{v_R}\omega} d\omega \\ &= U_0^2 \frac{2}{(2Dr/v_R)^3} \sim r^{-3} \quad \text{und} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M(\ddot{u}^2) &\sim U_0^2(\omega) \int_0^\infty \omega^4 e^{-\frac{2Dr}{v_R}\omega} d\omega \\ &= U_0^2 \frac{24}{(2Dr/v_R)^5} \sim r^{-5} . \end{aligned}$$

Für die Amplituden bedeutet dies eine Abnahme von

$$|\dot{u}| \sim r^{-1,5} \quad \text{und}$$

$$|\ddot{u}| \sim r^{-2,5}$$

zusätzlich zur geometrischen Abnahme  $r^{-0,5}$ .

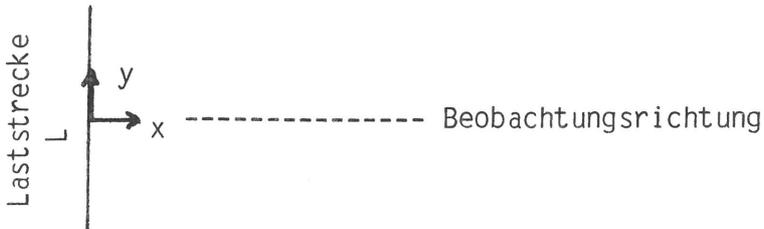
#### 4.6 Übersicht über die in Abschnitt 4 abgeleiteten Amplituden-Abstands-Gesetze

Quell- und Bodensituation	Potenzgesetz	andere Gesetze	Bemerkungen
Linienlast		konstant	
Punktlast	$r^{-0,5}$		
Dämpfung		$e^{-\alpha r}$	frequenzabhängig
unregelmäßig aufgebauter Boden		$e^{-\alpha r}$	
nichtlineare Dämpfung	$r^{-1}$ statt	$e^{-\alpha r}$	unabhängig von der Geometrie
Impuls + Dispersion	$r^{-0,5}$		zusätzlich, nur für das Maximum
Breitbandanregung + Dämpfung	$r^{-0,5}$ (Weg)		zusätzlich für die Gesamtamplitude statt $e^{-\alpha r}$
	$r^{-1,5}$ (Geschwindigkeit)		
	$r^{-2,5}$ (Beschleunigung)		

## 5. Die Schwingungsausbreitung bei einer gleichphasigen Streckenlast

### 5.1 Berechnung mit dem Superpositionsverfahren

Das in Abschnitt 3.3 erläuterte Superpositionsverfahren ermöglicht es, die Streckenlast durch eine bestimmte Anzahl gleichmäßig auf der Laststrecke  $L$  verteilter Punktlasten zu berechnen.



Das Ergebnis entspricht der numerischen Auswertung des theoretisch exakteren Integrals über die Laststrecke

$$u = \frac{P}{G L} \int_{-L/2}^{+L/2} \frac{1}{r} \sqrt{\frac{r\omega}{v_s}} e^{i\frac{\omega r}{v_R}} dy \quad .$$

In den Bildern 4 bis 6 werden diese Ergebnisse jeweils auf die (ebene) Linienlastlösung

$$u_{eb} = \frac{A_{eb} P}{G L}$$

mit der gleichen Lastintensität pro Länge  $P/L$  normiert.

Bei den Rechnungen werden

- die Anregungsfrequenzen zwischen 10 und 100 Hz,
- die Laststrecke zwischen 5 und 20 m und
- die Bodensteifigkeit ausgedrückt durch die Rayleighwellengeschwindigkeit  $v_R$  zwischen 100 und 700 m/s

variiert. Es ergeben sich jedoch qualitativ jedesmal die gleichen Kurvenverläufe:

Ab einer bestimmten Entfernung  $x_0$  nehmen die Amplituden wie bei einer Punktlast mit  $r^{-0,5}$  ab. In diesem Fernfeldbereich kann man auch die absoluten Amplitudenwerte aus der Punktlastlösung berechnen, wenn man die gesamte Kraftamplitude der über die Strecke  $L$  verteilten Lasten zugrundelegt. An dem Punkt  $x_0$  ist der Wert der relativen Amplitude ungefähr 1, was besagt, daß an diesem Punkt die Amplitude auch mit der Linienlastlösung übereinstimmt. Der Nahbereich mit kleineren Entfernungen als  $x_0$  kann näherungsweise als Bereich konstanter Amplituden bezeichnet werden, bzw. da sich die Amplituden als Linien-

lastlösung berechnen lassen, auch als "ebener Bereich". Tatsächlich schwanken die Amplituden etwas um diese Linienlastlösung, die Abweichungen sind aber kaum größer als 20 %. Etwas genauer betrachtet, hat man vor  $x_0$  zunächst noch einen Bereich, in dem die Amplituden - in Richtung zur Quelle gesehen - noch leicht zunehmen. Die Steigung nimmt von  $r^{-0,5}$  auf  $r^0$  ab, bis das Maximum mit dem 1,2-fachen der Linienlastlösung erreicht ist. Insofern existiert also ein kontinuierlicher Übergang zwischen der Punklast- und der Linienlastgesetzmäßigkeit. Im weiteren Nahbereich schwanken die Amplituden um die Linienlastlösung, so daß insgesamt für Prognosezwecke die grobe Einteilung

- Nahbereich bis  $x_0$  Streckenlast = Linienlast,
  - Fernbereich ab  $x_0$  Streckenlast = Punklast
- ausreicht.

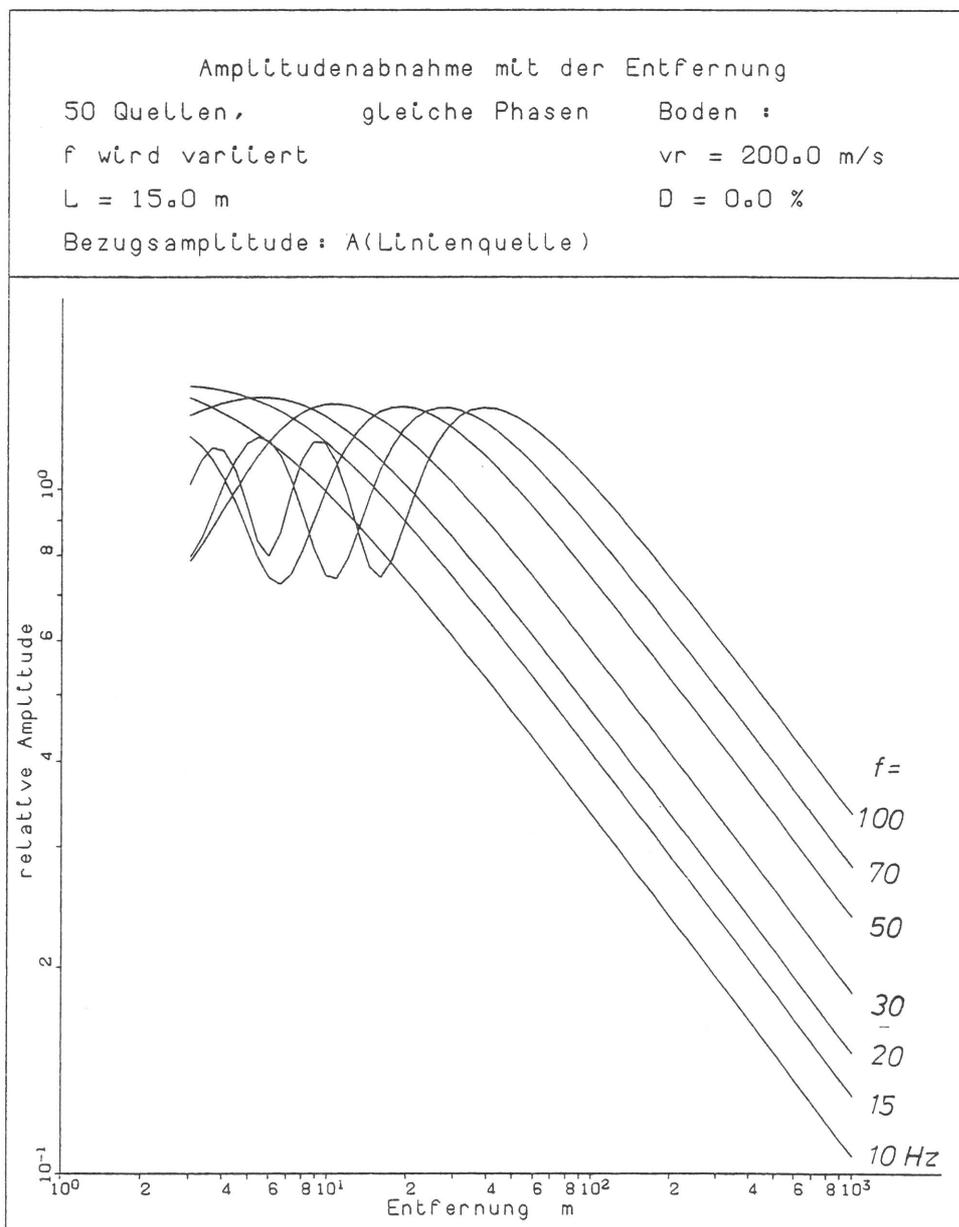
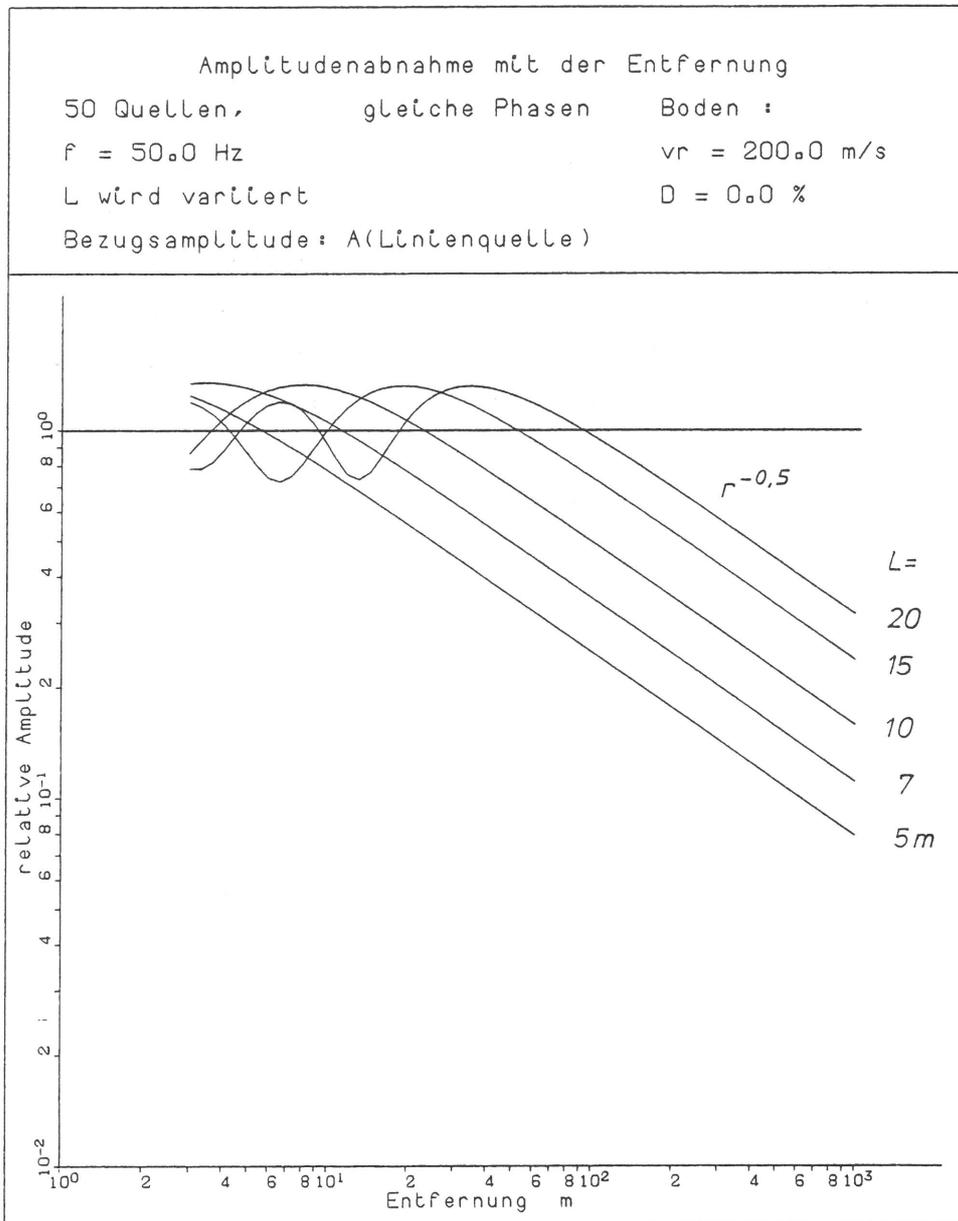


Bild 4  
Gleichphasige Streckenlast, Variation der Frequenz



**Bild 5**  
 Gleichphasige Streckenlast, Variation der Laststreckenlänge

Aus den Ergebnissen der Parametervariation (Bild 4 bis 6) kann man über die Länge des konstanten Nahbereichs folgendes ablesen:

Der konstante Nahbereich wird

- mit zunehmender Frequenz größer,
- mit länger werdender Laststrecke größer und
- mit zunehmender Bodensteifigkeit kleiner.

Der Einfluß der Laststrecke ist besonders stark. Bei einer Vervierfachung der Länge  $L$  von 5 auf 20 m verschiebt sich der Grenzabstand  $x_0$  von unter 10 auf etwa 100 m, während er sich bei der Variation der Frequenz von 10 auf 100 Hz nur von 10 auf 100 m verschiebt. Letzteres deutet darauf hin, daß Frequenz und Grenzabstand proportional sind.

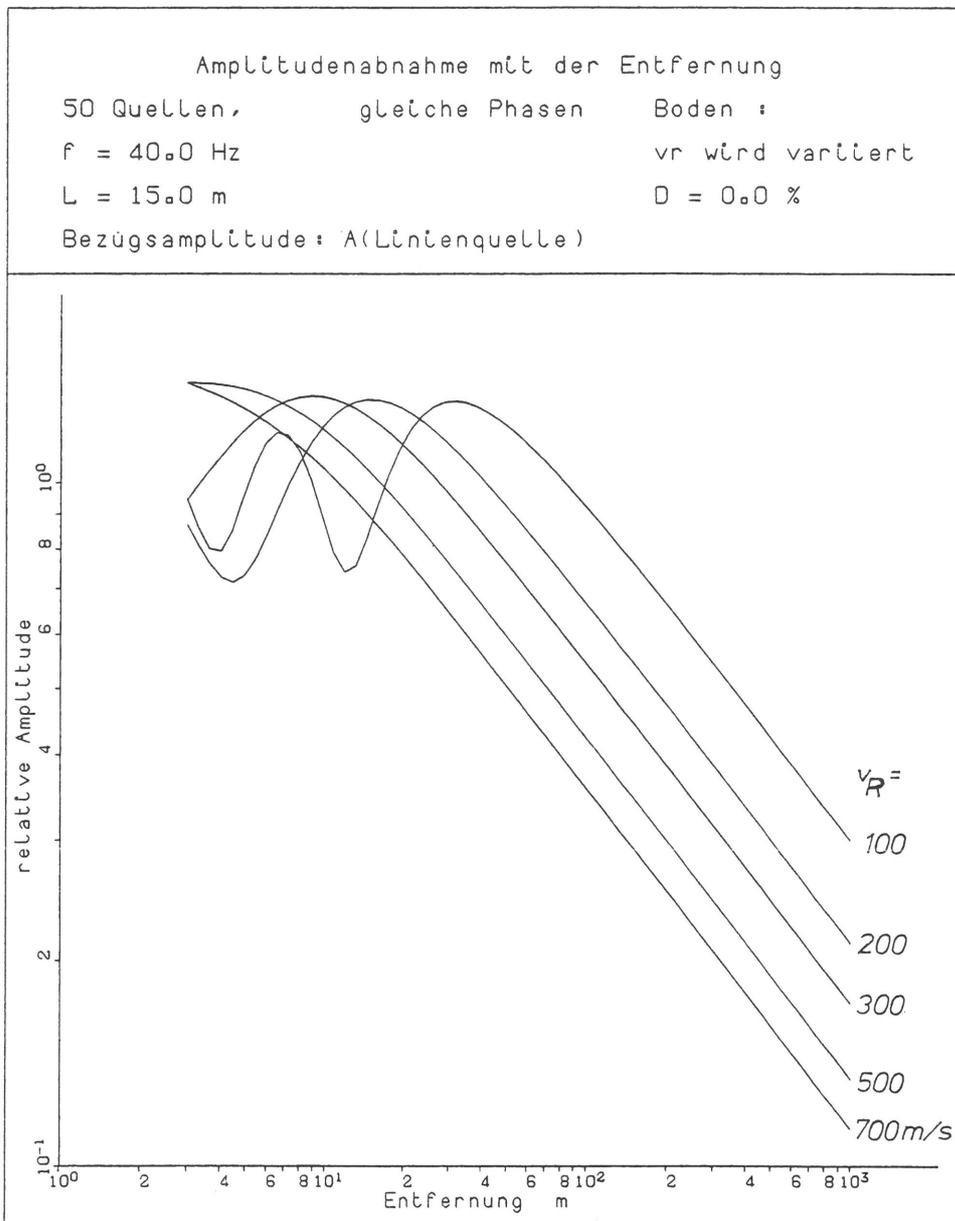


Bild 6  
 Gleichphasige Streckenlast, Variation der Bodensteifigkeit  
 (der Rayleighwellengeschwindigkeit)

Der Grenzabstand  $x_0$  zwischen ebenen und axialsymmetrischem Bereich läßt sich analytisch aus der Bedingung

$$u_{eb} = u_{ax}$$

gewinnen. Aus

$$\frac{A_{eb} P}{G L} = \frac{A_{ax} P}{G x_0} \sqrt{\frac{x_0 \omega}{v_s}}$$

ergibt sich

$$x_0 = \left( \frac{A_{ax}}{A_{eb}} \right)^2 \frac{L^2 \omega}{v_s}$$

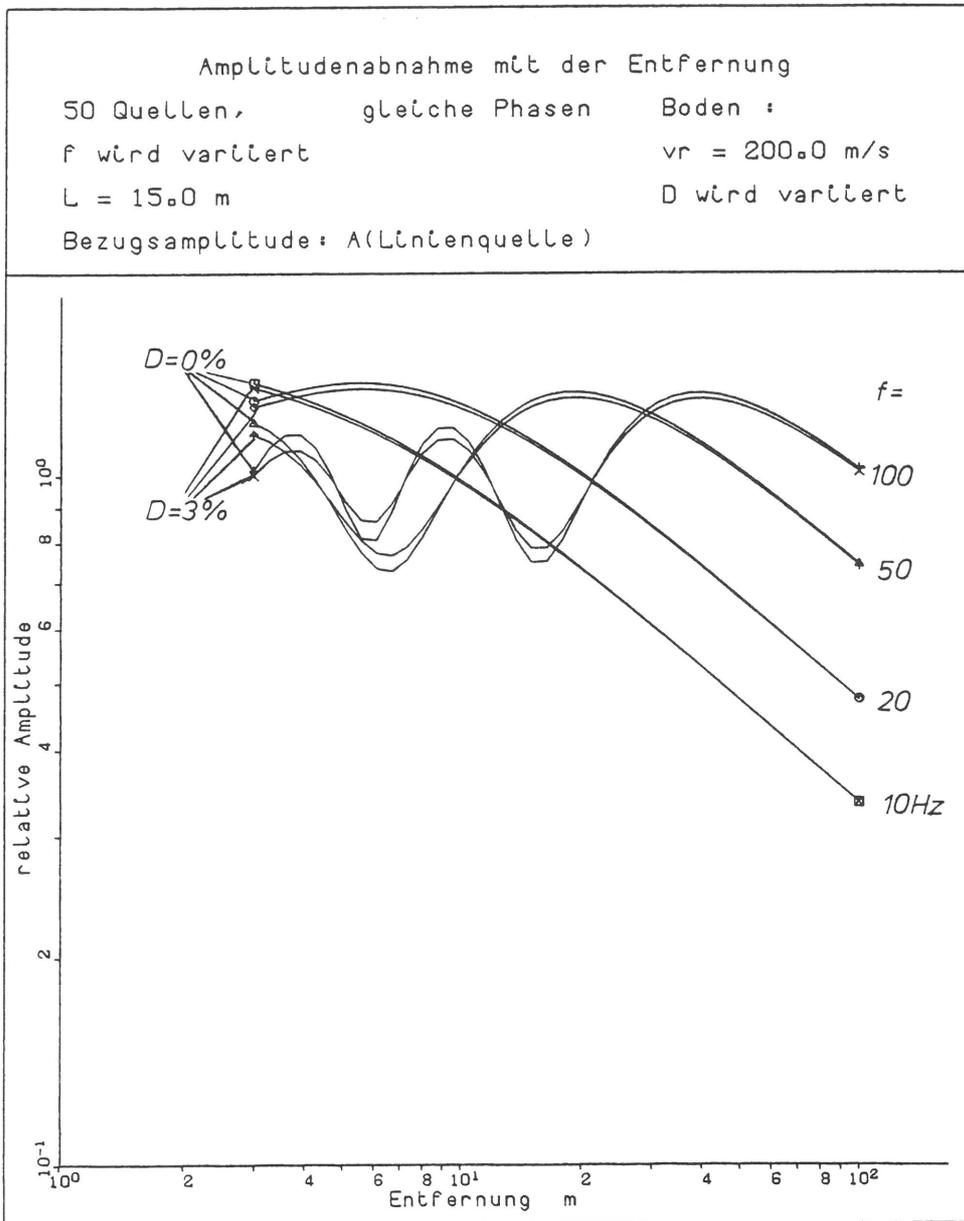


Bild 7  
 Gleichphasige Streckenlast mit und ohne Bodendämpfung

Mit

$$\left(\frac{A_{ax}}{A_{eb}}\right)^2 = \frac{v_s}{v_R 2\pi}$$

folgt

$$x_0 = \frac{L^2}{\lambda_R}$$

Die Nahfeldgrenze  $x_0$  wächst also quadratisch mit der Länge L der Streckenlast und nimmt mit der Rayleighwellenlänge  $\lambda_R$  ab. Insbesondere wird der ebene Bereich proportional zur Frequenz größer.

Zur besseren Einbindung der Ergebnisse in eine Prognoseformel werden die Rechnungen auch für einen hysteretisch gedämpften Boden durchgeführt. Die Amplituden werden wiederum auf die Linienlastlösung, die hier noch gemäß

$$A = A_{eb} e^{-\alpha x}$$

von der Entfernung  $x$  abhängt, bezogen. Bild 7 zeigt diese Ergebnisse im Vergleich zum ungedämpften Fall. Die Ergebnisse sind nahezu identisch - für den Boden mit Materialdämpfung sind die Schwankungen im Nahbereich eher geringer -, so daß die getroffenen Aussagen zur Ausbreitungscharakteristik einer Streckenlast auch für den hysteretisch gedämpften Boden gelten.

## 5.2 Berechnung mit dem Wechselwirkungsverfahren

In dem vorangegangenen Abschnitt 5.1 ist die Schwingungsausbreitung bei einer Last, die über eine gewisse Länge verteilt, andererseits aber auf einer unendlich schmalen Linie konzentriert ist, berechnet worden. Es soll nun zur Absicherung der dabei gefundenen Gesetzmäßigkeit auch die Schwingungsausbreitung einer Last untersucht werden, die auch über eine gewisse Breite verteilt ist. Es wird der Fall betrachtet, bei dem die Last durch ein starres Fundament verteilt wird.

Es werden starre rechteckige Fundamente berechnet, wobei es insbesondere auf eine große Ausdehnung quer zur Beobachtungsrichtung (zur Meßachse) ankommt. Dabei wird das Seitenverhältnis zwischen  $b/a = 1$  (Quadrat) und  $b/a = 5$  variiert. Die Größe der Fundamente beträgt

1. 1 m x 1 m,
2. 1 m x 3 m,
3. 1 m x 5 m.

Die Frequenz wird zwischen 4 und 80 Hz variiert, die Scherwellengeschwindigkeit des Bodens ist  $v_s = 200$  m/s. (Tatsächlich werden mit den Rechenergebnissen auch größere Fundamente und andere Bodensteifigkeiten erfaßt. Die Amplituden-Abstands-Gesetze hängen nur vom Seitenverhältnis  $b/a$  und dem dimensionslosen Parameter  $a_0 = a\omega/v_s$  ab,  $a$  ist die halbe Fundamentbreite. Die berechneten Gesetzmäßigkeiten für große  $a_0$ -Werte gelten demnach für hohe Frequenzen oder für große Fundamente oder für weiche Böden.)

Die berechneten Amplituden-Abstandsgesetze sind in den Bildern 8 und 9 in dimensionsloser Form dargestellt worden. Dabei sind die Amplituden auf die Amplitude des Fundaments und die Entfernungen auf die Wellenlänge bezogen. Letzteres verschiebt die Kurven für verschiedene Frequenzen etwas (zur Orientierung: es wurde jeweils vom Fundamentrand bis in 150 m Entfernung gerechnet). Die Abnahmegesetze lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

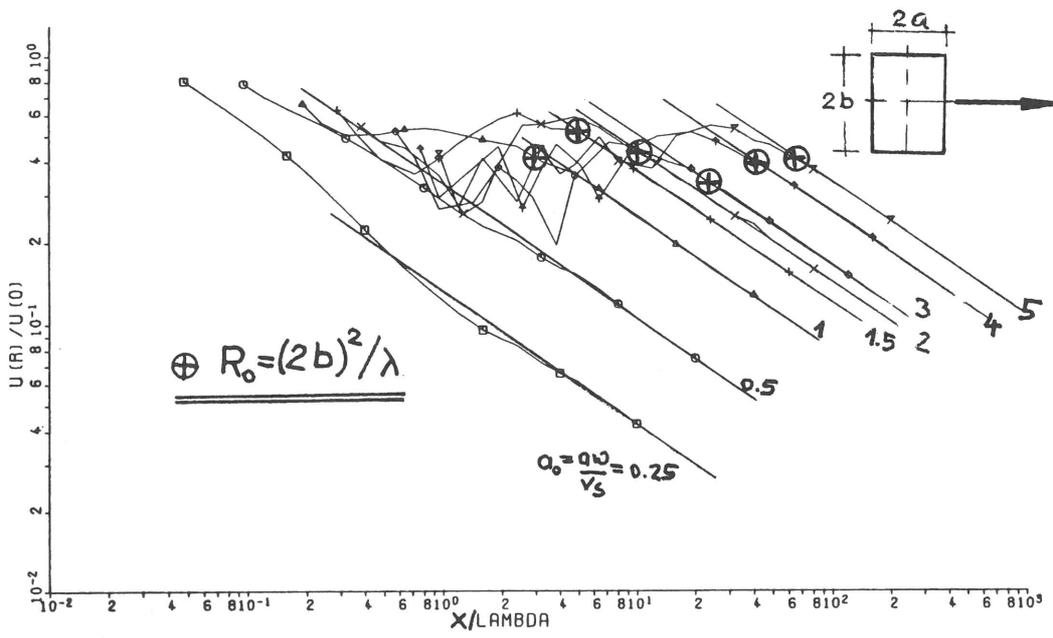
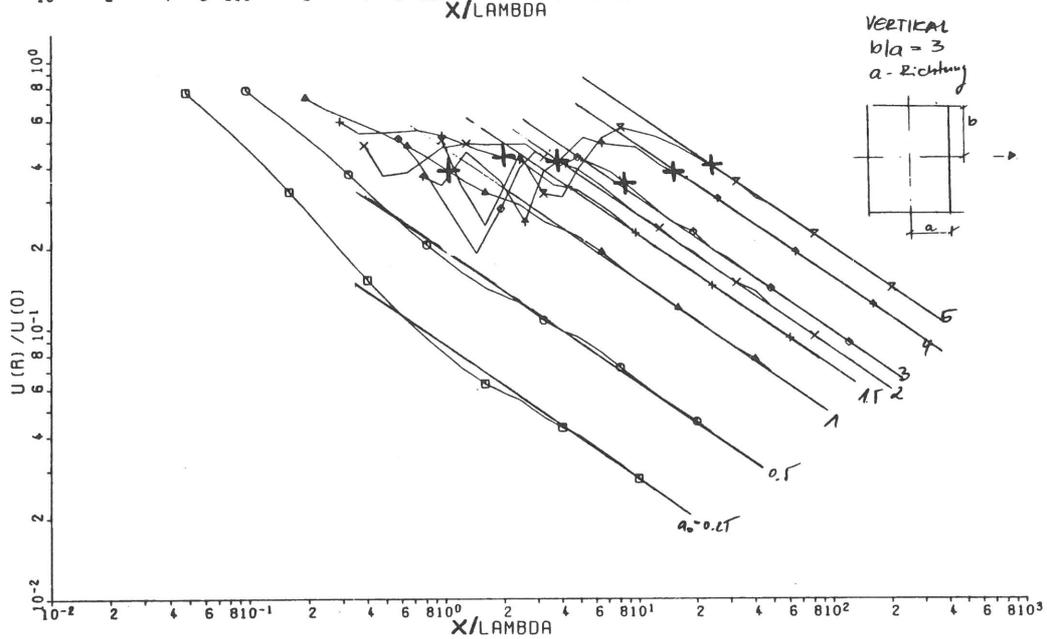
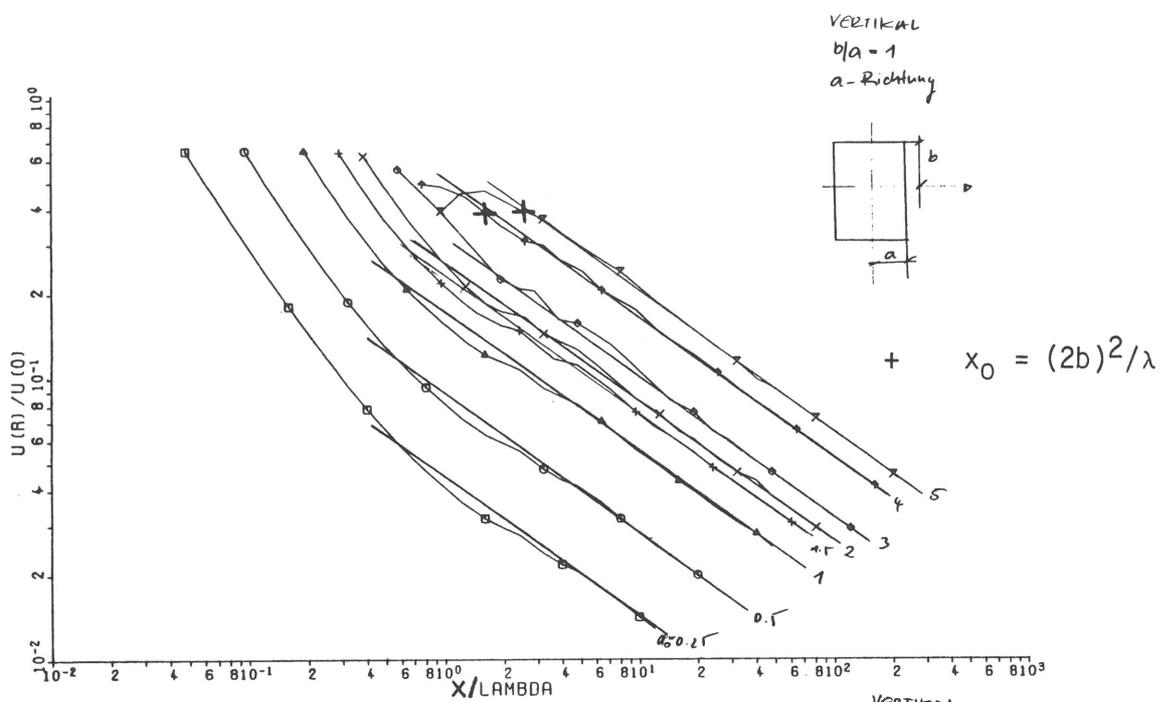


Bild 8

Amplituden-Abstands-Gesetze bei Lasteinleitung über ein starres Rechteckfundament (Meßachse senkrecht zur längeren Seite)

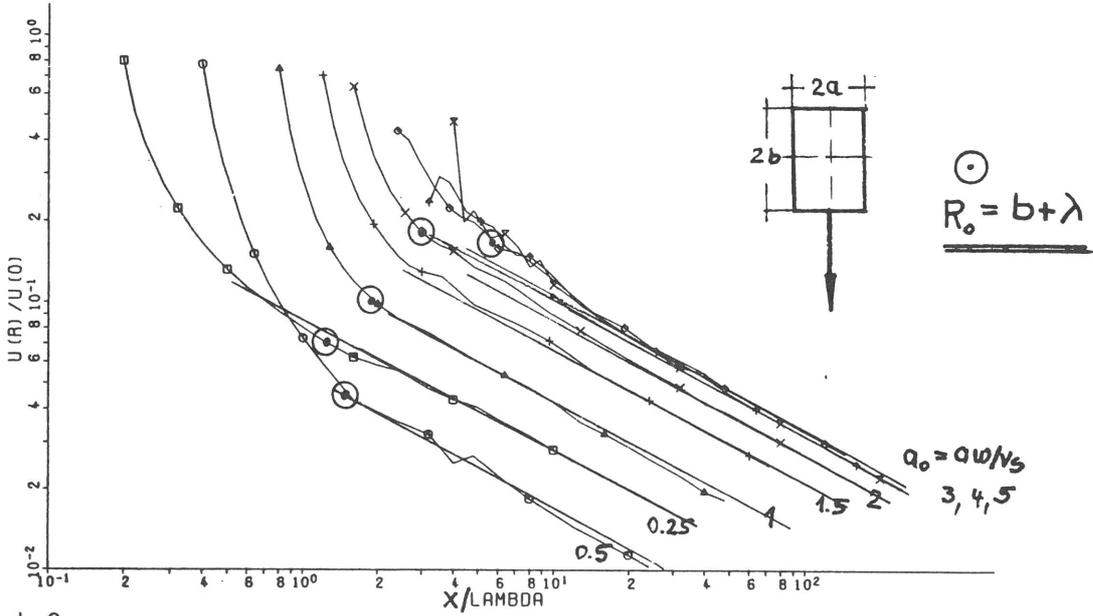
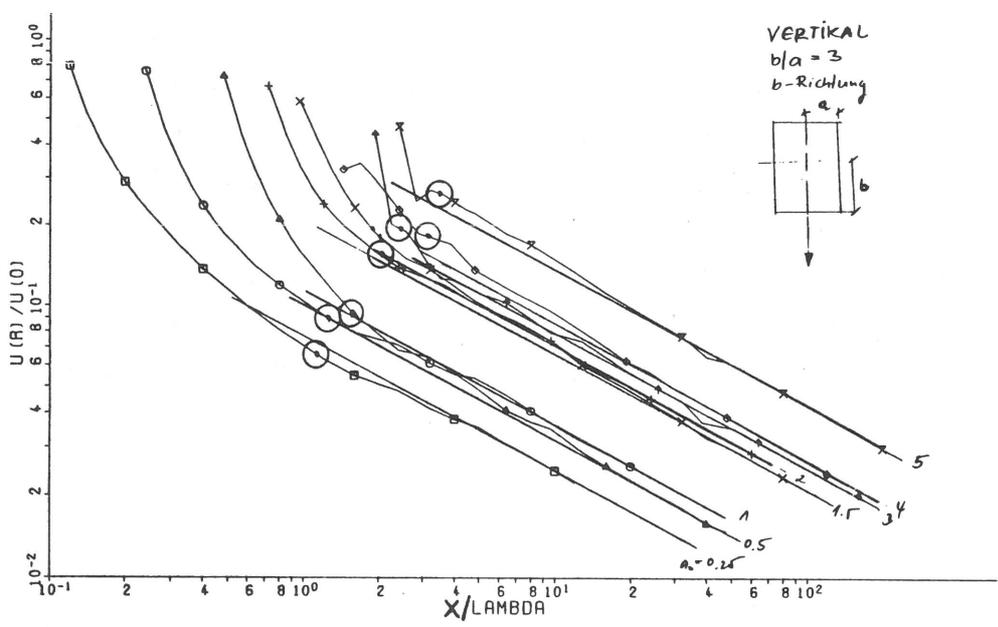
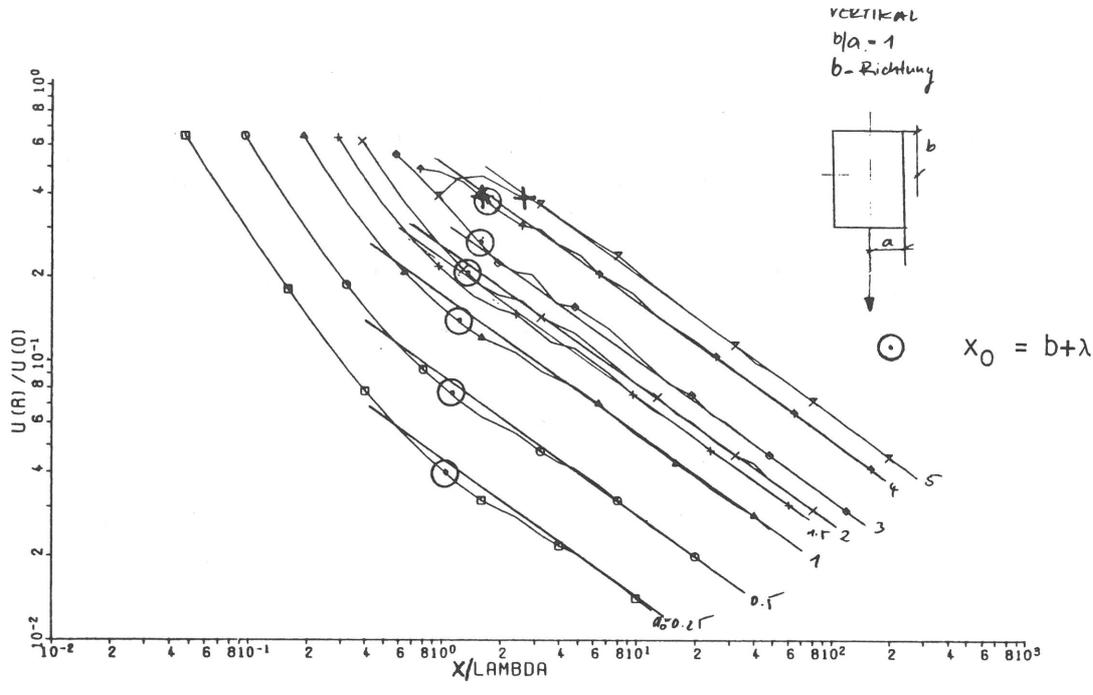


Bild 9

Amplituden-Abstands-Gesetze bei Lasteinleitung über ein starres Rechteckfundament (Meßachse senkrecht zur kürzeren Seite)

Im Vergleich der Bilder 8a bis 8c sieht man, daß mit zunehmender Länge des Fundaments Entfernungsbereiche mit konstanten Amplituden auftreten. Betrachtet man die Ergebnisse für das lange Fundament ( $b/a = 5$ , Bild 8c) genauer, so erkennt man, daß der konstante Bereich für größere  $a_0$ -Werte bzw. höhere Frequenzen größer wird. Es handelt sich hier um genau denselben konstanten oder "ebenen" Bereich, der schon in Abschnitt 5.1 für die Streckenlast gefunden wurde. Der dort ermittelte Grenzabstand  $x_0 = (2b)^2/\lambda$ , der das Ende des konstanten Bereichs und den Beginn der axialsymmetrischen Abnahme mit  $A \sim r^{-0,5}$  markiert, ist in den Bildern jeweils durch ein Kreuz gekennzeichnet. Er stimmt auch hier sehr gut mit dem Beginn der Fernfeldgesetzmäßigkeit überein. Damit wird das Ergebnis aus Abschnitt 5.1 auch für ausgedehnte starre Fundamente voll bestätigt.

Zur vollständigen Beschreibung dieses Lastfalls sind in den Bildern 9a bis 9c auch die Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten in Richtung der Fundamentlänge (der längeren Seite) dargestellt. Man erkennt in allen Fällen einen Nahbereich mit stärkerer Amplitudenabnahme als  $A \sim r^{-0,5}$ . Dies ist auf die Nahfeldgesetzmäßigkeit einer Punktquelle zurückzuführen. Unterhalb einer Wellenlänge Abstand gilt noch nicht die Fernfeldgesetzmäßigkeit  $A \sim r^{-0,5}$ , sondern die Amplituden tendieren zu einer Abnahme mit  $A \sim r^{-1}$ . Für ein ausgedehntes Fundament bedeutet dies, daß Unregelmäßigkeiten und stärkere Amplitudenabnahme noch in einem Wellenlängenabstand vom Fundamentrand auftreten. Der entsprechende Abstand  $r_0 = b + \lambda$  ist in den Bildern jeweils durch einen Kreis gekennzeichnet.

## 6. Gesetzmäßigkeiten bei stochastischer Lastverteilung über die Zuglänge

### 6.1 Simulationsrechnungen mit zufällig erzeugten Phasen

Als Anregung werden eine bestimmte Anzahl von harmonischen Punktquellen auf der Laststrecke  $L$  gleichmäßig verteilt. Die eingeleiteten Kräfte sollen völlig unkorreliert sein, das bedeutet für harmonische Schwingungen, daß die Phasenlage der einzelnen Schwingungen zueinander völlig zufällig ist. Diese zufälligen Phasen werden erzeugt und die jeweils zu einer Phasenkonstellation berechneten Ergebnisse werden quadratisch gemittelt.

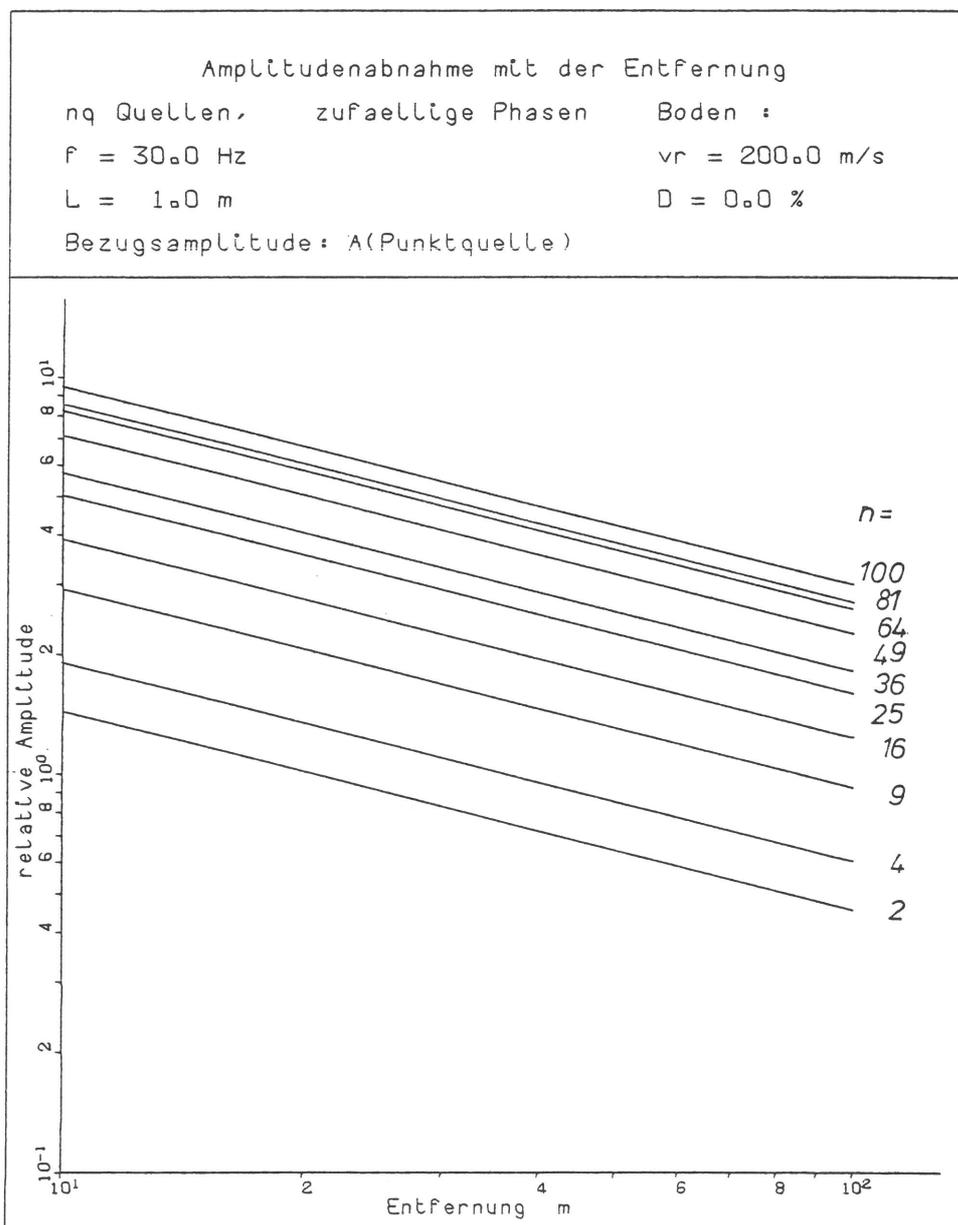


Bild 10

Überlagerung von unkorrelierten Zufallsschwingungen, Abhängigkeit der Amplitude von der Anzahl der Quellen

1) Laststrecke  $L = 0$  (Bild 10)

Es wird zunächst nur die Überlagerung von unkorrelierten Zufallsschwingungen betrachtet, ohne die räumliche Verteilung der Quellen zu berücksichtigen. Es kommen  $n = 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81$  und  $100$  Quellen zur Überlagerung. Dabei nimmt die Gesamtamplitude ungefähr mit  $\sqrt{n}$  zu. Man erkennt dies deutlich an den Amplitudenwerten für  $x = 10$  m, die in Bild 10 direkt an der Ordinate abgelesen werden können. Allerdings werden die Werte

$$\frac{A}{A_0} = \sqrt{2}, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$$

nicht 100-prozentig getroffen. Die tatsächlichen Werte streuen etwas um diese Werte. Offensichtlich reicht die Anzahl von 100 Mittelungen, die dem Bild zugrundeliegen, nicht aus, um die Gesetzmäßigkeiten exakt zu erfassen.

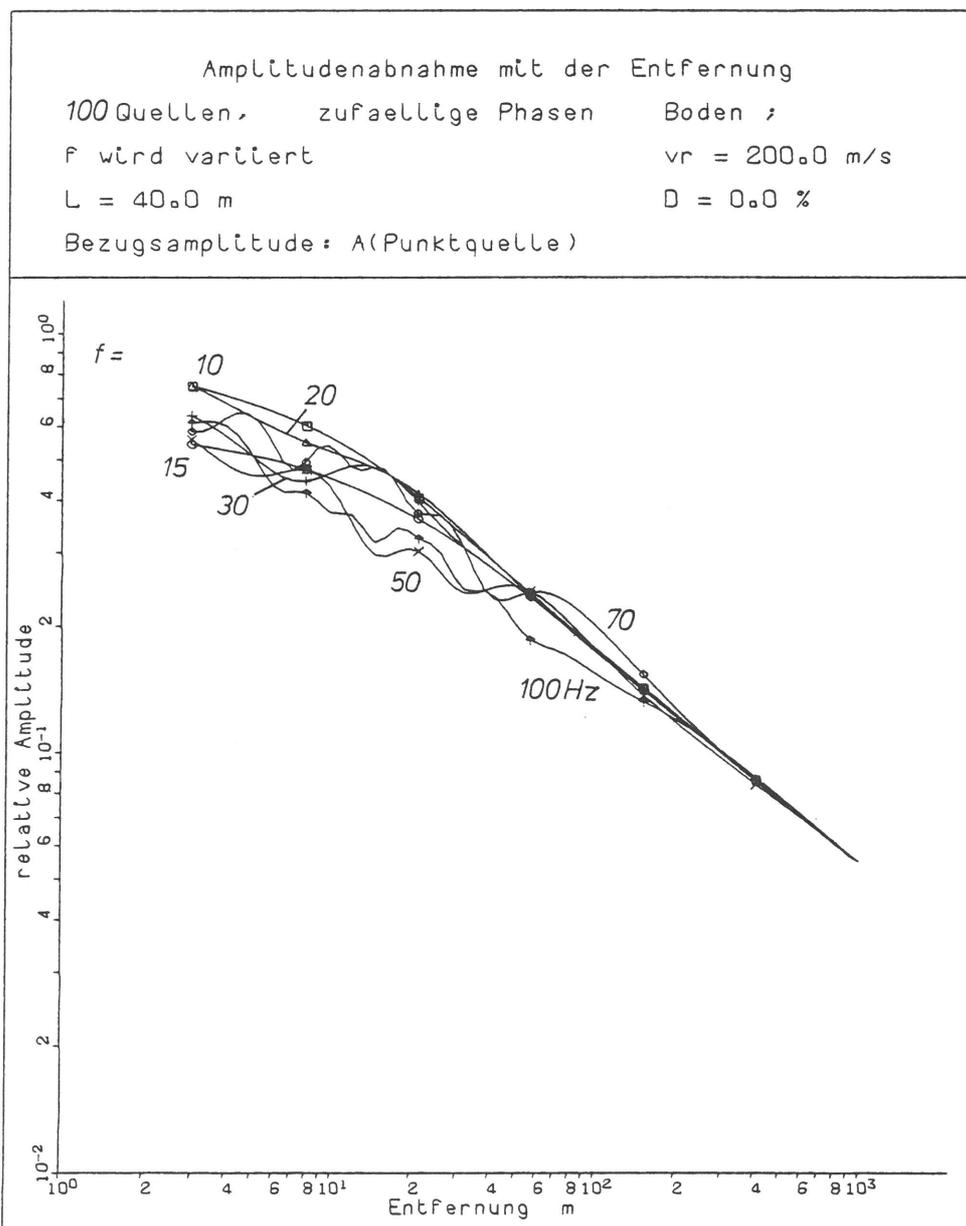


Bild 11  
 Simulation einer zufälligen Streckenlast, Variation der Frequenz

## 2) Die Frequenz wird variiert (Bild 11)

Es sind 100 Quellen auf einer Strecke von 40 Metern verteilt. Die berechneten Abnahmegesetze sind für alle Frequenzen ähnlich: Für große Entfernungen ab etwa 100 Metern nehmen die Amplituden mit  $A \sim r^{-0,5}$  wie eine Punktlast ab. Je näher man den Quellen kommt, desto geringer wird die Steigung des Amplituden-Abstands-Gesetzes. Die Kurvenverläufe für verschiedene Frequenzen unterscheiden sich nur in ihren Interferenzmustern, das heißt in ihren Schwankungen um den mittleren Kurvenverlauf. Bei 10 und 15 Hz sind keine, bei 20 Hz kaum Schwankungen festzustellen. Ab 30 Hz treten deutlich Minima und Maxima auf, die sich bei höheren Frequenzen auf einen immer weiteren Entfernungsbereich erstrecken.

Dieser Effekt läßt sich genauso erklären, wie die Tatsache, daß bei gleichphasiger deterministischer Anregung die Abweichung vom Punktlastabnahmegesetz, das heißt also der konstante Nahbereich sich bei höheren Frequenzen über größere Entfernungen erstreckt: Höhere Frequenzen sind mit kürzeren Wellenlängen verbunden, so daß auch kleine Wegdifferenzen für die Wellen von verschiedenen Quellen schon zu beträchtlichen Phasenunterschieden führen. Die Wegdifferenzen und damit die Phasenlage der einzelnen Wellenanteile ändern sich mit der Entfernung von der Quelle. Da die Phasenunterschiede für hohe Frequenzen größer sind, sind auch die Amplitudenschwankungen stärker. Außerdem reichen die Schwankungen in weitere Entfernungen, da die dort kleineren Wegdifferenzen nur noch für hohe Frequenzen zu deutlichen Phasenunterschieden führen.

Die Schwankungen, die für die unkorrelierten Quellen berechnet wurden, sind zufälliger Art. Das heißt bei der Anzahl der Mittelungen (hier 30) haben sich die Zufälligkeiten der einzelnen Phasenrealisierungen noch nicht ausgemittelt. Der theoretische Grenzwert muß für alle Frequenzen einen glatten Kurvenverlauf besitzen.

## 3) Die Länge der Laststrecke wird variiert (Bild 12)

Für die Laststreckenlänge  $L = 10$  und  $20$  m ist in Entfernungen ab 10 Meter die Verteilung der Quellen nicht zu bemerken. Abweichungen vom Punktlastabnahmegesetz sind erst bei Längen von 40 m etwas und von 80 m deutlicher zu erkennen.

## 4) Die Anzahl der Quellen wird variiert (Bild 13)

Die Erwartung, daß die Abnahmekurven mit zunehmender Quellenzahl sich einer Grenzkurve nähern, wird mit dieser Rechnung nicht bestätigt. Man kann ledig-

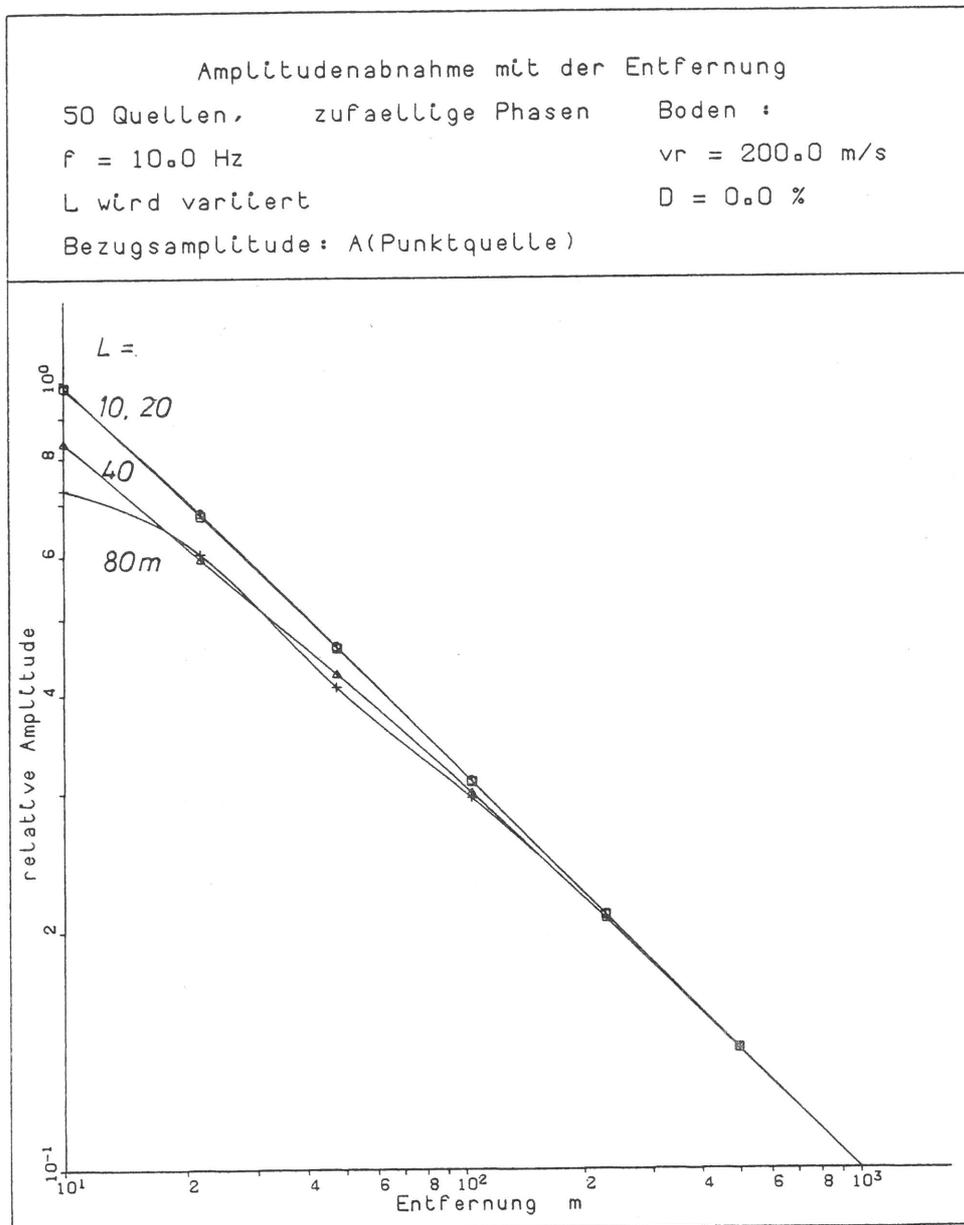


Bild 12

Simulation einer zufälligen Streckenlast, Variation der Laststreckenlänge

lich feststellen, daß ab etwa  $x = 100 \text{ m}$  alle Kurven annähernd das Punktlastgesetz erreicht haben. Die Abweichungen im quellnäheren Bereich sind aber keineswegs von eindeutiger Tendenz (bis auf die Tatsache, daß die Amplituden kleiner als bei Punktlastanregung sind). Sie sind offensichtlich zufälliger Natur und geben nicht die richtigen Gesetzmäßigkeiten wieder.

Die noch unbefriedigenden Ergebnisse der stochastischen Simulation zu 1) bis 4) sind in den Bericht mitaufgenommen worden, um zu illustrieren, mit welcher großen Abweichungen vom zu erwartenden mittleren Abnahmegesetz zum Beispiel bei Messungen zu rechnen ist, selbst bei einer großen Anzahl von Mittelungen.

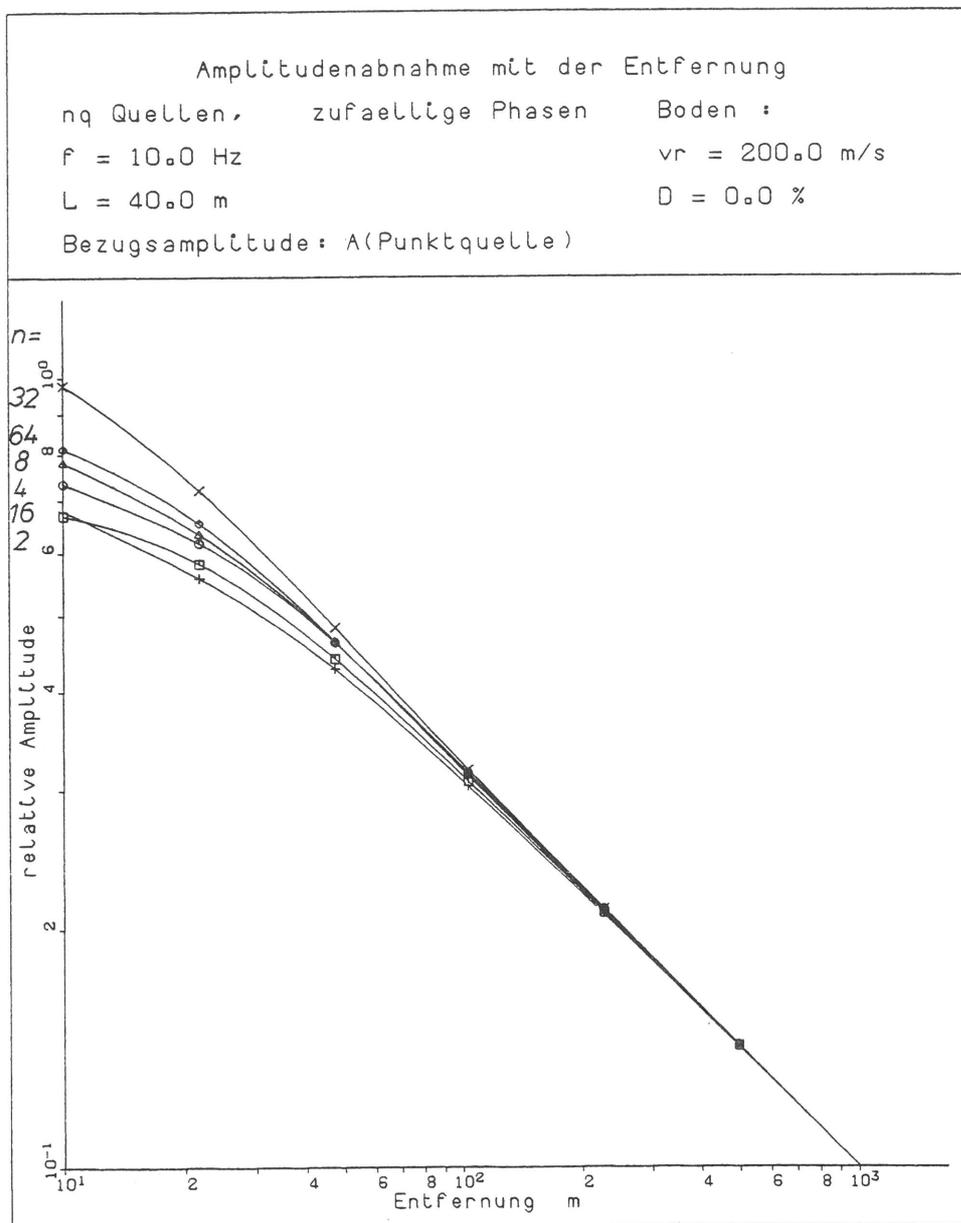


Bild 13  
Simulation einer zufälligen Streckenlast, Variation der  
Quellenzahl

## 6.2 Eine theoretische Grundlage zur Ableitung der "stochastischen Abnahmegesetze"

Für lineare Systeme gibt es auch bei stochastischer Anregung einen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen, der hier auf den Boden angewandt werden soll. Die Eingangsgrößen sind die  $n$  Kräfte  $P_j$ , die auf der Laststrecke verteilt sind, die Ausgangsgrößen sind die Schwingungsgrößen, hier zum Beispiel die Schwingwege  $u$ , in den verschiedenen Entfernungen. Die Übertragungsfunktion  $H_j(f)$  ist gerade die Punktlastlösung, die noch von der jeweiligen Entfernung  $r_j$  zwischen der Last  $P_j$  und dem betrachteten Punkt der Umgebung abhängt. Für die Leistungsdichten  $\Phi$  der Ein- und Ausgangsgrößen gilt nun

$$\Phi_{uu}(f) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n H_k^*(f) \Phi_{P_k P_l}(f) H_l(f)$$

bzw.

$$= \sum_{j=1}^n |H_j(f)|^2 \Phi_{P_j P_j}(f) + \dots$$

In der zweiten hier weiter verwendeten Darstellung ergibt sich die Leistungsdichte der Schwingantwort als Summe über die Betragsquadrate der Übertragungsfunktionen und die Leistungsdichten der einzelnen Kräfte und die Punkte stehen für Terme, die die Kreuzleistungsdichten  $\Phi_{P_k P_l}$ ,  $k \neq l$  enthalten. Da in diesem Abschnitt zunächst nur die Gesetzmäßigkeiten für vollständig unkorrelierte Lasten ermittelt werden sollen, fallen diese Terme gerade weg. Außerdem sollen die Quellen alle die gleiche Amplitude besitzen, so daß die  $\Phi_{P_j P_j}$  durch ein  $\Phi_{PP}$  ersetzt werden können

$$\Phi_{uu}(f) = \sum_{j=1}^n |H_j(f)|^2 \Phi_{PP}(f).$$

Da die Leistungsdichten proportional zu dem Quadrat der Amplituden sind, kann man den Zusammenhang auch folgendermaßen ausdrücken

$$|u| = \sqrt{\sum_{j=1}^n |H_j|^2} |P| ,$$

das heißt:

Das stochastische Amplituden-Abstands-Gesetz ergibt sich aus der quadratischen Mittelung der einzelnen Punktlastgesetze  $|H_j|$ .

Dieses Ergebnis erscheint vielleicht auch unmittelbar einsichtig:

Bei der Überlagerung der von unkorrelierten Quellen erzeugten Wellen kann die Laufzeit der Wellen, beziehungsweise die Phasenlage, keinen Einfluß auf das Ergebnis haben. Es überlagern sich demnach lediglich die Betrags-Abstandsgesetze. Die Überlagerung erfolgt im Sinne eines quadratischen Mittelwertes. Auch dies erscheint plausibel, da sich zum Beispiel bei linearer Überlagerung von  $n$  gleich weit entfernter Quellen die  $n$ -fache Amplitude ergeben würde, statt einem kleineren, nämlich dem  $\sqrt{n}$ -fachen Wert.

### 6.3 Berechnung der gemittelten Abnahmegesetze

Es wird wie bei den Simulationsrechnungen in Abschnitt 6.1 das Superpositionsprogramm benutzt. Die Punktlastlösungen für die einzelnen Quellen werden jedoch entsprechend den vorangehenden Überlegungen nur dem Betrag nach und außerdem quadratisch überlagert.

1) Die Anzahl der Quellen wird variiert (Bild 14)

Es sind  $n = 2, 4, 8, 16, 32, 64$  Quellen auf der Laststrecke  $L = 40$  m verteilt. Wie bereits in Abschnitt 6.1 gezeigt wurde, sind die Amplituden des Fernfeldes proportional zu  $\sqrt{n}$ . Dies wird hier durch die Normierung auf  $\sqrt{n} P$  berücksichtigt, so daß in Bild 14 die Fernfeldgesetze übereinstimmen. Für  $n \geq 8$  stimmen auch die Gesetze in der Nähe der Quelle gut überein. Es wird also sehr schnell das Grenzesetz für  $n \rightarrow \infty$  erreicht. Die Abweichungen im Nahbereich für  $n = 2$  bzw. 4 erklären sich daraus, daß bei gleichmäßiger Anordnung auf 40 m Länge die nächste Quelle schon knapp 7 m von der Meßachse (bzw. 20 m bei 2 Quellen) entfernt ist. Bei Zusanregung spielen diese extremen Situationen keine Rolle, da für die einzelnen Quellen (die Achsen) sich die Entfer-

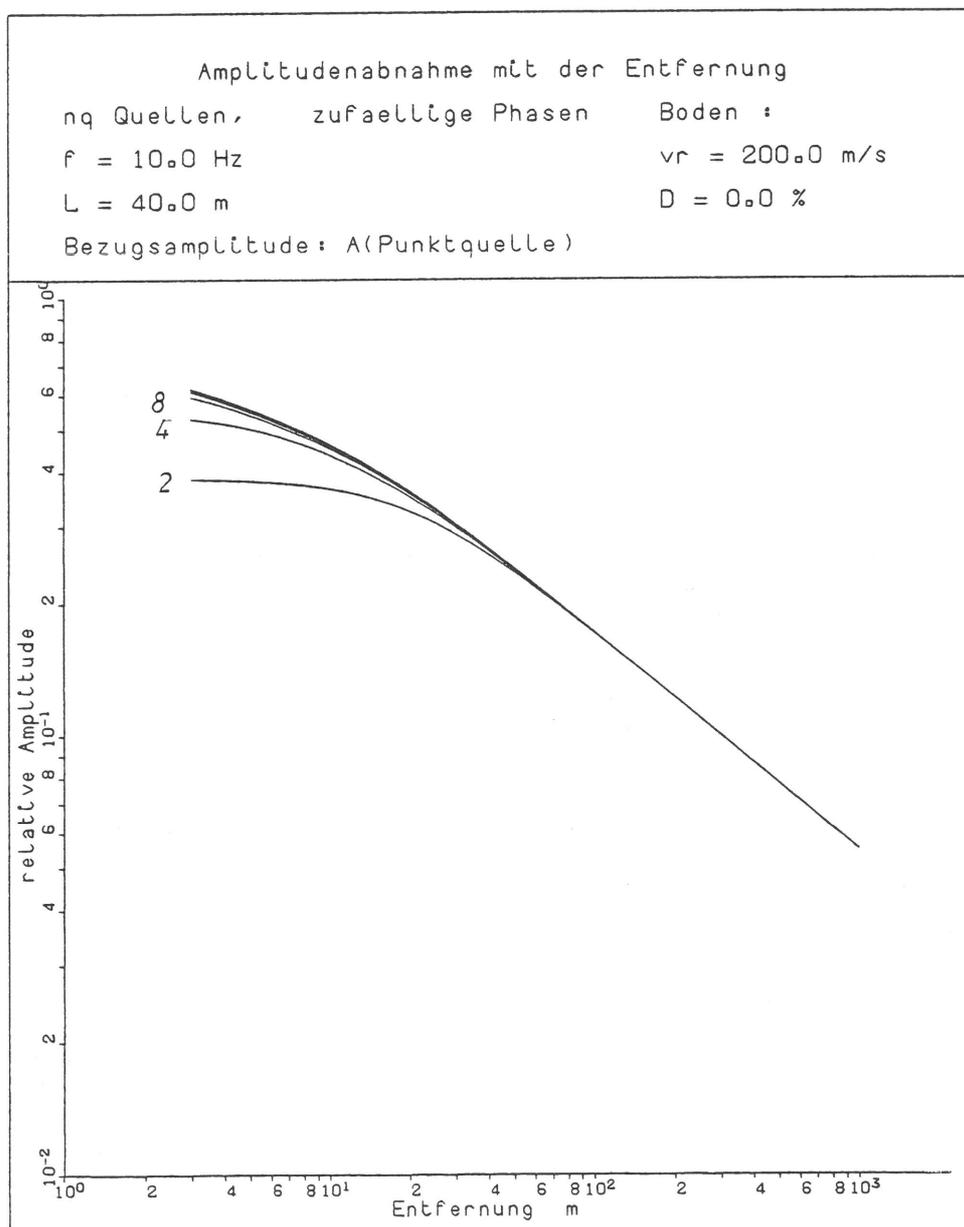


Bild 14  
Gemittelte Amplituden-Abstands-Gesetze für eine zufällige Streckenlast, Variation der Quellenanzahl

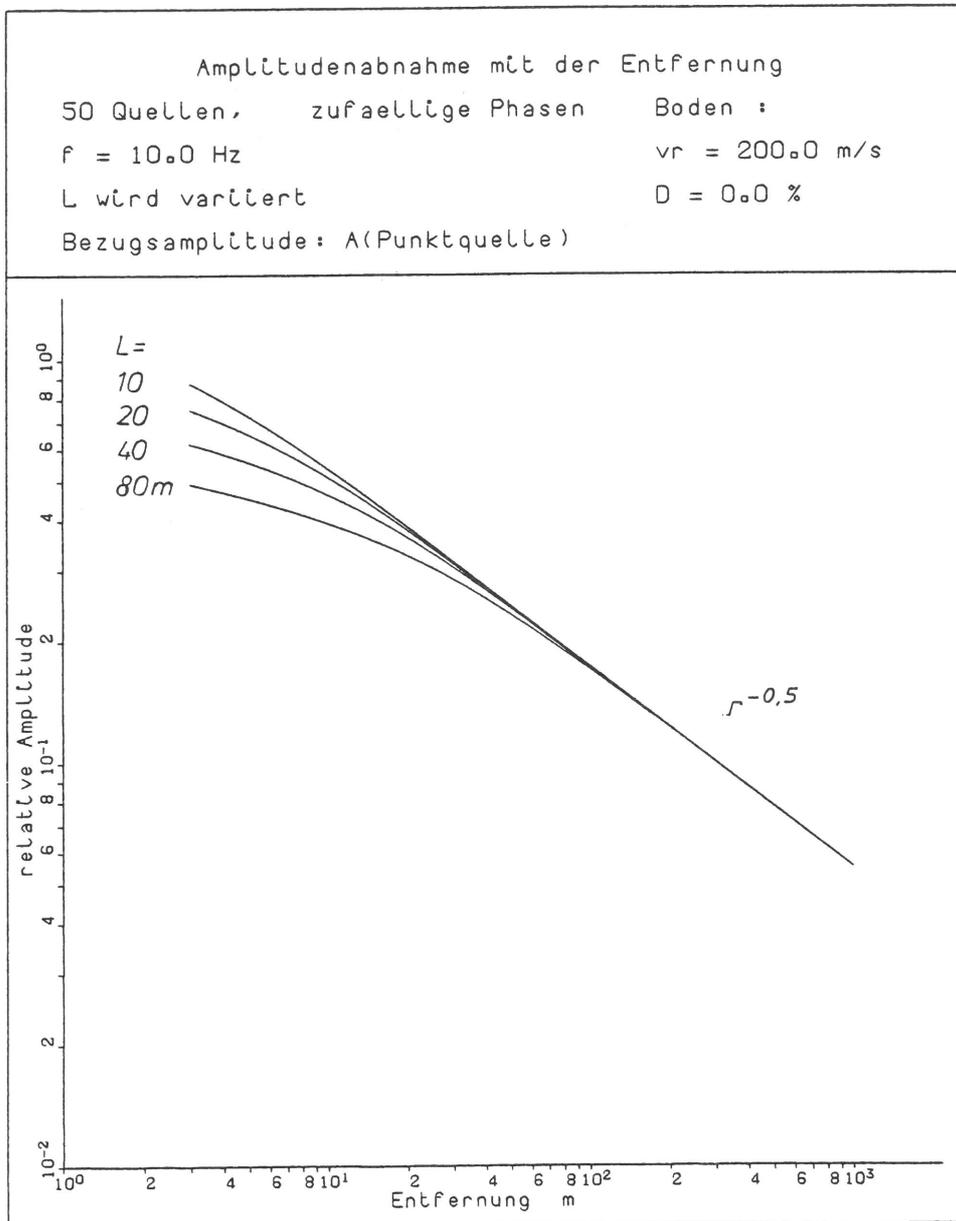


Bild 15

Gemittelte Amplituden-Abstands-Gesetze für eine zufällige Streckenlast, Variation der Laststreckenlänge

nung zur Meßachse während der Vorbeifahrt des Zuges sowieso ändert. Entscheidend scheint also das Amplituden-Abstands-Gesetz für unendlich viele unkorrelierte Quellen zu sein.

## 2) Die Länge der Laststrecke variiert (Bild 15)

Man erkennt deutlich in Bild 15, daß die Annäherung an das Punktlastgesetz für eine längere Laststrecke erst in weiterer Entfernung erfolgt. Dem entspricht im Nahbereich eine stärkere Abweichung und eine geringere Neigung der Amplituden-Abstands-Kurve.

## 3) Gleichzeitige Variation von $L$ und $n$ (Bild 16)

Diese Variation entspricht etwa dem Vergleich von Zügen mit einer unterschied-

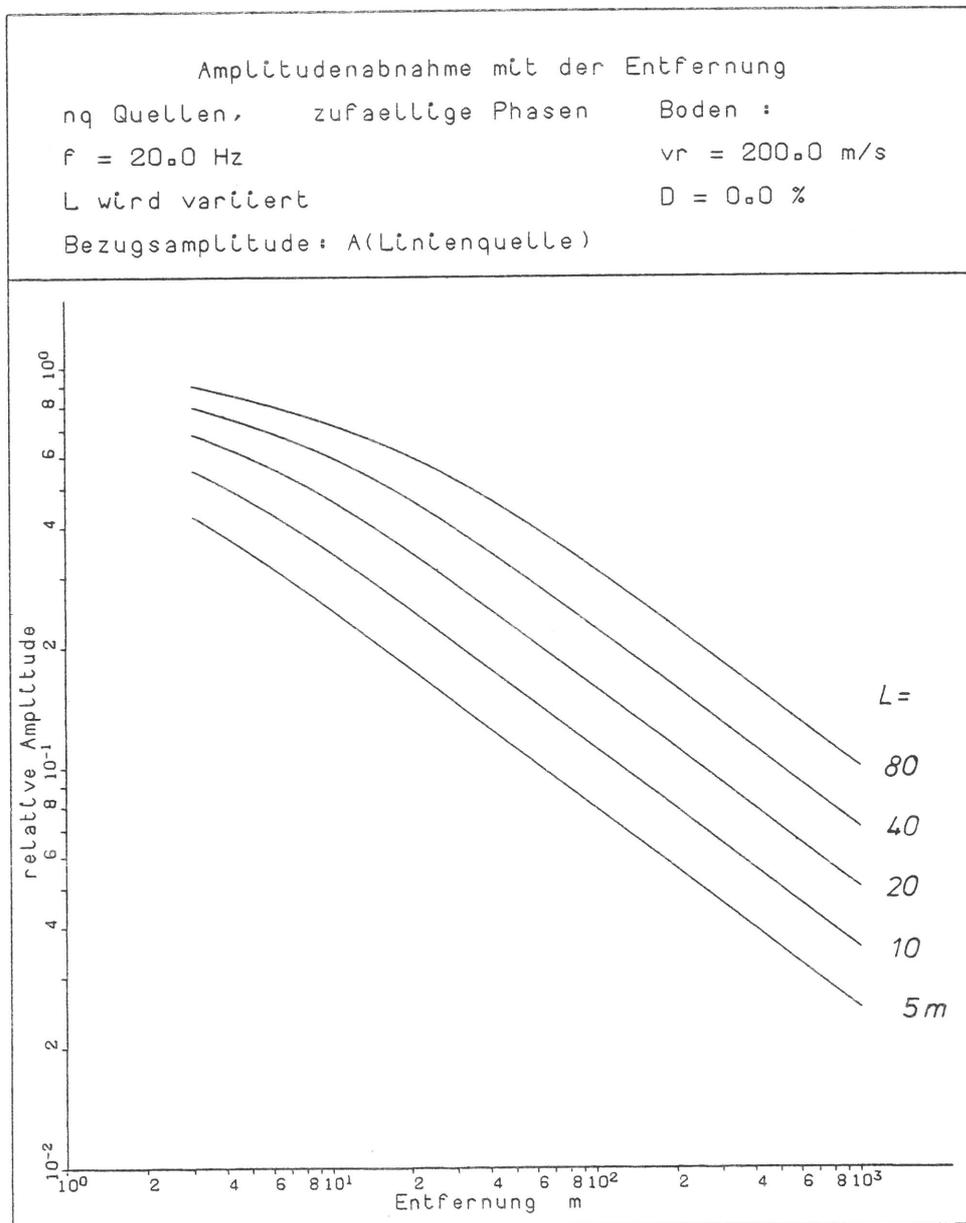


Bild 16

Gemittelte Amplituden-Abstands-Gesetze für eine zufällige Streckenlast, gleichzeitige Variation der Anzahl und der Länge bei gleichbleibender Lastdichte  $n/L = 4/5 \text{ m}$

lichen Anzahl von Wagen. Es wird die Länge der Strecke, auf der erregt wird, vergrößert, ohne dabei die Intensität der Erregung pro Länge  $P/L$  zu ändern. Bild 16 zeigt dazu, daß die Intensität Kraft pro Länge von geringerer Bedeutung ist als die Gesamtamplitude  $\sqrt{n} P_j$ . Selbst in unmittelbarer Nähe der Laststrecke in 3 Metern Entfernung sind die Amplitudenunterschiede deutlich. Die Kurven kommen zwar im Vergleich zum Fernfeld, wo die Kurven jeweils um den Faktor  $\sqrt{2}$  versetzt sind, etwas dichter zusammen, aber es gibt nicht wie im gleichphasigen Anregungsfall einen für alle Lastlängen (einschließlich  $L = \infty$ ) gleichen Nahbereich.

#### 6.4 Ein explizites Amplituden-Abstands-Gesetz für stochastische Anregung

Im vorangehenden Abschnitt ist gezeigt worden, daß mit zunehmender Anzahl der Quellen sehr schnell ein Grenzgesetz für  $n \rightarrow \infty$  erreicht wird. Dieses Abnahmegesetz soll hier explizit berechnet werden.

Für  $n$  gleich große Kräfte mit der Amplitude  $P$  kann das Amplituden-Abstands-Gesetz in zwei Faktoren zerlegt werden: einen Anregungsfaktor mit der resultierenden Amplitude  $\sqrt{n} P$  und dem quadratischen Mittelwert der einzelnen Punktlastabnahmegesetze

$$\frac{u}{P} = A_{ax} \frac{\sqrt{r\omega/v_S}}{G r}$$

mit vom Anregungsort abhängigen  $r$ . Der Mittelwert kann für unendlich viele Quellen explizit angegeben werden

$$M_2\left(\frac{u}{P}\right) = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \left(A_{ax} \frac{\sqrt{r\omega/v_S}}{G r}\right)^2 dy}$$

mit  $r = \sqrt{x^2+y^2}$ .

Die Berechnung dieses Integrals führt auf

$$\begin{aligned} M_2\left(\frac{u}{P}\right) &= A_{ax} \frac{\sqrt{\omega/v_S}}{G} \frac{1}{\sqrt{L}} \sqrt{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} dy} \\ &= A_{ax} \frac{\sqrt{\omega/v_S}}{G} \frac{1}{\sqrt{L}} \sqrt{\ln(y+\sqrt{x^2+y^2}) \Big|_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}}} \\ &= A_{ax} \frac{\sqrt{\omega/v_S}}{G} \frac{1}{\sqrt{L}} \sqrt{\ln \frac{r_1+y_1}{r_1-y_1}}, \end{aligned}$$

wobei  $y_1 = L/2$  und  $r_1 = \sqrt{x^2+y_1^2}$  ist.

Die Abnahmegesetzmäßigkeit steckt allein in dem Term

$$\sqrt{\ln \frac{r_1+y_1}{r_1-y_1}}$$

der sich auch als

$$\sqrt{\ln \frac{\sqrt{\xi^2+1} + 1}{\sqrt{\xi^2+1} - 1}} \quad \text{mit } \xi = \frac{x}{y_1} = \frac{2x}{L}$$

schreiben läßt. Für große Entfernungen (große  $\xi$ ) gilt die Näherung

$$\sqrt{\ln \frac{\sqrt{\xi^2+1} + 1}{\sqrt{\xi^2+1} - 1}} \approx \sqrt{\frac{2}{\xi}} = \sqrt{\frac{L}{x}}$$

Es wird deshalb eine Korrekturfunktion

$$f(\xi) = \sqrt{\frac{\xi}{2}} \ln \frac{\sqrt{\xi^2+1} + 1}{\sqrt{\xi^2+1} - 1}$$

definiert, für die

$$f(\xi) \rightarrow 1 \quad \text{für } \xi \rightarrow \infty$$

gilt. Bei  $\xi = 1$ , das heißt  $x = L/2$  ist bereits  $f(\xi) = 0,94$  und bei  $\xi = 2$  ( $x = L$ ) ist  $f(\xi) = 0,98$ . Das bedeutet, daß der Wert 1 schon innerhalb der Laststrecke  $x = L$  annähernd erreicht ist.

Damit ergibt sich als Amplituden-Abstands-Gesetz für  $n$  auf der Strecke  $L$  verteilte unkorrelierte Punktlastquellen der Amplitude  $P$

$$u = A_{ax} \frac{P\sqrt{n}}{G} \frac{\sqrt{x\omega/v_s}}{x} f(\xi)$$

das Punktlastgesetz für die Gesamtlast  $\sqrt{n} P$  multipliziert mit der oben definierten Korrekturfunktion  $f(\xi)$ . Im Anhang B ist  $f(\xi)$  noch einmal als Kurve und als Tabelle dargestellt.

## 6.5 Einfluß bestimmter Korrelationen zwischen den Quellen, der veränderlichen Anregungsorte während der Vorbeifahrt und der Materialdämpfung

Das Amplituden-Abstands-Gesetz für zufällig verteilte Lasten ist unter der Voraussetzung abgeleitet worden, daß die einzelnen Lasten vollständig unkorreliert sind. Andererseits sind im Berichtsteil "Theorie der Emission" gewisse Korrelationen zwischen den Kräften der einzelnen Achsen festgestellt worden. Der Einfluß dieser Korrelationen soll hier beispielhaft untersucht werden.

Zunächst soll die Auswirkung einer beliebigen aber festen Phasenlage der Achsanteile zueinander, wie sie etwa für Unrundheiten der Räder vorliegen könnte, untersucht werden (Bild 17). Es werden zufällige Phasen erzeugt und

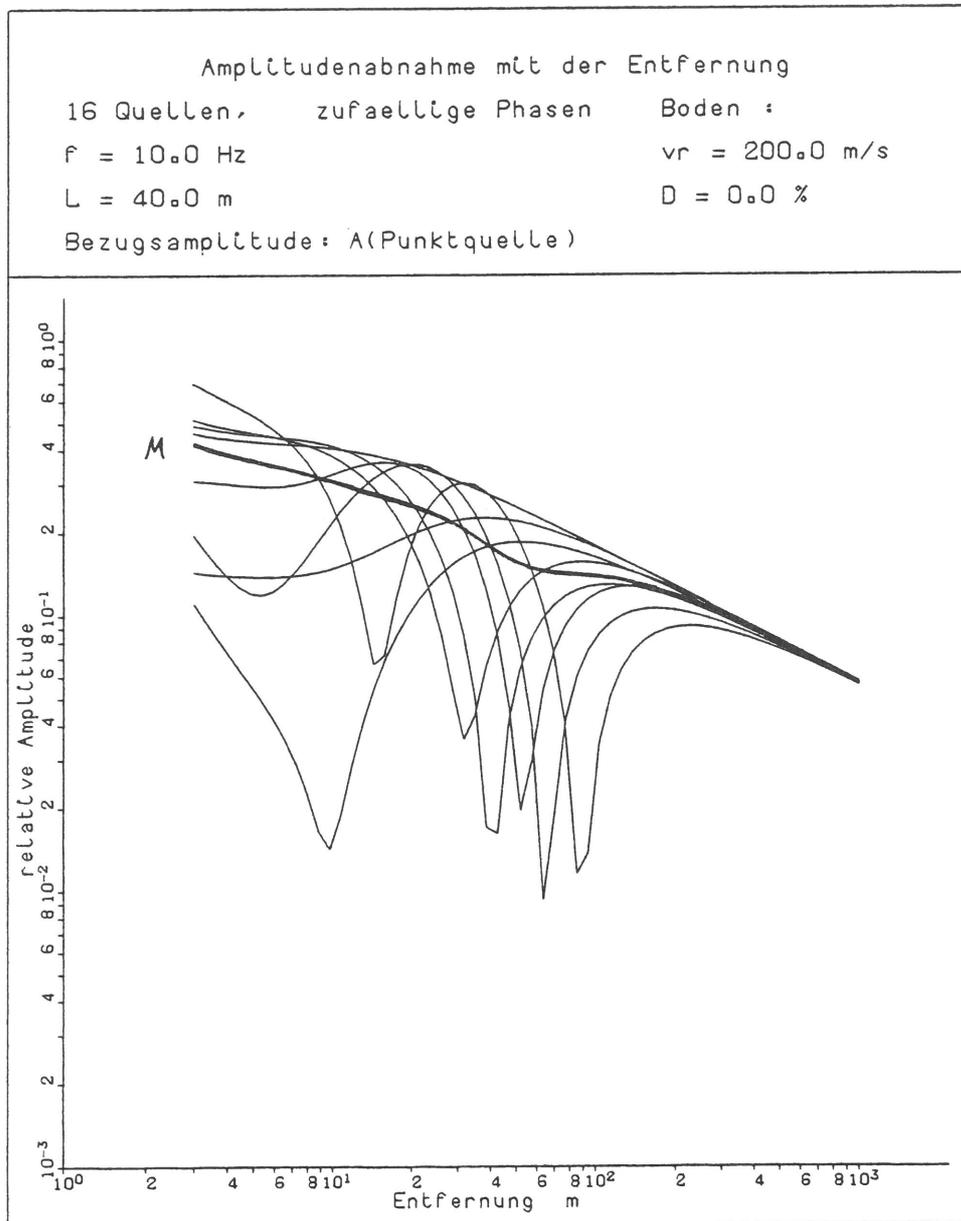


Bild 17

Auswirkungen einer zufälligen aber festen Phasenlage:  
Momentbilder der Amplituden-Abstands-Beziehungen während  
der Zugvorbeifahrt (Fahrstrecke = 20 m) und Mittelwert

die Schwingantworten für verschiedene Stellungen des Zuges während der Vorbeifahrt berechnet. Für jede Stellung ergeben die zufälligen Phasen sehr starke Interferenzen im Amplituden-Abstands-Gesetz. Der ebenfalls eingezeichnete Mittelwert, der einem zeitlichen Mittelwert über 2 Sekunden bei einer Fahrgeschwindigkeit von 70 km/h entspricht, verläuft dagegen annähernd gleichmäßig.

Als zweites Beispiel wird die Korrelation betrachtet, die sich aus der Überfahrt annähernd gleicher Systeme - gegen das Fahrzeug abgefederte Achsen - über die gleichen Schienenstörungen ergibt. Vom Zug aus gesehen bedeutet



Damit läßt sich die stochastische Ein-Ausgangsbeziehung

$$\Phi_{uu} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n H_k^* \Phi_{p_k p_l} H_l$$

umschreiben in

$$\begin{aligned} \Phi_{uu} &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n H_k^* e^{i\omega(t_k - t_l)} H_l \Phi_{pp} \\ &= \left( \sum_{k=1}^n H_k e^{-i\omega t_k} \right)^* \left( \sum_{l=1}^n H_l e^{-i\omega t_l} \right) \Phi_{pp} \\ &= \left| \sum_{k=1}^n H_k e^{-i\omega t_k} \right|^2 \Phi_{pp} \end{aligned}$$

Das bedeutet für die Amplituden, daß sie sich aus der Überlagerung harmonischer Anteile mit einer deterministischen Phasenlage  $\varphi_k = -\omega t_k = -\omega y_k / v$  berechnen lassen. Das Ergebnis ist in Bild 18 dargestellt. Auch hier sind die Abnahmegesetze wie in Bild 17 für verschiedene Zugstellungen während der Vorbeifahrt berechnet und anschließend gemittelt worden. Man erkennt wiederum starke Schwankungen in den Abstandsgesetzen der einzelnen Zugstellungen, die sich aber während der gesamten Vorbeifahrt des Zuges ausmitteln.

Damit ist gezeigt, daß sowohl eine feste aber zufällige Phasenlage (Unrundheiten der einzelnen Räder) als auch zeitliche versetzte identische Erregungen (durch die einzelnen Achsen) - wegen des ausmittelnden Effekts der Vorbeifahrt - zu keiner prinzipiellen Abweichung vom Abnahmegesetz für unkorrelierte Quellen (s. 6.4) führen.

Zur besseren Absicherung werden die Rechnungen auch für den Fall des Bodens mit Materialdämpfung durchgeführt. Der Vergleich der Abnahmegesetze (Bild 19) zeigt, daß die Amplituden beim Boden mit Materialdämpfung annähernd den mit dem Dämpfungsfaktor  $e^{-\alpha x}$  multiplizierten Amplituden  $A_0$  des ungedämpften Falls entsprechen. Bei hohen Frequenzen, starker Dämpfung oder sehr langen Laststrecken gibt es im Nahbereich etwas größere Abweichungen. Die gedämpften Amplituden sind etwas kleiner als durch

$$A = A_0 e^{-\alpha x}$$

vorgegeben, weil die tatsächlichen Entfernungen  $r_j$  und die dabei auftretenden Dämpfungen  $e^{-\alpha r_j}$  größer sind. Für diesen Fall (hohe Frequenz, große

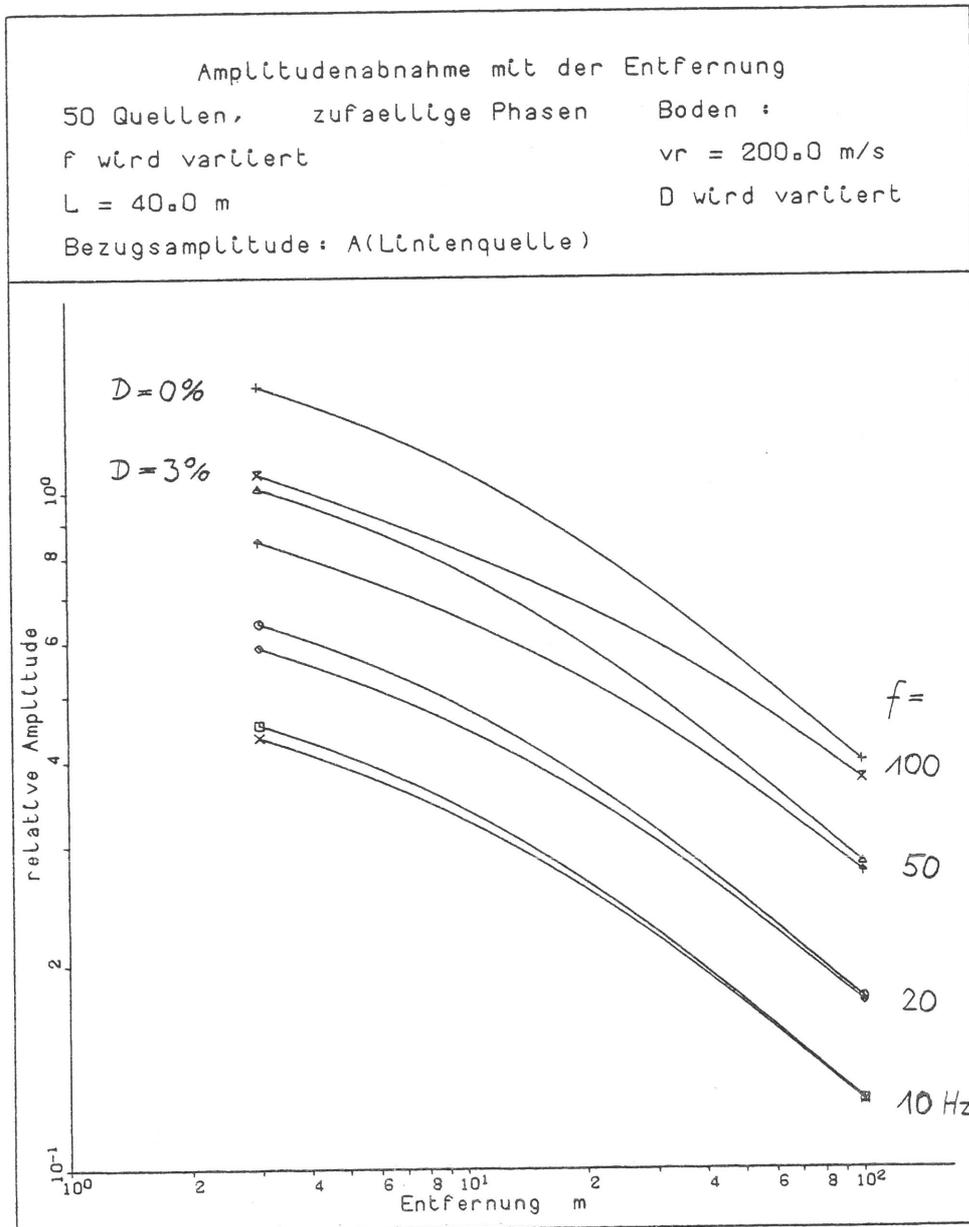


Bild 19  
 Zufällige Streckenlast mit und ohne Bodendämpfung

Dämpfung, langer Zug) wurde durch eine Reihe von Rechnungen folgendes explizites Amplituden-Abstands-Gesetz gefunden:

$$u = 0,20 \frac{P}{G} \sqrt{\frac{n f}{L v_R}} (\alpha x)^{-0,22} e^{-\alpha x}$$

(mit  $\alpha = D\omega/v_R$ ).

Wie in Bild 20 dargestellt, gilt dieses einfache dämpfungsbedingte Potenzgesetz in einem gewissen Nahbereich. Es ist, wie sich bei der Variation der Lastlänge zeigt, nur von der Lastdichte  $\sqrt{n/L}$ , aber nicht von der Lastlänge abhängig.

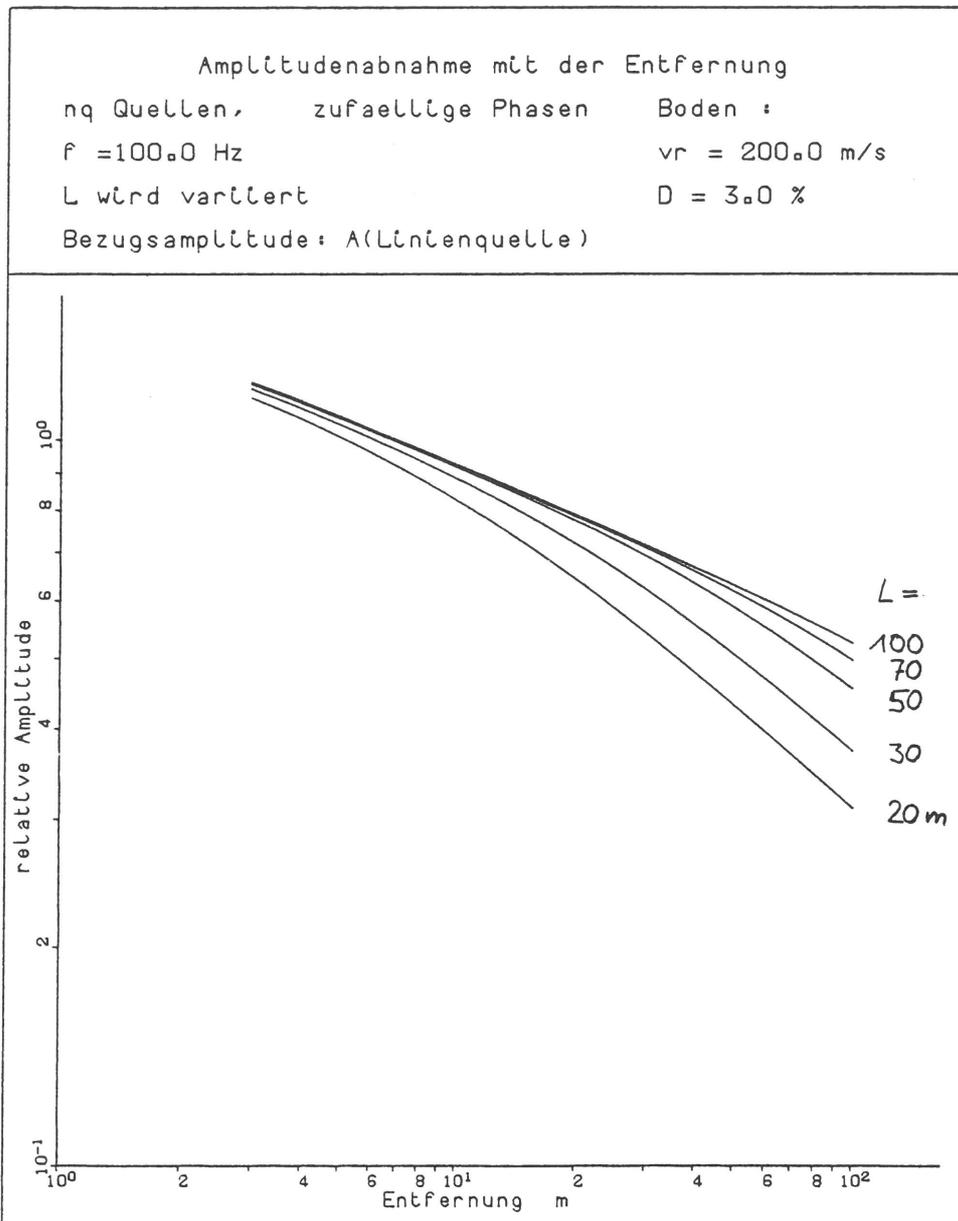


Bild 20  
 Zufällige Streckenlast mit Bodendämpfung:  
 Variation der Lastlänge bei konstanter Lastdichte

## 7. Zusammenfassung

Es werden eine Reihe von theoretischen Grundlagen bereitgestellt, die nach einem Vergleich mit Meßergebnissen zur Formulierung eines verbesserten Prognosemodells für Verkehrserschütterungen führen sollen.

Zunächst werden Einflüsse auf das Amplituden-Abstands-Gesetz untersucht, die unter bestimmten Voraussetzungen zu Abweichungen von den elementaren Abnahmegesetzen führen. In den meisten betrachteten Fällen wurden stärkere Abnahmen, insbesondere schneller abnehmende Potenzgesetze  $A \sim r^{-n}$ , gefunden. Im einzelnen sei auf die tabellarische Übersicht am Ende des Abschnitts 4 verwiesen.

Für eine über die Zuglänge verteilt wirkende Last wird ein Abnahmegesetz ermittelt, das sich mit ausreichender Genauigkeit mit den elementaren Lastfällen, Punktlast und Linienlast, erfassen läßt. Im Nahbereich bis zu einer Entfernung  $x_0 = L^2/\lambda$  gilt mit leichten Schwankungen das konstante Linienlastgesetz, in größeren Entfernungen exakt das Punktlastgesetz.

Betrachtet man eine zufällig über die Zuglänge verteilte Last, so führt die zufällige Phasenlage bzw. die Unkorreliertheit der einzelnen Lastanteile zu einer im Vergleich zur gleichphasigen Anregung stärkeren Annäherung an die Punktlastgesetzmäßigkeit. Für Entfernungen größer als die Zuglänge stimmen die Abnahmegesetze praktisch überein, für kleinere Entfernungen wird die Neigung der Amplituden-Abstands-Kurve geringer. Es läßt sich ein explizites Abnahmegesetz für diesen Anregungsfall angeben, das berücksichtigt, daß sich die Amplituden der einzelnen Quellen im quadratischen Mittel überlagern und deshalb die Gesamtamplitude nur mit der Wurzel der Quellenanzahl zunimmt.

Ein Verfahren zur Berechnung des Schwingungsverhaltens starrer Fundamente auf dem Boden

Es soll hier die Verfahrensweise in groben Zügen dargestellt werden. Das Verfahren wird in [15] und [16] ausführlicher beschrieben.

Das Verhalten starrer Fundamente läßt sich durch die sechs Starrkörperfreiheitsgrade  $\underline{v}$  und die sechs resultierenden Kräfte und Momente  $\underline{P}$  beschreiben. Das Ziel des Rechenverfahrens ist es, einen Zusammenhang zwischen den Kräften und Verschiebungen

$$\underline{P} = K \underline{v} \quad \text{bzw.}$$

$$\underline{v} = K^{-1} \underline{P} = F \underline{P}$$

mit der 6x6 Steifigkeitsmatrix  $K$  bzw. der Nachgiebigkeitsmatrix  $F$  herzustellen.

Bei der Berechnung der Steifigkeiten wird das Fundament zunächst in Teilflächen zerlegt, auf denen jeweils die Spannungen konstant sind. Mit Hilfe der Punktlastlösung für den elastischen Halbraum und einer Integration über die Teilfläche können die durch die konstante Spannung  $\underline{q}$  einer Teilfläche hervorgerufenen Verschiebungen  $\underline{u}$  aller anderen Teilflächenmittelpunkte berechnet werden

$$S \underline{q} = \underline{u} .$$

Andererseits müssen die Teilflächenverschiebungen  $\underline{u}$  insgesamt der Starrkörperverschiebung  $\underline{v}$  entsprechen.

$$\underline{u} = G \underline{v} .$$

Zusammen ergibt sich daraus eine Beziehung

$$S \underline{q} = \underline{u} = G \underline{v} .$$

Als zusätzliche Gleichung muß die Äquivalenz der Spannungen  $\underline{q}$  mit den resultierenden Kräften und Momenten  $\underline{P}$  erfüllt sein

$$D \underline{q} = \underline{P} .$$

So erhält man insgesamt ein Gleichungssystem für die unbekanntenen Spannungen  $\underline{q}$  und die Starrkörperverschiebungen  $\underline{v}$

$$\begin{bmatrix} S & G \\ D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{q} \\ \underline{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \underline{P} \end{bmatrix} .$$

Die Lösung des Gleichungssystems führt einerseits zu den Starrkörperverschiebungen  $\underline{v}$  unter einer bestimmten Last  $\underline{P}$ , bzw. bei Berechnung aller möglichen Lastfälle  $\underline{P}_i = \underline{e}_i$  zur Nachgiebigkeitsmatrix  $F = \{\underline{v}_i\}$ . Andererseits bekommt man die Spannungsverteilung  $\underline{q}$ , mit der man in einem zweiten Schritt wiederum durch Integration über die Punktlastlösung die Verschiebung an beliebigen Punkten berechnen kann.

Bei der Berechnung eines Systems von mehreren starren Fundamenten gelten die gleichen Beziehungen. Der Vektor  $\underline{v}$  besteht dann aus den  $n \cdot 6$  Starrkörperfreiheitsgraden aller  $n$  Fundamente und die Geometriebeziehung der Starrkörperbewegung

$$\underline{u} = G \underline{v}$$

und die Kraft-Spannungs-Äquivalenz

$$\underline{P} = D \underline{u}$$

wird für jedes Fundament einzeln angeschrieben.

## Anhang B

Das Amplituden-Abstands-Gesetz für eine stochastische Streckenlast

Wie in Abschnitt 6.4 hergeleitet, lautet das Amplituden-Abstands-Gesetz für  $n$  auf der Strecke  $L$  verteilte unkorrelierte Punktlastquellen der Amplitude  $P$

$$u = A_{ax} \frac{P\sqrt{n}}{G} \frac{\sqrt{x\omega/v_s}}{x} f(\xi) .$$

Das ist das Gesetz für eine Punktlast der Amplitude  $\sqrt{n} P$  multipliziert mit einer Korrekturfunktion  $f(\xi)$ , die vom Verhältnis  $\xi = 2x/L$  abhängt. Die Werte für  $f(\xi)$  kann man nachfolgender Tabelle oder Bild 17 entnehmen.

$\xi = 2x/L$	$f(\xi)$
0,001	0,09
0,002	0,12
0,004	0,16
0,007	0,20
0,01	0,23
0,02	0,30
0,04	0,40
0,07	0,48
0,1	0,55
0,2	0,68
0,4	0,81
0,7	0,90
1,0	0,94
2,0	0,98
4,0	0,99
7,0	1,00

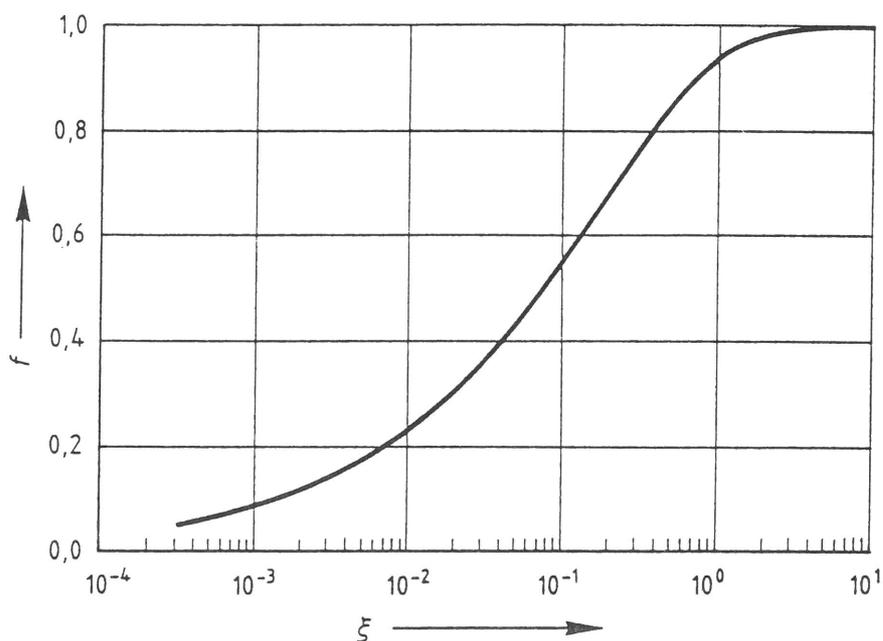


Bild 17

Das Verhältnis der Amplituden bei stochastischer Streckenlast und bei einer Punktlast als Korrekturfunktion  $f(\xi)$ ,  
 $\xi = 2x/L$

## L i t e r a t u r

- [1] F. Krüger, L. Auersch: Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Nahverkehrs in Geländeneiveau.  
Bericht 9 des BMFT Forschungsprogramms "Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden - Teilprogramm Schienennahverkehr", STUVA Köln, BAM Berlin, 1983.
- [2] O. Wallrapp, W. Kortüm: MEDUSA - ein Mehrkörperverfahren zur Analyse und Auslegung der Dynamik von spurgeführten Fahrzeugen.  
VDI-Berichte Nr. 510 "Dynamik schneller Bahnsysteme", S. 267-274, 1984.
- [3] M. Hoffmann: Meßradsatz mit Manganin-Meßverfahren zur Bestimmung des Radaufstandspunktes und der Radaufstandskraft.  
VDI-Berichte Nr. 510, S. 175-179, 1984.
- [4] G. Huber, B. Prange, T. Triantafyllidis: Dynamische Wechselwirkung von Untergrund und Oberbau.  
VDI-Berichte Nr. 510, S. 317-322, 1984.
- [5] L. Fryba: Vibration of solids and structures under moving loads.  
Noordhoff, Groningen, 1972.
- [6] J. Korb: Parametererregung beim Rad-Schiene-System.  
VDI-Berichte Nr. 381, S. 99-104, 1980.
- [7] J. Eisenmann, B. Duwe, L. Steinbeißer, D. Hilliges, W. Uhlmann: Dynamisches Verhalten der festen Fahrbahn - Beispiel Rheda-Oberbau.  
VDI-Berichte 510, S. 239-246, 1984.
- [8] W. Rücker: 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.  
Dissertation, TU Berlin, 1979.
- [9] H. Waldeck: Untersuchungen des dynamischen Verhaltens von Fahrzeugzellen, rechnerisch im Entwurfsstadium und experimentell an ausgeführten Strukturen.  
Statusseminar VI "Spurgeführter Fernverkehr", Bad Reichenhall, 1980.
- [10] J. Spang: Verformungen des Untergrunds von Eisenbahngleisen und seine Stabilisierung.  
Rundschau, Heft 10, S. 376-384, 1972.
- [11] B. Prange, G. Huber, T. Triantafyllidis: Dynamisches Rückwirkungsmodell des Gleisoberbaus.  
Schlußbericht zum BMFT Forschungsvorhaben TV 7815B, Institut für Boden- und Felsmechanik, Karlsruhe, 1982.

- [12] H. Lamb: On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid.  
Phil. Trans. Royal Soc., A203, S. 1-42, 1904.
- [13] U. Holzlöhner, L. Auersch: Propagation of shock waves at the surface of heterogeneous soil grounds.  
Int. J. Num. Anal. Meth. Geom., Vol. 8, S. 57-70, 1984.
- [14] R. V. Whitman: The response of soils to dynamic loadings.  
Rep. No. 3-26, U.S. Army Eng. Waterways Exper. Station, Vicksburg (Miss.), 1970.
- [15] W. Rücker: Dynamic behaviour of rigid foundations of arbitrary shape on a halfspace.  
Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.10, S. 675-690, 1982.
- [16] W. Rücker: Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund.  
Forschungsbericht 78, BAM, Berlin, 1981.

# Teil III Fahrweg-, Untergrund- und Erschütterungsmessungen bei Versuchsfahrten des Intercity Experimental

---

Inhalt	Seite
<b>Teil III Fahrweg-, Untergrund- und Erschütterungsmessungen bei Versuchsfahrten des Intercity Experimental</b>	<b>89</b>
1. Einleitung	89
2. Umfang des Meßprogramms	90
3. Ergebnisse zum Untergrund	93
4. Ergebnisse zum Fahrweg	99
5. Ergebnisse zu den Erschütterungen in der Umgebung	102
5.1 Zeitverlauf und Frequenzinhalt	102
5.2 Amplituden in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Zuglänge, Abnahmegesetz	105
Anlage A1 — A4 Meßort, Meßpunktanordnung, Daten zum ICE	111
Anlage B Meßergebnisse zum Fahrweg	114
Anlage C1 — C2 Meßergebnisse zur Umgebung	118

---

## 1. Einleitung

Im Rahmen der beiden Forschungsprogramme "Lärminderung in Städten und Gemeinden" und "Rad-Schiene" des Bundesministeriums für Forschung und Technologie hat die BAM in den letzten 10 Jahren eine Vielzahl von Schwingungsmessungen an Schienenverkehrswegen durchgeführt. Dabei wurden die Erschütterungen verschiedener Zugtypen des Nah-, Fern-, Güter- und U-Bahnverkehrs bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten und zum Teil bei verschiedenen Oberbauarten (Schottergleis, feste Fahrbahn) gemessen /18/, /3/, /6/, /7/. Für diesen Bericht wurden Messungen zum Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental ausgewählt, deren Ergebnisse im folgenden Teil III dargestellt und anschließend im Teil IV umfassend nachgerechnet werden. Es handelt sich dabei um Messungen, die 1986 und 1987 bei Versuchs- und Rekordfahrten des ICE auf der Neubaustrecke bei Würzburg durchgeführt wurden.

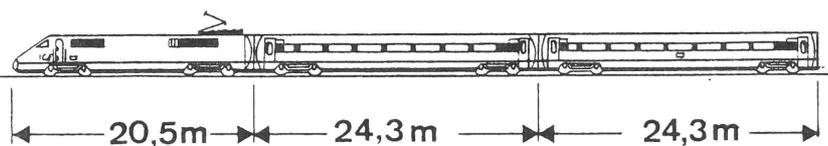
## 2. Umfang des Meßprogramms

Die Deutsche Bundesbahn nutzt ein Teilstück der Neubaustrecke Hannover-Würzburg, das sich in der Nähe von Würzburg zwischen Burgsinn und Hohe Wart befindet, für Versuchsfahrten mit dem Intercity Experimental. Auf dieser Versuchsstrecke wurde als Meßort ein annähernd ebenes Gelände etwa 2 km nördlich des Überholbahnhofs Rohrbach ausgewählt (s. Anlage A1).

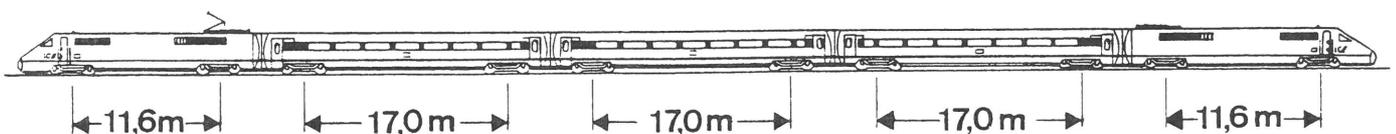
Es wurden zu verschiedenen Zeiten drei Serien von Zugvorbeifahrten gemessen: die erste Meßserie im September 1986 während der sogenannten "Hochstastfahrten" mit Geschwindigkeiten zwischen 100 und 260 km/h, die zweite Meßserie bei den Rekordfahrten im November 1987 (11.11.87 - 330 km/h, 17.11.87 - 345 km/h), wobei die Höchstgeschwindigkeit am Meßort noch nicht erreicht war (maximale gemessene Geschwindigkeit 300 km/h), und die dritte Meßserie im Juni 1987 ("Streckenversuchsfahrten"), bei denen eine Reihe von Meßprogrammen an der Strecke und im Gleis abgewickelt wurden und bei denen die BAM neben den Umgebungserschütterungen auch das Fahrwegverhalten messen konnte.

Der ICE bestand bei den Messungen aus einem oder zwei Triebköpfen mit zwei oder drei Mittelwagen. Die verschiedenen Zugzusammenstellungen bei den drei Meßserien zeigt Bild 1. Dem Bild sind auch die Achsabstände zu entnehmen, weitere technische Daten befinden sich in der Anlage A4.

### 1. Hochstastfahrten September 1986



### 2. Rekordfahrten November 1986



### 3. Streckenversuchsfahrten Juni 1987

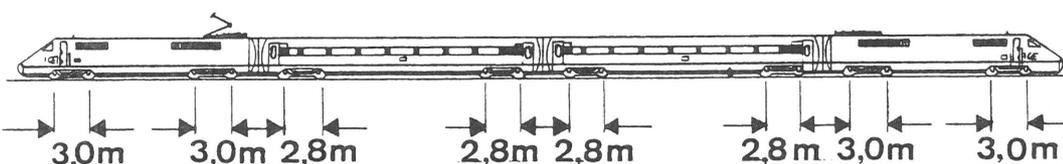


Bild 1

Die Zugzusammenstellungen bei den drei Meßserien

Das Versuchsprogramm der BAM umfaßte Messungen zum Untergrund, zum Fahrweg und zur Erschütterungsausbreitung in die Umgebung. Zur Kennzeichnung des Untergrundes wurden Laufzeitmessungen bei harmonischer Erregung und bei Impulserregung durchgeführt. Die harmonische Erregung wurde mit einem elektrodynamischen Schwinger (Kraftamplitude 1 kN) im Frequenzbereich zwischen 7 und 70 Hz erzeugt. Aus den Laufzeiten bzw. den Wellengeschwindigkeiten läßt sich die Steifigkeit des Untergrundes bestimmen. Weiterhin wurden die erzeugten harmonischen Wellenfelder auch hinsichtlich ihrer Amplituden ausgewertet, so daß die Ausbreitungscharakteristik des Untergrundes bei definierter Belastung bekannt ist.

Das Versuchsprogramm zum Fahrweg und zur Umgebung beinhaltet die Messung der Schwinggeschwindigkeiten bei den Zugvorbeifahrten. Es wurden insgesamt 51 Fahrten des Intercity Experimental mit Geschwindigkeiten bis 300 km/h (s. Tabelle 1) sowie 36 Fahrten eines "Standardzuges" (mit Lok E 103, Lok E 120 und 7 bis 9 Reisezugwagen) mit 100 bis 250 km/h gemessen. Die

Meßserie Anzahl (Lok+Wagen) Fahrgeschwindigkeit	9/86 1+2	11/86 2+3	6/87 2+2	Summe
10 km/h	-	-	2	2
100 km/h	5	-	1	6
150 km/h	-	-	1	4
160 km/h	1	-	1	
180 km/h	-	1	-	
200 km/h	1	10	5	16
220 km/h	2	-	-	5
230 km/h	-	1	1	
240 km/h	1	-	-	
250 km/h	1	1	5	7
260 km/h	1	-	-	6
265 km/h	-	1	1	
280 km/h	-	1	2	
300 km/h	-	5	-	5
Summe	12	20	19	51

Tabelle 1

Überblick über die Schwingungsmessungen beim Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental (ICE)

Messungen zum Fahrweg umfassen Meßpunkte an sieben aufeinanderfolgenden Schwellen (vertikale, zum Teil auch horizontale Meßrichtung) und einen Meßpunkt an der Schiene (horizontal am Steg). Die genauen Meßpunktanordnungen sind in den Anlagen A2 und A3 dargestellt. In der Umgebung wurden jeweils auf einer Meßachse senkrecht zum Gleis an 13 bzw. 14 Meßpunkten im Abstand von 2,5 bis 100 m von der Gleismitte die vertikalen Schwingeschwindigkeiten gemessen. (Dabei wurden Geophone mit einer Eigenfrequenz von 4,5 Hz benutzt. Die Meßsignale werden mit einer Grenzfrequenz von 500 Hz gefiltert, mit einer Abtastrate von 2000 Punkten pro Sekunde digitalisiert und auf Magnetband gespeichert.)

### 3. Ergebnisse zum Untergrund

Der Boden am Meßort besteht aus einer Deckschicht aus Lößlehm über Muschelkalkstein (Fa. Niedermeyer), wobei die Schichtgrenze nicht horizontal und regelmäßig ist (örtliche Bauleitung, Ansicht im unmittelbar benachbarten Einschnitt des Abzweiges nach Lohr). Zur Bestimmung der dynamischen Untergrundsteifigkeit wurden Laufzeitmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse für eine Impuls- und eine harmonische Schwingererregung in Bild 2 und 3 exemplarisch dargestellt sind. Eine vollständige Darstellung der Laufzeitmessungen ist im Meßbericht /23/ zu finden.

Aus den dargestellten Schwinggeschwindigkeitszeitverläufen läßt sich eine dominierende Wellengeschwindigkeit herauslesen, die gewöhnlich der Rayleighwelle zugeordnet wird. Die Rayleighwelle hat als Oberflächenwelle nur eine auf etwa die Wellenlänge begrenzte Eindringtiefe in den Boden. So sind die Ergebnisse für die Impulsanregung und die Schwingeranregung mit 40 Hz der oberen Lößlehmschicht zuzuweisen. Die Schwingermessungen mit tiefen Frequenzen (größeren Wellenlängen) ergaben höhere Ausbreitungsgeschwindigkeiten, die mit den tieferliegenden steiferen Bodenschichten zu erklären sind /23/. Die Rayleighwellengeschwindigkeit  $v_R$  ist nur unwesentlich kleiner als die Scherwellengeschwindigkeit  $v_S$

$$v_R \approx v_S = \sqrt{G/\rho} ,$$

die mit der Massendichte  $\rho$  ( $1,7 - 2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) und der Schubsteifigkeit  $G$  verknüpft ist. Die aus Bild 2 und 3 abgeleitete Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$v_R \approx v_S = 270 \text{ m/s}$$

charakterisiert demnach die Steifigkeit

$$G = 1,3 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \quad (\text{bei } \rho = 1,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3)$$

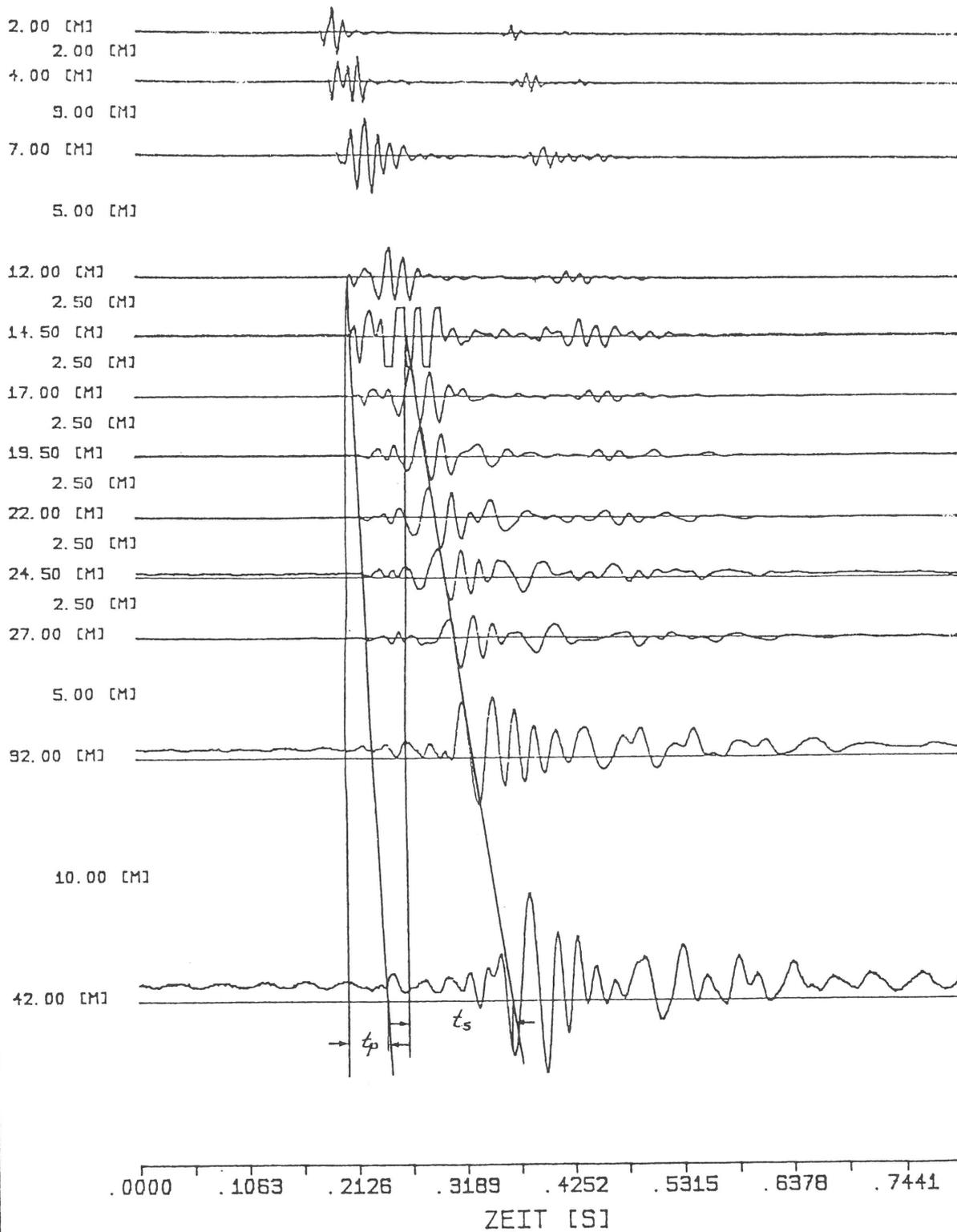
des oberflächennahen Untergrundes von Fahrweg und Umgebung. (Dieser Wert wurde auch auf der anderen Seite des Gleises bei der zweiten Meßserie mit 270 bzw. 280 m/s bestätigt /23/.)

Als nächstes wurden auch die Amplituden der harmonischen Wellenfelder ausgewertet. Bild 4 oben zeigt dazu für die Anregungen mit 20, 30, 40, 50 und 70 Hz die absoluten Schwinggeschwindigkeitsamplituden, die aus den Fourierspektren herausgelesen wurden. In einem zweiten Schritt werden dieselben Amplituden so normiert, daß sie bestmöglich in ein Amplituden-Abstands-Gesetz der Form

$$A = R^{-n} e^{-2\pi DR}$$

mit der auf die Wellenlänge bezogenen Entfernung

$$R = r/\lambda \quad , \quad \lambda = v_S/f$$



B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

ICE NEUBAUSTRECKE BEI WUERZBURG

Bild 2

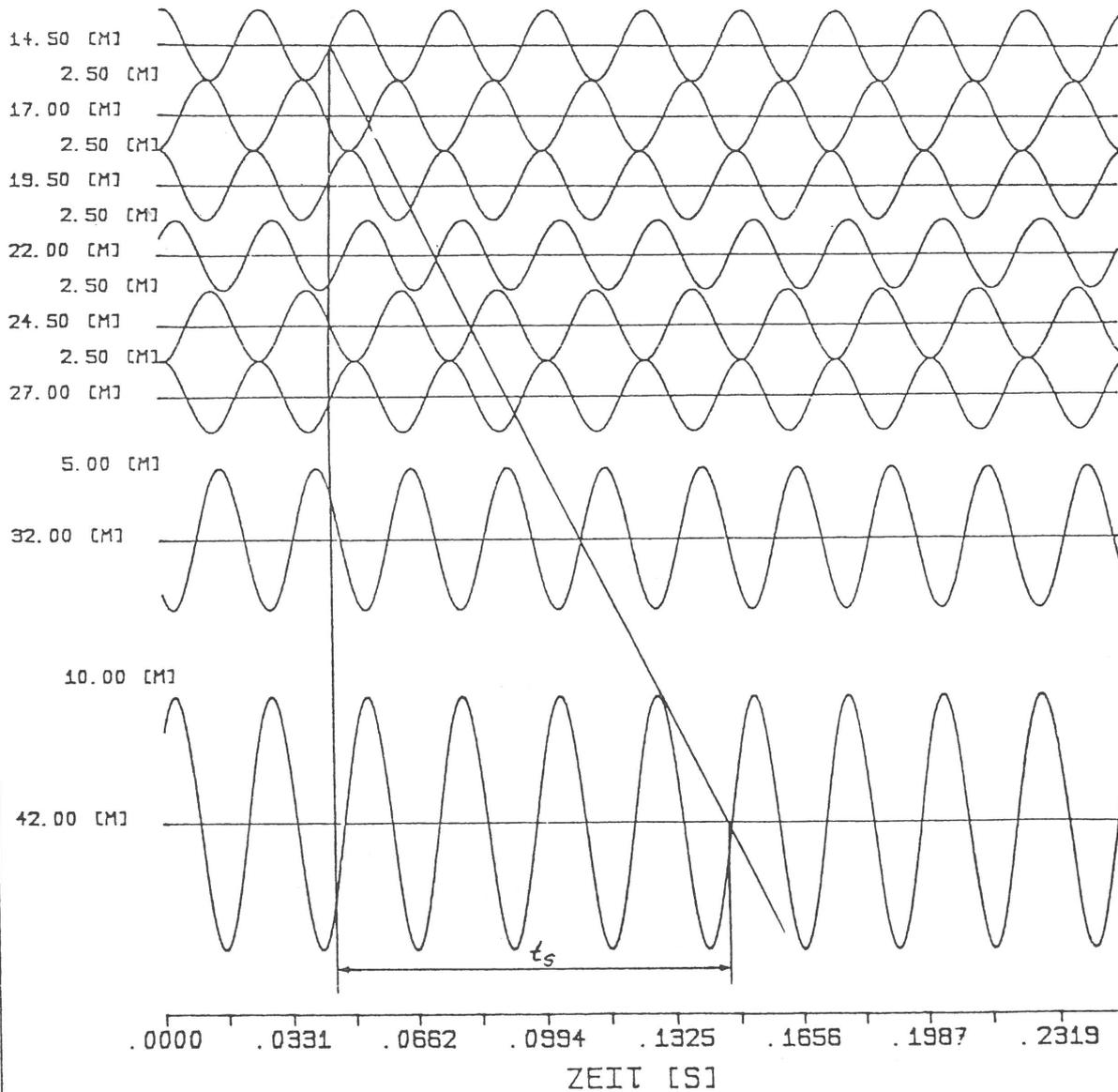
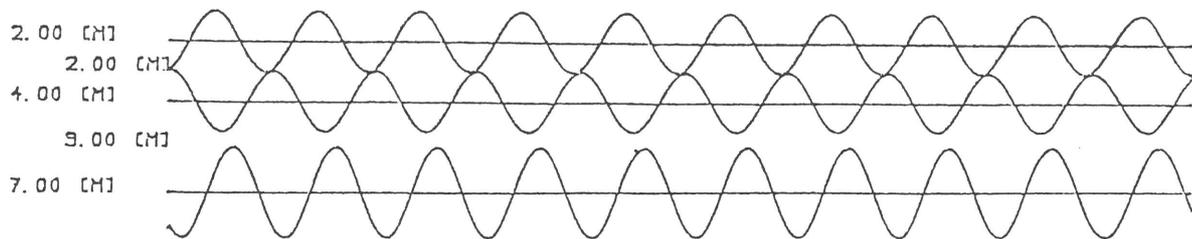
Laufzeitmessung bei Impulserregung

$t_s \approx 0,1 \text{ s}$

$v_s \approx 270 \text{ m/s}$

$t_p \approx 0,04 \text{ s}$

$v_p \approx 750 \text{ m/s}$



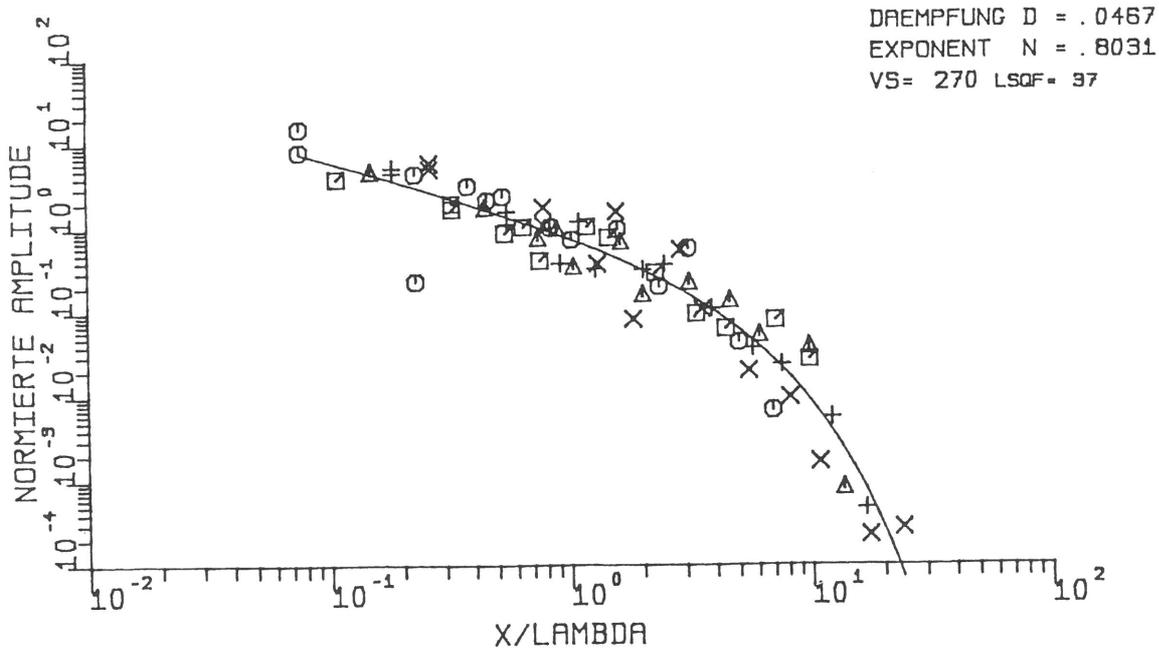
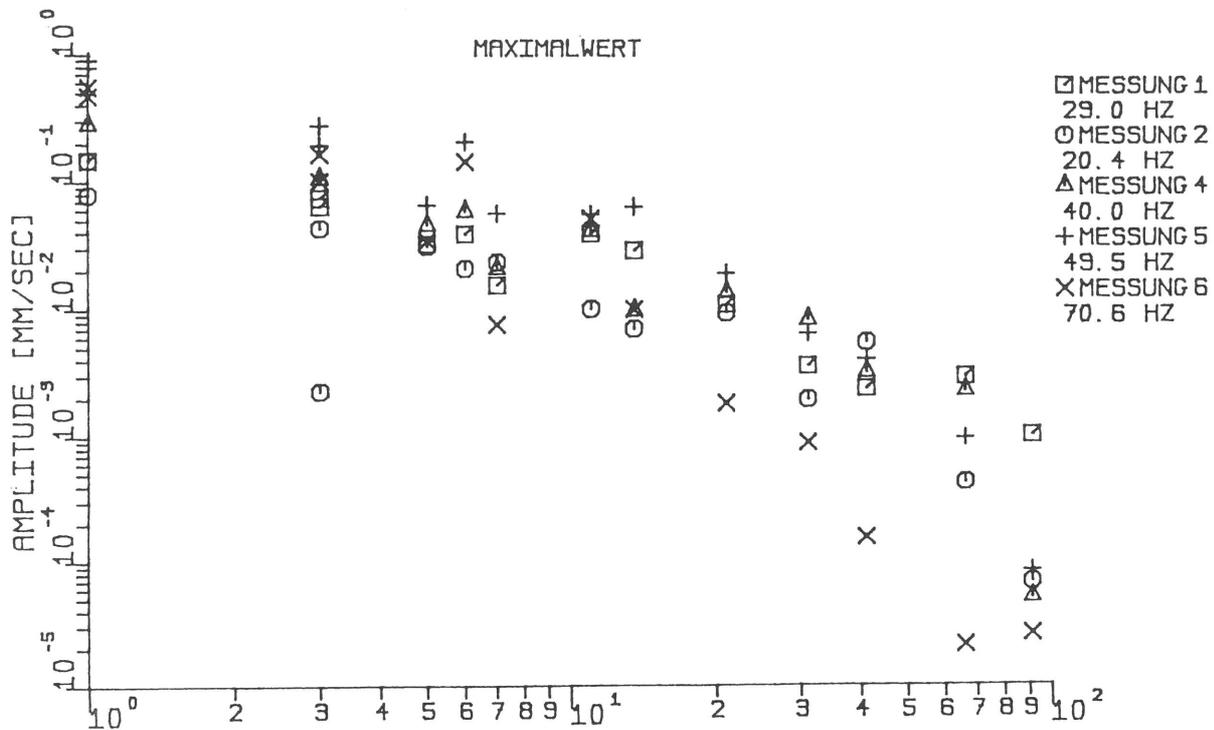
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

ICE NEUBAUSTRECKE BEI WUERZBURG

Bild 3 -

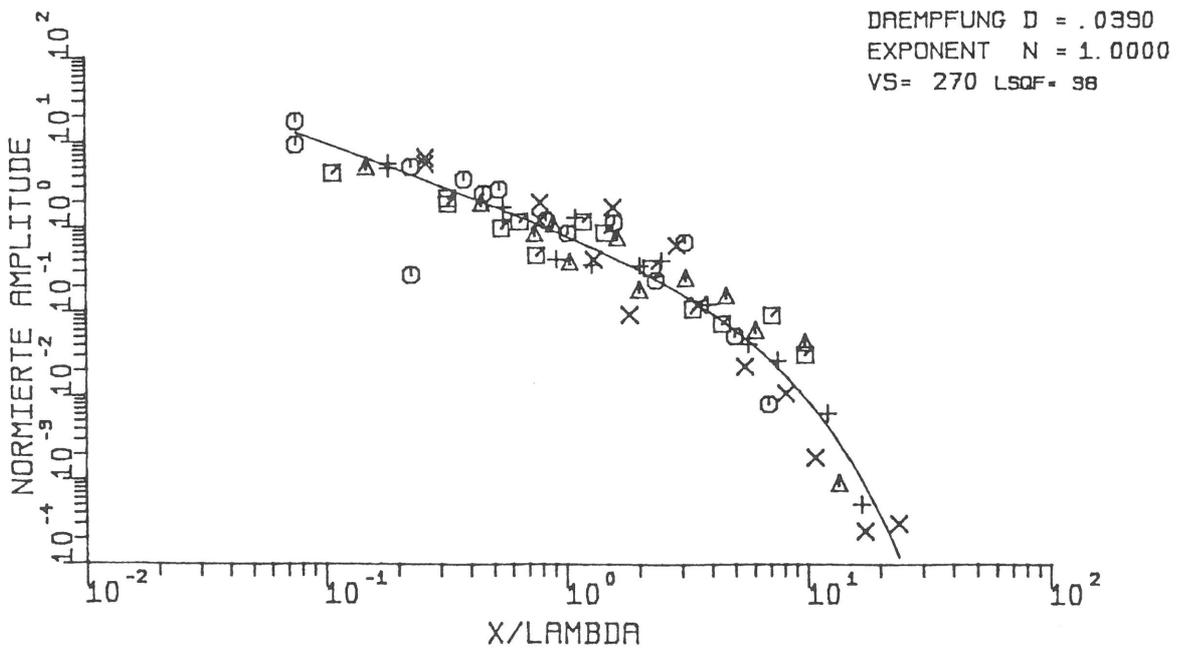
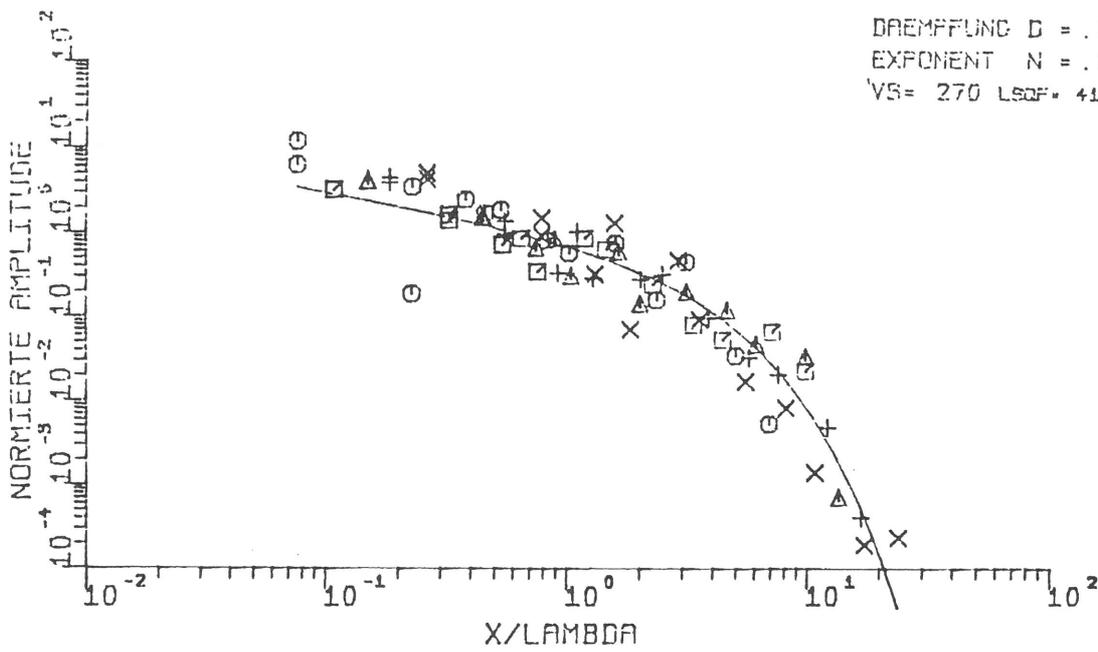
Laufzeitmessung bei Schwinger-  
 erregung  $f = 40 \text{ Hz}$

$t_s \approx 0,103 \text{ s}$   
 $v_s \approx 270 \text{ m/s}$



B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Bild 4 - Wellenausbreitung im Boden bei harmonischer Anregung, Schwinggeschwindigkeitsamplituden über die Entfernung (oben), Approximation des Amplituden-Abstands-Gesetzes (unten)



B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Bild 5 - Approximation des Amplituden-  
 Abstandsgesetzes mit vorgegebenen Exponenten  $n = 0,5$   
 (oben) und  $n = 1,0$  (unten)

passen. Bild 4 unten zeigt das Ergebnis dieser Approximation, wobei für den geometrischen Abnahmeexponenten  $n$  der Wert

$$n = 0,8$$

und für die hysteretische Materialdämpfung  $D$  der Wert

$$D = 4,7 \%$$

ermittelt wurde. Eine kaum schlechtere Approximation erhält man, wenn man für  $n$  den Raumwellenexponenten

$$n = 1$$

vorgibt und dazu eine etwas kleinere Dämpfung

$$D = 3,9 \%$$

bestimmt (Bild 5 unten). Auch bei Vorgabe der Fernfeldasymptote des Halbraums

$$n = 0,5$$

ist mit

$$D = 5,9 \%$$

die Übereinstimmung befriedigend, wenn auch im Nahbereich ( $r/\lambda < 0,5$ ) die Amplitudenabnahme unterschätzt wird.

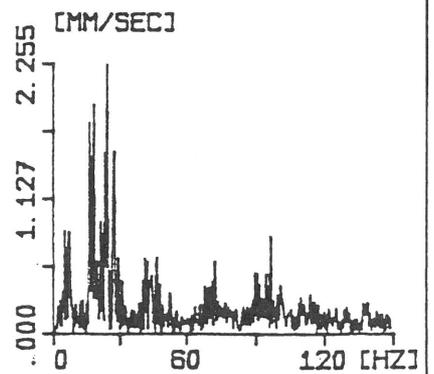
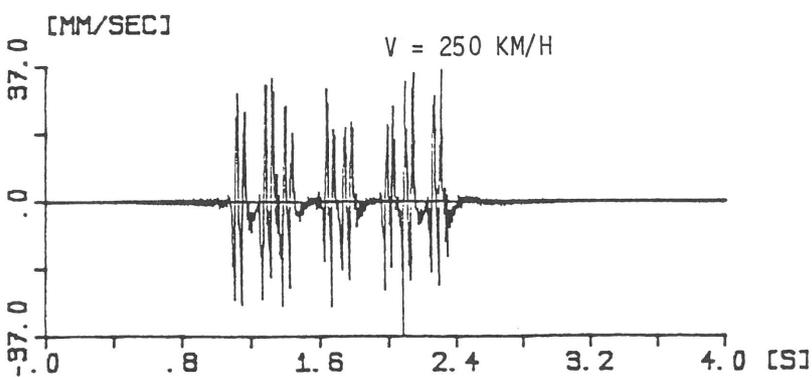
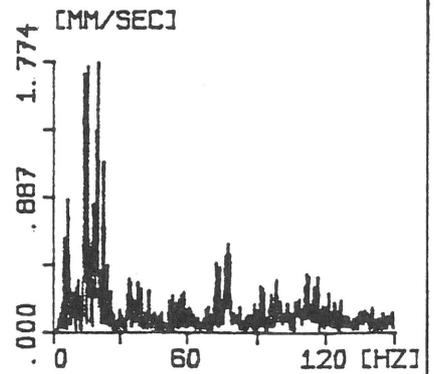
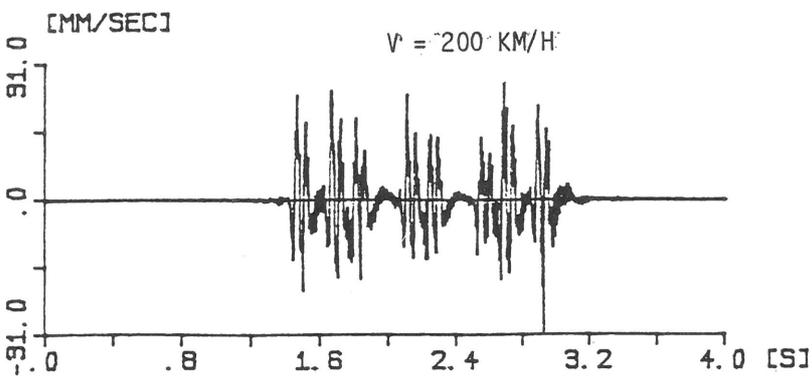
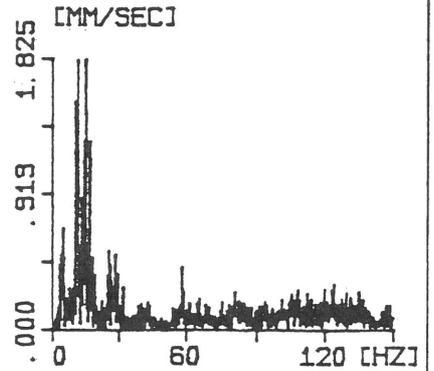
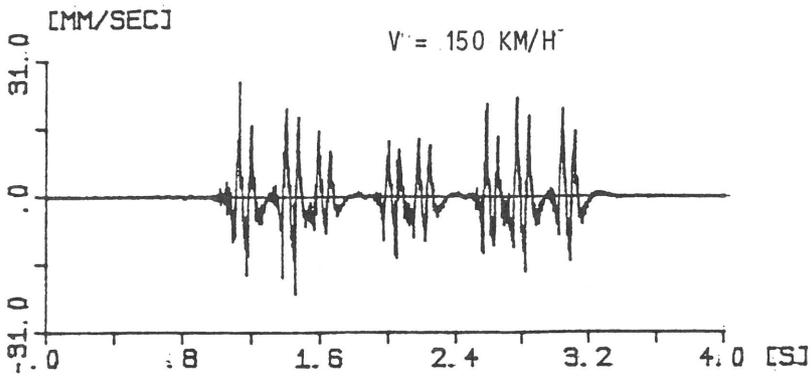
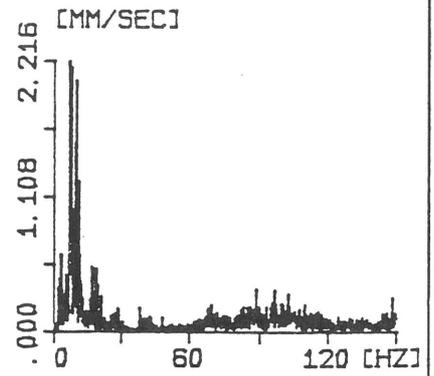
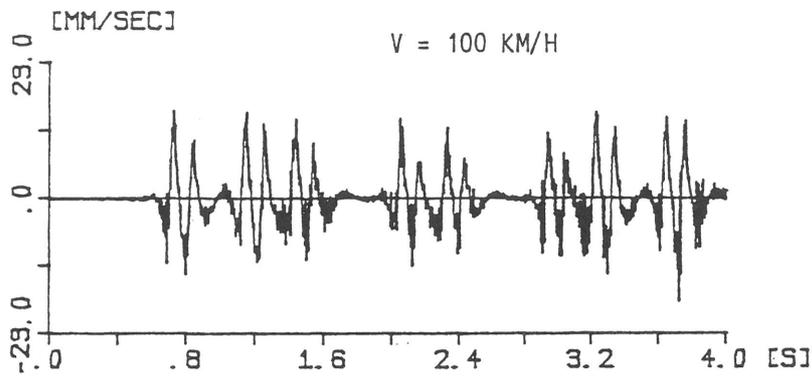
#### 4. Ergebnisse zum Fahrweg

Von den Ergebnissen bei den Zugfahrten sollen zuerst die Schwingungen der Schwellen betrachtet werden. Dazu wurden vier Fahrten der dritten Meßserie mit Fahrgeschwindigkeiten von 100, 150, 200 und 250 km/h ausgewertet. Die Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe und die daraus ermittelten Spektren aller Fahrwegmeßpunkte sind im Anhang B zusammengefaßt. Je ein Zeitverlauf für jede Geschwindigkeit ist in Bild 6 zu sehen.

Die Zeitverläufe sind vollständig von der Abfolge der einzelnen Achsen geprägt (- bei der dritten Meßserie bestand der ICE aus 2 Triebköpfen und 2 Mittelwagen, das heißt 16 Achsen). Die Überfahrt einer Achse bedeutet für die Schwelle eine einmalige Ab- und Aufwärtsbewegung, die sich im Schwinggeschwindigkeitszeitverlauf ungefähr als eine Vollschrwingung mit der Schwingungsdauer, die sich aus der Vorbeifahrt der "Einsenkungsmulde" ergibt, darstellt. Die Anteile der beiden Achsen im Drehgestell folgen unmittelbar (nahezu phasenrichtig) aufeinander, so daß die Drehgestellüberfahrt als eine Doppelschrwingung mit der Achsabstandsfrequenz erscheint. Dem entsprechen im Spektrum (Bild 6 rechts) die Maxima bei 10, 15, 20 und 25 Hz je nach Fahrgeschwindigkeit.

Der Vergleich der vier Fahrgeschwindigkeiten zeigt im wesentlichen die Stauchung der Zeitverläufe mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit, der die Verbreiterung des Frequenzinhaltes entspricht. Die Spektren enthalten neben dem charakteristischen tieffrequenten Amplitudengebirge, das den statischen (Gewichts-) Anteilen der Belastung entspricht, auch ein breites Band kleinerer höherfrequenter dynamischer Anteile. Diese dynamischen Anteile machen sich im Zeitverlauf als Störschrwingungen, die den Achsüberfahrten überlagert sind, bemerkbar.

Bei der Auswertung der Amplituden ist dieser Unterschied zwischen deterministischer statischer Achsüberfahrt und den stochastischen dynamischen Anteilen zu berücksichtigen. In Bild 7 sind die Maximalamplituden der Schwinggeschwindigkeiten aufgetragen, wobei die Schwankungsbreite in etwa den Unterschied zwischen nur statischen Anteilen und statischen und dynamischen Anteilen charakterisiert. Die Amplituden nehmen nahezu proportional zur Fahrgeschwindigkeit zu, was für das Vorbeiziehen der statischen Biegelinie der Schiene auch theoretisch zu erwarten ist. Betrachtet man zu den höherfrequenten dynamischen Anteilen die Spektren, so scheinen diese bei 100 km/h kleiner als bei den höheren Fahrgeschwindigkeiten zu sein. Eine detailliertere Diskussion der Meßergebnisse folgt aus dem Vergleich mit den Rechenergebnissen in Teil IV.



B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Bild 6 - Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe (links) und -spektrien (rechts) der Schwellen bei Überfahrt eines viergliedrigen ICE, Meßergebnisse für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten

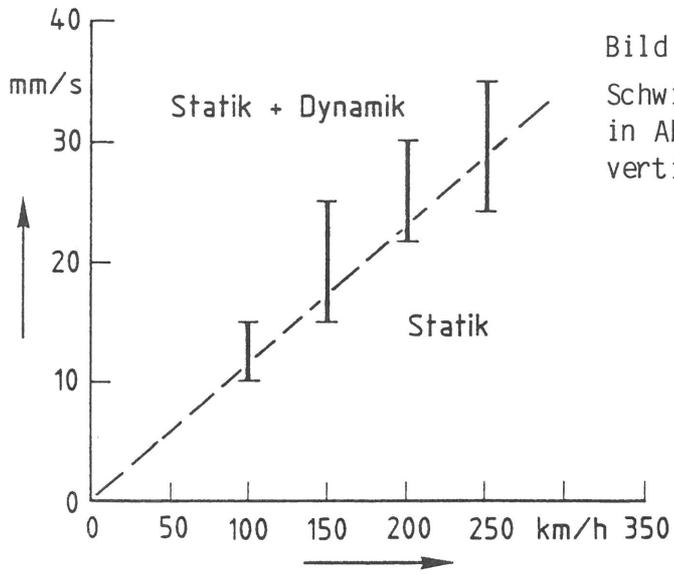


Bild 7

Schwingungsgeschwindigkeitsamplituden des Fahrwegs in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, vertikale Schwellenmeßpunkte

## 5. Ergebnisse zu den Erschütterungen in der Umgebung

Die umfangreichen Meßergebnisse sind in den beiden Meßberichten /23/ und /24/ beschrieben und dokumentiert. Für den vorliegenden Bericht wurden die wesentlichen Ergebnisse ausgesucht, eine Auswahl von Meßergebnissen ist in den Anlagen C1 (1. Meßserie, 100 - 260 km/h) und C2 (2. Meßserie, 280 - 300 km/h) dokumentiert. Bei der folgenden Darstellung werden zunächst die Zeitverläufe und Frequenzspektren qualitativ ausgewertet. Im darauffolgenden Abschnitt 5.2 werden die Amplituden, Einflüsse der Fahrgeschwindigkeit und der Zuglänge und das Amplituden-Abstands-Gesetz untersucht.

### 5.1 Zeitverlauf und Frequenzinhalt

Es soll im Folgenden an wenigen Beispielen das Charakteristische der Schienenverkehrserschütterungen aufgezeigt werden. Bild 8 zeigt die Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe des gleisnächsten Punktes ( $r = 2,5 \text{ m}$ ) von je einer Vorbeifahrt der ersten, zweiten und dritten Meßserie. Man kann noch recht deutlich die einzelnen Drehgestelle erkennen, im Vergleich zu den Schwellenbewegungen (Bild 6) sind jedoch die beiden Achsen eines Drehgestells nicht mehr zu unterscheiden. Betrachtet man nun die Schwingungen in der weiteren Umgebung (Bild 9,  $v = 240 \text{ km/h}$ , 1. Meßserie), so sind schon in 5 m, spätestens in 10 m Entfernung auch die Drehgestellvorbeifahrten nicht mehr zu erkennen. Die Anteile einzelner Achsen und Drehgestelle haben sich zu einer quasistationären Schwingung überlagert.

Im Frequenzbereich lassen sich drei unterschiedliche Anteile unterscheiden, die sehr verschiedene Ausbreitungscharakteristiken aufweisen:

#### Tiefe Frequenzen (unter 10 Hz)

Dieser Anteil der Erschütterungen ist nur in der unmittelbaren Gleisnähe vorhanden. Es handelt sich um die Drehgestellvorbeifahrten.

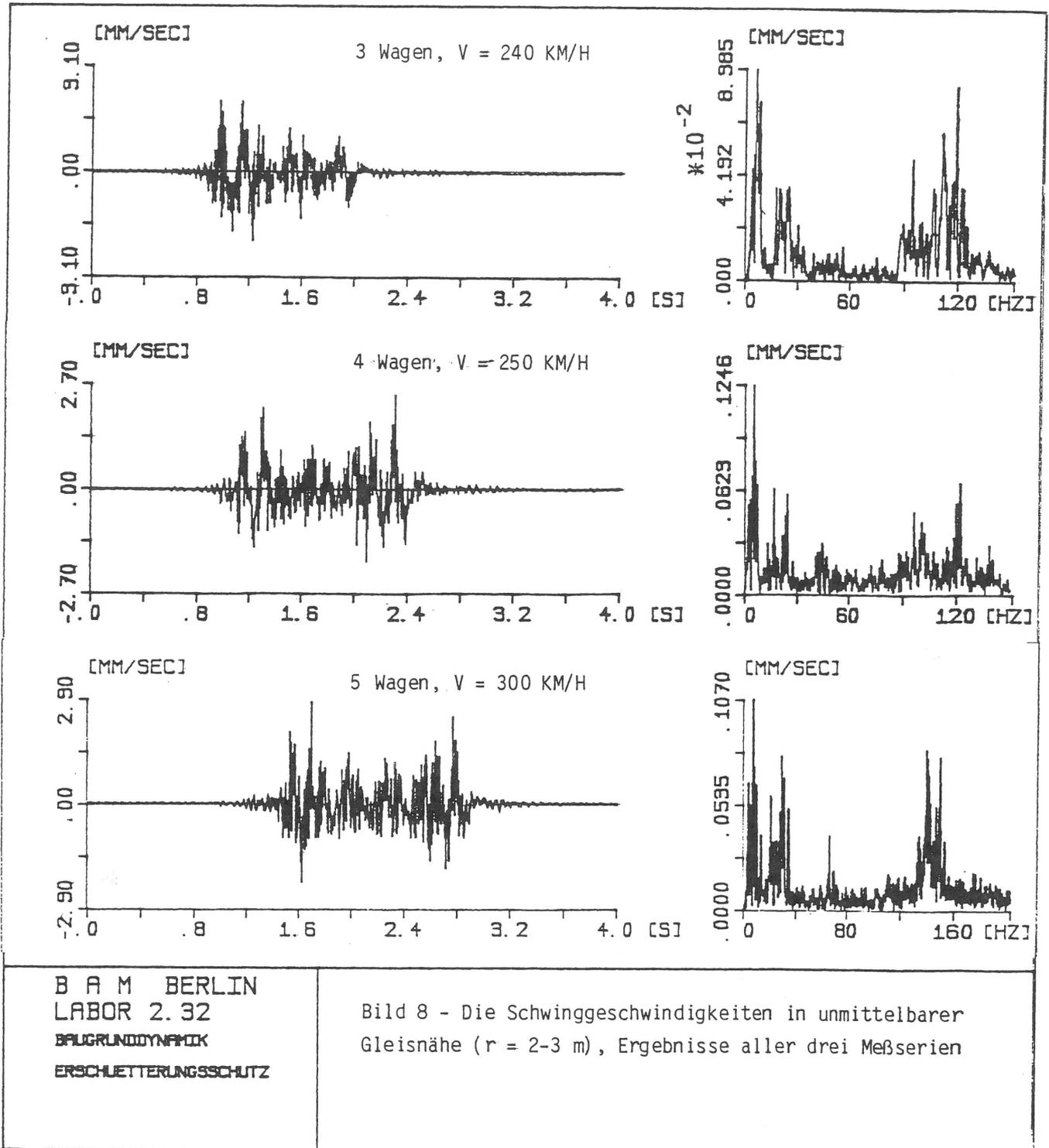
#### Mittlere Frequenzen (um 25 Hz)

Dieser Anteil ist in allen Entfernungen gut zu erkennen. Er dominiert das Schwingungsbild in größeren Entfernungen (ab 20 m).

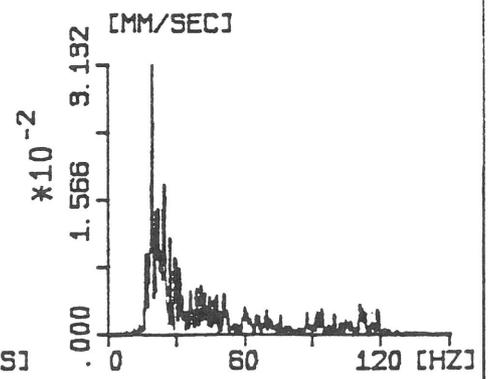
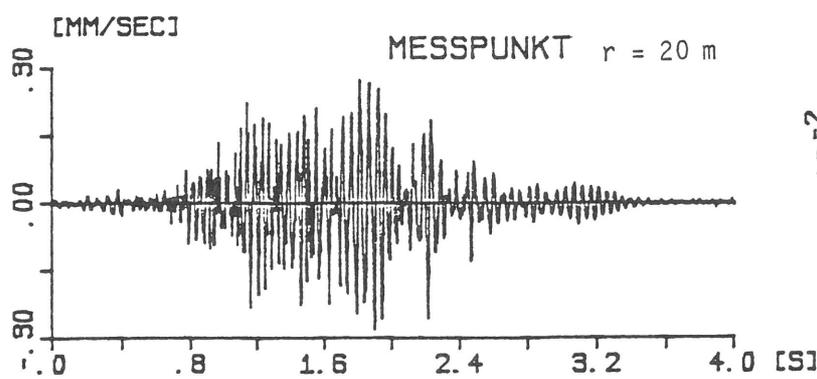
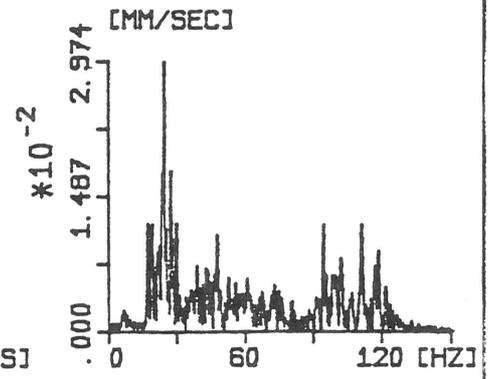
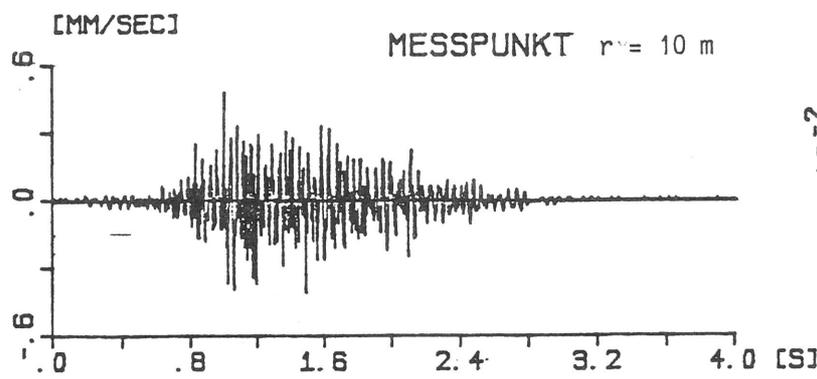
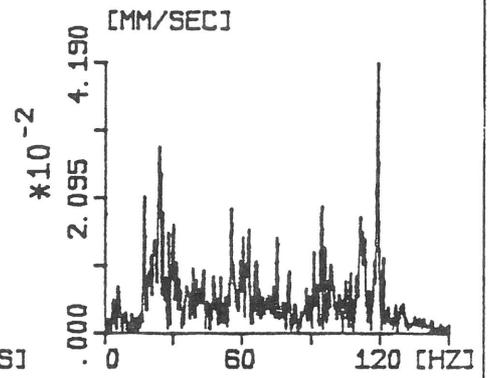
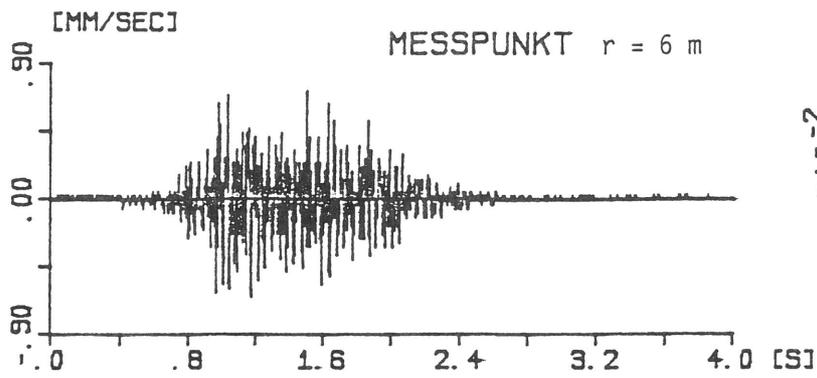
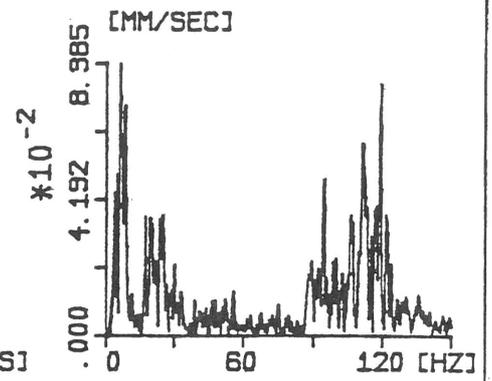
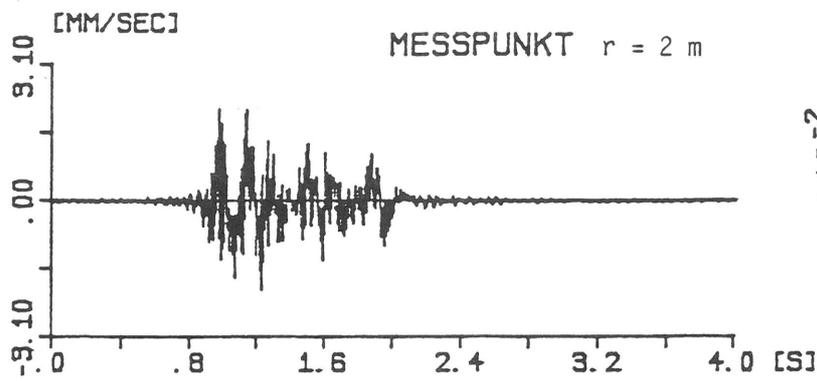
#### Hohe Frequenzen (100 - 120 Hz)

Es handelt sich hier um die Schwellenabstandsfrequenz, die genau genommen bei  $f = v/d = 111 \text{ Hz}$  liegen müßte. Dieser Anteil ist bis zu einem mittleren Entfernungsbereich ( $r < 20 \text{ m}$ ) deutlich erkennbar. Die Materialdämpfung des Bodens mindert diese hohe Frequenz jedoch bei größeren Entfernungen sehr stark.

Diese drei Anteile der Erschütterungen sind bei allen Zugvorbeifahrten (s. Anlage C) zu finden. Die Lage der Frequenzen verschiebt sich dabei teilweise mit der Fahrgeschwindigkeit (Bild 10). Ganz deutlich ist den Messungen



zu entnehmen, daß die Schwellenabstandsfrequenz proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist. Beim tieffrequenten Bereich, den nur in Gleisnähe zu beobachtenden Drehgestellvorbeifahrten, ist diese Proportionalität weniger deutlich. Der mittlere Frequenzbereich scheint im wesentlichen geschwindigkeitsunabhängig zu sein. Die am Fahrweg gemessenen fahrgeschwindigkeitsproportionalen Achsabstandsfrequenzen fallen in diesen mittleren Bereich, sind aber zwischen den anderen Frequenzanteilen nicht zu erkennen. (Die Berechnungen im Teil IV zeigen, daß dies auch nicht zu erwarten ist.)



B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

Bild 9 - Schwinggeschwindigkeiten in der Umgebung bei Vorbeifahrt eines dreigliedrigen ICE mit  $v = 240$  km/h, Parameter: Abstand von Gleismitte

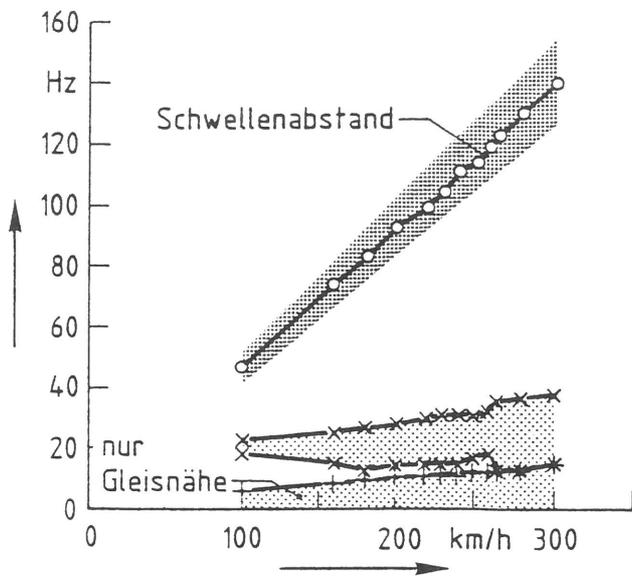


Bild 10  
Hauptfrequenzbereiche der gemessenen Erschütterungen in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit des Zuges

## 5.2 Amplituden in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Zuglänge, Abnahmegesetz

Zur Bestimmung der Erschütterungsstärke in der Umgebung wird hier als sehr einfaches Maß die Maximalamplitude der Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe betrachtet. Diese Maximalamplituden aller Meßpunkte sind in den folgenden Bildern 11 bis 14 für die erste und zweite Meßserie zusammengestellt. Aus ihnen kann man Folgendes entnehmen:

Bild 11:

Vergleicht man die beiden Meßserien miteinander, so sind die Maximalamplituden der 2. Meßserie im allgemeinen größer bei gleicher Fahrgeschwindigkeit. Das kann mit der größeren Zuglänge (2 + 3 Wagen gegenüber 1 + 2 Wagen) zumindest für die weiteren Entfernungen erklärt werden. Es sind jedoch auch unterschiedliche Versuchsbedingungen (Fahrzustand, Gleiszustand) anzunehmen.

Bild 12:

Ab 10 m von der Gleismittelachse entfernt liegen bei allen Messungen die maximal aufgetretenen Geschwindigkeitsamplituden unter 1 mm/s.

Bild 13:

Die Erschütterungsamplitude nimmt mit der Steigerung der ICE-Fahrgeschwindigkeit bis etwa 200 km/h zu. Bei höheren Geschwindigkeiten als 200 km/h ist eine Abhängigkeit der Erschütterungsgröße von der Fahrgeschwindigkeit nicht zu verzeichnen.

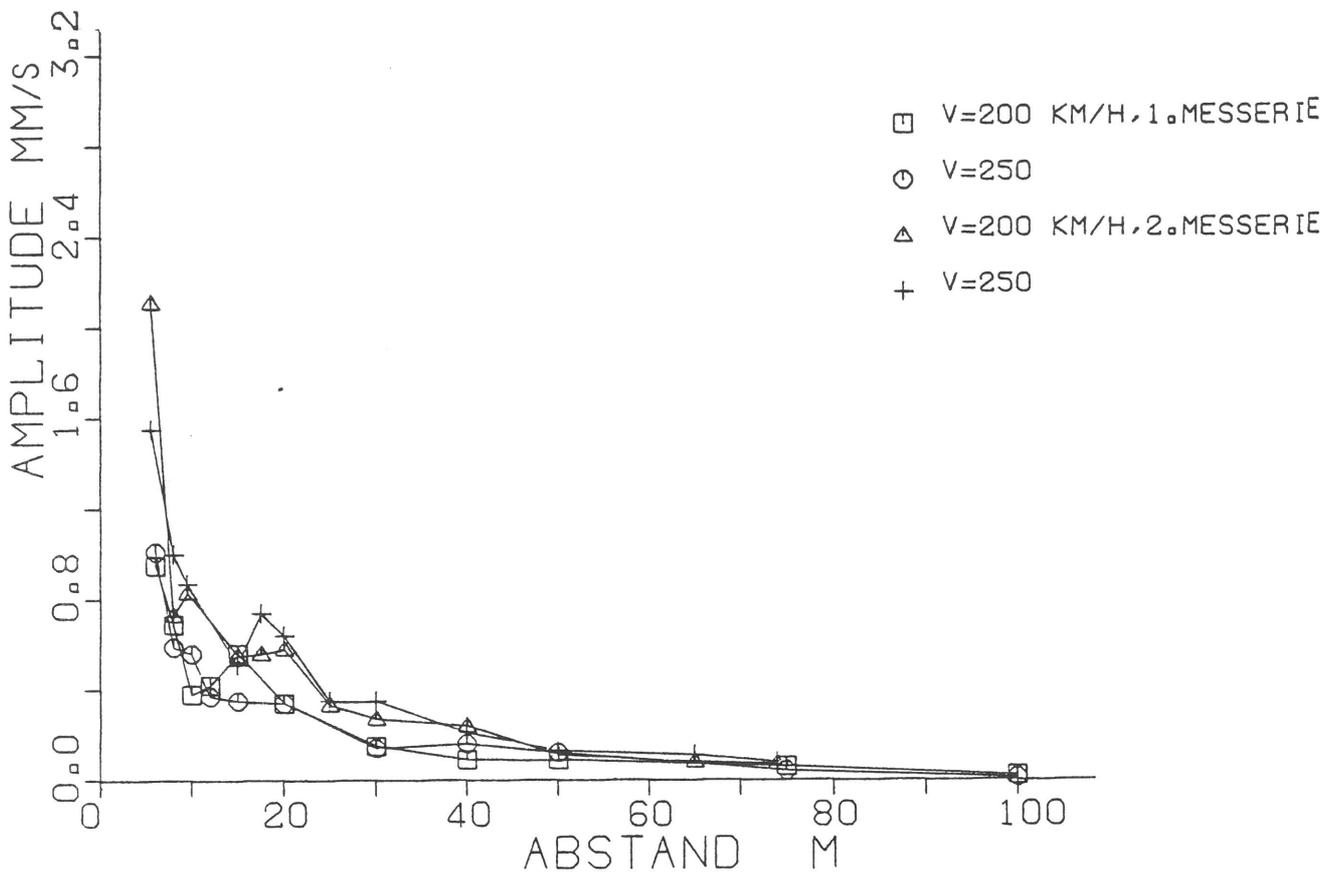


Bild 11  
 Maximale Schwinggeschwindigkeitsamplituden, Vergleich der 1. und 2. Meßserie

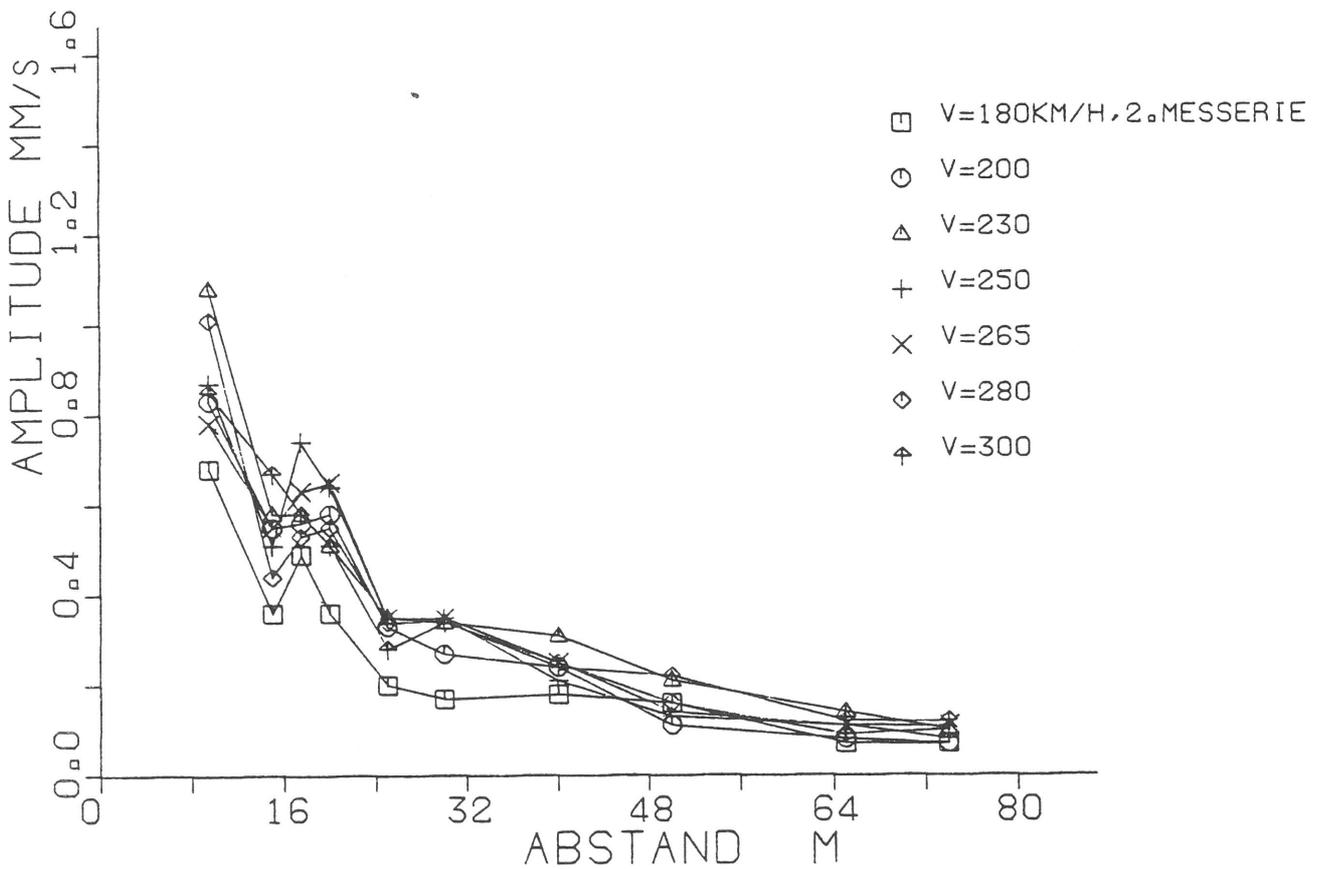


Bild 12  
 Maximale Schwinggeschwindigkeitsamplituden in der Umgebung mit  $r \geq 10$  m

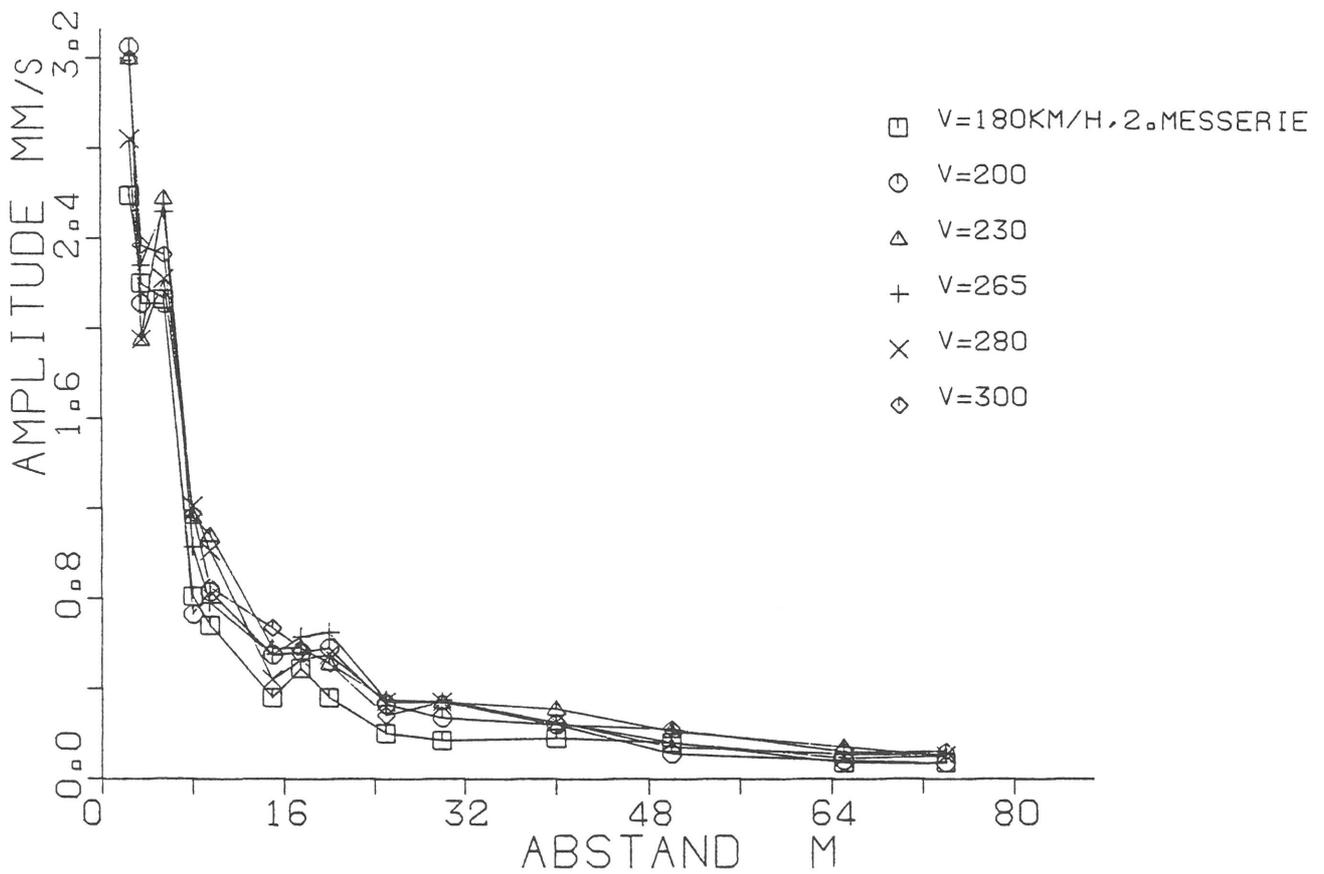
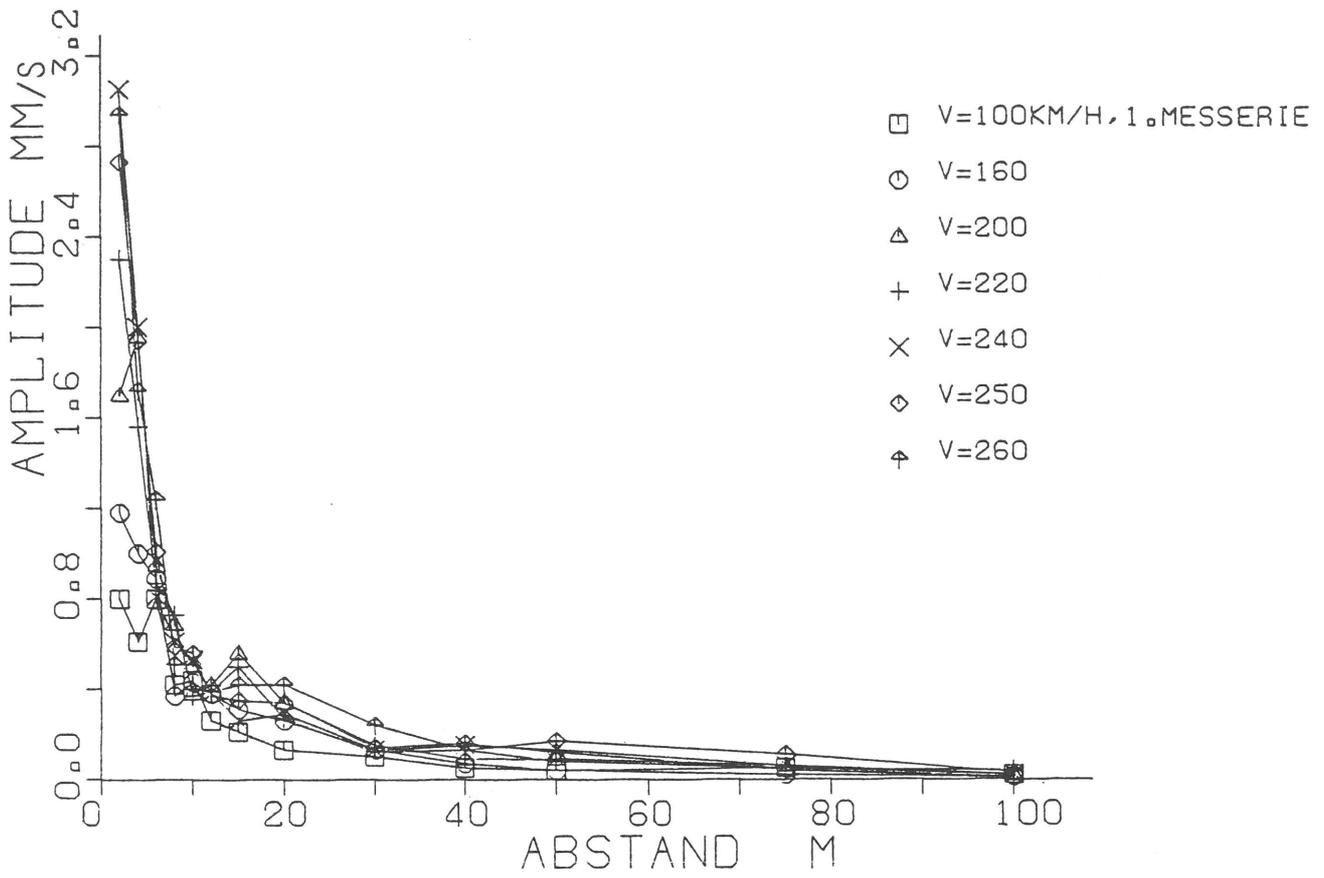


Bild 13  
 Maximale Schwinggeschwindigkeitsamplituden in Abhängigkeit von der  
 Fahrgeschwindigkeit

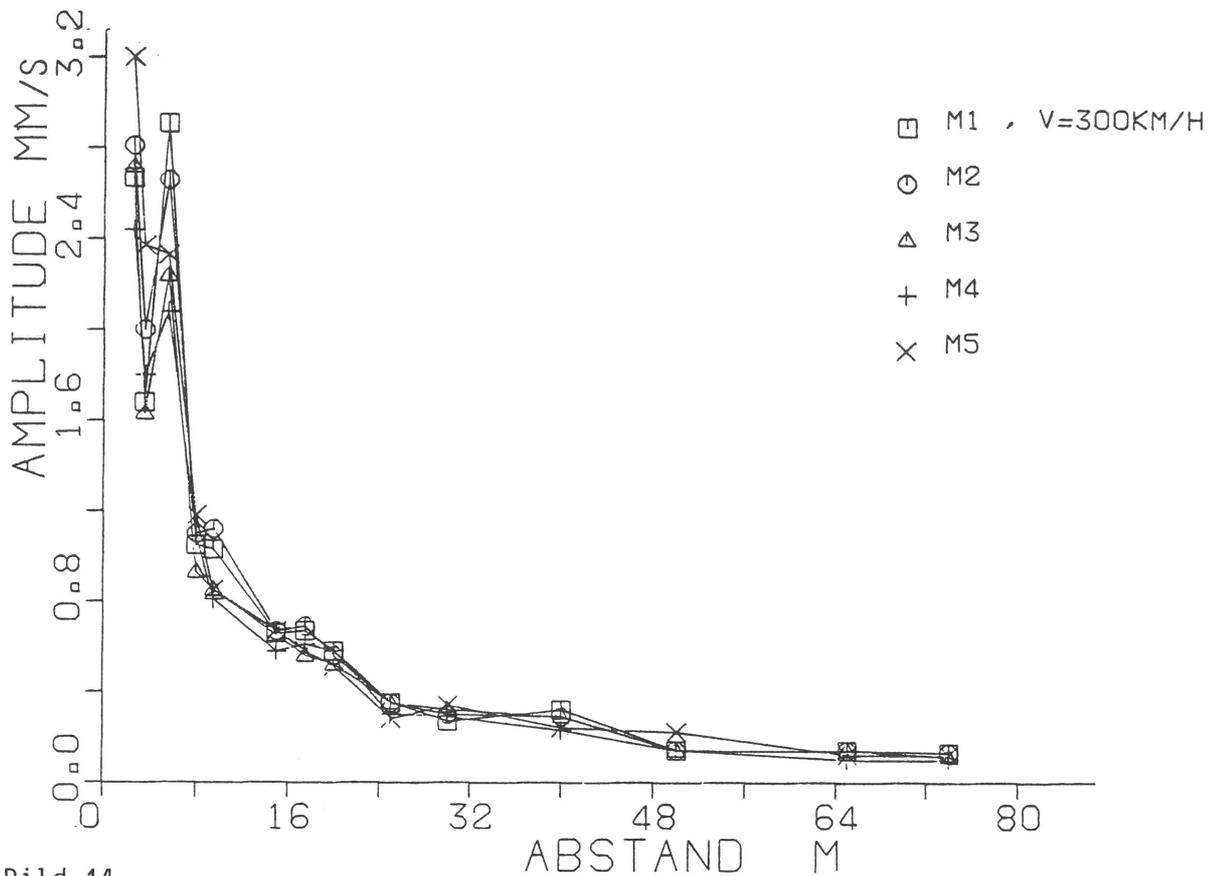


Bild 14

Maximale Schwinggeschwindigkeitsamplituden, Streubereich verschiedener Messungen  $v = 300 \text{ km/h}$

Bild 14:

Bei den verschiedenen Messungen bei konstantem Parameter (Zuglänge, Fahr- geschwindigkeit usw.) sind Abweichungen bis zu 30 % aufgetreten.

Zum Vergleich der Erschütterungsstärke bei verschiedenen Fahrgeschwindig- keiten sind die Amplituden bei 2,5, 5, 10 und 20 m Entfernung in Bild 15 über die Fahrgeschwindigkeit aufgetragen. (Um grobe Zufälligkeiten zu vermeiden, wurden die Maximalwerte mit denen benachbarter Meßpunkte und mit den Effektivwerten abgeglichen.) Der Fahrgeschwindigkeitseinfluß zeigt sich

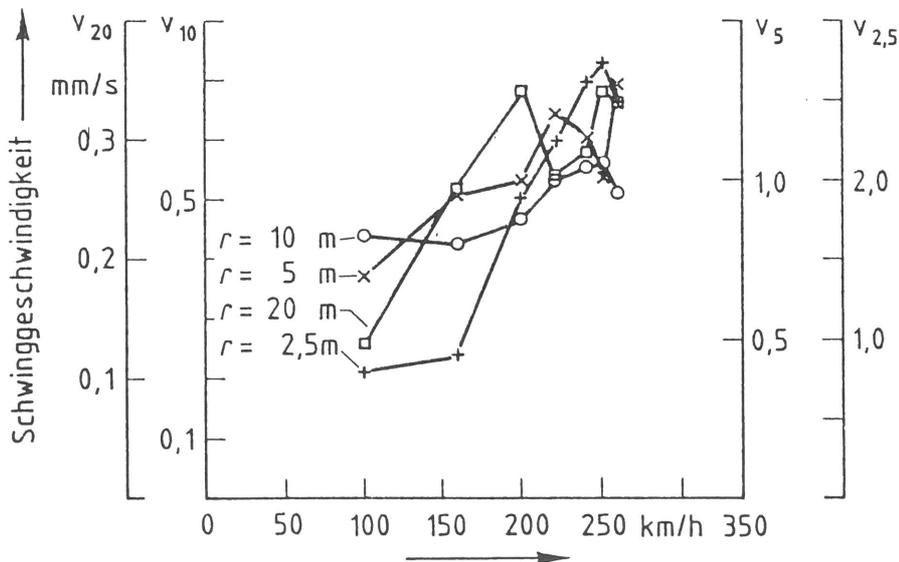


Bild 15

Schwinggeschwindigkeits amplituden der Umgebung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, Ergebnisse der 1. Meßserie

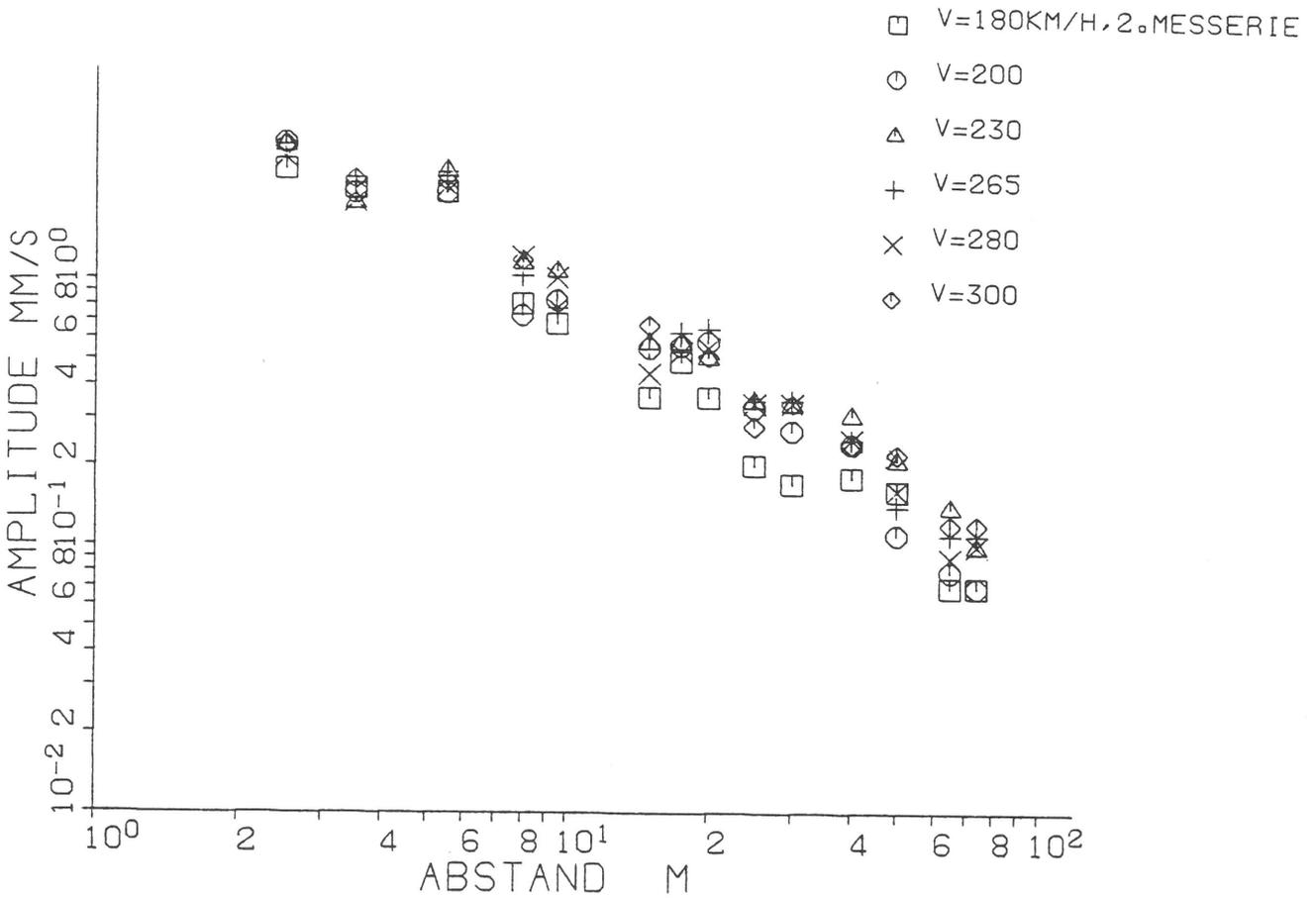
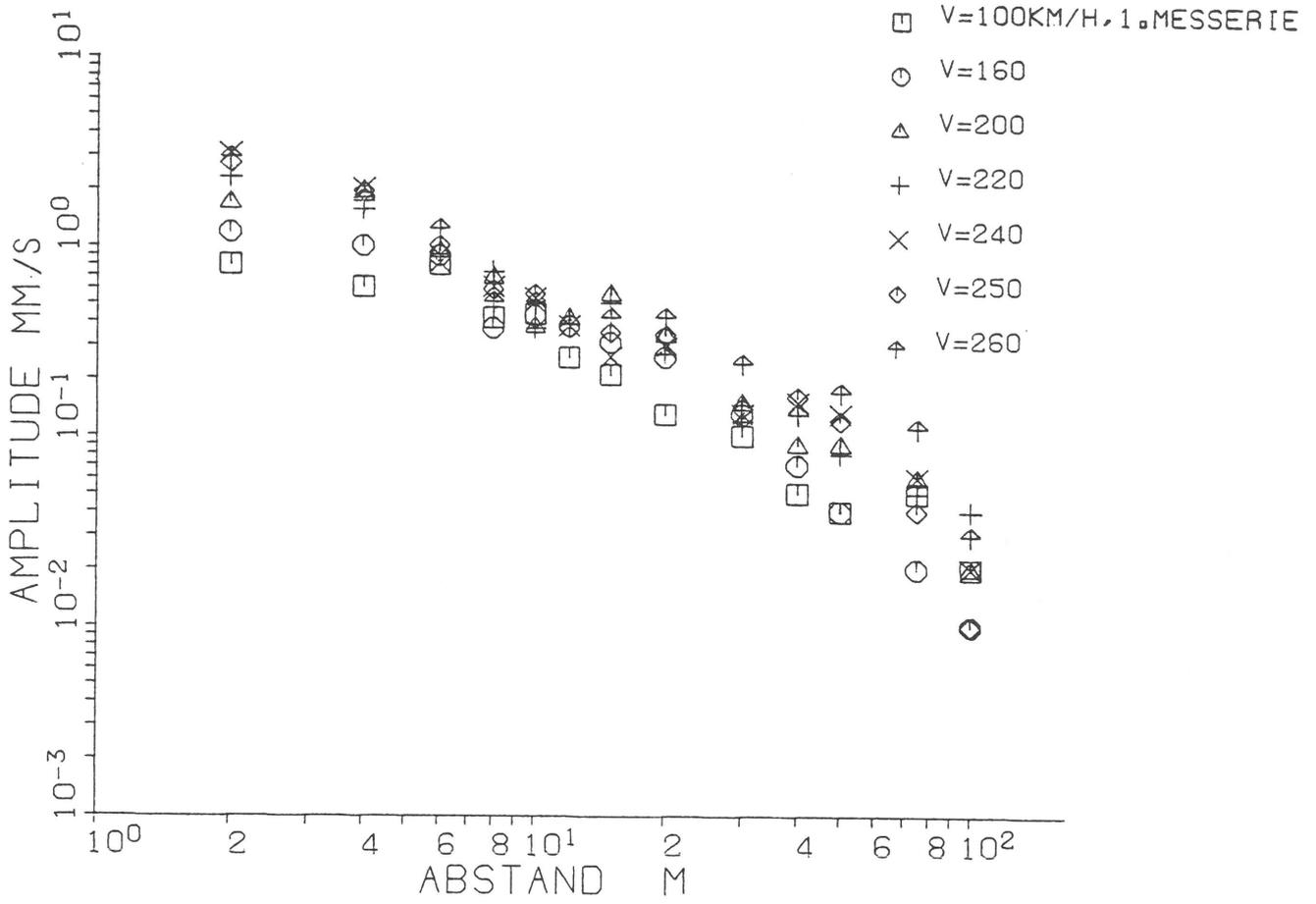


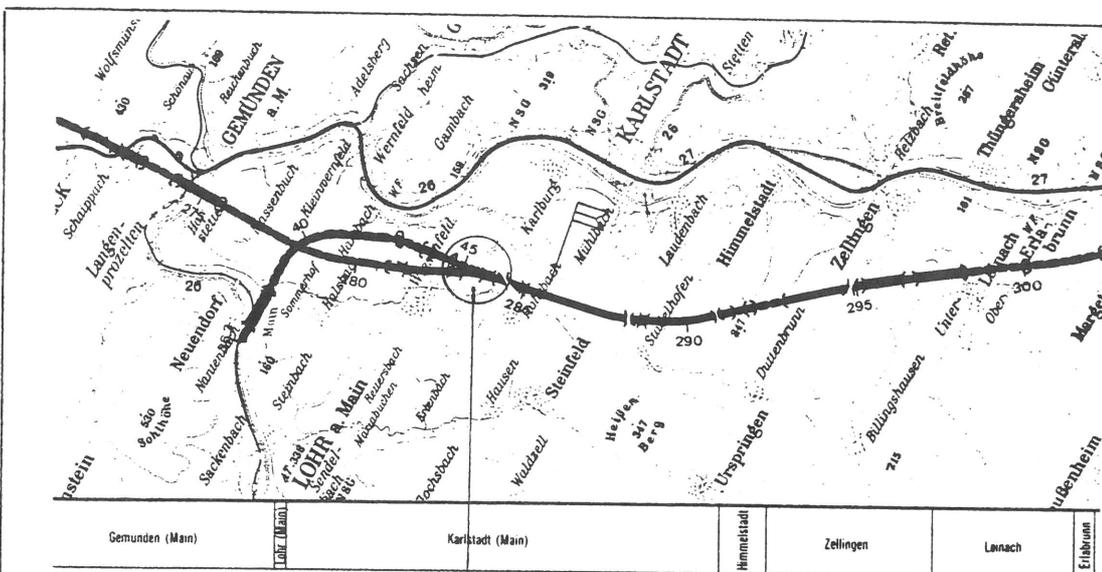
Bild 16

Maximale Schwinggeschwindigkeitsamplituden, Amplituden-Abstands-Gesetz bei Zugvorbeifahrten

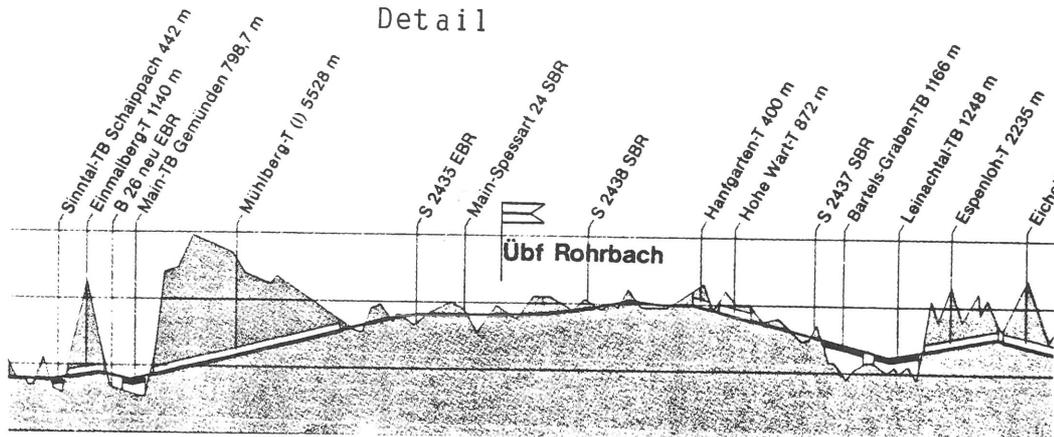
nur in der unmittelbaren Gleisnähe, jedoch nicht so stark wie beim Fahrweg selbst (vergleiche Bild 7). Das Bild zeigt noch einmal, daß die hohen Fahrgeschwindigkeiten über 200 km/h anscheinend im Hinblick auf die Erschütterungen in der Umgebung nicht kritisch sind.

Um die Ausbreitungsgesetzmäßigkeit der gemessenen Schienenverkehrserschütterungen zu erkennen, sind die Maximalamplituden in Bild 16 noch einmal im logarithmischen Maßstab über der Entfernung aufgetragen. Es ergibt sich ein geometrischer Abnahmeexponent von  $n = 0,7$  bis 1. Die etwas stärkere Abnahme in großen Entfernungen ( $r > 50$  m) muß mit der Materialdämpfung erklärt werden, die aber sinnvollerweise bei dem vorliegenden Frequenzgemisch nicht quantifiziert wird. Im Vergleich zu Bild 4 ist festzustellen, daß das Amplituden-Abstands-Gesetz für Zugverkehr nicht wesentlich, vielleicht etwas im Nahbereich, von dem einer ortsfesten harmonischen Punktlast abweicht.

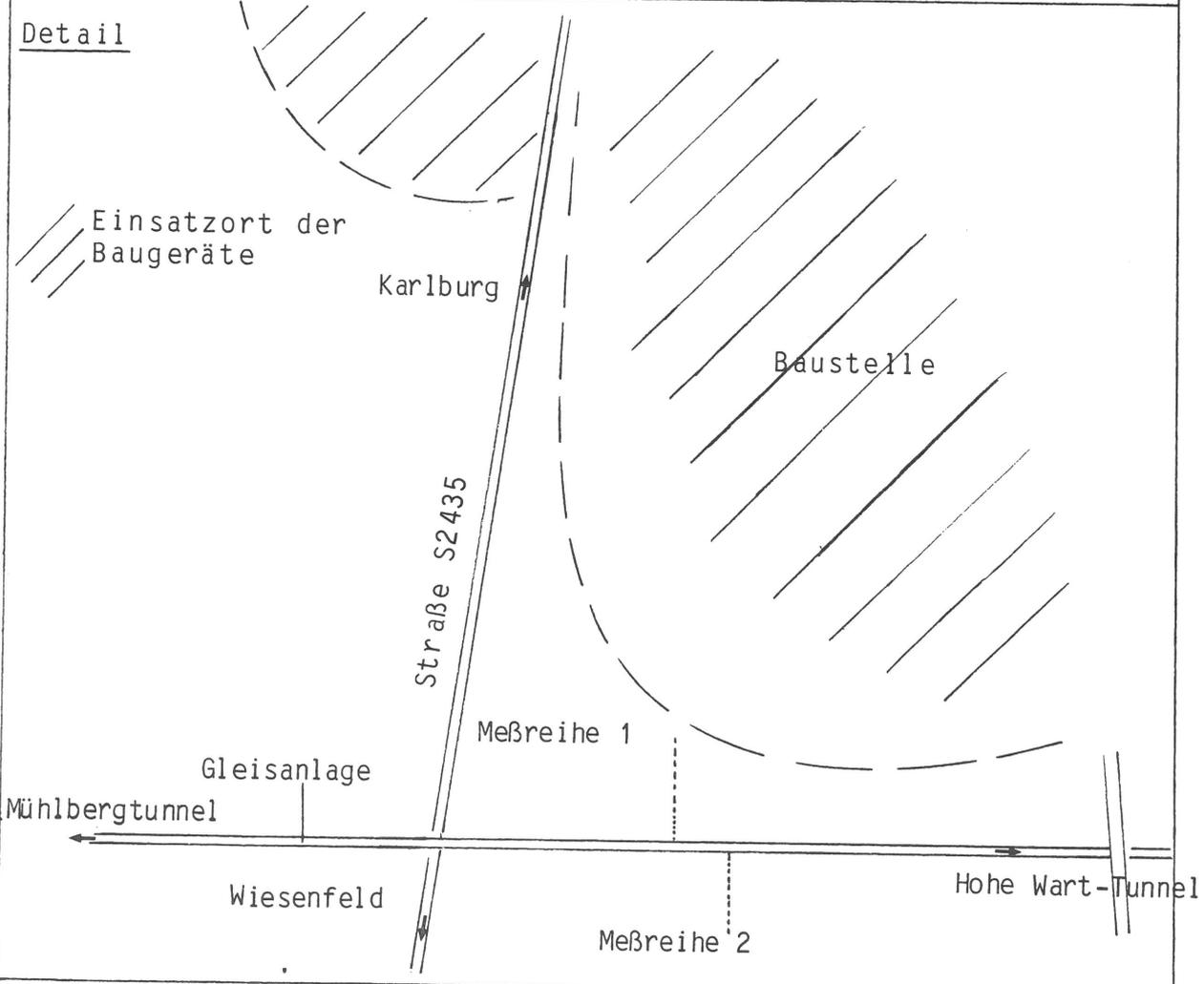
Anlage A1  
Lageplan der  
Meßorte



Detail

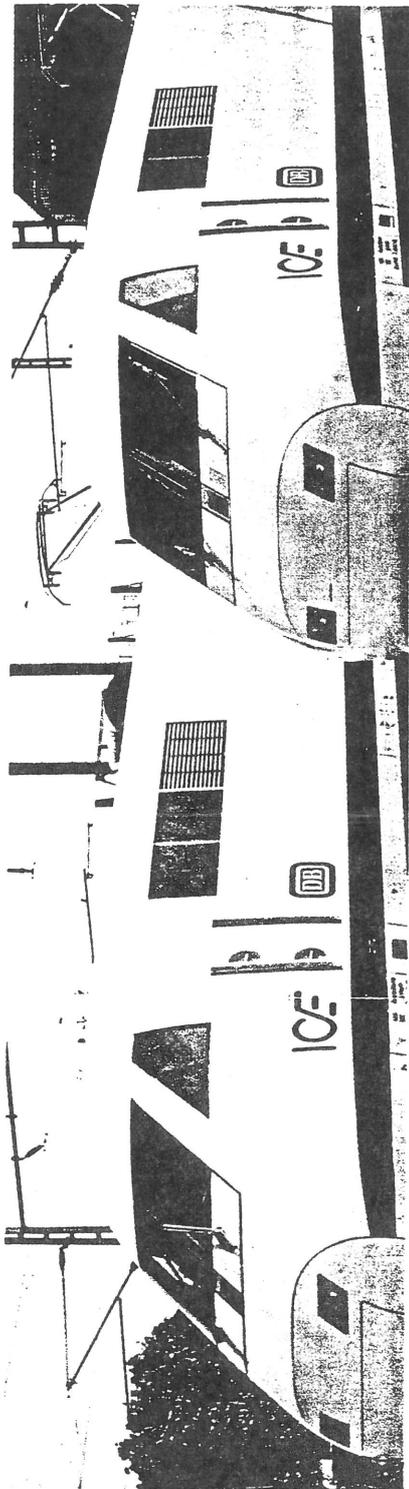


Detail





# ICE-Technik auf einen Blick



## 1. Zugverbund

Triebkopf (TK 1)  
Mefwagen (MW)  
Demonstrationswagen 1 (DW 1)  
Demonstrationswagen 2 (DW 2)  
Triebkopf (TK 2)

UIC 505  
- Bei Versuchsfahrten 350 km/h  
- Bei Demonstrationstfahrten 300 km/h

114 m  
304 t  
(Mit 87 Passagieren und 10 Personen für  
Zugsteuerung und Versuchsbetriebung)

15 kV, 16 2/3 Hz  
2 x 3640 kW, insgesamt 7280 kW  
2 x 4200 kW, insgesamt 8400 kW

Dreistromleistungsübertragung mit Gleich-  
spannungszwischenkreis und kollektions-  
Asynchronmotoren,  
Fahrmotor-Getriebeblock mit doppeltem  
Kardanhothwellenantrieb.

Mikroprozessorgesteuertes Bremssystem,  
bestehend aus:  
- Generatorischer Bremse im Triebkopf mit  
Energierückspeisung in den Fahrdraht  
- reibwertunabhängigen linearen Wirbel-  
strombremsen (Wb) in sämtlichen Trieb-  
und Lauftriebstellen. Speisung durch  
NiCd-Batterien.  
- Scheibenbremsen auf allen Trieb- und  
Laufachsen.  
Steuerungsübertragung über Lichtwellenleiter.  
Diagnosesystem DIAS  
Meftechnik

## 2. Mittelwagen

Wagenlänge: 24,34 m  
Wagenbreite: 2,93 m  
Wagenhöhe: 3,65 m über S.O.  
Fußbodenhöhe: 1,15 m über S.O.  
Lichte Fahrgastraumhöhe: 2,23 m  
Radsatzstand im Drehgestell: 2,80 m

Massen  
Dienstmasse  
- Demonstrationswagen 1 44 700 kg  
- Demonstrationswagen 2 45 500 kg  
- Mefwagen 50 505 kg  
Wagenkasten-Rohbaumasse 6 400 kg  
Lauftriebstellmassen mit Mefteinrichtung:  
- Drehgestell mit Luftfederung 2 x 6 900 kg  
- Drehgestell mit Stahlfederung 2 x 7 700 kg  
- in Wagen 2 und Mefwagen 2 x 7 700 kg  
- MBB-Hochleistungs-drehgestell 2 x 5 750 kg  
(voraus. ab 1987)

Alle Räder sind mit Schallabsorbieren  
ausgestattet.

Aluminium-Vollinlegrabauweise mit Blenden  
und Verkleidungen aus Faserverbundwerk-  
stoffen. Wagenkastengestaltung unter Berück-  
sichtigung des Multiklassenkonzeptes mit  
flexibler Innenausstattung.  
Außenhaut-ändige Fensterscheiben mit  
Dreifach-Verglasung.  
max. 65 dB (A), im Tunnel bis 70 dB (A).  
Schall- und druckdichte Übergangseinrich-  
tungen in zweischaliger Bauweise mit einer  
lichten Weits von 1,10 m.  
Hydraulische Koppelerelemente zur  
Schwingungsdämpfung.  
Automatische Mittelpufferkupplung,  
Bauart Scharfenberg.  
Audiovisueller Informationsservice  
system - FIS  
Klimaanlage  
Sanitärreinrichtung

Obenausblasende Klimaanlage mit zugfreier  
Luftführung und Fußbodenheizung.  
Geschlossenes WC-System mit Druckwasser-  
Spülung und Unterflur-Sammelbehälter.

## 3. Triebkopf

Abmessungen  
Länge 20,80 m  
Breite 3,07 m  
Höhe 3,92 m über Schienenoberkante

Triebkopfmasse 78,2 t

Antriebsdrehgestelle  
Weiterentwickelte Bauart UmAn mit passiver  
Ankoppelung, Radsatzstand 3,0 m. Achslager-  
gehäuse aus Aluminium.  
Lagerung des Motor-Getriebe-Blocks zu 1/3  
im Drehgestell, zu 2/3 Aufhängung am  
Wagenkasten. Massen des Motor-Getriebe-  
Blocks sind im Bereich der Drehgestell-Kopf-  
träger horizontal durch hydraulische Dämpfer  
an den Wagenkasten angeköpelt.  
Kraftübertragung Getriebe - Radsatz durch  
doppelte Hohlwelle.  
Die äußere Hohlwelle ist zugleich als Träger  
von je 3 Bremschreiben aus Sintermetall  
ausgebildet.

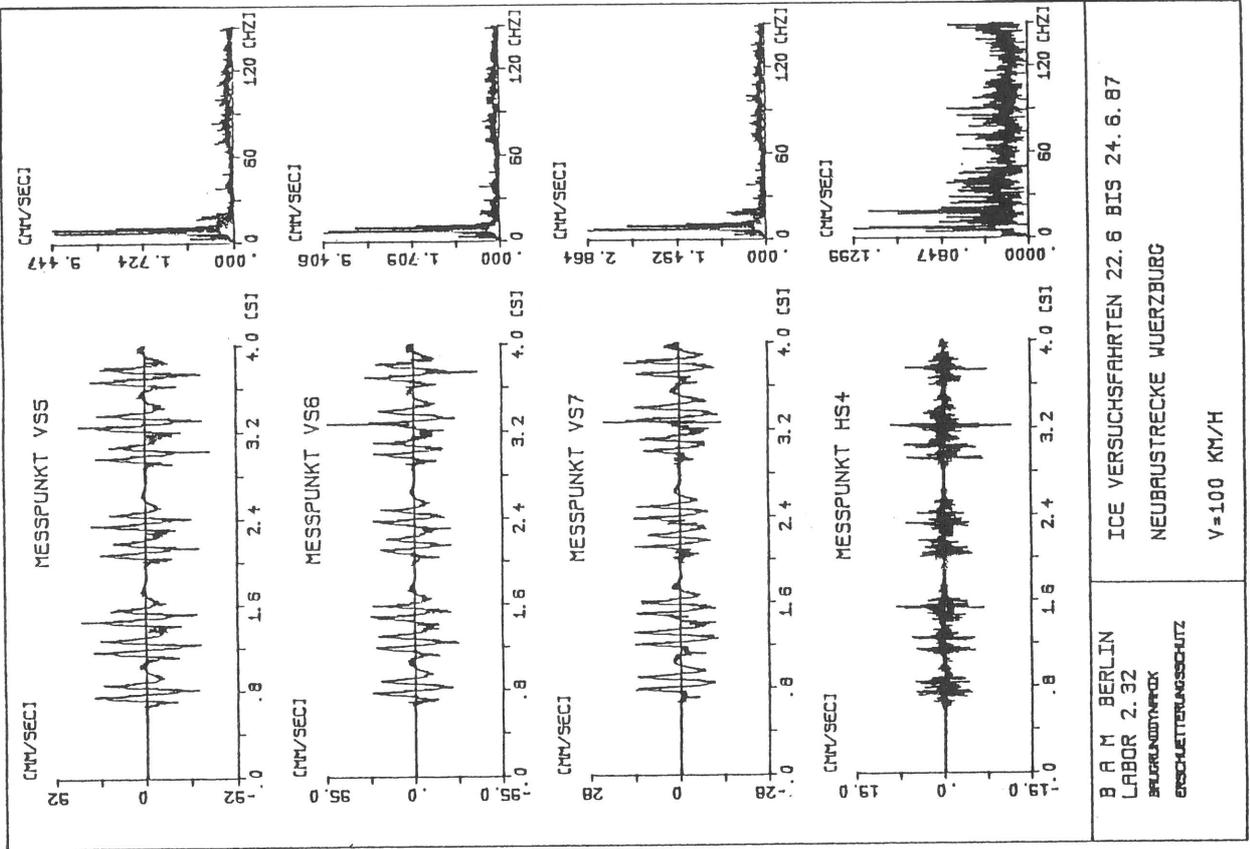
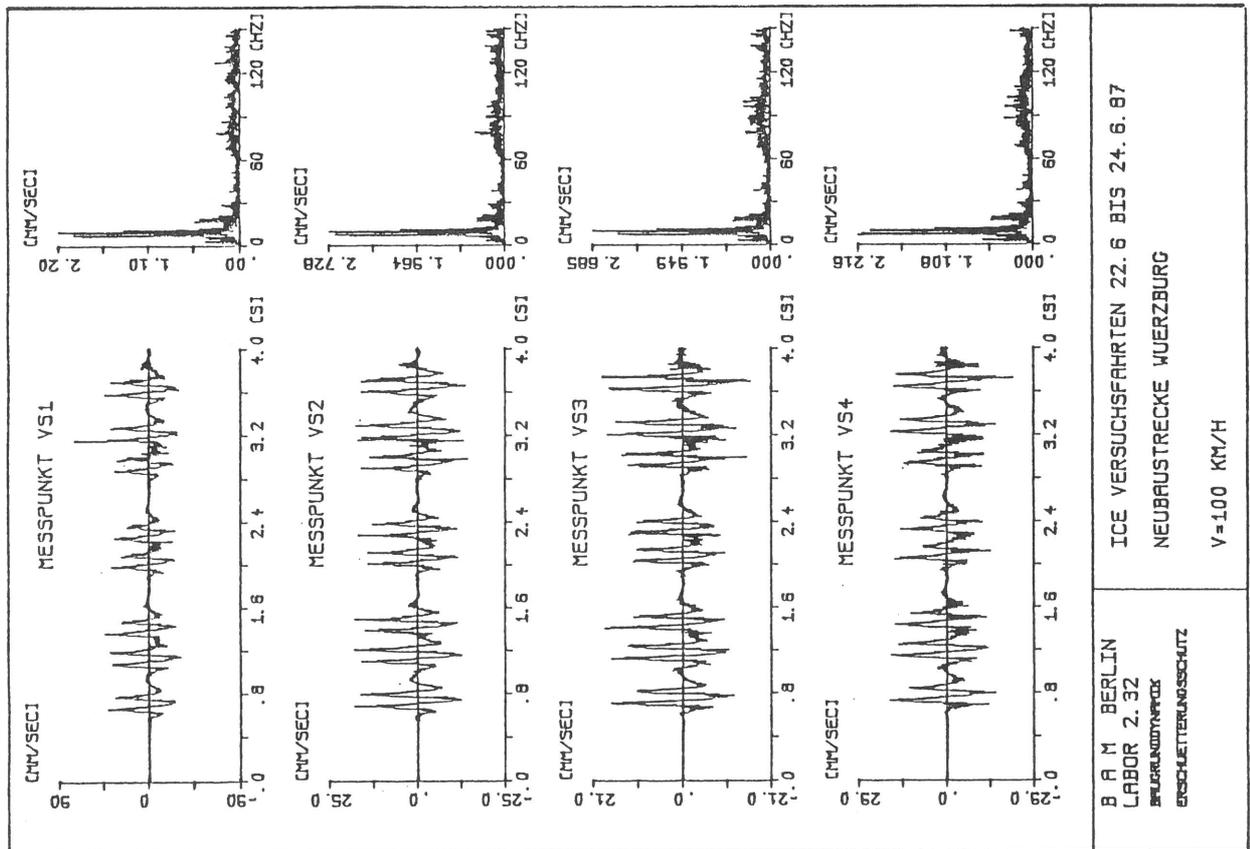
Anlenkung  
Radsatz/Drehgestellrahmen über einseitige  
Lenker, Drehgestell/Lokkasten über Zug-/  
Druckstange.

Struktur  
Stahl-Leichtbauweise mit seitlicher Ver-  
steifung durch Höckerplatten,  
Abnehmbare Dachteile und Gerflägerüste  
aus Aluminium.  
Schürzen u. Fronthauben aus Faserverbund-  
werkstoff.

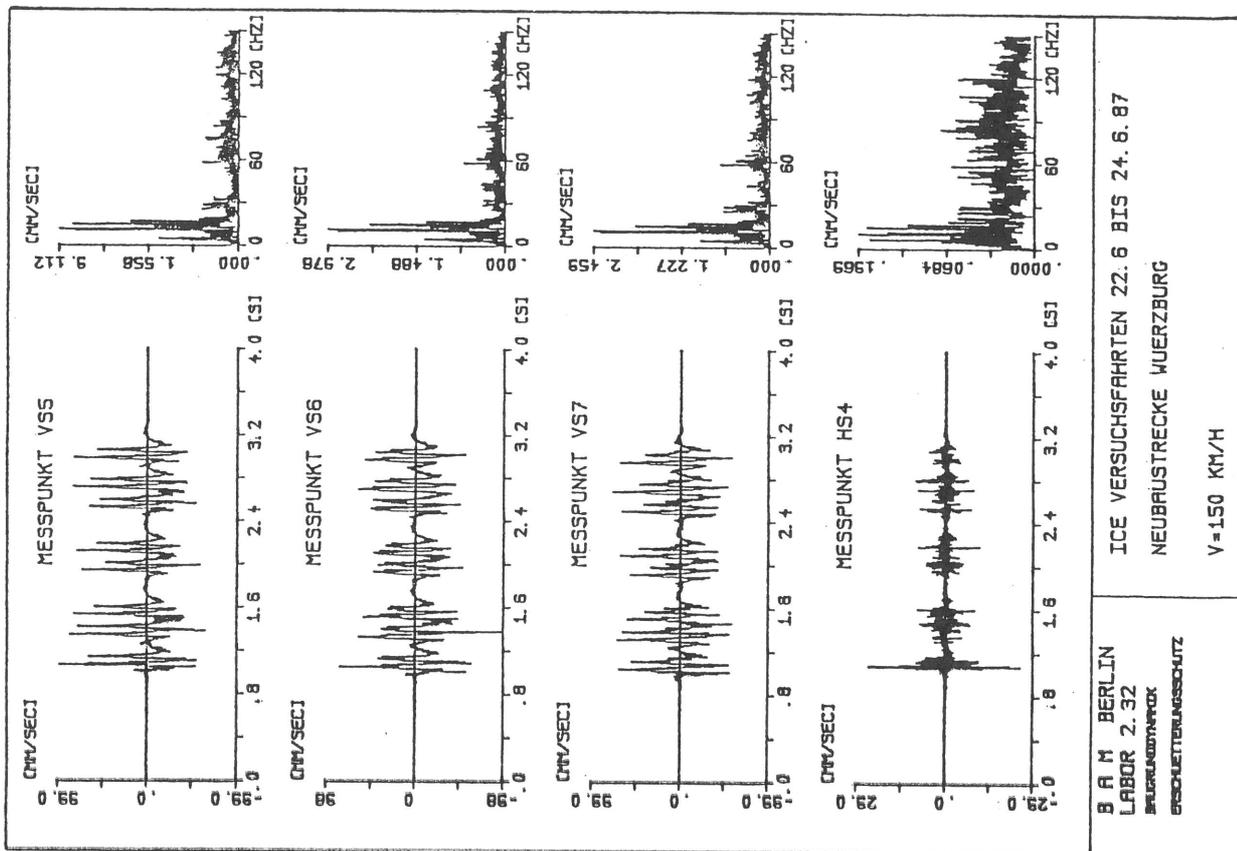
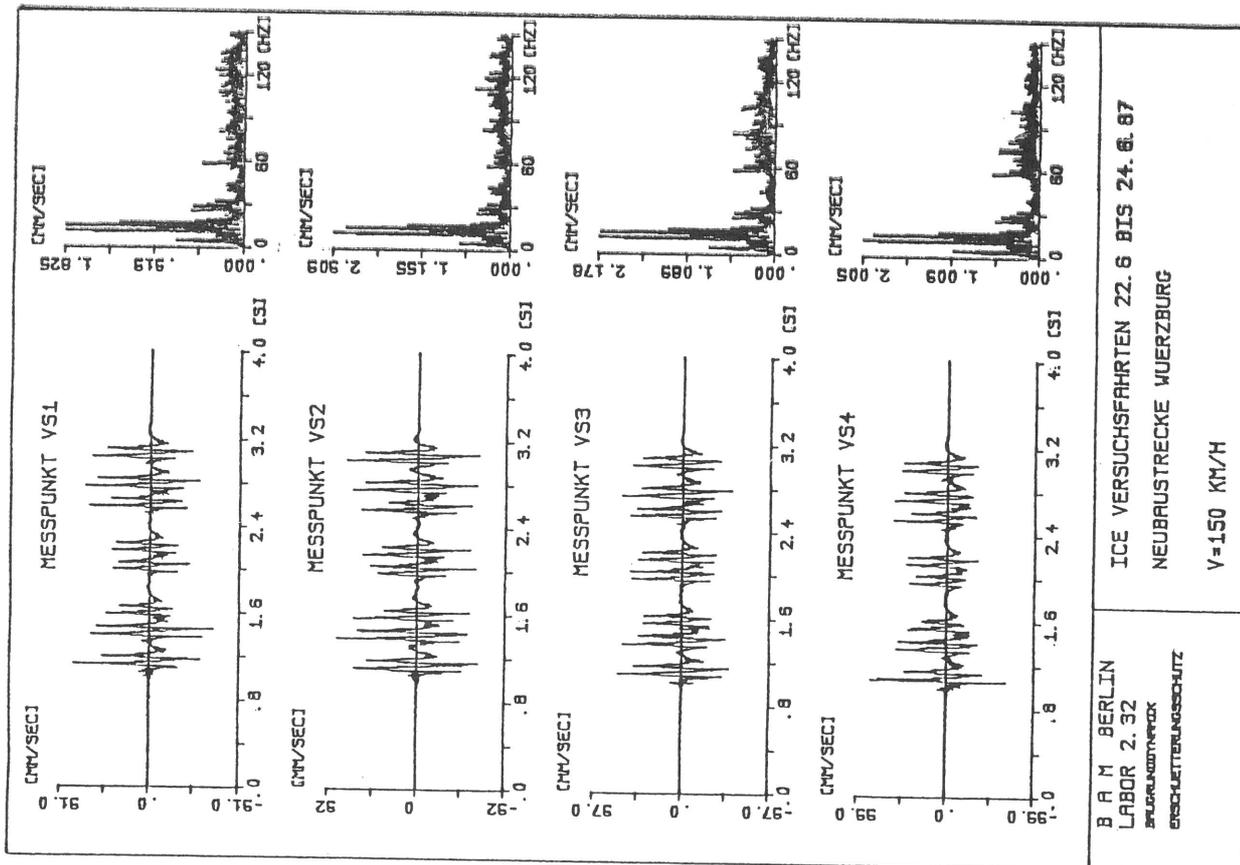
Stromabnehmer  
Mit einstellbarem aerodynamischen Auftriebs-  
verhalten.  
Schnellfahrhöhe: 1,60 m  
Gesamthöhe in eingelehntem 0,29 m  
Zustand.

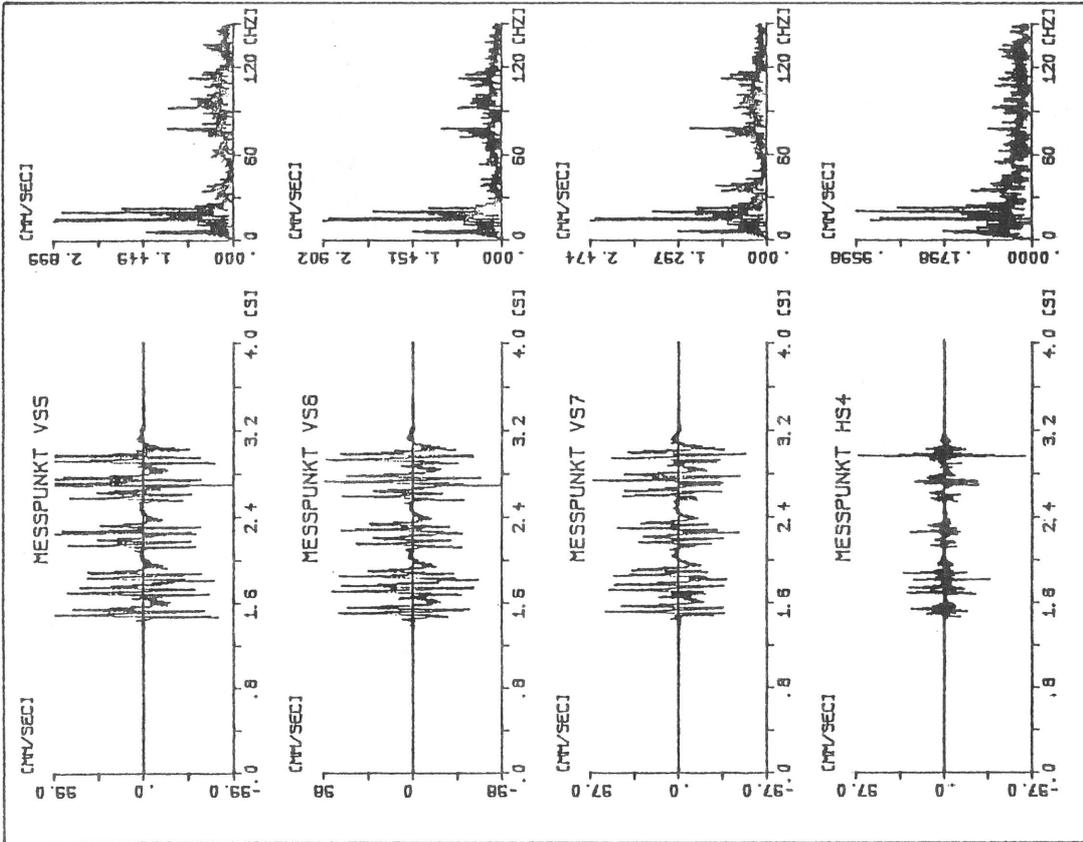
Führerstand  
Einheitsführerstand der  
Deutschen Bundesbahn

Zug- und Stoß-  
richtungen  
Vorn Abschlepphaken (verdeckt unter Front-  
haube), hinten automatische Mittel-Puffer-  
kupplung u. hydraulische Dämpferelemente.

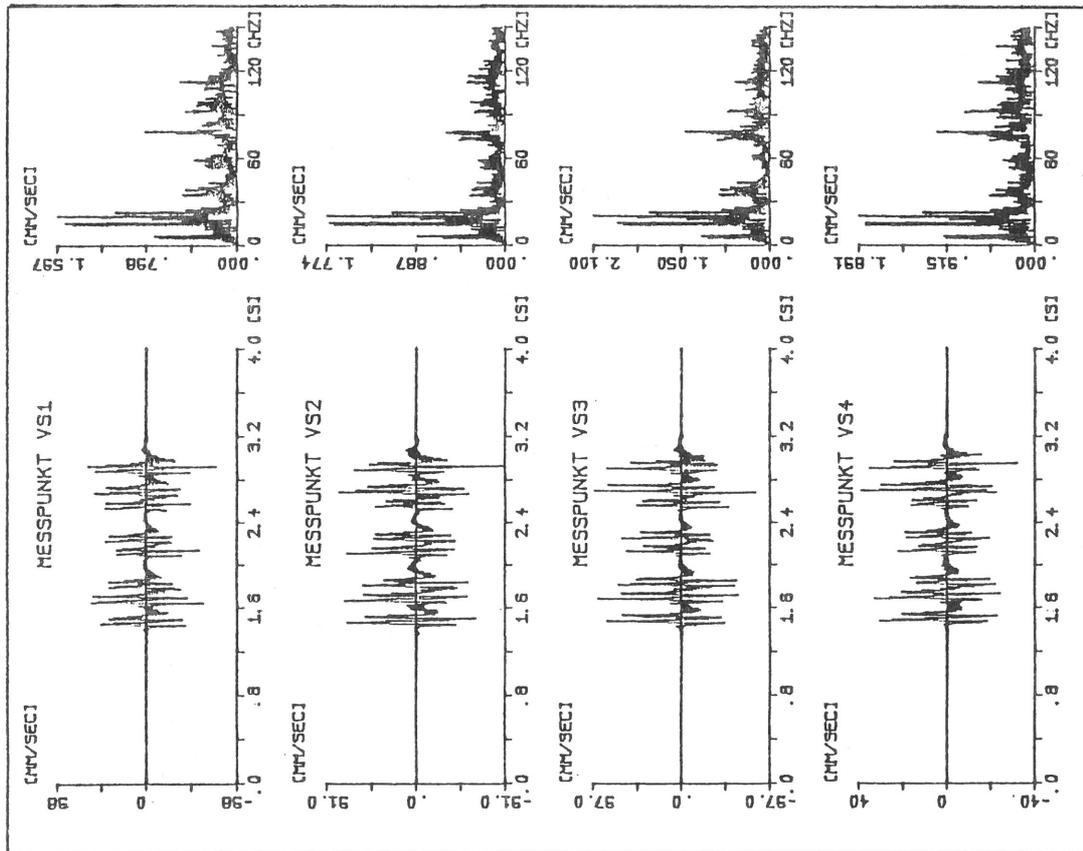


Anlage B - Schwinggeschwindigkeiten der Fahrwegmeßpunkte

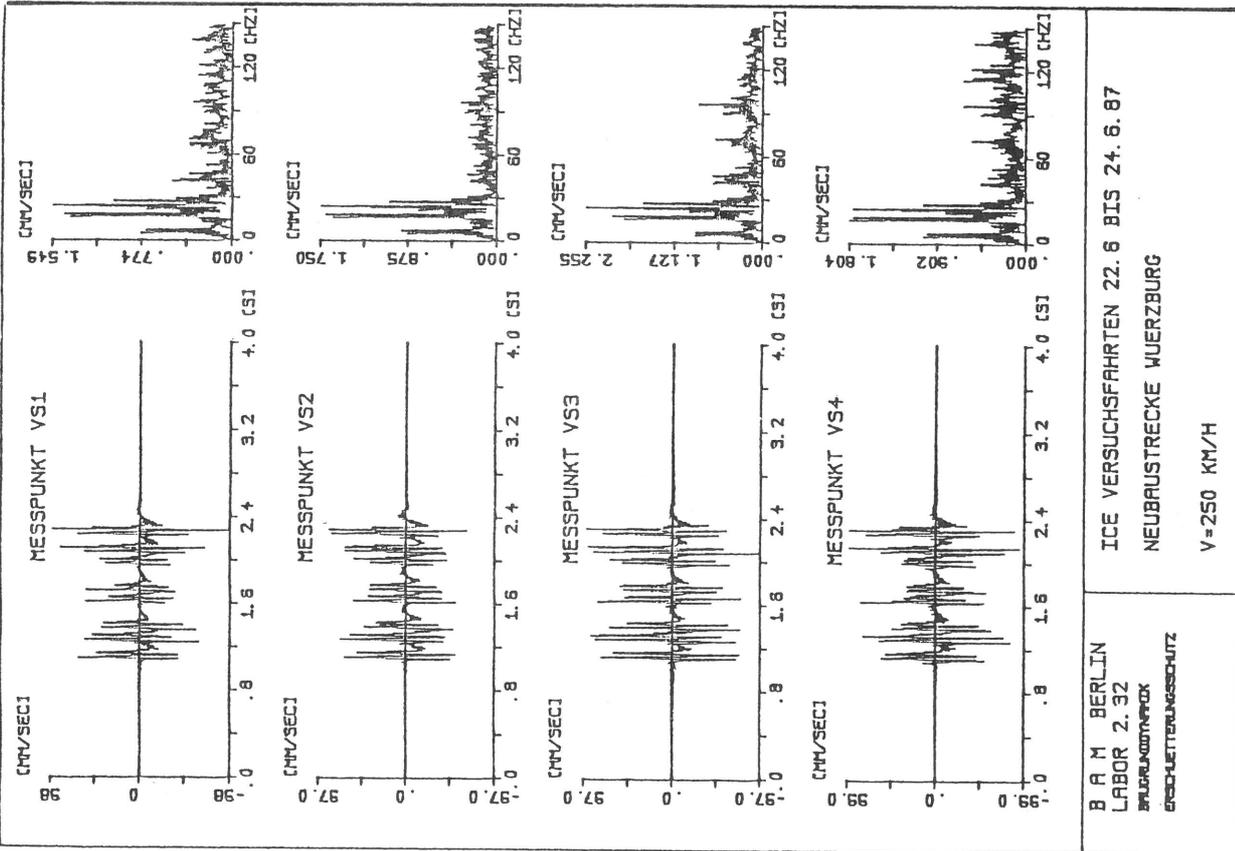




B A M BERLIN LABOR 2.32 BRUNNENSTRASSE ERSCHEINUNGSCHUTZ	ICE VERSUCHSFARTEN 22.6 BIS 24.6.87 NEUBAUSTRECKE WUERZBURG V=200 KM/H
---	--

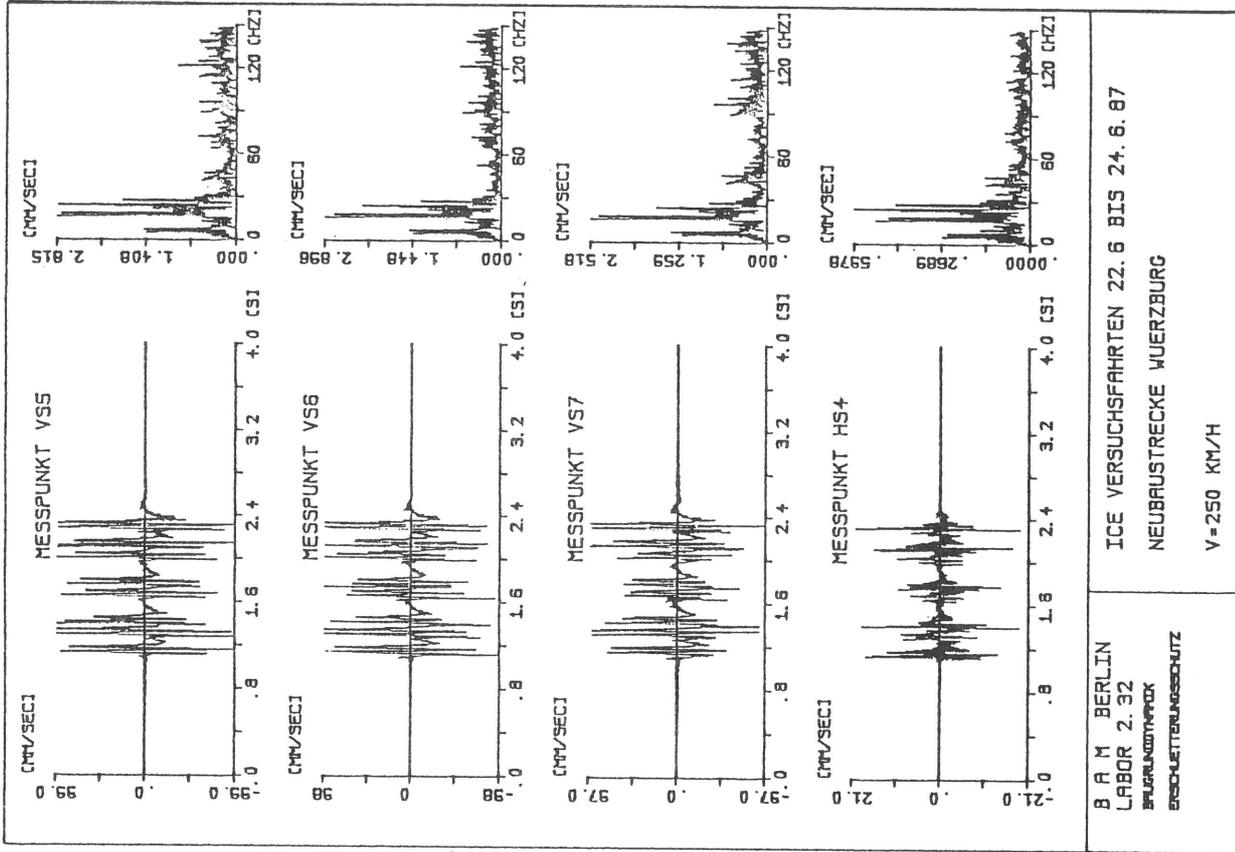


B A M BERLIN LABOR 2.32 BRUNNENSTRASSE ERSCHEINUNGSCHUTZ	ICE VERSUCHSFARTEN 22.6 BIS 24.6.87 NEUBAUSTRECKE WUERZBURG V=200 KM/H
---	--



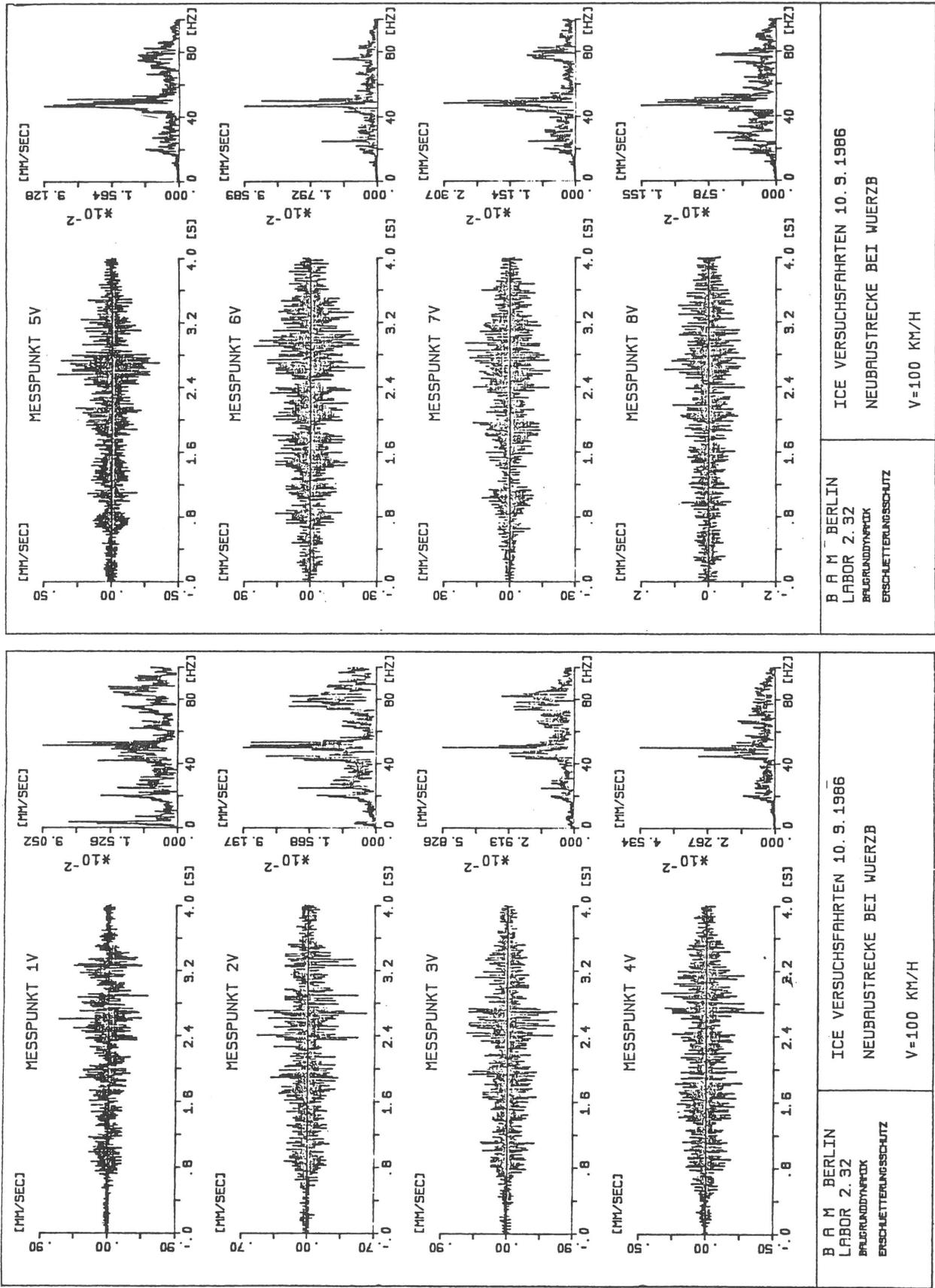
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 EINGEMISST  
 ERDSCHUTTERUNGSSCHUTZ

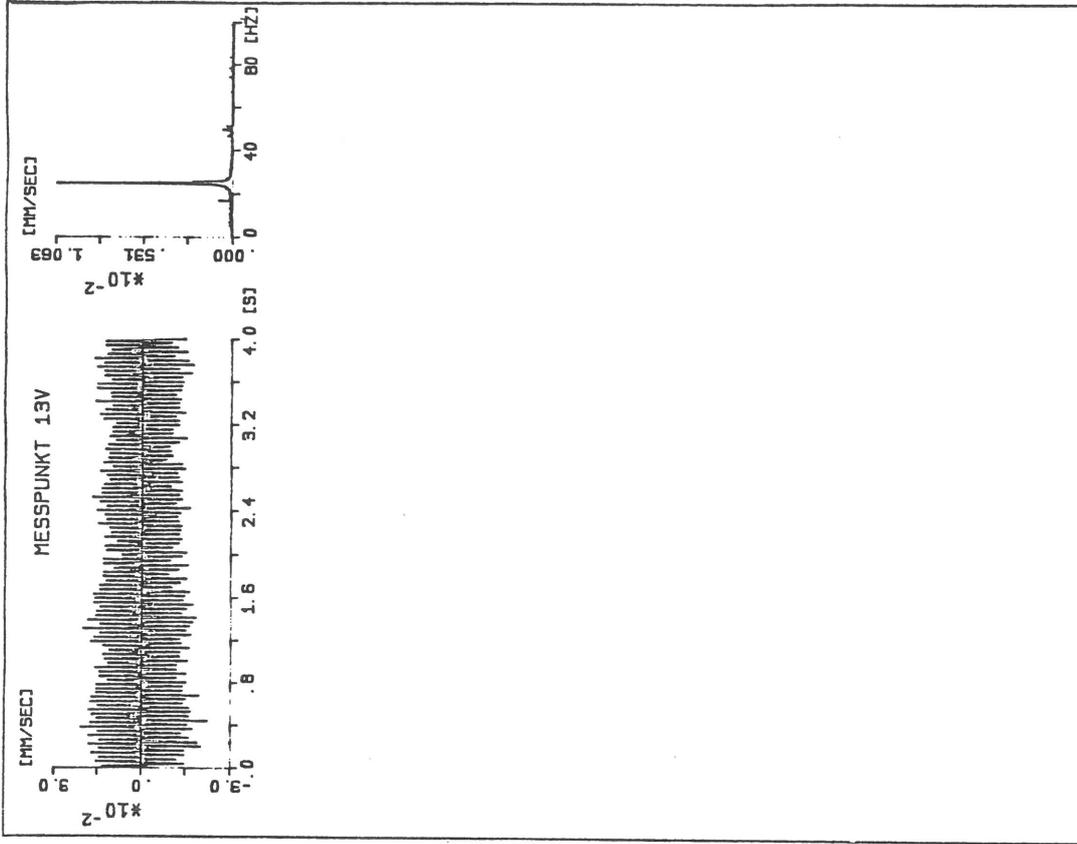
ICE VERSUCHSFARTEN 22.6 BIS 24.6.87  
 NEUBAUSTRECKE WUERZBURG  
 V=250 KM/H



B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 EINGEMISST  
 ERDSCHUTTERUNGSSCHUTZ

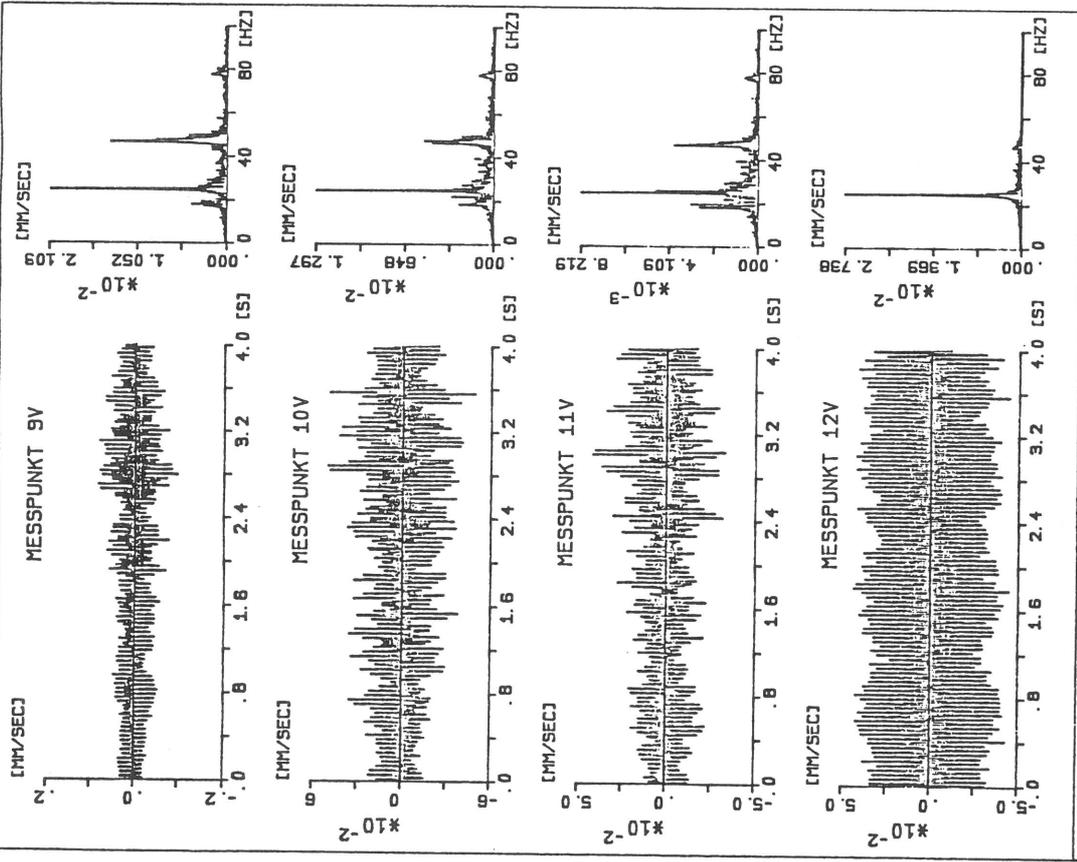
ICE VERSUCHSFARTEN 22.6 BIS 24.6.87  
 NEUBAUSTRECKE WUERZBURG  
 V=250 KM/H





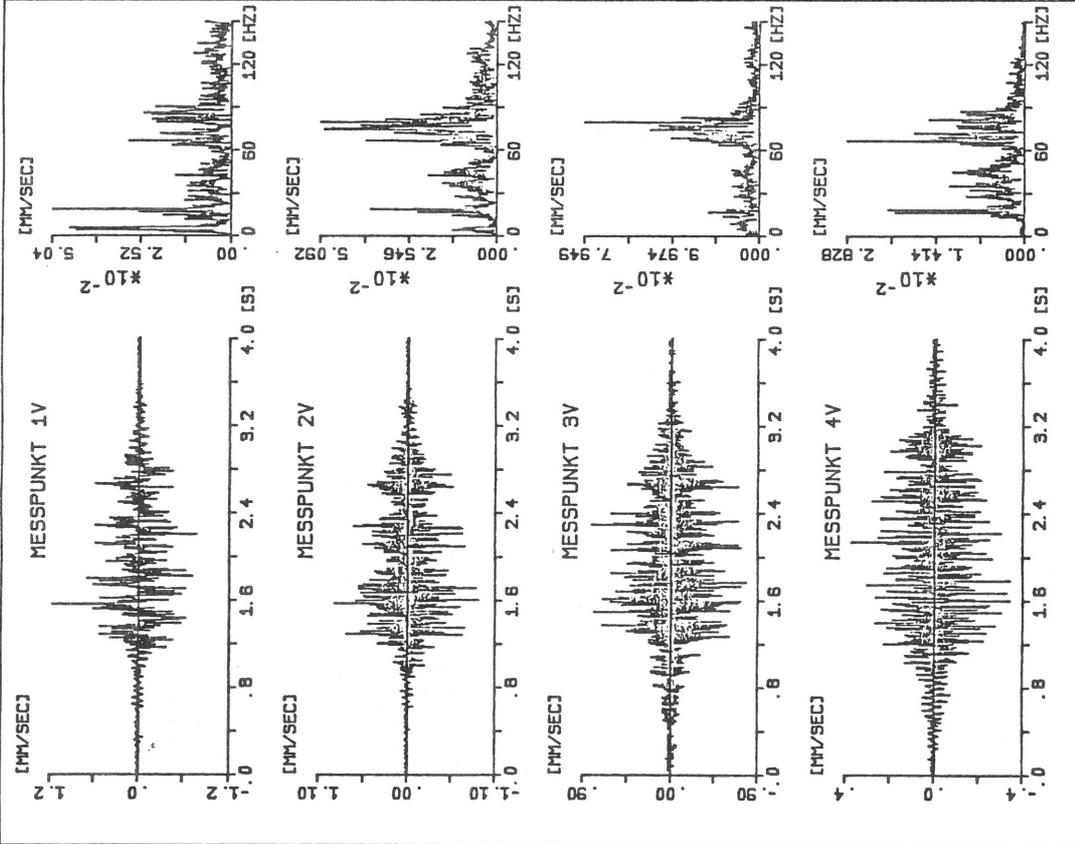
B R M BERLIN  
LABOR 2.32  
PRÜFUNGSMETHODIK  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFARTEN 10.9.1986  
NEUBRUSTECKE BEI WUERZB  
V=100 KM/H



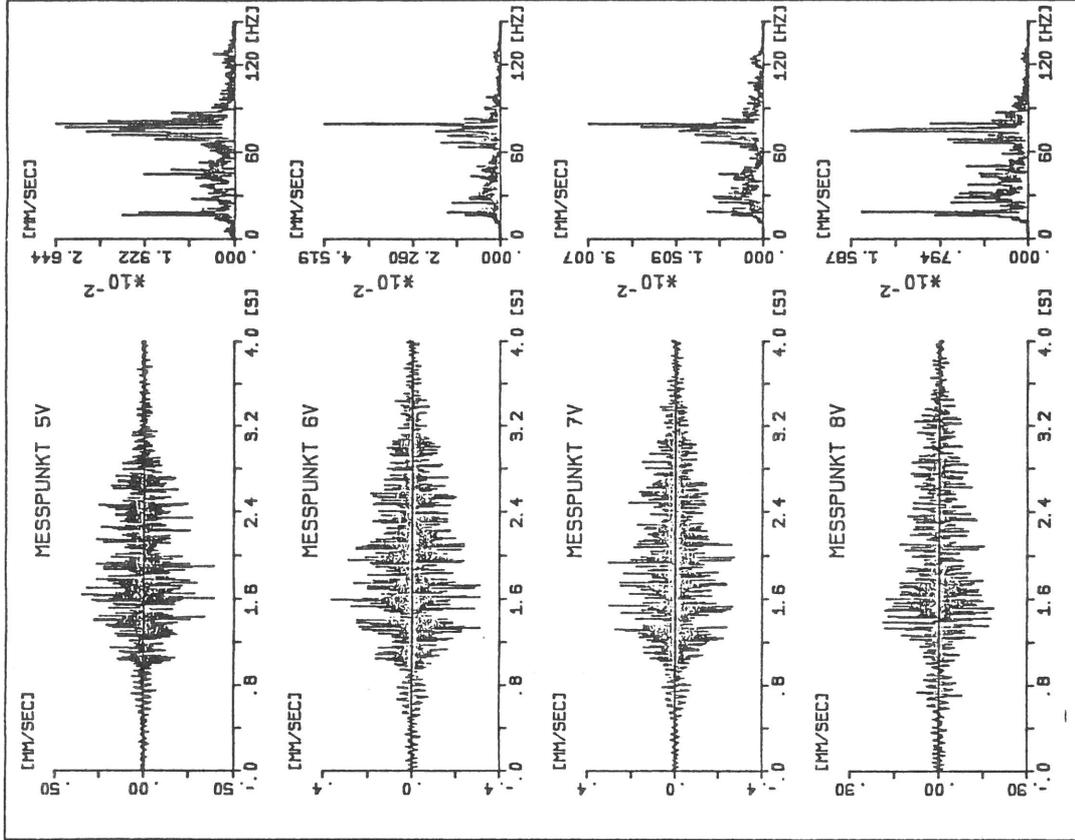
B R M BERLIN  
LABOR 2.32  
PRÜFUNGSMETHODIK  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFARTEN 10.9.1986  
NEUBRUSTECKE BEI WUERZB  
V=100 KM/H



B A M BERLIN  
LABOR 2.52  
BAUGRUNDINFORM  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10. 9. 1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=160 KM/H



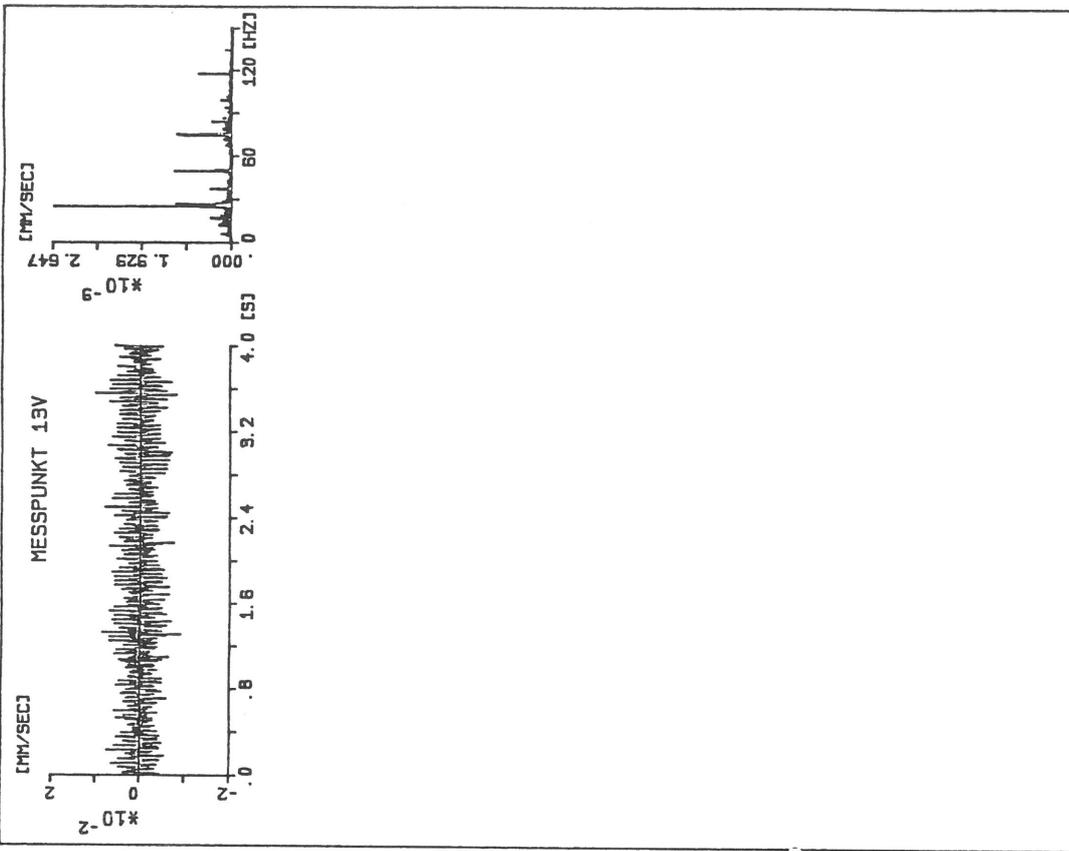
B A M BERLIN  
LABOR 2.52  
BAUGRUNDINFORM  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10. 9. 1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=160 KM/H

B R M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BRÜNDENTRÄFK  
 ERSCHEITERUNGSSCHUTZ

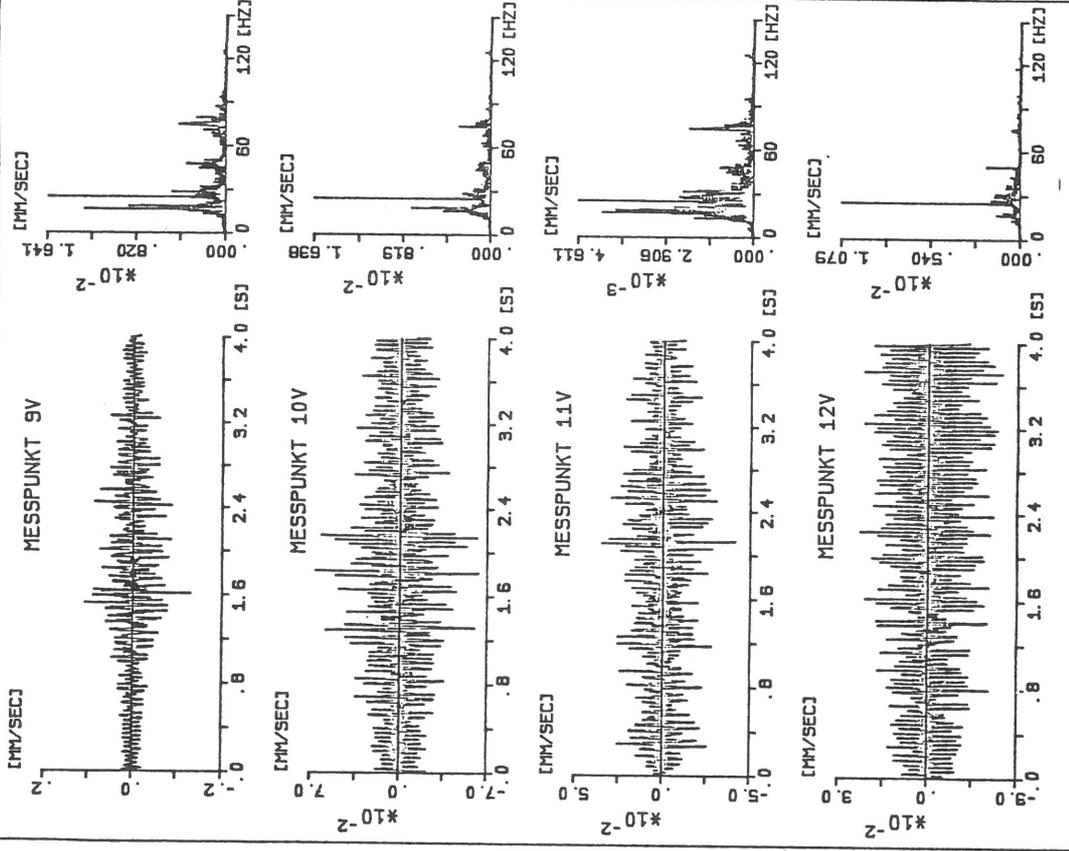
ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
 NEUBRAUSTECKE BEI WUERZB  
 V=160 KM/H

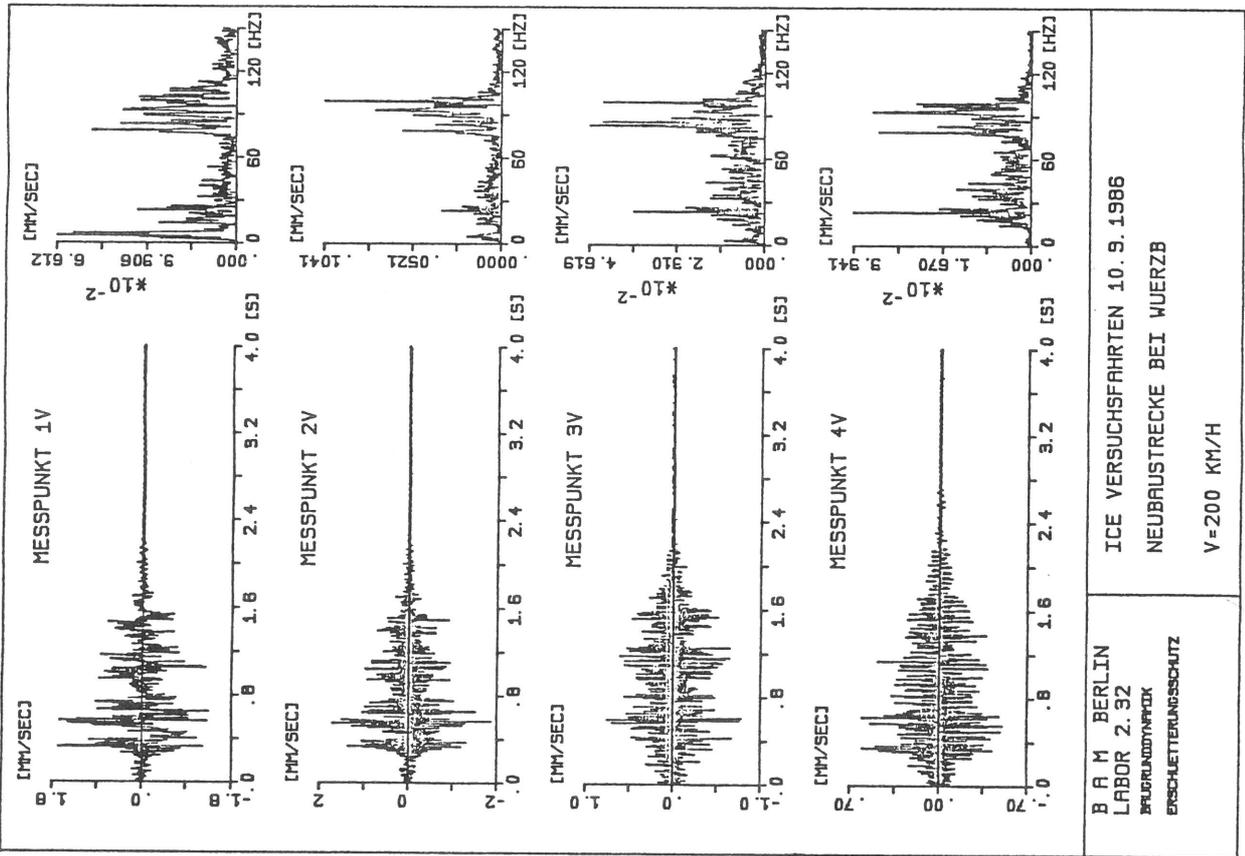
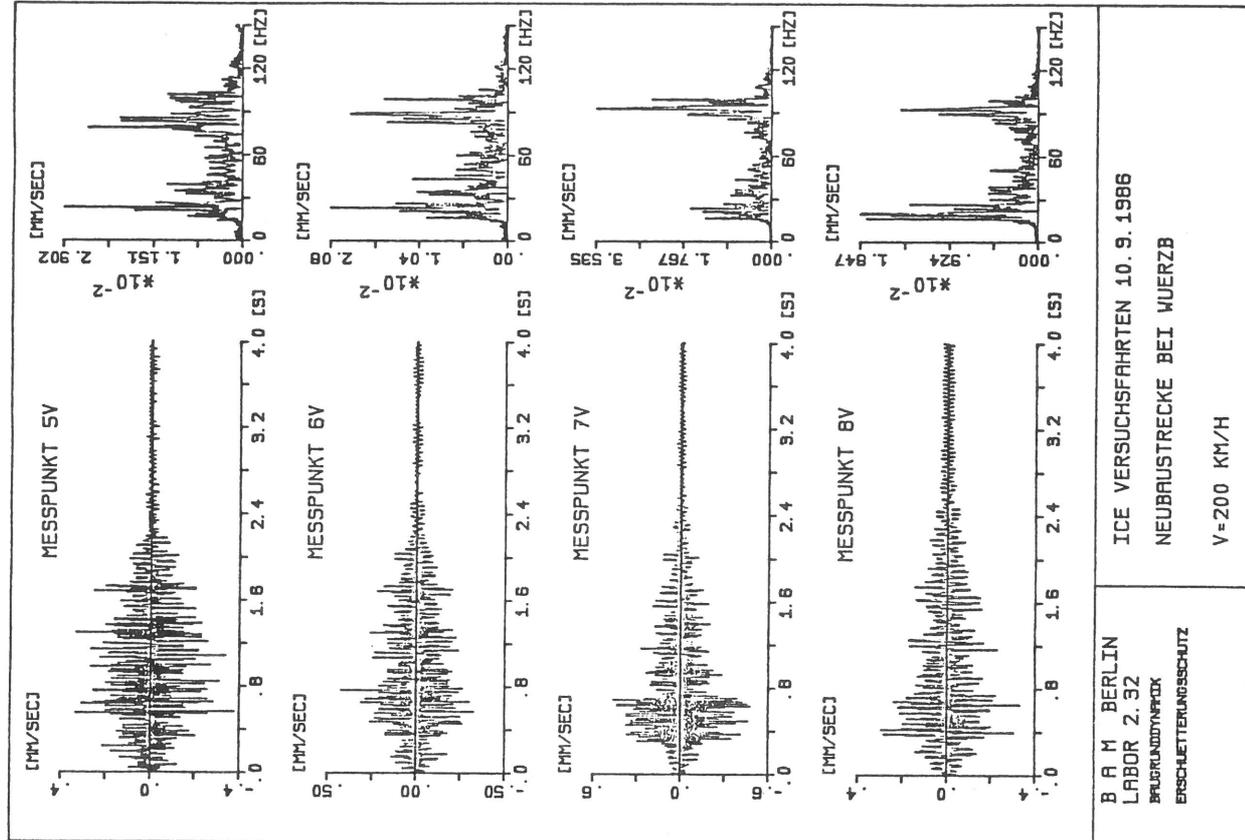
BLATT NR. 4

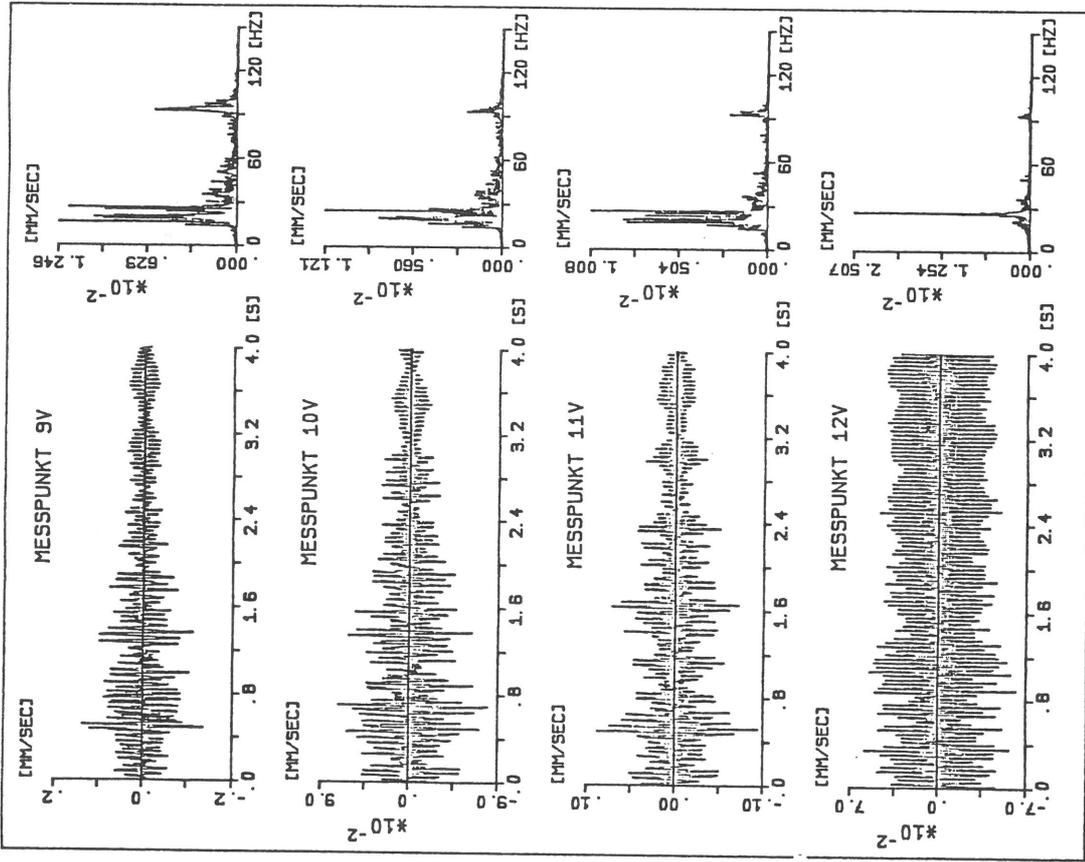


B R M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BRÜNDENTRÄFK  
 ERSCHEITERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
 NEUBRAUSTECKE BEI WUERZB  
 V=160 KM/H

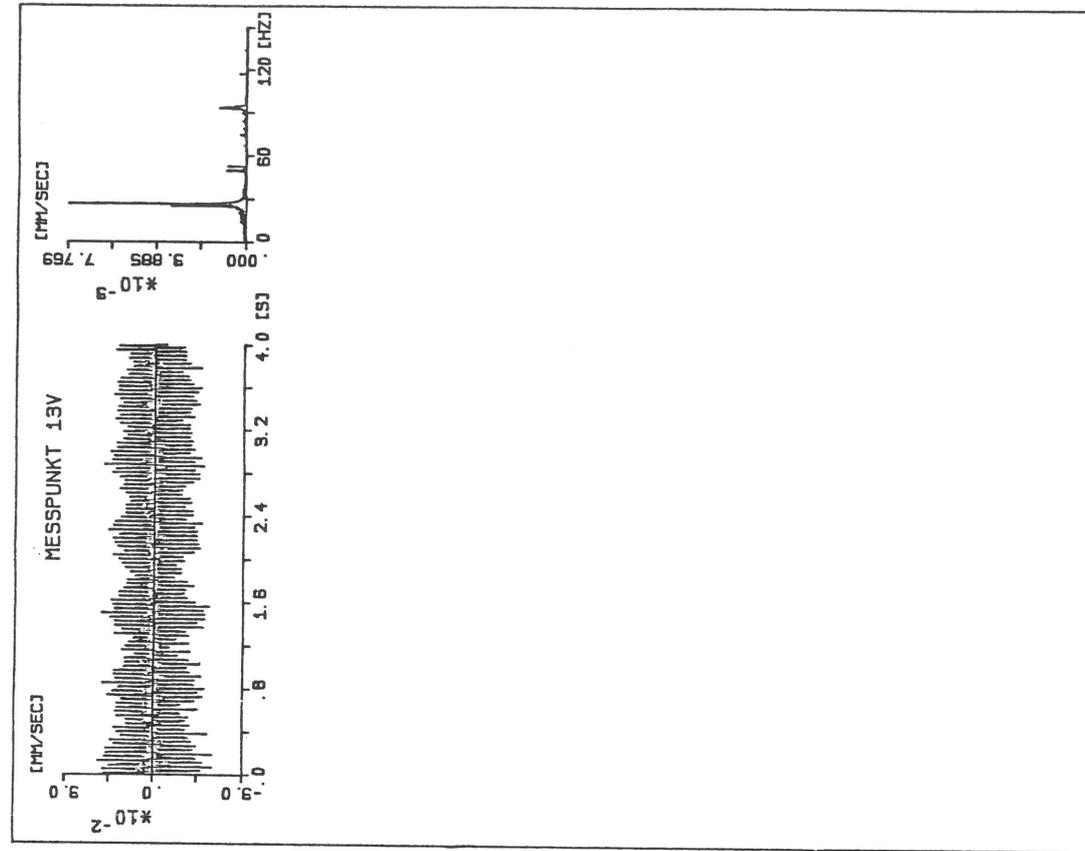






B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
PRÜFGRUNDSTAPPE  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

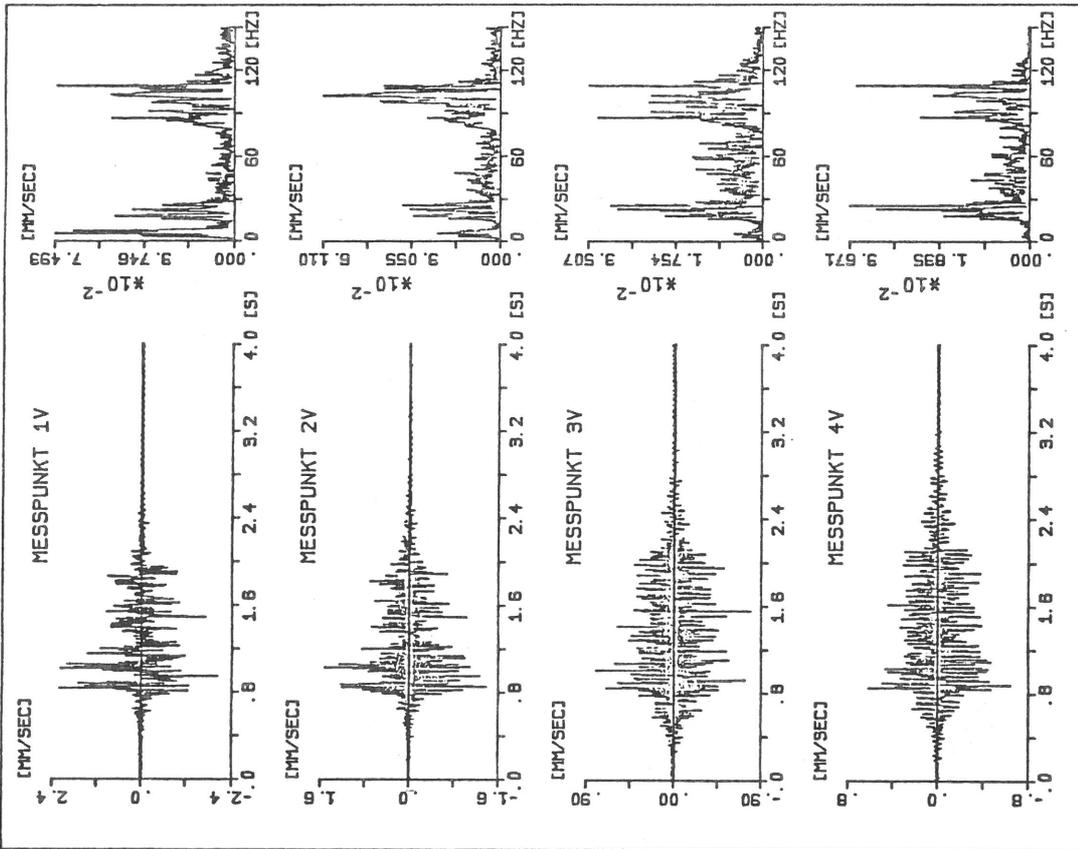
ICE VERSUCHSFARTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=200 KM/H



B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
PRÜFGRUNDSTAPPE  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

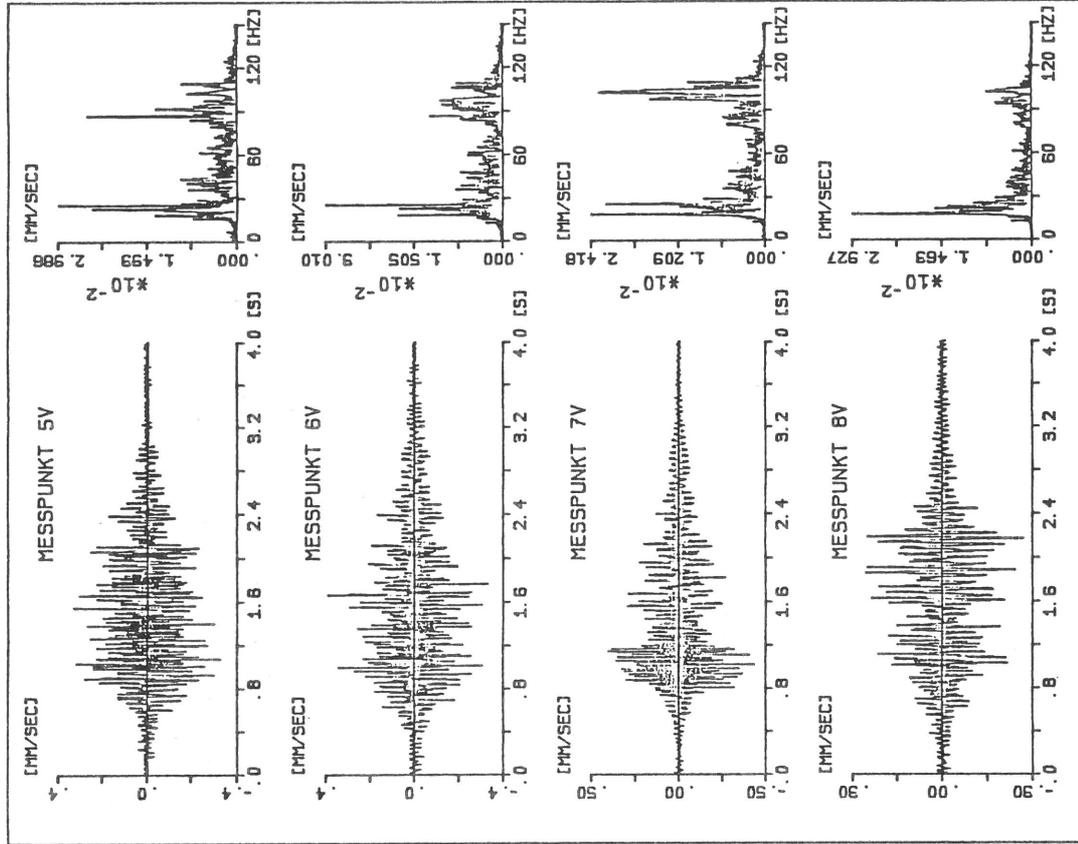
ICE VERSUCHSFARTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=200 KM/H

BLATT NR. 8



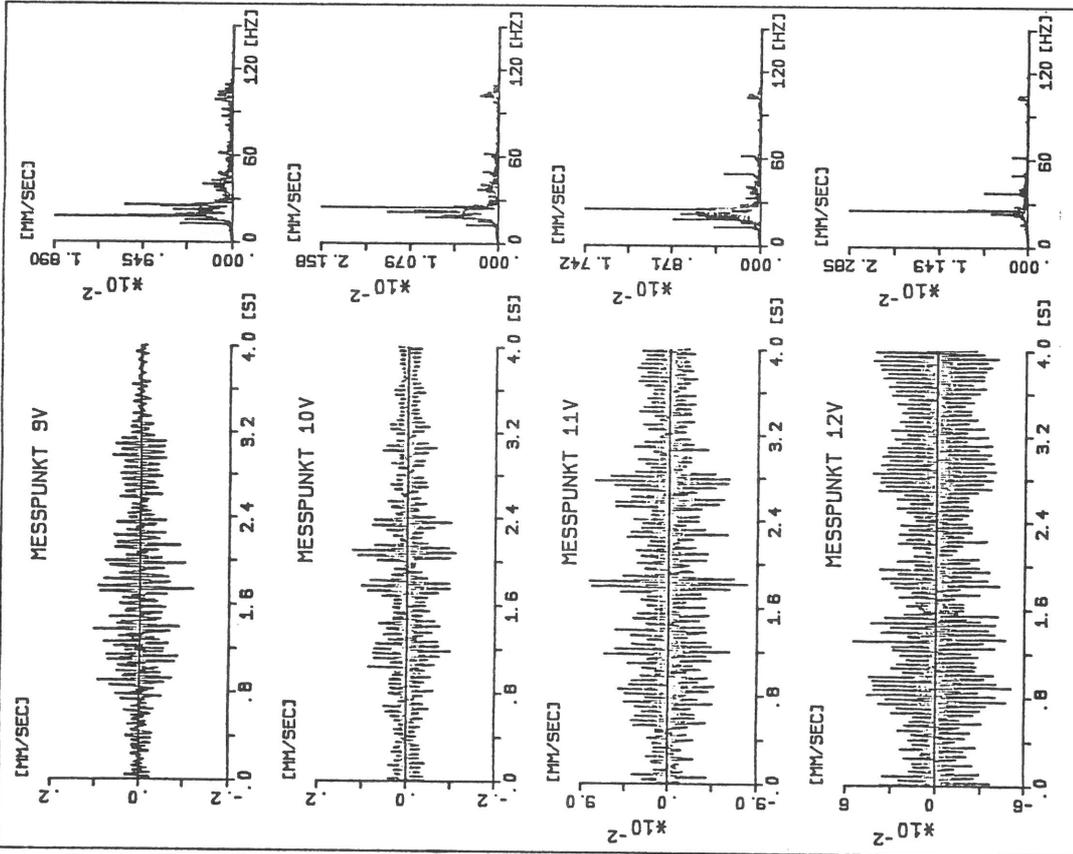
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENSTRASSE  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=220 KM/H



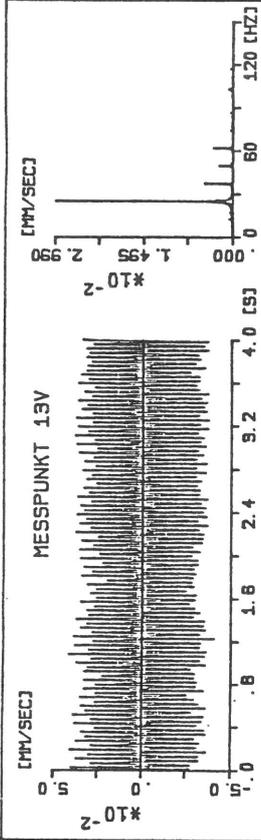
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENSTRASSE  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=220 KM/H



B A M BERLIN  
LABOR 2.92  
BRUNNEN/PAFOLK  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

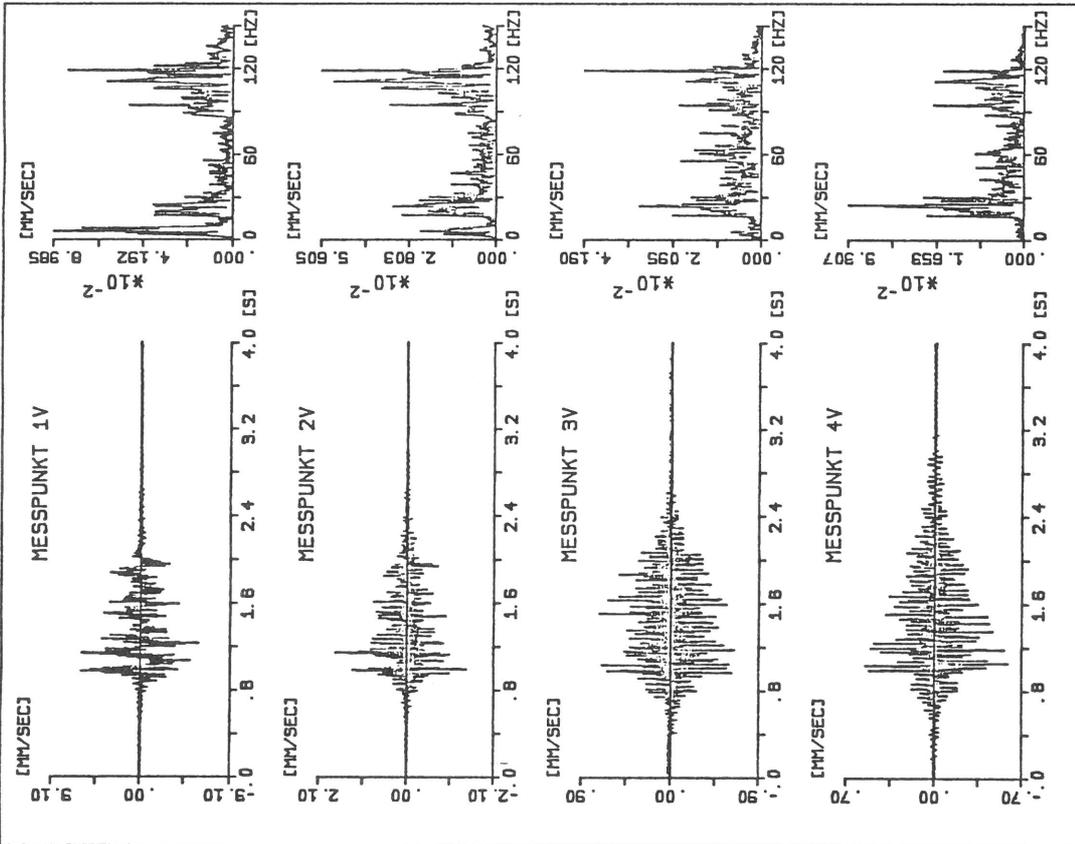
ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=220 KM/H



B A M BERLIN  
LABOR 2.92  
BRUNNEN/PAFOLK  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

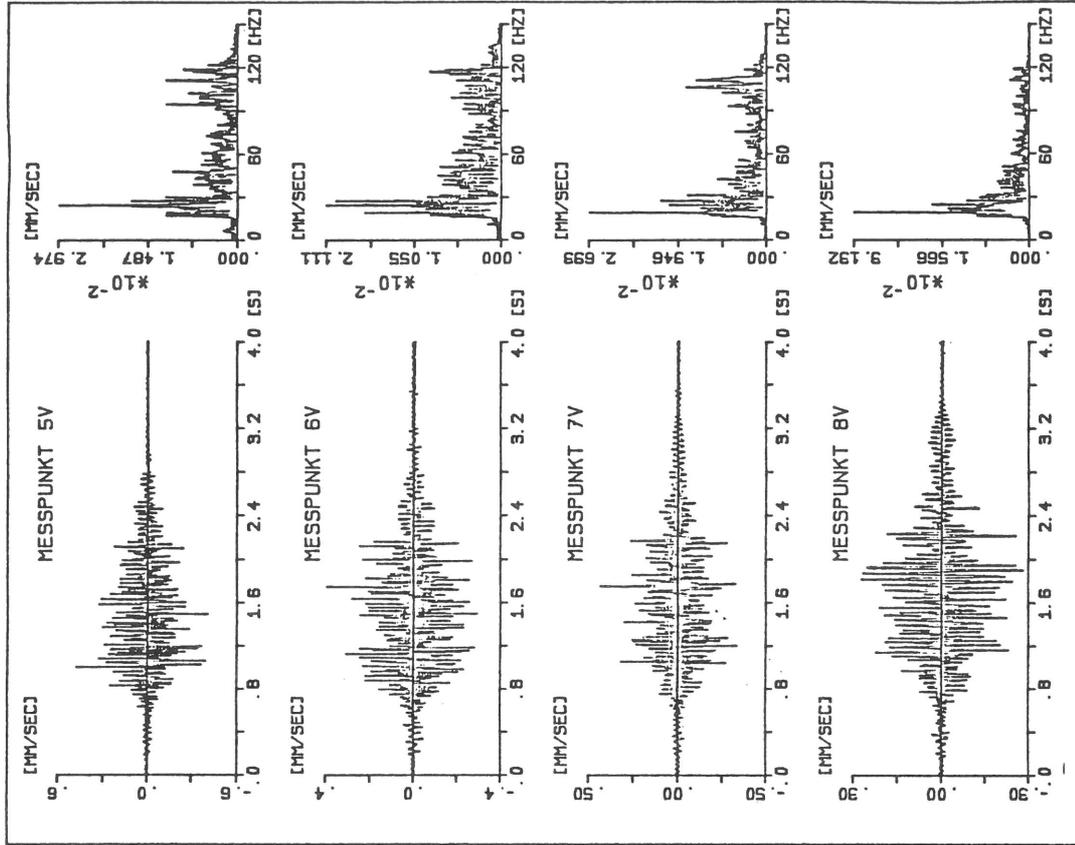
ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=220 KM/H

BLATT NR. 12



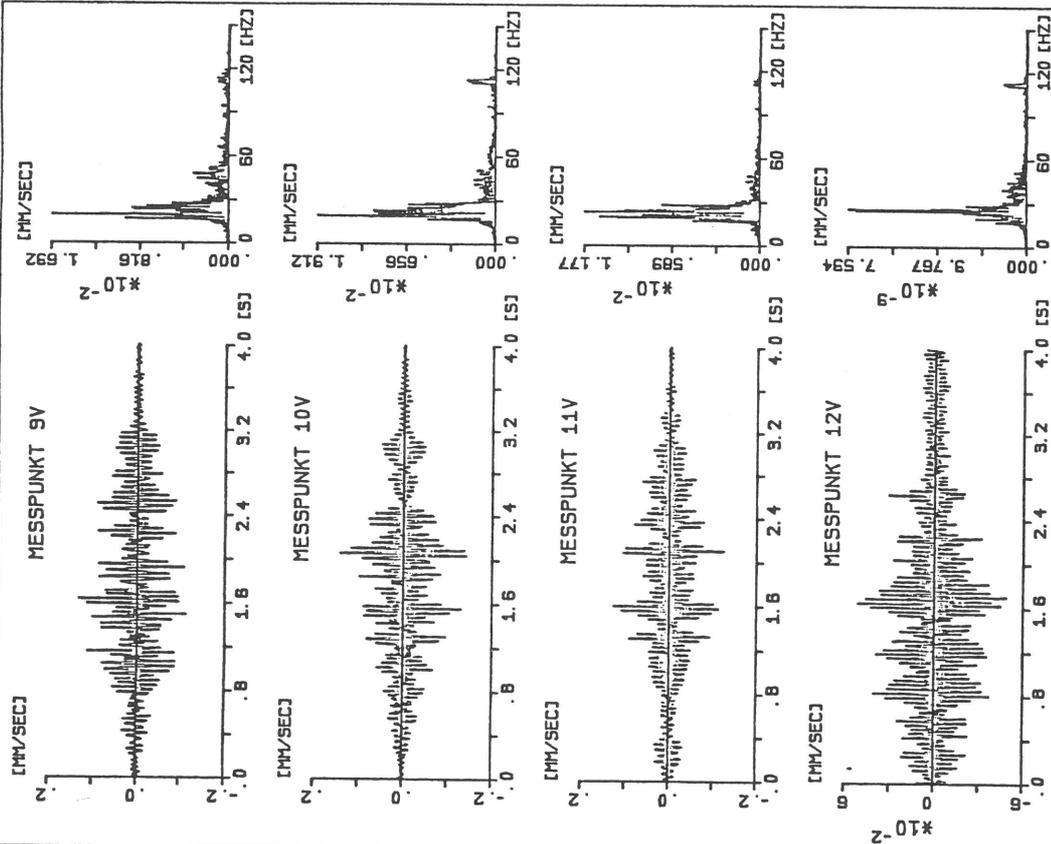
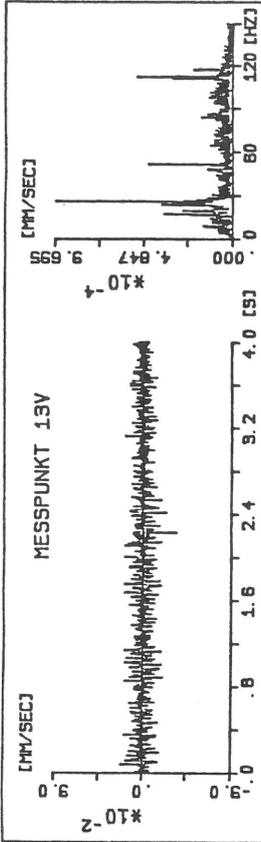
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENSTRASSE  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=240 KM/H



B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENSTRASSE  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=240 KM/H



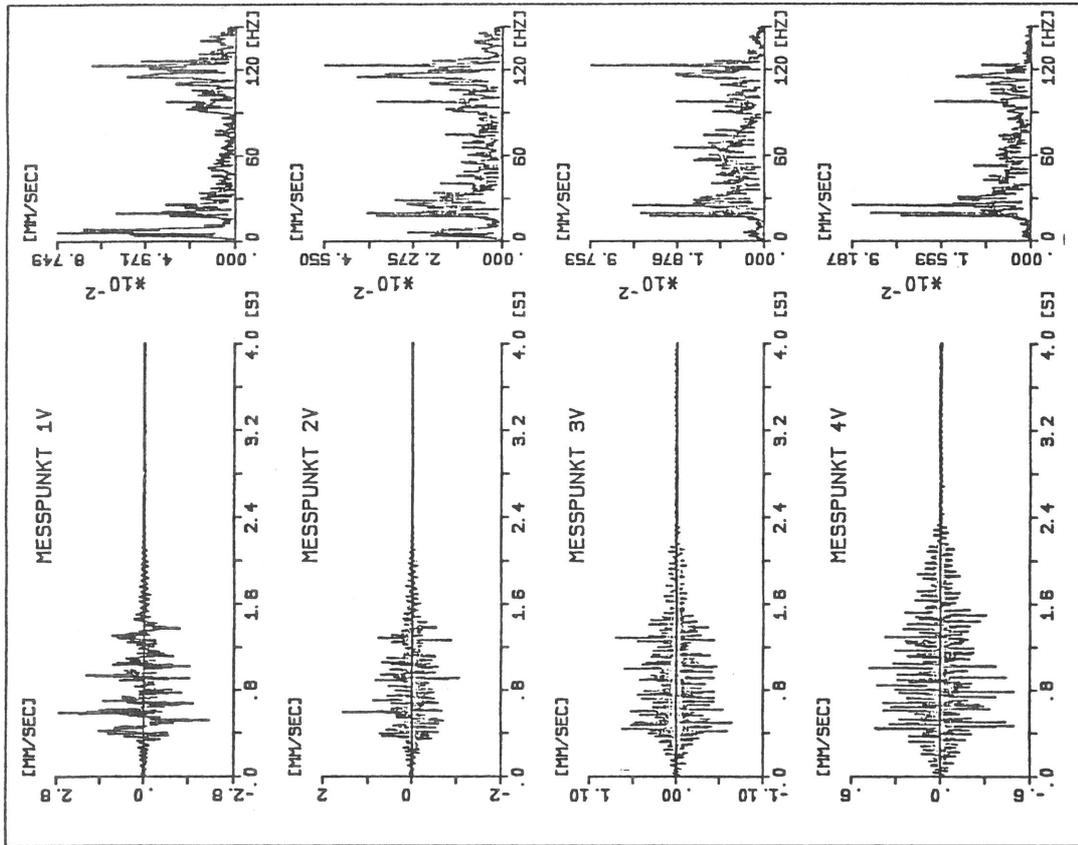
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENPARK  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFARTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=240 KM/H

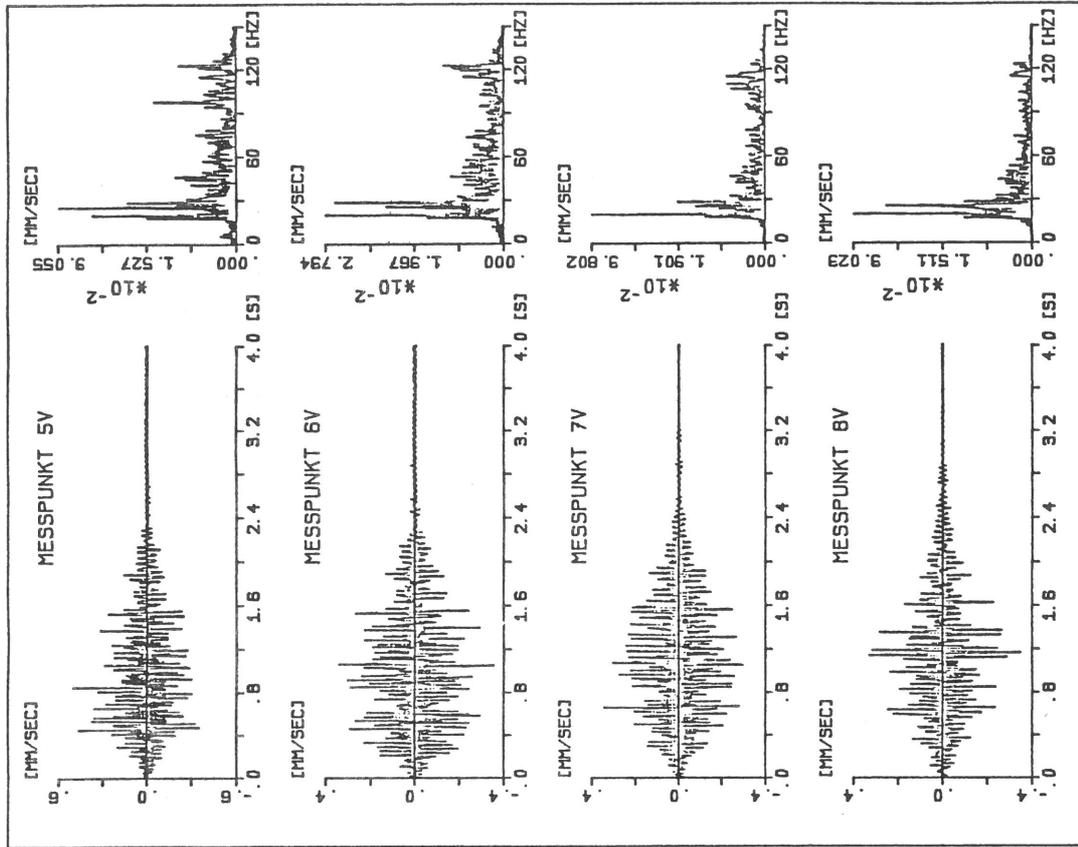
BLATT NR. 16

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENPARK  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

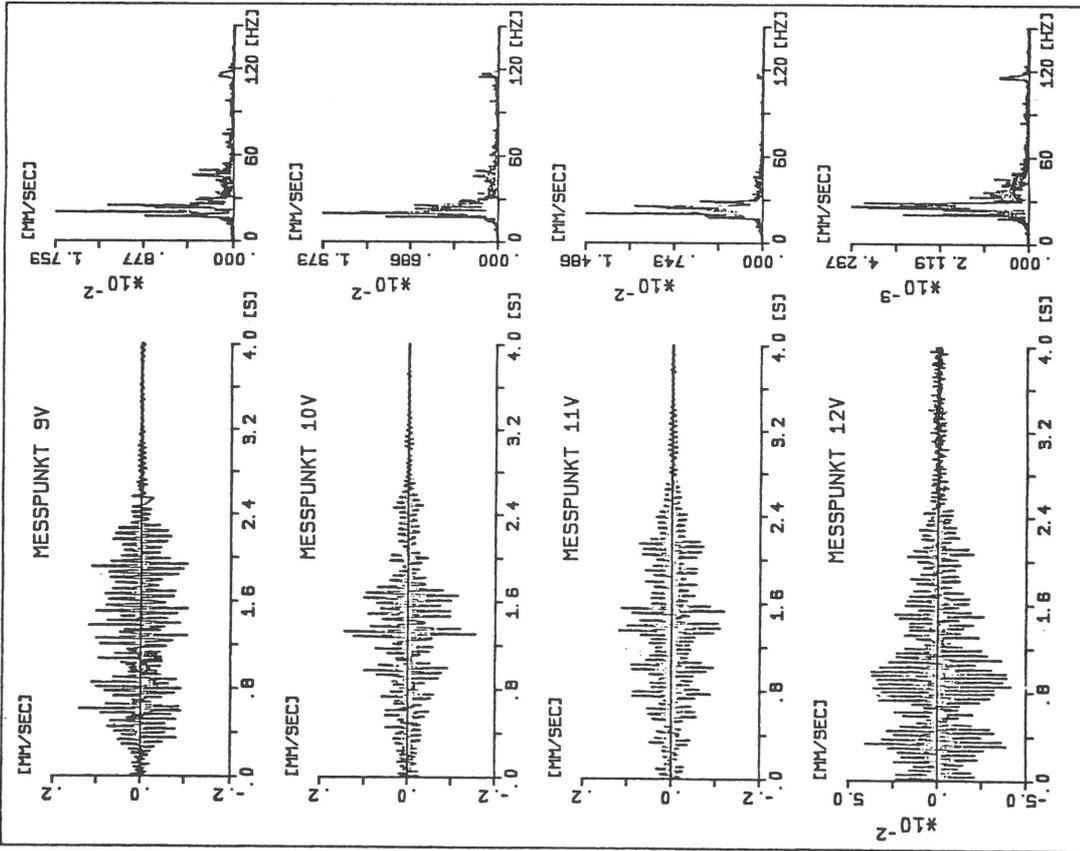
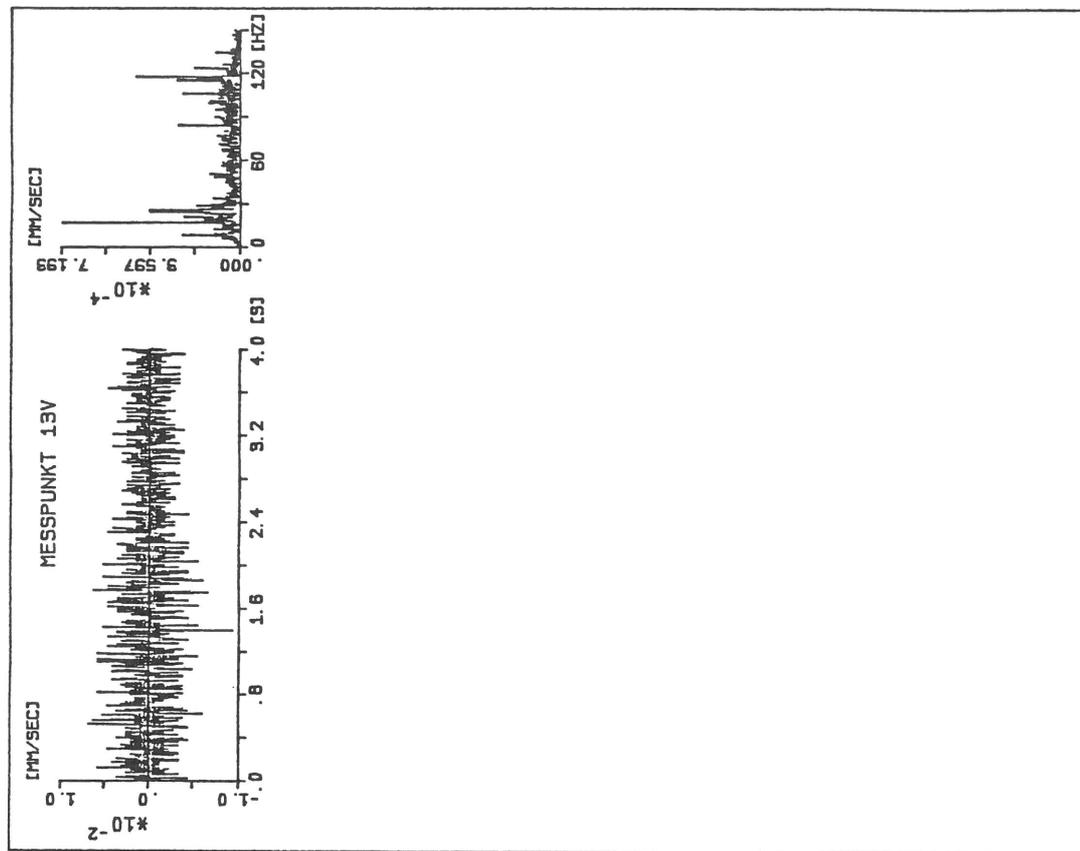
ICE VERSUCHSFARTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=240 KM/H



B A M BERLIN LABOR 2.32 BRUNNENSTRASSE ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ	ICE VERSUCHSFahrTEN 10. 9. 1986 NEUBRAUSTRECKE BEI WUERZB V=250 KM/H
--	--



B A M BERLIN LABOR 2.32 BRUNNENSTRASSE ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ	ICE VERSUCHSFahrTEN 10. 9. 1986 NEUBRAUSTRECKE BEI WUERZB V=250 KM/H
--	--



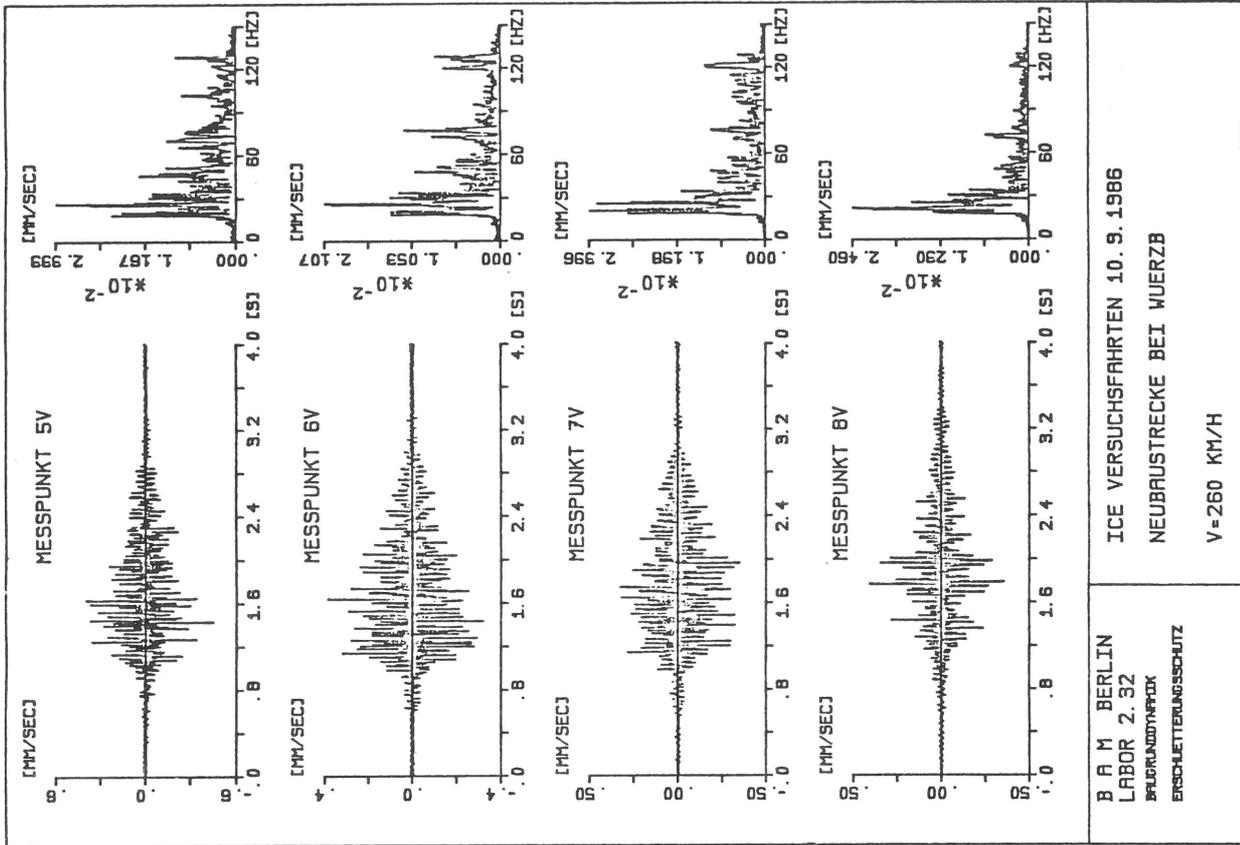
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BÜROUNTERKRIEG  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=250 KM/H

BLATT NR. 20

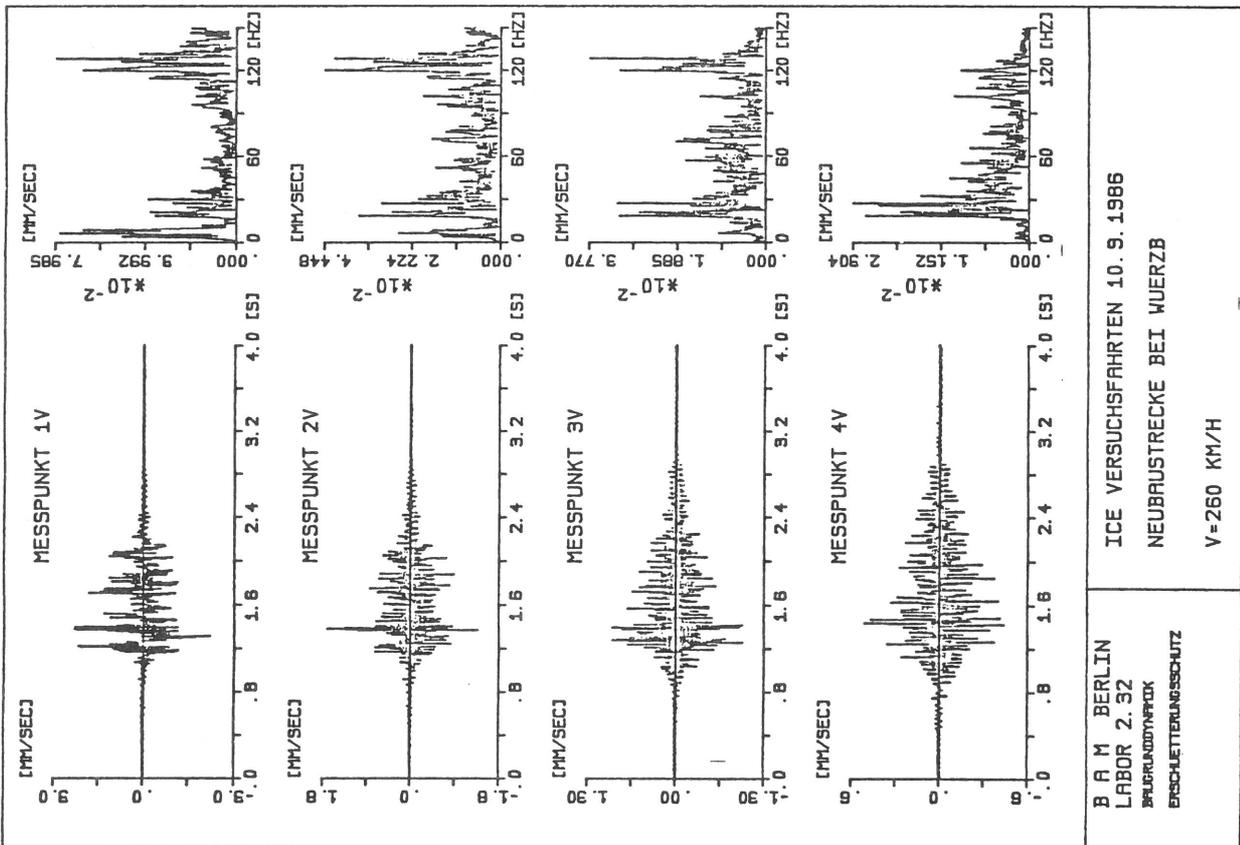
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BÜROUNTERKRIEG  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=250 KM/H



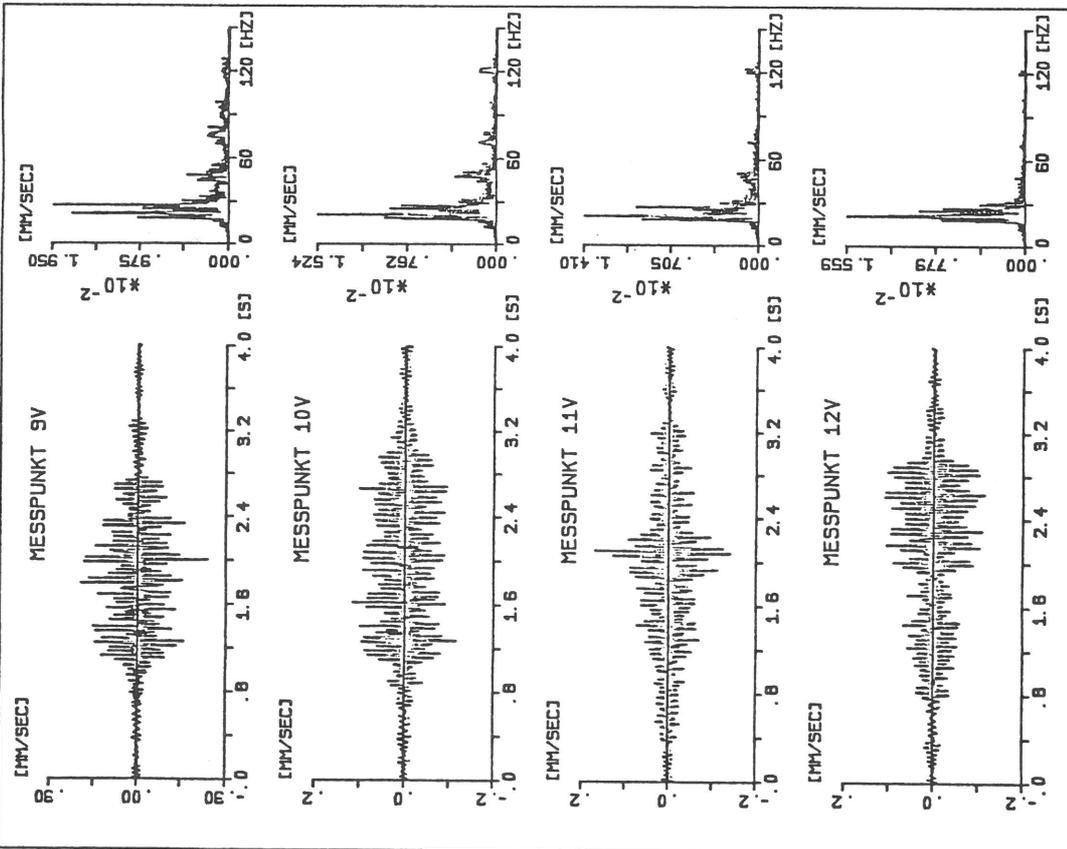
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENSTRASSE  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=260 KM/H



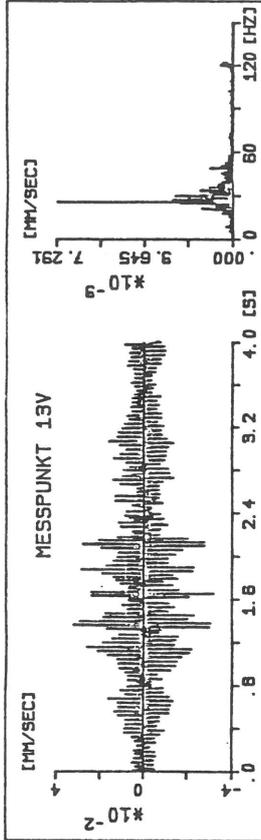
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BRUNNENSTRASSE  
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10.9.1986  
NEUBAUSTRECKE BEI WUERZB  
V=260 KM/H



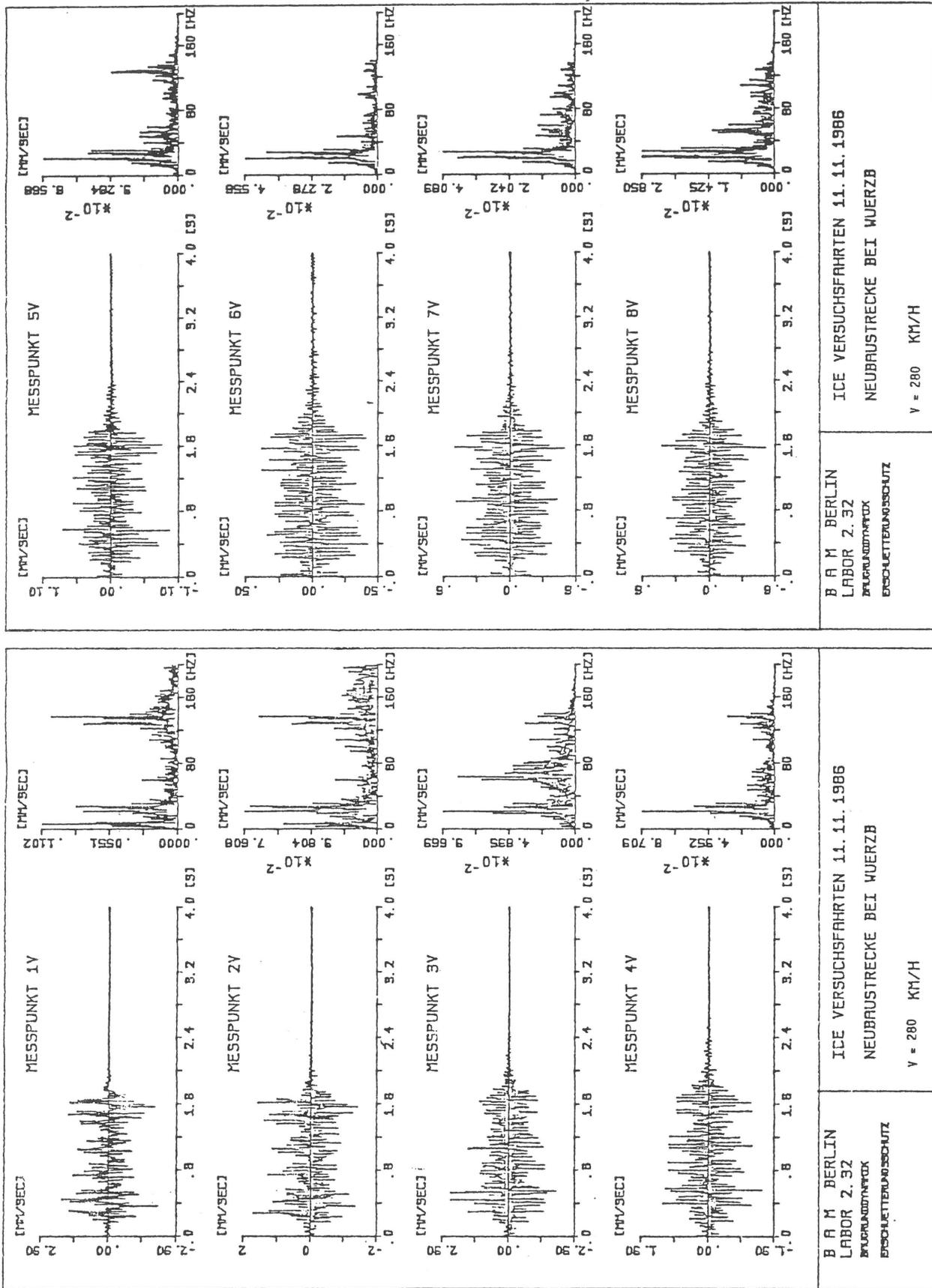
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BÜROKONTAKT  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10. 9. 1986  
NEUBRAUSTECKE BEI WUERZB  
V=260 KM/H

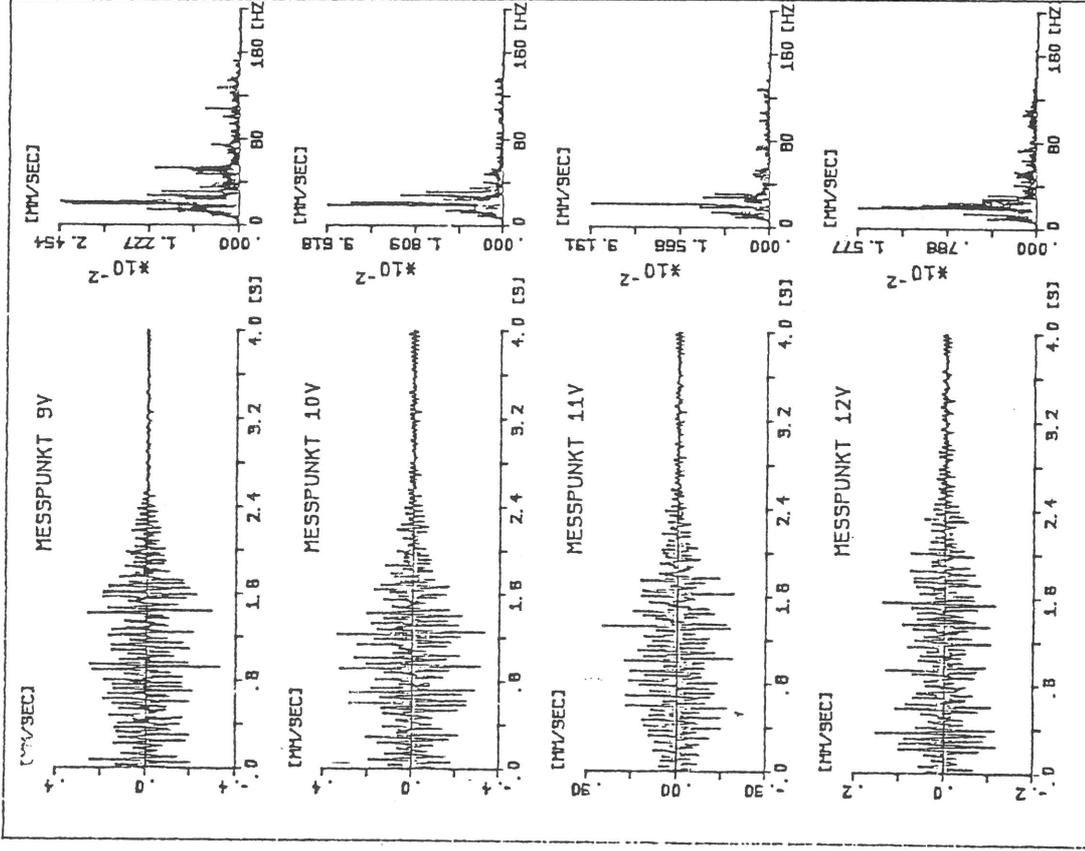


B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BÜROKONTAKT  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFAHRTEN 10. 9. 1986  
NEUBRAUSTECKE BEI WUERZB  
V=260 KM/H



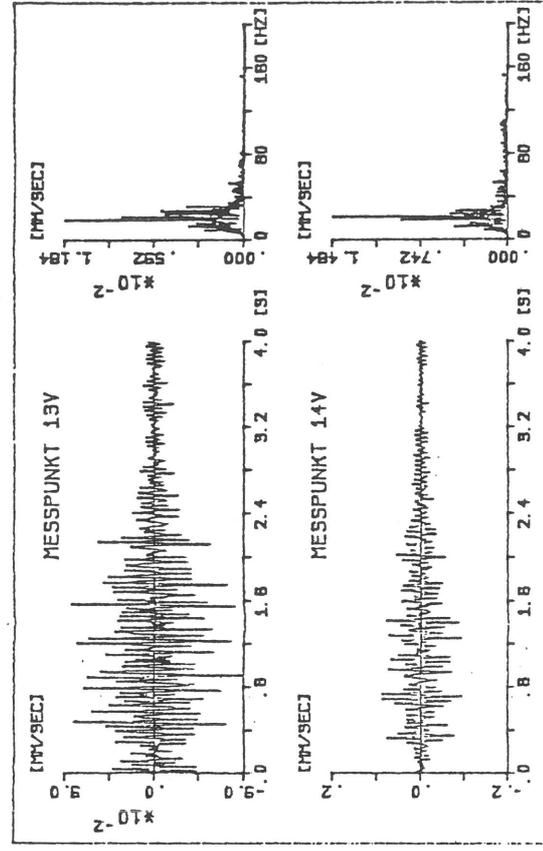
Anlage C2 - Schwinggeschwindigkeiten in der Umgebung, 2. Meßserie



B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
FLUGRUNDSTROCK  
ERSCUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFahrTEN 11. 11. 1988  
NEUBRAUSTRECKE BEI WUERZB

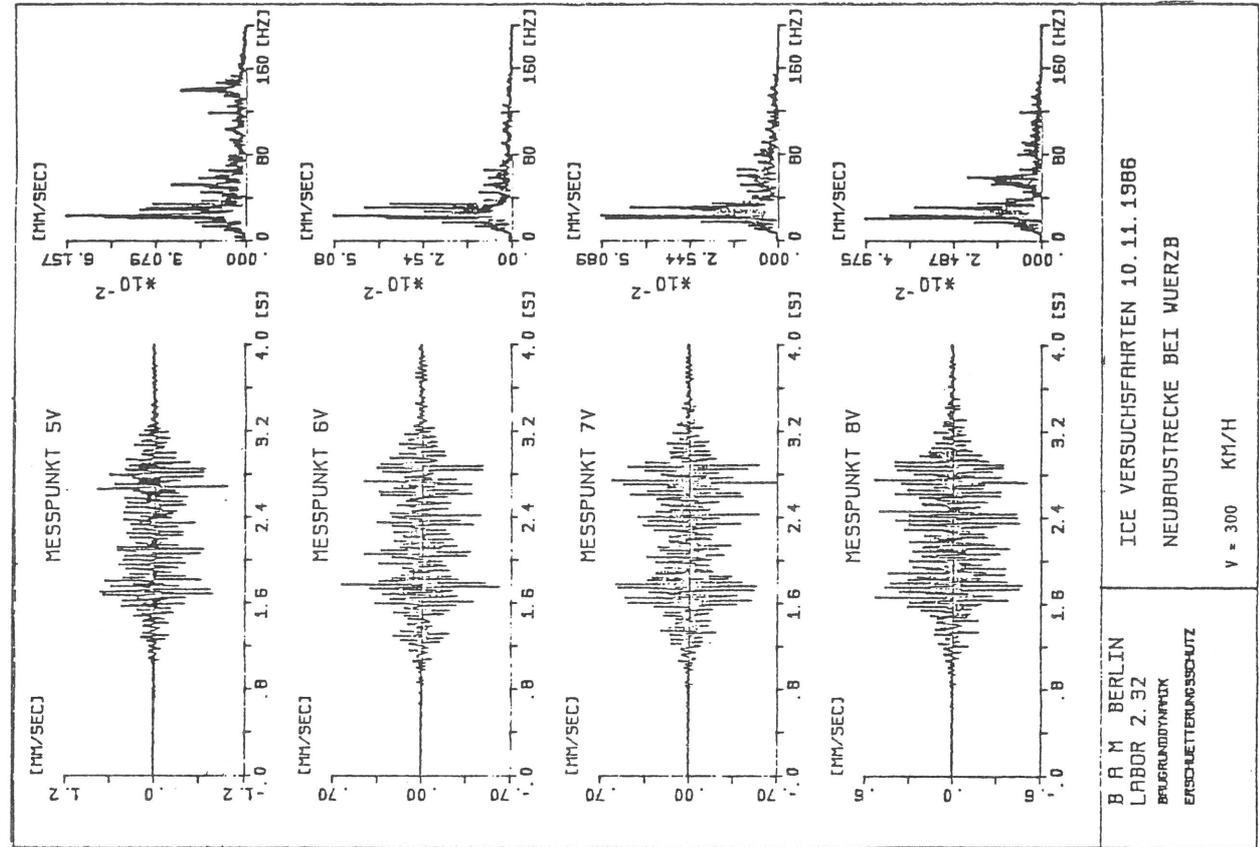
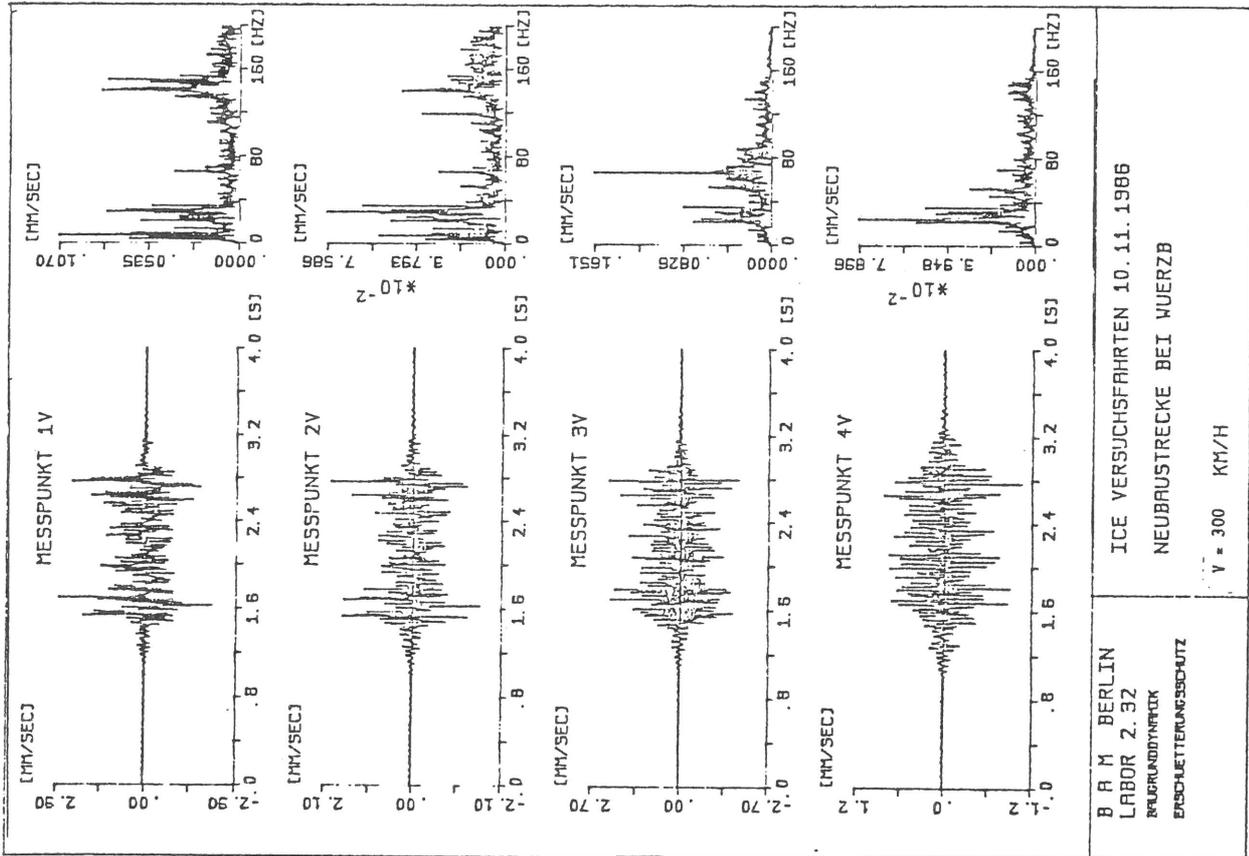
V = 280 KM/H



B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
FLUGRUNDSTROCK  
ERSCUTTERUNGSSCHUTZ

ICE VERSUCHSFahrTEN 11. 11. 1988  
NEUBRAUSTRECKE BEI WUERZB

V = 280 KM/H







# Teil IV Nachrechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik und der Erschütterungen in der Umgebung

---

Inhalt	Seite
<b>Teil IV Nachrechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik und der Erschütterungen in der Umgebung</b>	<b>137</b>
1. Das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Umgebung	138
2. Elemente der Berechnung von Fahrzeug, Fahrweg, Untergrund und Erschütterungsausbreitung	141
2.1 Die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit	141
2.1.1 Ergebnisse für eine Schwelle, ein Schottergleis und eine feste Fahrbahn	141
2.1.2 Einfluß der diskreten Schienenstützpunkte und der Fahrgeschwindigkeit	144
2.2 Berechnung der dynamischen Last aus der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik	148
2.2.1 Das Fahrzeugverhalten	148
2.2.2 Die Kopplung von Fahrzeug und Fahrweg-Untergrund unter Berücksichtigung der Schwellenabstandsanregung (Parametererregung)	147
2.2.3 Die dynamische Last bei hohen Fahrgeschwindigkeiten	151
2.3 Die Erschütterungsausbreitung bei bewegten Lasten	153
2.3.1 Die Lastverteilung durch die Schwellen	153
2.3.2 Ausbreitungsgesetze für eine Punktlast	155
2.3.3 Die Simulation von Zugvorbeifahrten	155
2.4 Die Fahrwegverformung bei bewegten Lasten	157
2.4.1 Das klassische Fahrwegmodell ohne Untergrundkopplung — der gebettete Balken	158
2.4.2 Der Einfluß der Untergrundkopplung bei hohen Fahrgeschwindigkeiten	160
2.4.3 Diskussion „kritischer“ Fahrgeschwindigkeiten	167
3. Nachrechnung der Versuchsfahrten des Hochgeschwindigkeitszuges Intercity Experimental (ICE) und Vergleich mit den Meßergebnissen	170
3.1 Die Fahrwegbewegungen	170
3.2 Die Erschütterungen in der Umgebung	173
3.3 Der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit	179
4. Schlußfolgerungen aus den Meß- und Rechenergebnissen	181
4.1 Schwingungsmessungen an Schienenverkehrswegen — charakteristische Auswirkungen bewegter Lastgruppen	181
4.2 Erschütterungen durch Schienenverkehr, insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten	182
4.3 Der Einfluß der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik	183
4.4 Anwendung der Ergebnisse: Ursachenklärung, Optimierung und Prognose	181
Anhang A	
Rechenergebnisse zur Erschütterungsausbreitung	185

---

## 1. Das Gesamtsystem Fahrzeug - Fahrweg - Untergrund - Umgebung

Von den dynamischen Vorgängen bei einer Zugvorbeifahrt sind alle Komponenten Fahrzeug, Fahrweg, Untergrund und Umgebung betroffen. Dabei handelt es sich nicht um eine reine Wirkungskette vom Fahrzeug über Fahrweg und Untergrund zur Umgebung, vielmehr beeinflussen sich einzelne Komponenten gegenseitig. Es gibt an einigen Stellen Rückwirkungen, z. B. vom Fahrweg auf das Fahrzeug, oder ganz allgemein Wechselwirkungen zwischen den Komponenten, die insbesondere für die Erschütterungsproblematik wesentlich sind. Während bei anderen Fragestellungen, z. B. bei der Laufdynamik, die wesentlich durch die Kontaktgeometrie und -physik (Schienenprofil und Schräglaufräfte) bestimmt wird, oder bei der Fahrweg- (Schienen-) belastung, die hauptsächlich vom Zuggewicht (den Achslasten) bestimmt ist, die Wechselwirkungen des Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Systems mit etwas größerer Berechtigung oft vernachlässigt werden, soll in diesem Bericht gerade durch die umfassende Berücksichtigung aller Systemkopplungen eine bessere Einsicht in die Entstehung der Schienenverkehrserschütterungen gewonnen werden.

Zunächst sollen die Verknüpfungen der Komponenten Fahrzeug, Fahrweg, Untergrund und Umgebung zum Gesamtsystem am Bild 1 erläutert werden. Als Schwingungsanregung sind oben links äußere auf das Fahrzeug wirkende Kräfte  $p_z$  (z. B. Gewichtskräfte, aber auch Maschinenkräfte) sowie Störwege  $s$  (Gleislagefehler, Schienenunebenheiten, Radunrundheiten) als Eingangsgrößen des Gesamtsystems dargestellt. Die dritte Anregung ist im Fahrweg und Untergrund verborgen und beruht auf der Ortsabhängigkeit der Fahrwegeigenschaften durch die diskrete Lagerung auf einzelnen Schwellen und auf zufälligen Schwankungen der Untergrund- (Schotterbett-) eigenschaften. Die Komponenten Fahrzeug und Fahrweg stellen sich formal in gleicher Weise dar: Sie reagieren auf eine Kraft- und eine Fußpunktanregung mit Verschiebungen und Auflagerkräften. Für das Fahrzeug sind die Anregungen die äußeren Kräfte  $p_z$  und die Verschiebungen  $u_R$  der Radaufstandspunkte und die Antworten sind die Fahrzeugbewegungen  $u_z$  und die Rad/Schiene-Kontaktkräfte  $p_W$ . Diese Kontaktkräfte sowie die Untergrund- (Schwellen-) verschiebungen  $u_U$  sind die Eingangsgrößen für den Fahrweg (Schienen und Schwellen), der darauf mit Schienenverschiebungen  $u_W$  an den Radaufstandspunkten und Auflagerkräften  $p_U$  (unter den Schwellen) reagiert. Bei der Kopplung Fahrzeug - Fahrweg ist zu beachten, daß sich die Radverschiebungen  $u_R$  und die zugehörigen Schienenverschiebungen  $u_W$  um den Störabstand  $s$  unterscheiden. Der Untergrund reagiert auf die (Schwellen-) Kräfte  $p_U$  mit den (Schwellen-) verschiebungen  $u_U$ . Schließlich erzeugen die Untergrundbelastungen  $p_U$  Wellen, die sich durch den Boden ausbreiten und auch in der Umgebung zu Verschiebungen (Erschütterungen)  $u_M$  führen.

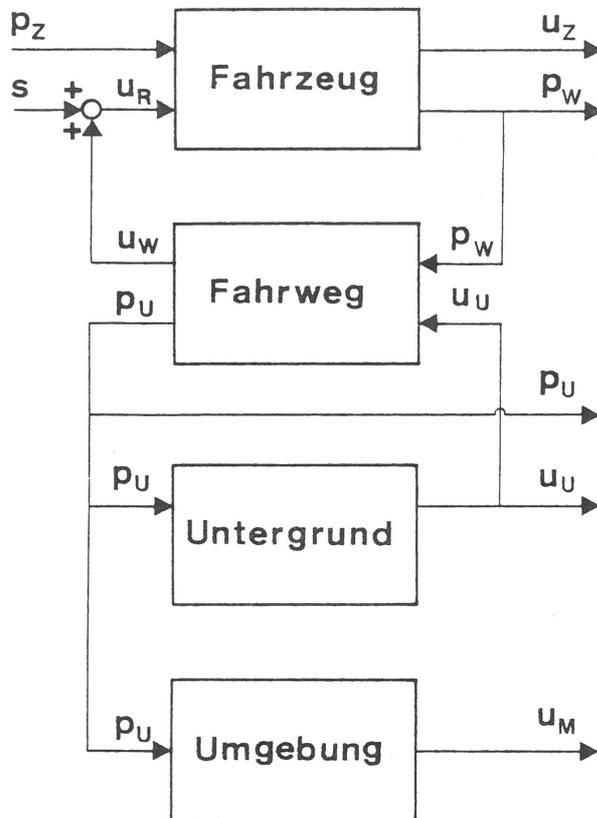


Bild 1  
Das Gesamtsystem Fahrzeug-  
Fahrweg-Untergrund-Umgebung

Das Verknüpfungsdiagramm (Bild 1) ist sehr allgemein, da noch keinerlei Einschränkungen hinsichtlich bestimmter Fahrzeug-, Fahrweg- oder Untergrundmodelle getroffen wurden. Die angegebenen Größen können Skalare, Vektoren oder auch Ortsfunktionen einer Kontinuumsbeschreibung sein und die Systemabbildungen (Ein- Ausgangsbeziehungen) sind allgemein Funktionale zwischen Zeitfunktionen. Auf dieser Ebene ist eine Verknüpfung sehr verschiedenartiger Modelle möglich. So können sehr detaillierte Fahrzeugberechnungen mit dem Mehrkörperdynamikprogramm MEDYNA (BAM-Forschungsvorhaben /14/) und detaillierte Untergrundberechnungen auf der Basis der Halbraumtheorie (BAM-Forschungsvorhaben /22/) miteinander verbunden werden. Man sollte aber bei jeder Aufgabenstellung nach dem Prinzip "so einfach wie möglich und nur so detailliert wie nötig" verfahren, um sich nicht in einer Vielzahl vermeintlicher Einflußgrößen zu verirren. So kann das Wesentliche zur Entstehung der Erschütterungen schon mit sehr einfachen Fahrzeugmodellen und einem realistischen, jedoch auf wenige Parameter konzentrierten Untergrundmodell erarbeitet werden. Große Sorgfalt muß dabei auf die richtige (nicht notwendigerweise detaillierte) Berücksichtigung der Steifigkeitsschwankungen des Fahrwegs (Parametererregung) gelegt werden.

Die Berechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik im Hinblick auf Erschütterungen in der Umgebung geschieht in mehreren Teilschritten (Bild 2): Zunächst wird die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit, das heißt der Zusammenhang zwischen den Radaufstandskräften  $p_w$  und den entsprechenden Schienenver-

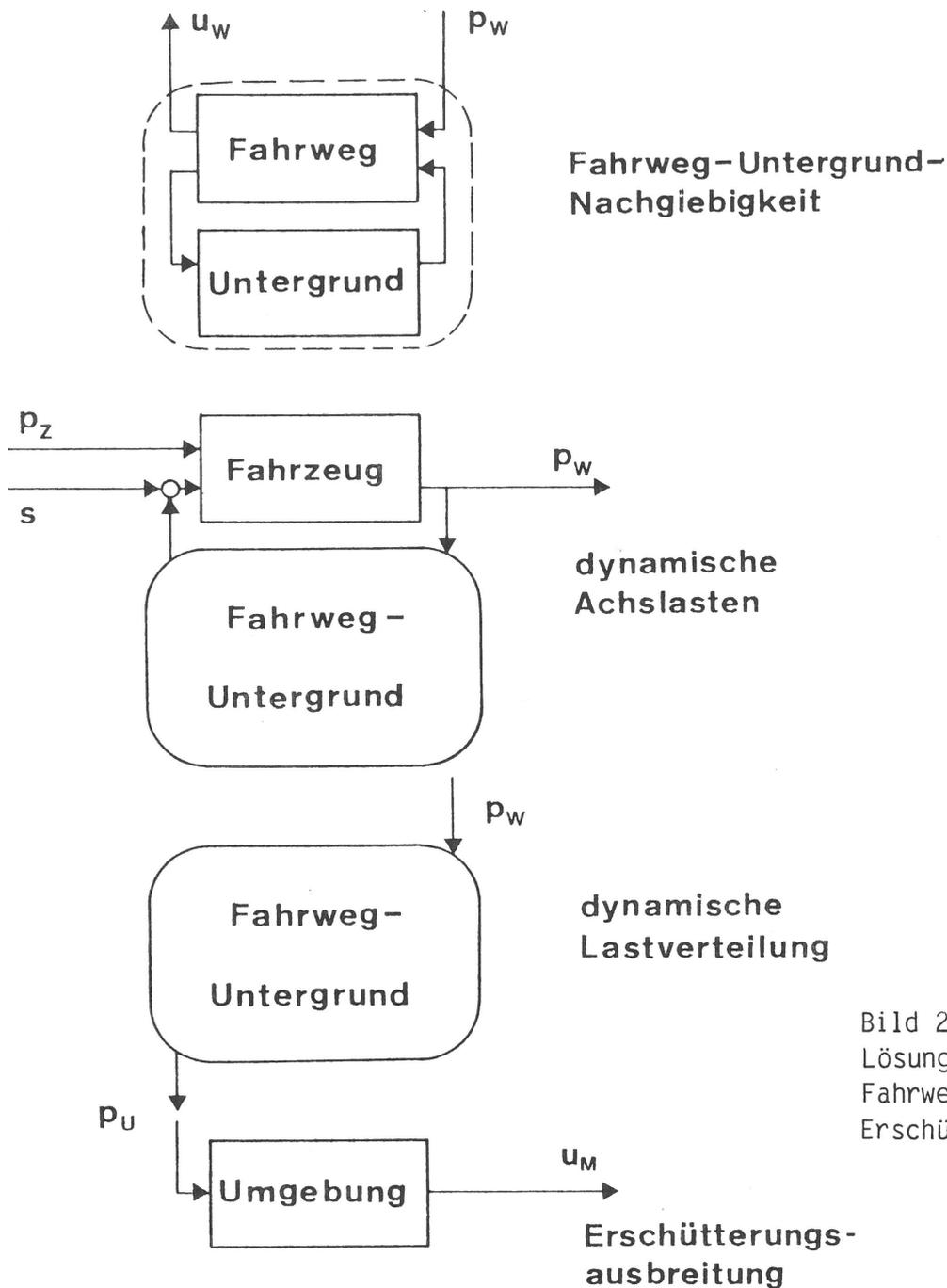


Bild 2  
Lösungsschritte zur Fahrzeug-  
Fahrweg-Untergrund-Dynamik und  
Erschütterungsausbreitung

schiebungen  $u_w$  berechnet, wobei auch die Nachgiebigkeitsunterschiede durch die diskrete Schienenauflagerung auf Einzelschwellen ermittelt werden. Diese Nachgiebigkeit wird an ein einfaches Fahrzeugmodell gekoppelt, mit dem dann die dynamischen Achslasten  $p_w$  bei vorgegebenen äußeren Kräften  $p_z$  oder Störwegen  $s$  berechnet werden. Diese dynamischen Achslasten  $p_w$  sind Ausgangspunkt für die Berechnung der Erschütterungsausbreitung. Dabei wird zunächst die dynamische Lastverteilung durch den Fahrweg berücksichtigt und schließlich die Schwingungen  $u_M$  in der Umgebung der Trasse berechnet.

Ergänzend werden auch die Schienen- und Schwellenbewegungen der Messungen mit einem kontinuierlichen Fahrwegmodell nachgerechnet, mit dem sowohl Untergrund- als auch Fahrgeschwindigkeitseinflüsse erfaßt werden können.

## 2. Elemente der Berechnung von Fahrzeug, Fahrweg, Untergrund und Erschütterungsausbreitung

### 2.1 Die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit

Als Modell für den Untergrund wird hier der homogene elastische Halbraum betrachtet. Der Fahrweg besteht aus starren oder elastischen Schwellen und elastischen Schienen. Zur Berechnung derartiger Struktur-Boden-Wechselwirkungsprobleme sind in der BAM verschiedene Rechenverfahren entwickelt worden, die auf den Punktlastlösungen des elastischen Halbraums (Rücker /20/) beruhen. Man kann, wie dies im BAM-Forschungsvorhaben /19/ geschehen ist, aus diesen Lösungen für eine harmonische Punktlast eine vollständig gekoppelte Steifigkeitsmatrix für eine Anzahl von starren Schwellen berechnen. Diese mit sehr feiner Diskretisierung aufwendig berechneten Steifigkeitsmatrizen sind in konzentrierter (dimensionsloser) Form für einen weiten (ebenfalls dimensionslosen) Frequenzbereich abgespeichert worden. Sie können zur Berechnung von Schienen beliebiger Steifigkeit und Schwellen beliebiger Masse auf einem Untergrund beliebiger Steifigkeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit verwendet werden. Diese "Substrukturmethode" erspart das wiederholte aufwendige Berechnen der Untergrundsteifigkeiten und ermöglicht so Parameterstudien bis in einen hohen Frequenzbereich (ca. 500 Hz) hinein, s. BAM-Forschungsvorhaben /22/.

Für die Erschütterungsproblematik genügt ein kleinerer Frequenzbereich bis 150 maximal 200 Hz. Die notwendigen Fahrweg-Untergrund-Berechnungen werden hier mit einer etwas gröberen aber ausreichenden Diskretisierung mit einer kombinierten Finite-Element- und Randelement-Methode (Auersch /9/) durchgeführt. Dabei werden alle Fahrwegkomponenten allgemein als elastische Strukturen mit der Finite-Element-Methode berechnet. So können neben elastischen Schwellen (- die sich kaum anders als starre Schwellen verhalten dürften -) auch elastische Fahrwege wie etwa die "Feste Fahrbahn" berechnet werden. Auch die Berechnung von Eisenbahntunneln ist durch Einbeziehung der Vollraumlösung in die Randelementmethode möglich.

#### 2.1.1 Ergebnisse für eine Schwelle, ein Schottergleis und eine feste Fahrbahn

Die Fahrweg-Untergrund-Systeme sind in Anlehnung an die Situation, die bei den Messungen auf der Neubaustrecke vorgefunden wurde, ausgewählt worden. Die Untergrundeigenschaften sind:

Scherwellengeschwindigkeit	$v_s = 270 \text{ m/s,}$
Schubmodul	$G = 1,3 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2,$
Massendichte	$\rho = 1,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3,$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,33.$

Es wurde das Schienenprofil UIC 60 gewählt mit

Querschnittsfläche	$F = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2,$
Flächenträgheitsmoment	$J = 3,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4,$
Elastizitätsmodul	$E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2,$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,15,$
Massendichte	$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3.$

Die Schwellen sind Betonschwellen mit

Länge	$b = 2,6 \text{ m},$
Breite	$a = 0,26 \text{ m},$
Höhe	$h = 0,2 \text{ m},$
Massendichte	$\rho = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3,$
Elastizitätsmodul	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2,$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,15.$

Die feste Fahrbahn wird hier grob als 0,2 m dicke und 2,6 m breite Betonplatte modelliert.

Die berechneten vertikalen Nachgiebigkeiten sind in Bild 3 als Funktion der Frequenz nach Betrag und Phase dargestellt. Erwartungsgemäß ergibt eine vertikale Belattung der Einzelchwelle die größten Verschiebungen. Der Nachgiebigkeitsfrequenzgang unterscheidet sich nicht wesentlich von einem Ein-Massen-Schwinger mit starker Dämpfung ( $D = 0,7 - 1$ ) und hoher Eigenfrequenz ( $f_0 \approx 200 \text{ Hz}$ ). Wird die vertikale Belastung beim Schottergleis durch die Schienen auch auf Nachbarschwellen verteilt, so ergeben sich kleinere Verschiebungen. Der Steifigkeitszuwachs von einer Schwelle zum Schottergleis ist allerdings deutlich geringer, als von einer Parallelschaltung der Untergrundfedern zu erwarten wäre. Hier wirkt sich die Kopplung der Schwellen durch den Untergrund aus: Die Nachbarschwellen sind auch schon ohne Schienenaufgabe aufgrund der Belastung der Einzelchwelle verschoben. Die Schiene bewirkt nur zusätzliche kleinere Verschiebungen mit entsprechenden kleineren "Federkräften". Diese Untergrundkopplung ist auch im Vergleich zu dynamischen Messungen ausführlich untersucht worden /19/, /21/. Die feste Fahrbahn schließlich zeichnet sich durch die kleinsten Verschiebungen und eine größere Dämpfung (größere Phase) aus, die sich aufgrund der größeren Auflagefläche auf dem Untergrund ergibt.

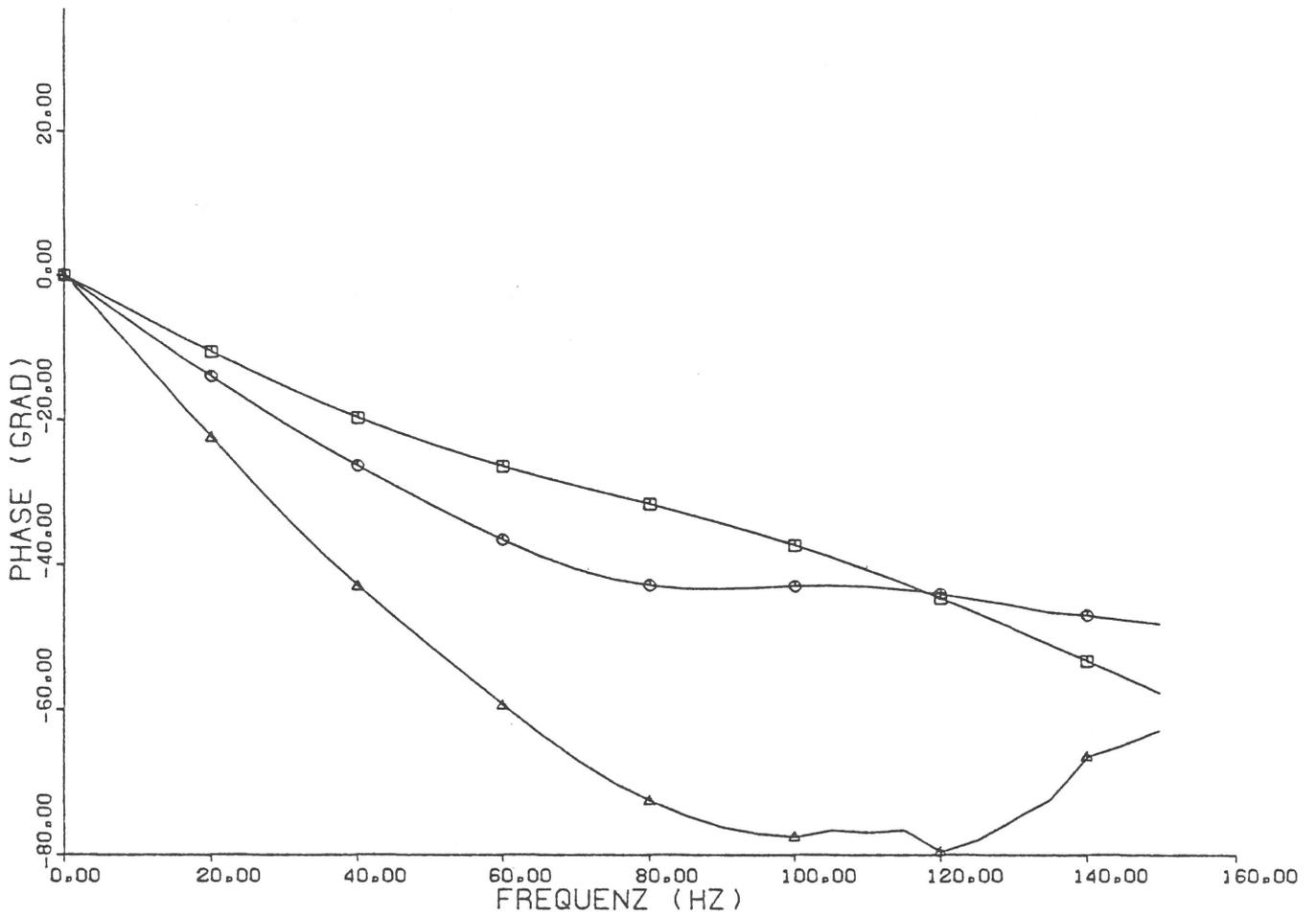
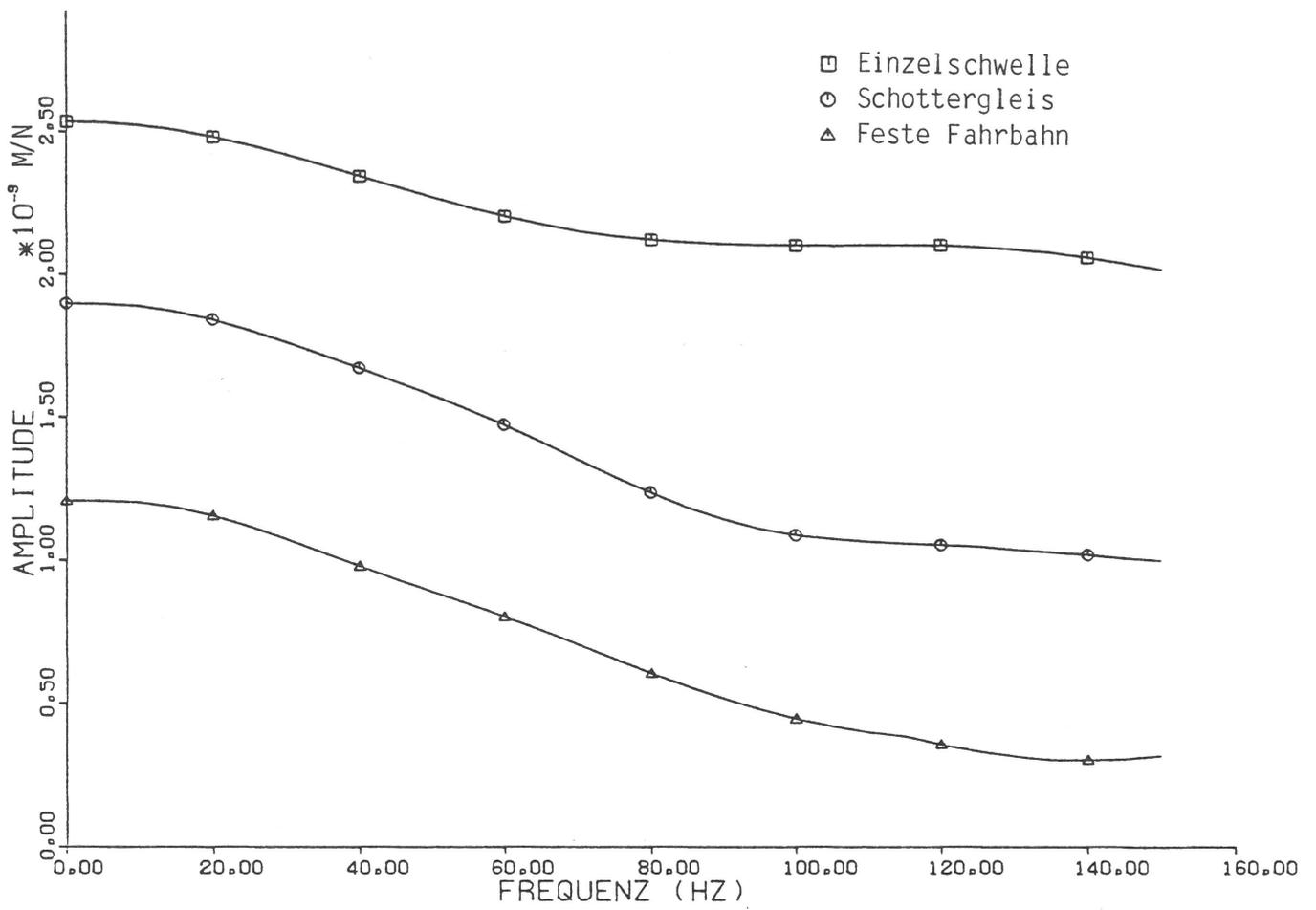


Bild 3  
Die Nachgiebigkeit verschiedener Fahrweg-Untergrund-Systeme

## 2.1.2 Einfluß der diskreten Schienenstützpunkte und der Fahrgeschwindigkeit

Bei den vorangehenden Berechnungen der Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeiten greift die vertikale Last an der Schiene über der Schwelle an. In Bild 4 sind nun zum Vergleich auch die Nachgiebigkeiten gezeigt, wenn die Last zwischen zwei Schwellen angreift. Die Nachgiebigkeit ist im Schwellenfach (zwischen den Schwellen) etwas größer als direkt über der Schwelle und die Dämpfung (Phase) ist etwas geringer. Für die Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik ist insbesondere die Nachgiebigkeitsdifferenz bei  $f = 0$  Hz (für die statischen Lasten) von Interesse. Die zusätzliche Verschiebung  $du$  bei Laststellung zwischen den Schwellen beträgt

$$du = 0,16 \cdot 10^{-9} \text{ m} \quad (\text{bei } p = 1 \text{ N})$$

und bezogen auf den Mittelwert der Nachgiebigkeit  $F$  ist die reguläre Nachgiebigkeitsschwankung des Schwellengleises

$$\frac{dF}{F} = \frac{0,16 \cdot 10^{-9}}{1,98 \cdot 10^{-9}} = 8,1 \text{ \%}.$$

Dieser Wert gilt für die am Meßort vorgefundene Bodensteifigkeit, den Schwellenabstand  $d = 0,6$  m und die Schiene UIC 60.

(Zur Ergänzung sollen hier auch die Werte für die Schiene S 49 bei etwas steiferem Untergrund -  $v_s = 300$  m/s - aufgeführt werden:

$$du = 2,0 \cdot 10^{-9} - 1,7 \cdot 10^{-9} = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ m},$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{0,3 \cdot 10^{-9}}{1,85 \cdot 10^{-9}} = 16 \text{ \%}.$$

Die Wegdifferenz  $du$  entspricht übrigens der Verschiebung  $u$  der im Schwellenabstand beidseitig eingespannten Schiene

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{192} \frac{pd^3}{EJ} = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ m} \quad (\text{S 49}) \\ &= 0,18 \cdot 10^{-9} \text{ m} \quad (\text{UIC 60}), \end{aligned}$$

so daß man - zumindest für die hier zugrundeliegenden relativ steifen Böden - einen Zusammenhang

$$du \sim \frac{1}{EJ}$$

vermuten könnte.)

Als zweites soll nun in diesem Abschnitt der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit betrachtet werden. Im Vorgriff auf die Ergebnisse des Abschnitts 2.4 (kontinuierliche Gleismodelle) läßt sich sagen, daß die Fahrgeschwindigkeit einen erkennbaren Einfluß auf die Biege-

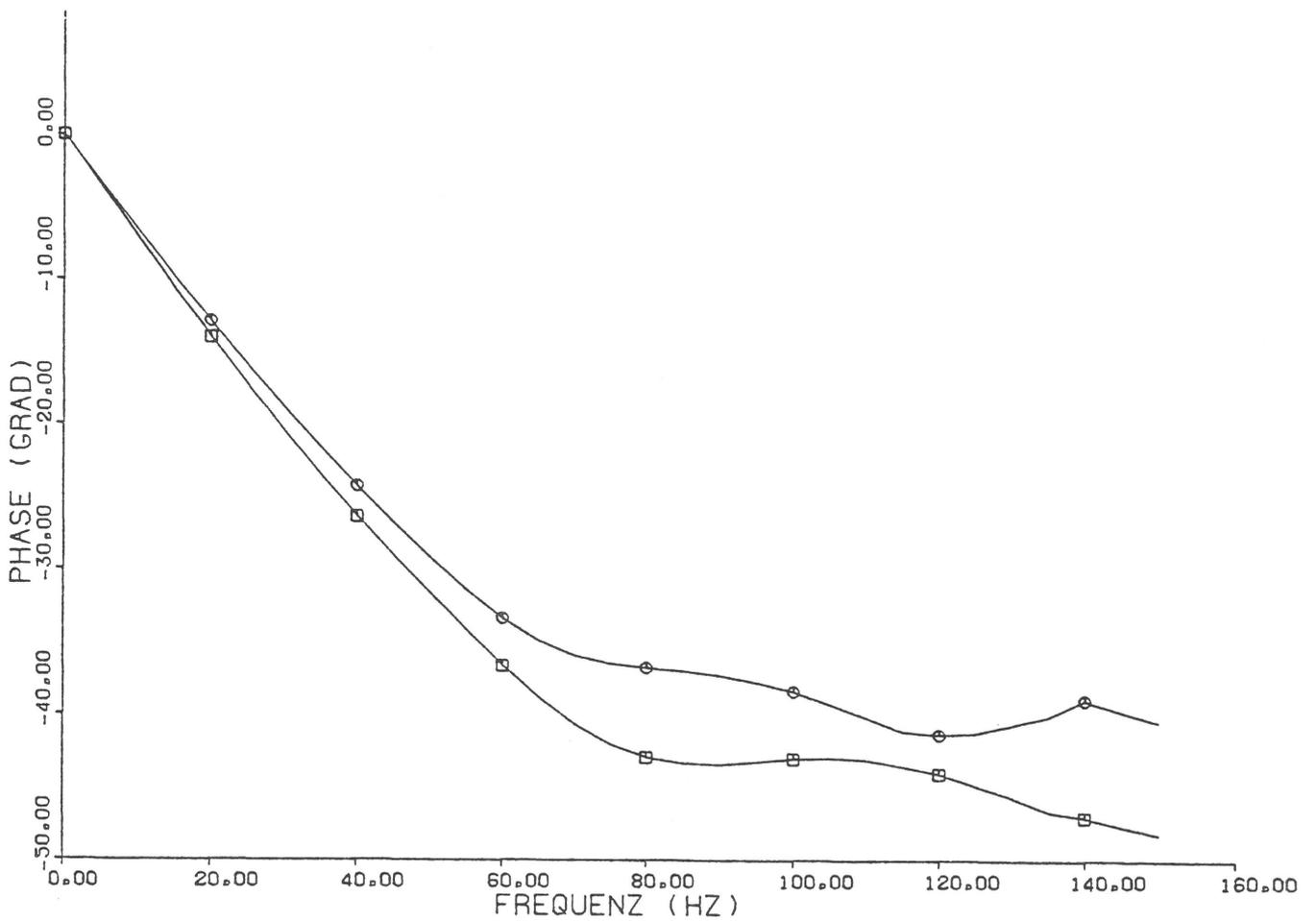
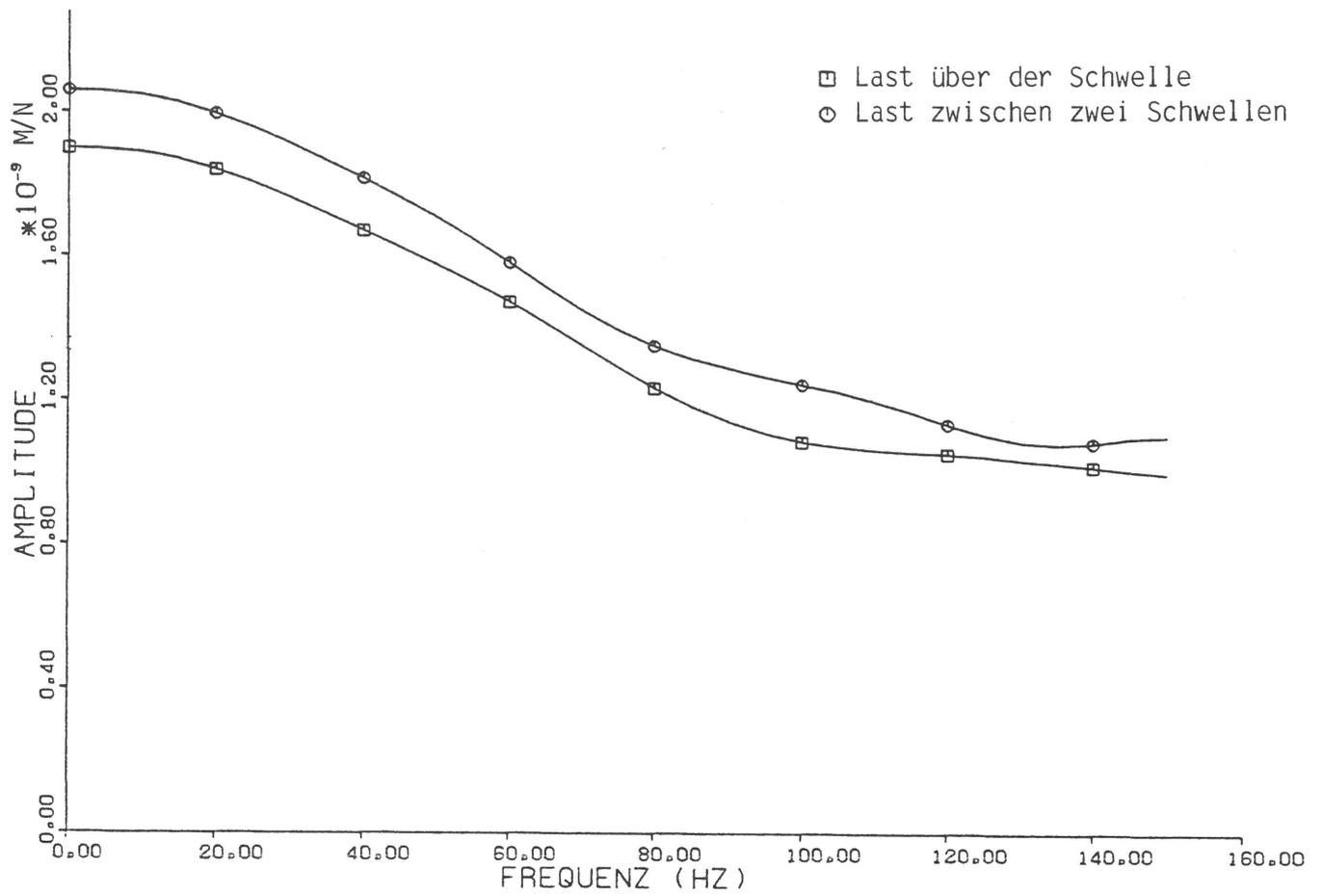


Bild 4  
 Die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit bei verschiedenen Laststellungen

linie der Schiene hat, daß gleichzeitig aber die Nachgiebigkeit des Fahrweges unter dem Radaufstandspunkt nur minimal mit zunehmender Geschwindigkeit kleiner wird. Da nur Letztere in die Berechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik eingeht, können demnach die bisher gezeigten Nachgiebigkeiten, die für stehende Lasten an Stelle von mit der Fahrgeschwindigkeit bewegten Lasten berechnet werden, zugrunde gelegt werden.

## 2.2 Berechnung der dynamischen Last aus der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik

Die hier zu behandelnde Problemstellung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik ist noch einmal in Bild 5 dargestellt. Neben der im vorigen Abschnitt behandelten Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit muß nun als zweiter Block auch das Fahrzeugverhalten betrachtet werden.

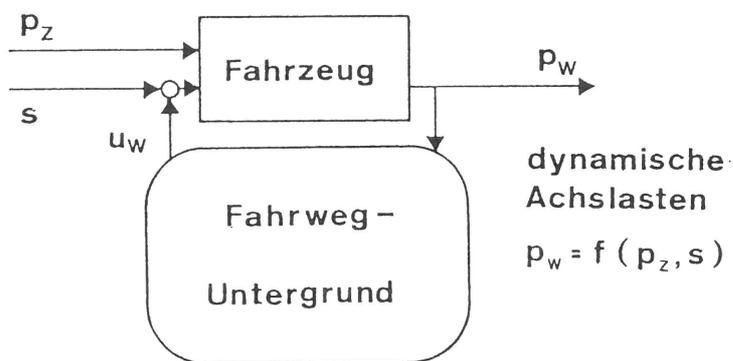


Bild 5  
Ermittlung der dynamischen Achslasten als Teilproblem der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik

### 2.2.1 Das Fahrzeugverhalten

Folgendes Fahrzeugverhalten ist hier von Interesse (Bild 5): Es müssen die dynamischen Radaufstandskräfte  $p_w$  bei einer Anregung des Fahrzeugs durch Verschiebungen  $u_R$  der Radaufstandspunkte und durch äußere Kräfte  $p_z$  bestimmt werden. Dies läßt sich, ebenso wie bei der Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit, gut im Frequenzbereich berechnen. Man ermittelt die Übertragungsfunktionen  $G_z$  und  $K_z$

$$p_w = G_z p_z - K_z u_R, \quad (1)$$

wobei  $G_z$  und  $K_z$  komplexe Funktionen der Frequenz  $f$  und im allgemeinen Matrizen sind, die (z. B.  $K_z$ ) die Verschiebungen aller Radaufstandspunkte mit allen Kräften der Radaufstandspunkte verknüpfen (Vorzeichenfestlegung s. Bild 6).  $K_z$  stellt die dynamische Steifigkeit des Fahrzeugs dar, die gegen den Fahrweg wirkt. Sie enthält im wesentlichen die Trägheitswirkungen der einzelnen Fahrzeugkomponenten.

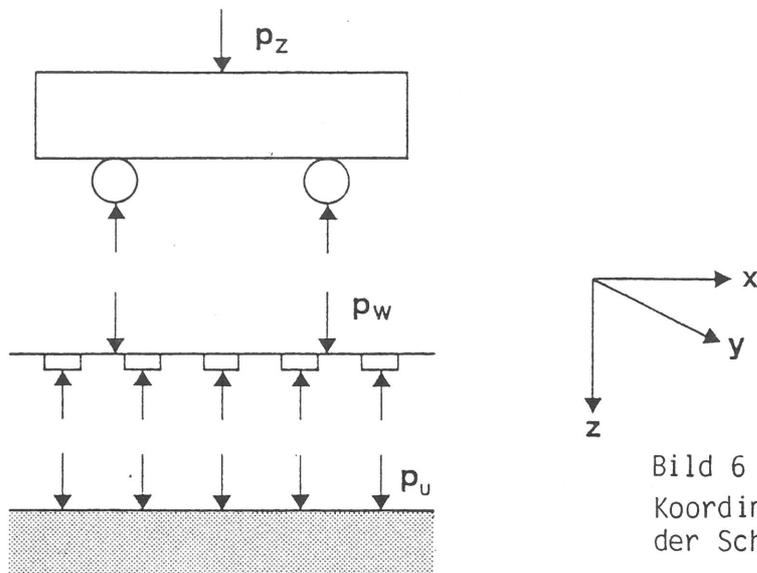


Bild 6  
Koordinatensystem und Definition  
der Schnittkräfte

Die dynamische Steifigkeit  $K_Z = - p_W/u_R$  und der Kraft"durchgriff"  $G_Z = p_W/p_Z$  lassen sich auf verschiedene Weisen berechnen: Man kann sehr detaillierte Modelle (z. B. auch mit elastischem Wagenkasten) mit einem Mehrkörperalgorithmus (z. B. MEDYNA) berechnen, man kann aber auch einfache Modelle wie das im Teil I Abschnitt 5 (Bild 11) gezeigte 3-Massen-Modell elementar berechnen. Die Rechenergebnisse dort legten sogar in bestimmten Frequenzbereichen noch einfachere Modelle nahe (Abkopplung der Wagenkastenmasse, evtl. sogar der Drehgestellrahmenmasse bei genügend hohen Frequenzen). Für die Berechnung der Schwellenabstandsanregung im Frequenzbereich von 50 bis 150 Hz wird deshalb hier nur ein einfacher Radsatz (mit einer Masse von 1700 kg) als ausreichend genaues Modell gewählt.

### 2.2.2 Die Kopplung von Fahrzeug und Fahrweg-Untergrund unter Berücksichtigung der Schwellenabstandsanregung (Parametererregung)

Zunächst soll der einfachere Fall, ein Gleis mit kontinuierlicher Schienenlagerung behandelt werden. Dazu muß man die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit  $F_W(f, v_Z)$  für eine bewegte Last(gruppe) mit der dynamischen Fahrzeugsteifigkeit  $K_Z(f)$  verknüpfen (Index W für "Weg" = Fahrweg-Untergrund und Index Z für "Zug" = Fahrzeug). Man berücksichtigt den Zusammenhang zwischen Radverschiebung  $u_R$ , Schienenverschiebung  $u_W$  und Störweg  $s$ , weiterhin die Definitionsgleichungen für  $K_Z$ ,  $G_Z$  und  $F_W$ , und erhält die dynamische Rad-Schiene-Kontaktkraft  $p_W$  (Vorzeichen s. Bild 6):

$$F_W(f, v_Z) \approx F_W(f, v_Z=0) \quad \text{Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit}$$

$$K_Z(f) \quad \text{Fahrzeugsteifigkeit (Trägheit)}$$

$$u_R = u_W + s \quad (2)$$

$$p_W = G_Z p_Z - K_Z u_R \quad (1)$$

$$u_W = F_W p_W \quad (3)$$

$$p_W = (I + K_Z F_W)^{-1} (G_Z p_Z - K_Z s). \quad (4)$$

Damit ist das Problem für den kontinuierlichen Fahrweg bereits vollständig gelöst: Gleichung (4) kann im Frequenzbereich ausgewertet werden und man erhält die Radaufstandskräfte infolge von Störwegen  $s$  und Kräften  $p_Z$  bzw. die beiden zugehörigen Übertragungsfunktionen (Frequenzgangmatrizen)

$$\begin{aligned} & (I + K_Z F_W)^{-1} G_Z && \text{für die Kräfte } p_Z \text{ und} \\ - & (I + K_Z F_W)^{-1} K_Z && \text{für die Störwege } s. \end{aligned}$$

Die diskrete Schienenstützung auf den Schwellen (bzw. allgemein eine Schwankung der Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit) bringt demgegenüber einige Änderungen mit sich, die auch für die Erschütterungsproblematik und allgemein für die dynamischen Lasten von Bedeutung sind. Die mit dem Ort veränderliche Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit ergibt für den mit  $v_Z$  fahrenden Zug eine zeitveränderliche Nachgiebigkeit  $F_W$ .

Um auch für diesen Fall die dynamischen Lasten zu bestimmen, wird zunächst die Systemgleichung für das gekoppelte Fahrzeug- und Fahrweg-Untergrund-System formuliert. Geht man von Nachgiebigkeiten  $F_W$  auf Steifigkeiten  $K_W$  für den Fahrweg-Untergrund über

$$K_W u_W = p_W, \quad (3')$$

so erhält man aus den Gleichungen (1), (2) und (3')

$$(K_Z + K_W) u_R = G_Z p_Z + K_W s. \quad (5)$$

Für ein kontinuierliches Gleis kann diese Systemgleichung unmittelbar im Frequenzbereich (als Beziehung zwischen komplexen Amplituden  $u_R$ ,  $p_Z$ ,  $s$  und Übertragungsfunktionen  $K_Z$ ,  $K_W$ ,  $G_Z$ ) gelesen werden, für ein diskret gestütztes Gleis muß sie zunächst als Beziehung zwischen Zeitfunktionen  $u_R$ ,  $p_Z$ ,  $s$  und Operatoren  $K_Z$ ,  $K_W$ ,  $G_Z$  aufgefaßt werden. Beim Fahrzeug auf diskret gestütztem Gleis handelt es sich um ein zeitvariantes System, bei dem die dynamische Gesamtsteifigkeit  $K_Z + K_W$  aus einem konstanten Anteil  $K$  und einem zeitabhängigen Anteil  $K_1(t)$  besteht

$$K_Z + K_W = K + K_1(t).$$

Faßt man noch die Anregungsanteile zu einer Last  $p$  zusammen

$$G_Z p_Z + K_W s = p,$$

so stellt sich die Systemgleichung übersichtlicher als

$$[K + K_1(t)] u = p \quad (6)$$

dar. Die Lösung dieser zeitvarianten Systemgleichung umfaßt die mittlere Bewegung infolge der Anregung  $p$ , einen zusätzlichen Anteil aus der Steifigkeitsschwankung  $K_1$ , sowie freie Schwingungen, die bei zeitvarianten Systemen

instabil sein können. Im folgenden wird zunächst der zusätzliche Anteil aus der Steifigkeitsschwankung und die daraus folgende dynamische Last bestimmt und anschließend die Stabilität des Systems diskutiert.

Man hat für ein zeitvariantes System folgendes iterative Lösungsverfahren, mit dem bei kleinen Steifigkeitsschwankungen die erzwungenen Schwingungen berechnet werden können.

$$\begin{aligned}
 u_0 \text{ aus} & \quad K u_0 = p \\
 u_1 \text{ aus} & \quad K u_1 = - K_1(t) u_0 \\
 & \quad \dots \\
 u_n \text{ aus} & \quad K u_n = - K_1(t) u_{n-1} \\
 & \quad \hline
 & \quad K \left( \sum_{i=0}^n u_i \right) = - K_1(t) \left( \sum_{i=0}^{n-1} u_i \right) + p .
 \end{aligned} \tag{7}$$

Die Näherungslösung nach dem (n+1)ten Schritt

$$u = \sum_{i=0}^n u_i$$

erfüllt die Gleichung (6) bis auf einen kleinen Restfehler

$$[K + K_1(t)] \left( \sum_{i=0}^n u_i \right) = p + \underline{K_1(t) u_n} . \tag{8}$$

Wählt man für  $p$  eine harmonische Anregung mit einer Frequenz  $f$  und betrachtet Fahrweg-Untergrund-Schwankungen mit einer Frequenz  $f_s$ , so ergeben sich neben der Antwort in der Anregungsfrequenz  $f$  auch kleinere Antworten mit

$$f_i = f \pm i f_s \quad (i = 1, 2, \dots) .$$

Bricht man das Iterationsverfahren nach dem zweiten Schritt ab, so hat man für die zusätzlichen Verschiebungen die Näherung

$$u_1 = - K^{-1} K_1(t) K^{-1} p \tag{9}$$

und für die zusätzliche dynamische Last

$$\begin{aligned}
 p_1 &= - K_Z u_1 \\
 &= K_Z K^{-1} K_1(t) K^{-1} p .
 \end{aligned} \tag{10}$$

Vernachlässigt man weiterhin Produkte von Störgrößen, so verbleiben als wesentliche Auswirkung der Fahrweg-Untergrund-Schwankungen die zusätzlichen dynamischen Lasten aus dem Eigengewicht des Zuges.

Für den Lastfall Eigengewicht des Zuges ( $p = p_0$ ) lassen sich die Gleichungen (9) und (10) leicht in den Frequenzbereich überführen. Da die regulären Fahrweg-Untergrund-Schwankungen eine periodische Zeitfunktion mit der Schwellen-Abstands-Frequenz

$$f_S = \frac{v_Z}{d} \quad (11)$$

als Grundfrequenz und vernachlässigbaren höheren Frequenzanteilen (s. detailliertere Untersuchungen von z. B. Korb /15/), das heißt nahezu eine harmonische Zeitfunktion sind, kann man Gleichung (9) schreiben als

$$u_1 = - K^{-1}(f_S) K_1(f=0) K^{-1}(f=0) p_0 \quad (12)$$

bzw. Gleichung (10) als

$$p_1 = K_Z(f_S) K^{-1}(f_S) K_1(f=0) K^{-1}(f=0) p_0 . \quad (13)$$

Die dynamische Last aus Schwellenabstandsanregung läßt sich nunmehr mit den bisherigen Rechenergebnissen im Frequenzbereich gemäß Gleichung (13) ermitteln. Dabei ist

- $K_Z$  die dynamische Steifigkeit des Fahrzeugs (Abschnitt 2.2.1),
- $K_1$  die Schwankung der Fahrweg-Untergrund-Steifigkeit (Abschnitt 2.1.2),
- $K^{-1}$  die (mittlere) Nachgiebigkeit des Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Gesamtsystems  $(K_Z + K_W)^{-1}$  .

Abschließend sollen noch die Lösungen der Systemgleichung (9) für den Fall ohne Last ( $p = 0$ , homogene Lösungen)

$$[ K + K_1(t) ] u = 0 \quad (14)$$

diskutiert werden. Ohne Parametererregung ( $K_1(t) = 0$ ) hätte man die Eigenschwingungen des Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Systems, die gedämpft sind und deshalb für die stationäre Lösung ohne Bedeutung sind. Durch die Parametererregung sind nun im Allgemeinen auch Instabilitäten (aufklingende Lösungen der Gleichung (14)) möglich. Für einen Radsatz auf einem Schwellen-Gleis führt diese Untersuchung praktisch auf die Mathiesche Differentialgleichung, deren Stabilitätsverhalten bekannt ist (s. z. B. Klotter /13/). Wegen der vorhandenen Dämpfung durch den Untergrund (mindestens  $D = 0,1$  aufgrund der Abstrahlung) sind bei Steifigkeitsschwankungen  $K_1/K$  kleiner 30 % keine Instabilitäten zu erwarten. Bei größeren Steifigkeitsschwankungen (schlechtes Schotterbett) ist ein kleiner Instabilitätsbereich bei Geschwindigkeiten um 300 km/h möglich. Diese Situation - schlechter Oberbauzustand bei hohen Zuggeschwindigkeiten - dürfte allerdings schon aus anderen Gründen (Laufdynamik, Komfort) ausgeschlossen sein.

### 2.2.3 Die dynamische Last bei hohen Fahrgeschwindigkeiten

Die Kontaktkräfte zwischen Rad und Schiene setzen sich aus folgenden Anteilen zusammen:

- dem Fahrzeuggewicht,
- der Schwellenabstandsanregung infolge des Fahrzeuggewichts,
- den Auswirkungen von Störwegen (Schieneunebenheiten, Radunrundheiten, Achsunwuchten) und
- von äußeren "Maschinen"-Kräften.

Die frequenzabhängigen Berechnungsvorschriften (Übertragungsfunktionen), die im vorangehenden Abschnitt abgeleitet wurden, sind in Bild 7 noch einmal zusammengefaßt.

$$\begin{aligned} & - p_0 && \text{Fahrzeuggewicht} \\ & f = 0 \text{ HZ} \\ & - p_1 = K_Z K^{-1} K_1(0) K^{-1}(0) p_0 \\ & f = v_z / d && \text{Schwellenabstand} \\ & - p_2 = -(I + K_Z F_W)^{-1} K_Z s \\ & f = v_z / \lambda && \text{Störwege} \\ & - p_3 = -(I + K_Z F_W)^{-1} G_Z p_z \\ & f = f_z && \text{äußere „Maschinen“kräfte} \end{aligned}$$

Bild 7

Die dynamischen Lastanteile

Für die Nachrechnung der ICE-Versuchsfahrten bei Würzburg ergeben sich dann folgende Kräfte, die hier als Achslasten angegeben werden:

Mit den Massen für Triebkopf (78 t), Meßwagen (50 t) und Demonstrationswagen (45 t) des Intercity Experimental ergeben sich statische Achslasten zwischen

$$\begin{aligned} p_0 &= 112,5 \text{ kN} \quad \text{und} \\ p_0 &= 195 \text{ kN} \quad . \end{aligned}$$

Die daraus berechneten Schwellenabstandsanregungen  $p_1$  (bei einer Steifigkeitsschwankung um  $\pm 5\%$  und einer Radsatzmasse von 1,7 t) sind in Bild 8 für die schwerste Achslast von 195 kN für Fahrgeschwindigkeiten zwischen 100 und 300 km/h dargestellt. Bild 9 zeigt zum Vergleich für denselben Frequenzbereich die Radkräfte  $p_2$  bei einer Wegerregung von  $s = 0,01$  mm.

Als wesentliches Ergebnis fällt zunächst auf, daß die dynamischen Lasten  $p_1$  und  $p_2$  zunächst deutlich mit der Fahrgeschwindigkeit (bzw. der Frequenz) zunehmen. Sie erreichen bei ca. 100 Hz (200 km/h) ein Maximum und bleiben bei

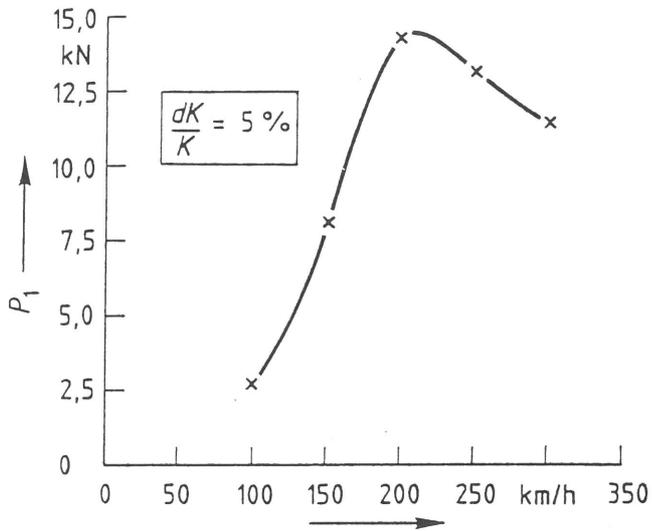


Bild 8

Radaufstandskräfte infolge der Steifigkeitsschwankung des Fahrwegs (Schwellenabstandsanregung)

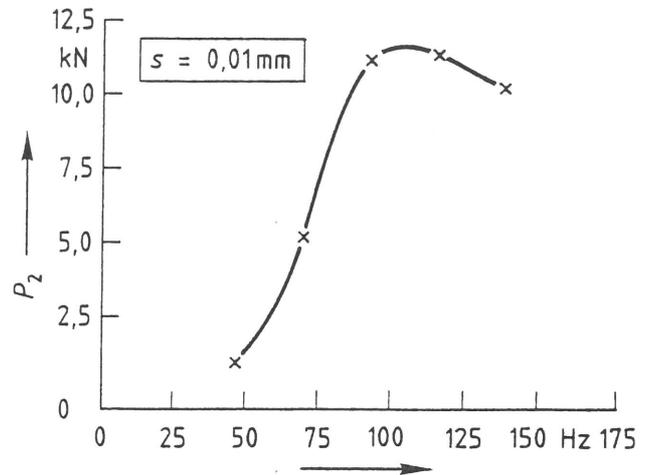


Bild 9

Radaufstandskräfte infolge von Störwegen (Gleislage, Schienenoberfläche)

weiterer Geschwindigkeits- und Frequenzsteigerung annähernd konstant. Dieses für den Hochgeschwindigkeitsverkehr wichtige Ergebnis beruht auf dem Überschreiten der Radsatz-Untergrund-Eigenfrequenz. Wie in Teil I Abschnitt 5 erläutert, werden oberhalb dieser Eigenfrequenz Unebenheiten  $s$  vom Radsatz nicht mehr ausgefahren, sondern nur noch gegen die Fahrweg-Untergrund-Steifigkeit, die in diesem Frequenzbereich noch annähernd konstant ist, weggedrückt. Noch eindeutiger ist die Begrenzung der dynamischen Last bei hohen Geschwindigkeiten für die Schwellenabstandsanregung  $p_1$ :

Die Übertragungsfunktion

$$G_1 = K_Z K^{-1}, \tag{15}$$

die mit der fahrgeschwindigkeitsunabhängigen Anregungsamplitude

$$p_1' = K_1(0) K^{-1}(0) p_0 \tag{16}$$

den dynamischen Lastanteil

$$p_1 = G_1 p_1' \tag{17}$$

ergibt, ist - bis auf eine geringe Überhöhung bei der Radsatz-Untergrund-Eigenfrequenz - auf den Maximalwert 1 beschränkt. Bei weiterer Geschwindigkeitssteigerung könnte die Kraft  $p_1$  sogar aufgrund zunehmender Fahrwegträgheit wieder etwas kleiner werden. Dieses Ergebnis - Beschränktheit der dynamischen Last bei hohen Geschwindigkeiten - gilt nicht nur für die regulären Fahrwegschwankungen aufgrund der diskreten Schienenstützung. Sie gilt vielmehr auch für zufällige Oberbau-(Schotterbett-) und Untergrundschwankungen, insbesondere auch für den (als "Nullsetzung" bezeichneten) Fall, daß eine Schwelle erst unter Belastung mit dem Schotter in Berührung kommt.

Um die Ähnlichkeit zwischen Parametererregung durch Fahrwegschwankungen und Wegerregung etwas genauer zu betrachten, werden die beiden zugehörigen Übertragungsfunktionen für  $p_1$  und  $p_2$  in vergleichbare Formen umgeschrieben

$$p_1 = K_Z (K_W + K_Z)^{-1} p_1' \quad (18)$$

$$\begin{aligned} p_2 &= -K_W (K_W + K_Z)^{-1} K_Z s \quad (19) \\ &= -K_Z (K_W + K_Z)^{-1} K_W s \end{aligned}$$

Die beiden Übertragungsfunktionen stimmen bis auf den Faktor  $-K_W$  überein. Die Ähnlichkeit der beiden Lastanteile (Parameter- und Wegerregung) beruht demnach auf der nur geringen Steifigkeitszunahme des Fahrwegs in diesem Frequenzbereich (s. Abschnitt 2.1.1). Es bleibt noch zu ergänzen, daß langwelligere Störwege, die mit der Fahrgeschwindigkeit zu Frequenzen unter 50 Hz führen, nicht nur Radsatz-, sondern auch Drehgestellträgheiten hervorrufen. Der in Bild 9 nicht dargestellte tieffrequente Bereich dürfte demnach nicht so gleichmäßig mit  $f^2$  gegen  $p_2(0) = 0$  gehen. Die genauen Verhältnisse hängen noch von der speziellen Drehgestellgeometrie und -abstimmung ab, so wie dies in Teil I Abschnitt 5 angedeutet ist.

Zur Anregung  $p_3$  durch Kräfte (äußere Kräfte, Maschinenkräfte) ist zum Abschluß dieses Abschnitts zu sagen, daß diese nicht unbedingt frequenzmäßig an die Fahrgeschwindigkeit gekoppelt sind, so daß hierzu kaum allgemeingültige Tendenzen angegeben werden können. Diese Auswirkung einer dynamischen Belastung auf die Radaufstandskräfte  $p_W$  hängt von der Lage des Lastangriffspunktes ab. Wegen der tiefabgestimmten Lagerung des Wagenkastens (oder bedingt auch des Drehgestells), werden dort angreifende Maschinenkräfte häufig abgemindert auf das Gleis übertragen.

## 2.3 Die Erschütterungsausbreitung bei bewegten Lasten

### 2.3.1 Die Lastverteilung durch die Schwellen

Im vorangehenden Abschnitt sind die dynamischen Kräfte, die auf die Schiene wirken, berechnet worden. Um diese Ergebnisse mit der Wellenausbreitung im Boden zu verknüpfen, muß zunächst die Lastverteilung durch den Fahrweg, also durch Schienen und Schwellen betrachtet werden. Diese Lastverteilung erhält man ebenso wie die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit aus der vollständigen Berechnung des Systems Fahrweg-Untergrund mit der kombinierten Finite-Element- und Randelementmethode (s. Abschnitt 2.1 und /9/). Die Ergebnisse sind in Bild 10 für die Frequenz 0 zusammengefaßt.

Bild 10 zeigt, daß die Last im wesentlichen auf ein bis zwei Schwellen konzentriert bleibt, bei Laststellung auf der Schwelle übernehmen die beiden Nach-

barschwellen nur jeweils 20 % der Last. Diese Lastkonzentration ist eine wesentliche Auswirkung der Kopplung durch den Untergrund. Der Vergleich mit den ebenfalls angegebenen Verschiebungen zeigt, daß ein Modell ohne Untergrundkopplung (gebettete Schiene), eine deutlich breitere Verteilung der Last ergeben würde. Über die Schwellenbreite wird die Last ziemlich gleichmäßig verteilt.

Die Lastverteilung über die Schwellenbreite hat Auswirkungen auf die Erschütterungsausbreitung, die bereits im BAM-Forschungsvorhaben /3/ bzw. /4/ untersucht wurde. Sie führt zu einer frequenzabhängigen Abminderung der Erschütterungen in der Umgebung (im Vergleich zu einer Punktlasterregung), die durch den Abminderungsfaktor für die Kraft

$$p' = p \begin{cases} \sin \bar{a}/\bar{a} & \text{für } \bar{a} \leq 1,57 \\ 1/\bar{a} & \text{für } \bar{a} > 1,57 \end{cases}$$

mit der normierten halben Schwellenbreite  $\bar{a}$

$$\bar{a} = \frac{2\pi f a}{v_S}$$

ausreichend genau beschrieben werden kann. Detailliertere Lastverteilungen dürften nur für die direkte Umgebung der Schwelle von Interesse sein.

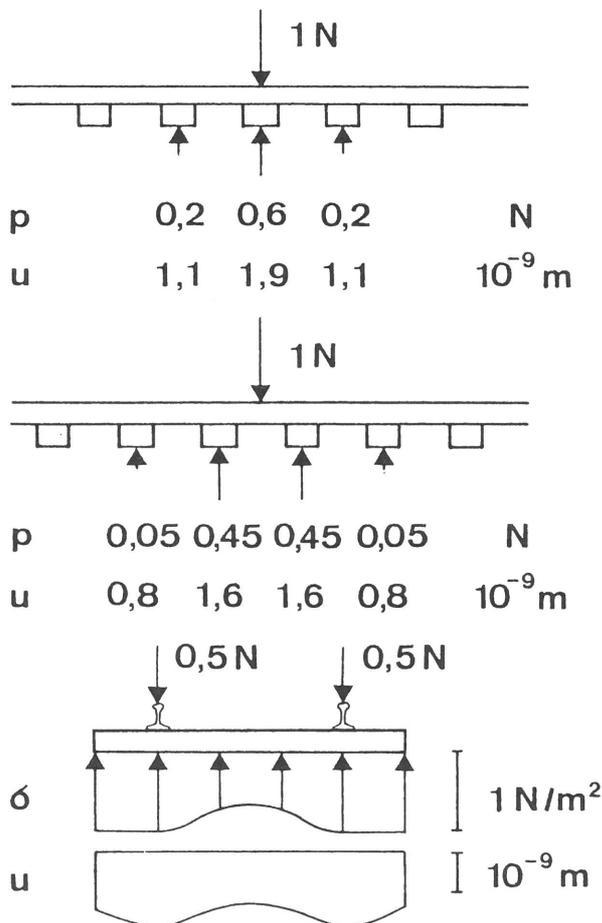


Bild 10  
Lastverteilung unter den Schwellen  
und zugehörige Verschiebungen

### 2.3.2 Ausbreitungsgesetze für eine Punktlast

Das Ausbreitungsgesetz für eine harmonische (vertikale) Punktlast  $p$  auf einem homogenen Halbraum mit hysteretischer Materialdämpfung (Schubmodul  $G = G_0 (1 + i2D)$ ) läßt sich in guter Näherung durch die beiden (Nah- und Fernfeld-) Asymptoten

$$u(r, f) = \frac{p (1 - \nu)}{2 \pi G r} e^{-D\bar{r}} \begin{cases} 1 & \text{für } \bar{r} \leq 2,5 \\ \bar{r}/2,5 & \text{für } \bar{r} > 2,5 \end{cases}$$

mit dem normierten Abstand  $r$  von der Last

$$\bar{r} = \frac{2 \pi f r}{v_S}$$

beschreiben (s. /4/). Der Einfluß von Bodenschichtungen, der ebenfalls im BAM-Forschungsvorhaben /4/ untersucht wurde, kann in diesem Gesetz durch Vorgabe von frequenzabhängigen Bodenparametern näherungsweise berücksichtigt werden.

In dem Rechenprogramm zur Simulation der Zugvorbeifahrten (s. nächster Abschnitt) werden auch zwei weitere Alternativen angeboten:

- die Auswahl nur einer Asymptote, z. B. nur der Nahfeldasymptote bei Fehlen der Rayleighwelle im Fernfeld, oder
- die explizite Vorgabe eines Ausbreitungsgesetzes

$$u(r, f) = A p r^{-n} e^{-\alpha r}$$

mit im allgemeinen frequenzabhängigen Parametern  $A$ ,  $n$  (Abnahmeexponent),  $\alpha$  (Abklingkoeffizient). Mit der zweiten Möglichkeit können auch extreme Schichtsituationen, wie von Auersch in /2/ untersucht, oder eine viskoelastische Materialdämpfung erfaßt werden. Insbesondere können natürlich auch experimentelle Befunde vor Ort auf diese Weise in die Rechnung eingebracht werden.

### 2.3.3 Die Simulation von Zugvorbeifahrten

Die Erschütterungen infolge eines vorbeifahrenden Zuges werden folgendermaßen berechnet:

Es werden

Zugdaten - die Lage der einzelnen Achsen und gegebenenfalls ihre Zuordnung zu bestimmten Gruppen (z. B. Drehgestellen),

Untergrunddaten - die gegebenenfalls frequenzabhängigen Parameter für das Ausbreitungsgesetz und die interessierenden Umgebungspunkte,

Lastdaten - die Zuggeschwindigkeit und die sich aus ihr und der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik ergebenden Lastanteile und Frequenzen, sowie sonstige Lasten (z. B. Fahrzeuggewicht)

vorgegeben. Die Lastdaten sind dabei in der Regel Ergebnisse vorangegangener Berechnungen (s. Abschnitt 2.2). Schließlich vervollständigen Rechendaten - Zeitausschnitt und -schrittweite, Frequenzbereich den Eingabedatensatz.

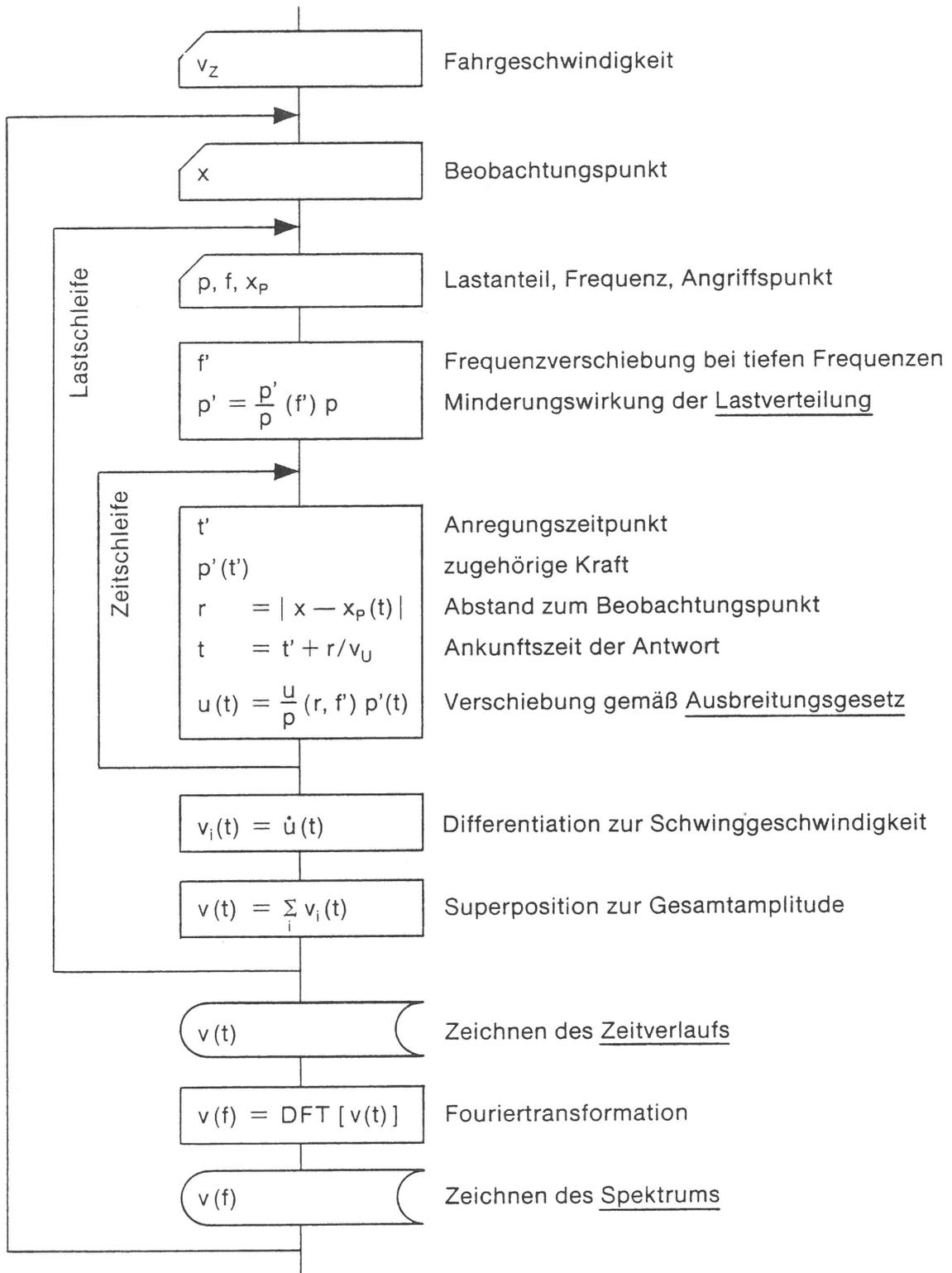


Bild 11  
 Simulation der Erschütterungen infolge eines vorbeifahrenden Zuges

Der Rechenablauf ist in Bild 11 dargestellt. Es wird zunächst der Schwinggeschwindigkeitszeitverlauf für einen Beobachtungspunkt (Umgebungspunkt) berechnet. Dabei werden die Antworten für jeden Lastanteil getrennt berechnet, da der Lastangriffspunkt und das Ausbreitungsgesetz nicht für alle Lastanteile übereinstimmt. In dieser Lastschleife wird jeweils ein Lastanteil, das ist eine Frequenz  $f$ , eine (komplexe) Lastamplitude  $p$  und der Lastangriffspunkt  $x_p$  eingelesen. Die Lastverteilung über die Fahrwegbreite wird durch einen Abminderungsfaktor  $p'/p(f)$  erfaßt (Abschnitt 2.3.1). Der zur Last  $p$  gehörige Anteil der Erschütterungen wird dann in einer Zeitschleife berechnet. Es wird die zum Zeitpunkt  $t'$  gehörige momentane Kraft  $p(t')$  und mit dem momentanen Angriffspunkt  $x_p(t')$  der Abstand zum Beobachtungspunkt  $x$  bestimmt. Es wird die Ankunftszeit  $t$  der Welle am Beobachtungspunkt und die zugehörige Verschiebung  $u(t)$  mit dem Ausbreitungsgesetz  $u/p(r,f)$  berechnet. Nach Durchlaufen dieser Zeitschleife wird der Verschiebungszeitverlauf mittels Differentiation in einen Geschwindigkeitszeitverlauf  $v_i(t)$  umgewandelt und zum Gesamtgeschwindigkeitszeitverlauf  $v(t)$  aller Lastanteile hinzugefügt. Dieser Zeitverlauf wird, wenn alle Lastanteile berücksichtigt wurden, gezeichnet. Es wird außerdem das diskrete Fourierspektrum gebildet und ebenfalls gezeichnet. Bild 12 zeigt beispielhaft für einen ICE mit 300 km/h das Ergebnis dieser Prozedur, die nacheinander für alle interessierenden Umgebungspunkte durchlaufen wird.

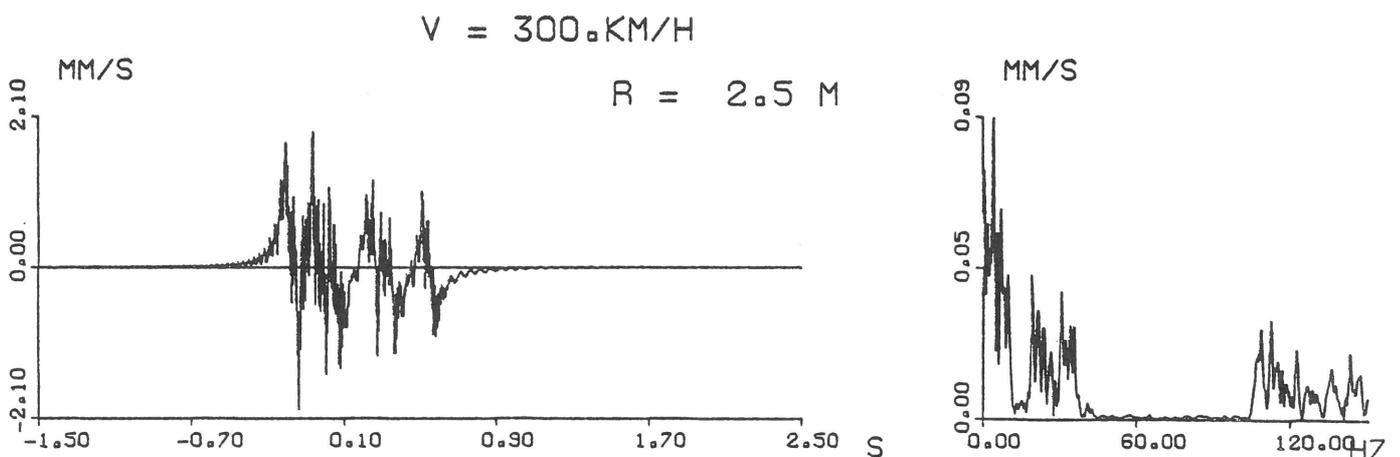


Bild 12  
Ergebnis der Simulation: Schwinggeschwindigkeitszeitverlauf (links) und zugehöriges Spektrum (rechts) bei Vorbeifahrt eines dreigliedrigen ICE

#### 2.4 Die Fahrwegverformung bei bewegten Lasten

In Abschnitt 2.1 war die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit als Bestandteil des Gesamtsystems Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund behandelt worden. Dabei wurden die (auf die Last bezogenen) Fahrwegverschiebungen unter den Lastaufstandspunkten berechnet. In diesem Abschnitt sollen die Verschiebungen aller Fahrwegpunkte, die zur besseren Unterscheidung mit "Fahrwegverformung" bezeichnet werden,

betrachtet werden. Die Trennung der Abschnitte 2.1 "Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit" und 2.4 "Fahrwegverformung" soll die unterschiedliche Einbettung in den Gesamtzusammenhang verdeutlichen: Während die "Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit" den Rückwirkungsanteil des Fahrweg-Untergrund-Systems darstellt, ist die "Fahrwegverformung" eine (rückwirkungsfreie) Antwort auf die (gekoppelt berechneten) dynamischen Lasten.

#### 2.4.1 Das klassische Fahrwegmodell ohne Untergrundkopplung - der gebettete Balken

Das bekannteste Modell zur Beschreibung der Schienenverformungen ist ein elastischer Balken auf einer kontinuierlichen (elastischen oder viskoelastischen) Bettung. Zur Entwicklung dieses Modells, deren Anfang mit dem Namen Zimmermann verbunden wird, sei auf die Literaturübersicht in /16/ verwiesen.

Die Differentialgleichung für die mit einer statischen oder harmonischen Last  $p$  mitbewegten Biegelinie  $u(x)$  der Schiene lautet

$$EJ u'''' + \rho F (u - 2vu' + v^2 u'') + c (u - vu') + ku = 0. \quad (20)$$

Die Übergangsbedingungen am Lastangriffspunkt lauten

$$\begin{aligned} [EJ u''''] &= p, \\ [u] &= 0, \\ [u'] &= 0, \\ [u''] &= 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Dabei ist

- $EJ$  - die Biegesteifigkeit der Schiene,
- $\rho F$  - die kontinuierliche Massenbelegung (einschließlich Schwellenmassen),
- $c$  - die Bettungsdämpfung,
- $k$  - die Bettungssteifigkeit,
- $v$  - die Geschwindigkeit der Last.

Die Ortsvariable zählt von der bewegten Last in Fahrtrichtung, ein Strich ' bedeutet Ableitung nach dieser (mitbewegten) Ortsvariablen, ein Punkt ' bedeutet Ableitung nach der Zeit und die Klammern [] bedeuten die Differenz zwischen den Schienenenden vor und hinter der Last.

Die Lösung für eine harmonische Last  $p$  erhält man mit dem (komplexen) Ansatz

$$u = A e^{\xi x} e^{i\omega t}, \quad (22)$$

der in die Differentialgleichung (20) eingesetzt, die charakteristische

Gleichung für die Wellenzahlen  $\xi$  ergibt. Man findet (iterativ oder in Spezialfällen explizit) vier komplexe Lösungen, wobei jeweils zwei davon mit der Entfernung von der Last abklingende Lösungen für den vorderen ( $x > 0$ ) oder hinteren ( $x < 0$ ) Schienenteil darstellen. Diese allgemeinen Lösungen werden an die Übergangsbedingungen (21) angepaßt. Als Ergebnis erhält man die in Bild 13 dargestellten Biegelinien der Schiene.

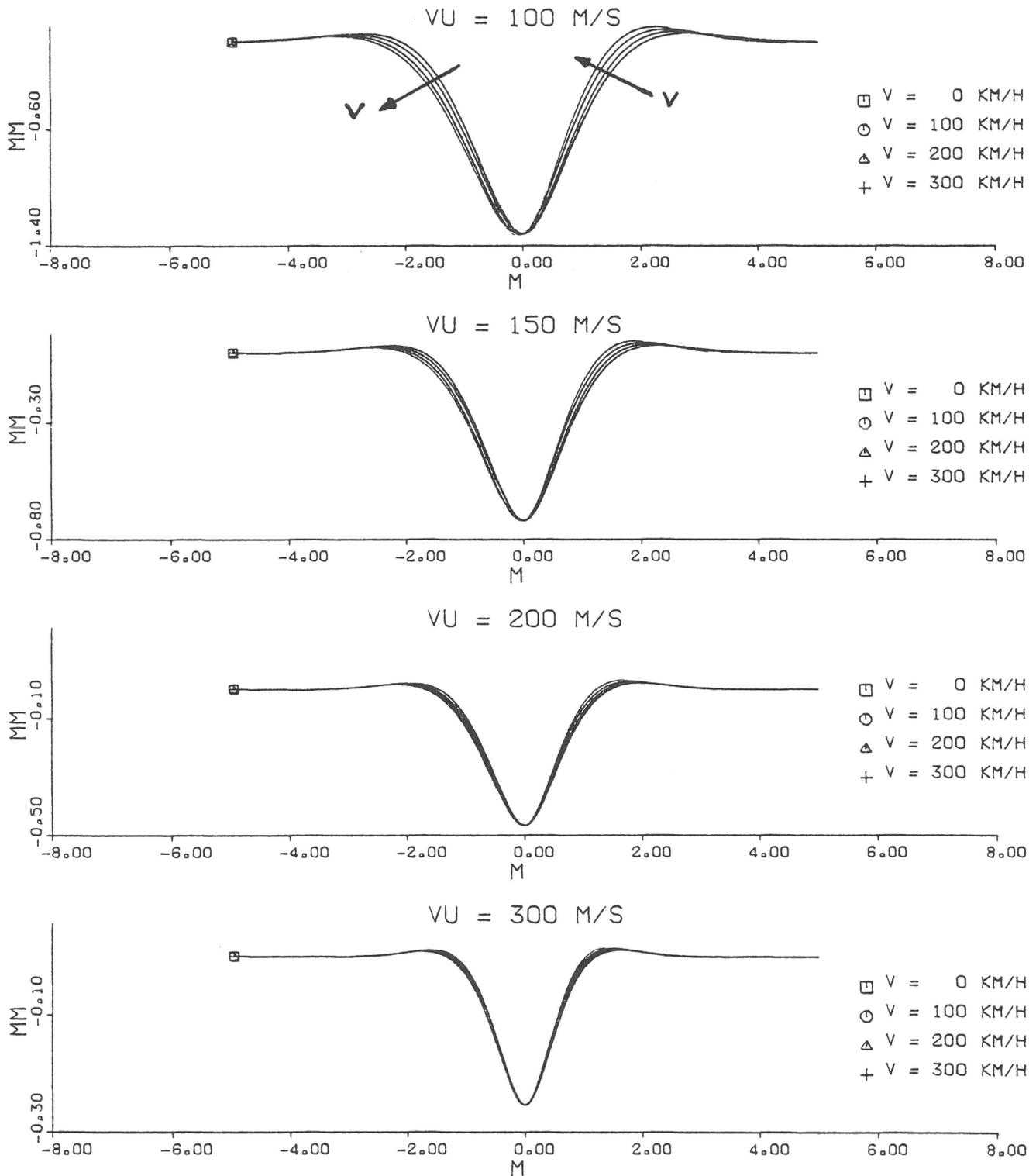


Bild 13

Die Biegelinie der Schiene unter einer Achslast von 195 kN,  
 Parameter: Fahrgeschwindigkeit  $v$  des Zuges und Wellengeschwindigkeit  $v_U$   
 (Steifigkeit) des Untergrundes

Bei den Ergebnissen in Bild 13 handelt es sich um die Schieneneinsenkungen unter der Achslast des ICE-Triebkopfes ( $p = 195 \text{ kN}$ ) bei Fahrgeschwindigkeiten zwischen 0 und 300 km/h. Der Fahrweg besteht aus einer Schiene UIC 60 auf Betonschwellen im Abstand von  $d = 0,6 \text{ m}$  (Massen kontinuierlich verteilt). Der Untergrund, der bekanntermaßen den maßgeblichen Einfluß auf die Schienenverschiebungen hat, wurde variiert. Mit den angegebenen Scherwellengeschwindigkeiten  $v_S$  ( $\rho = 1,8 \cdot 10^3 \text{ kg}$ ) wurden die Steifigkeit und Dämpfung einer Schwelle berechnet und in Bettungszahlen  $k$  und  $c$  umgerechnet. Die Ergebnisse zeigen einen leichten Fahrgeschwindigkeitseinfluß auf die Biegelinie der Schiene. Die Verschiebungen vor und hinter dem Lastangriff ( $x = 0$ ) unterscheiden sich etwas. Die der Last vorangehende leichte Aufwärtsbewegung verstärkt sich etwas, während die Einsenkungsmulde hinter der Last etwas gedehnt wird.

#### 2.4.2 Einfluß der Untergrundkopplung bei hohen Fahrgeschwindigkeiten

Zunächst können für die Fahrgeschwindigkeit  $v = 0$  die Ergebnisse des klassischen Fahrwegmodells mit den Ergebnissen des vollständig gekoppelten Fahrweg-Untergrund-Modells verglichen werden. Dazu zeigt Bild 14 für einen Untergrund  $v_S = 270 \text{ m/s}$ , der den Nachrechnungen der Meßergebnisse zugrunde liegt, die Biegelinien des klassischen Modells in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Unterschiede sind bei diesem relativ steifen Untergrund allerdings gering. Man erkennt zumindest die allgemeine Tendenz, daß die Biegelinie mit zunehmender Frequenz welliger wird. (Oberhalb der Fahrweg-Untergrund-Eigenfrequenz - hier ca. 200 Hz - ergeben sich fortschreitende Wellen.)

Zum Vergleich mit dem vollständig gekoppelten Fahrweg-Untergrund-Modell sind die Nachgiebigkeiten unter dem Lastangriffspunkt ( $x = 0$ ) ausgewertet und zusammen mit den Ergebnissen aus Abschnitt 2.1 in Bild 15 gezeichnet worden. Man erkennt im Mittel eine grobe Übereinstimmung mit frequenzabhängigen Abweichungen. Im unteren Frequenzbereich, der stark von der Kopplung durch den Untergrund beeinflusst ist, überschätzt das klassische Modell die Steifigkeit des Fahrweg-Untergrund-Systems. Die Wechselwirkung benachbarter Schwellen (Fundamente) vermindert die Steifigkeit und erhöht die Dämpfung (s. dazu auch /9/). Vergleicht man auch die Biegelinie des klassischen Modells mit den Verschiebungen des "Halbraum"-Modells (Bild 10 in Abschnitt 2.3.1), so erkennt man ebenfalls Unterschiede.

Es soll im Folgenden angedeutet werden, wie die Einflüsse sowohl von Fahrgeschwindigkeit als auch Untergrundkopplung in einem einfachen Modell berücksichtigt werden könnten. Dazu müßte im klassischen Modell die Bettung  $k, c$  durch einen allgemeineren Zusammenhang (einen Steifigkeitsoperator, der die Untergrundverschiebungen  $u(x,t)$  mit den Belastungen  $p'(x,t)$  verknüpft) ersetzt

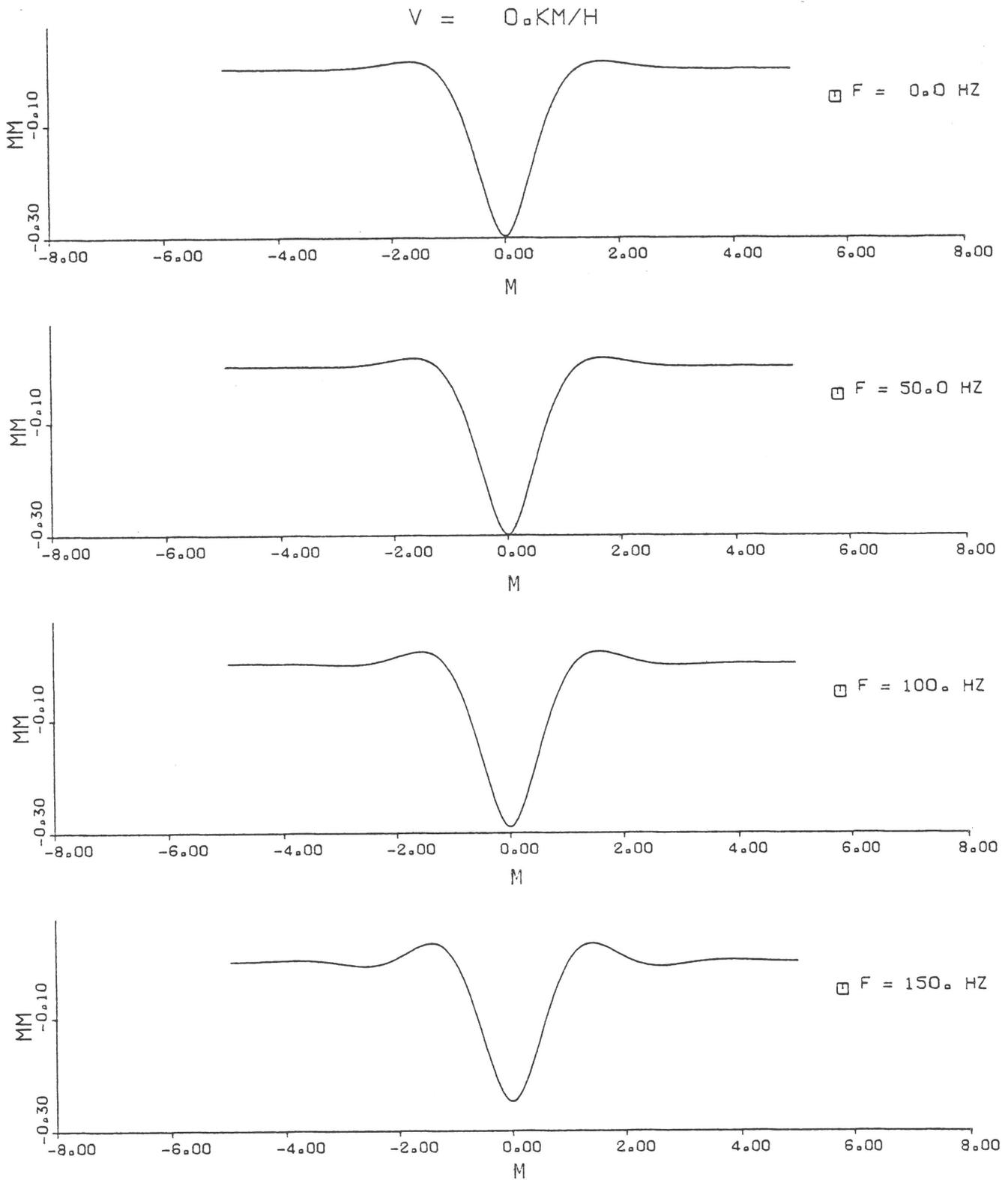


Bild 14

Die Biegelinie der Schiene unter einer Achslast von 195 kN, Parameter: Frequenz  $f$

werden. Als ersten Schritt in dieser Richtung kann man die Bettung um "lokale Wechselwirkungen" erweitern, in dem man auch Ortsableitungen der Verschiebungen berücksichtigt

$$p' = k_1 u + k_2 u' + k_3 u'' .$$

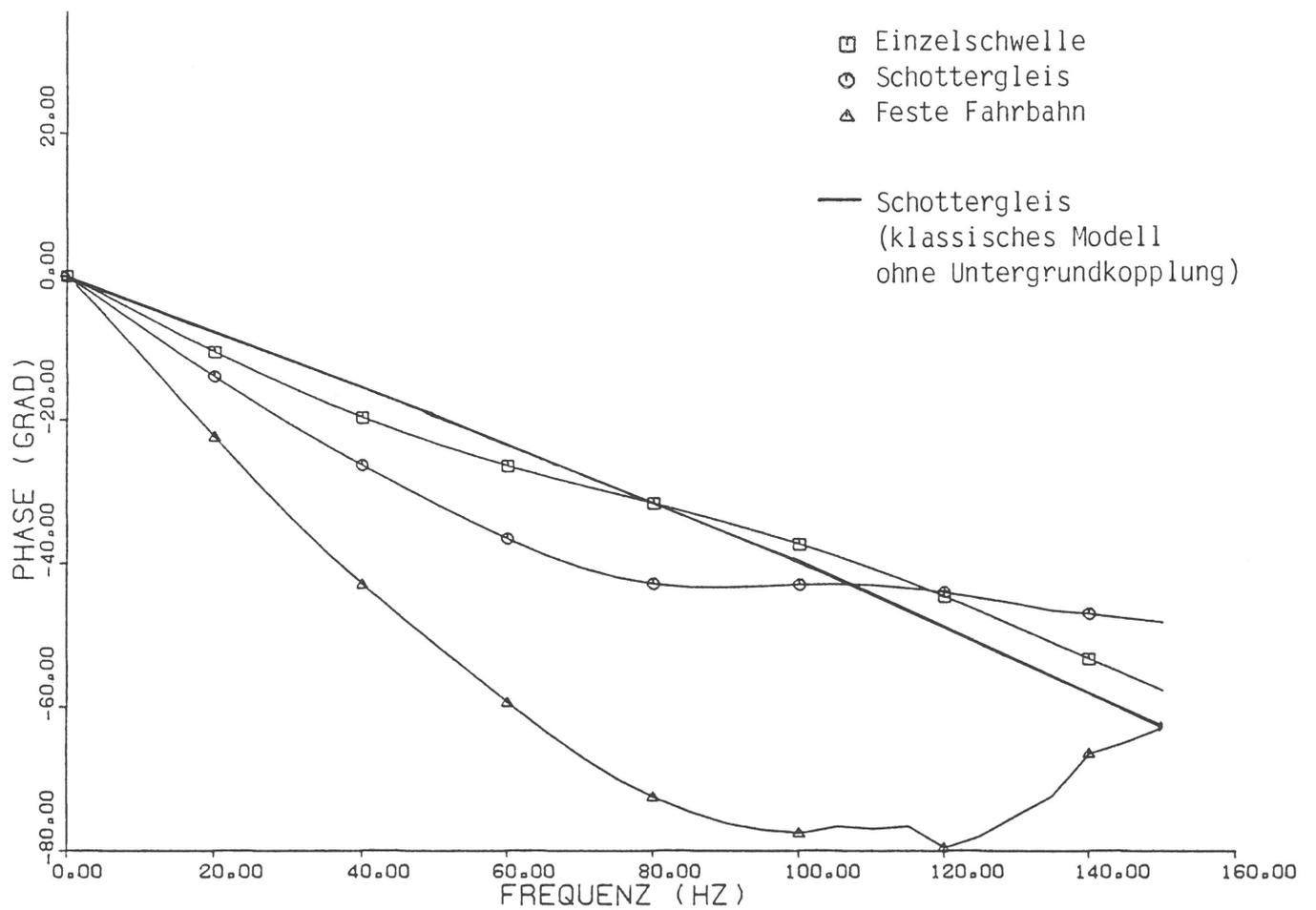
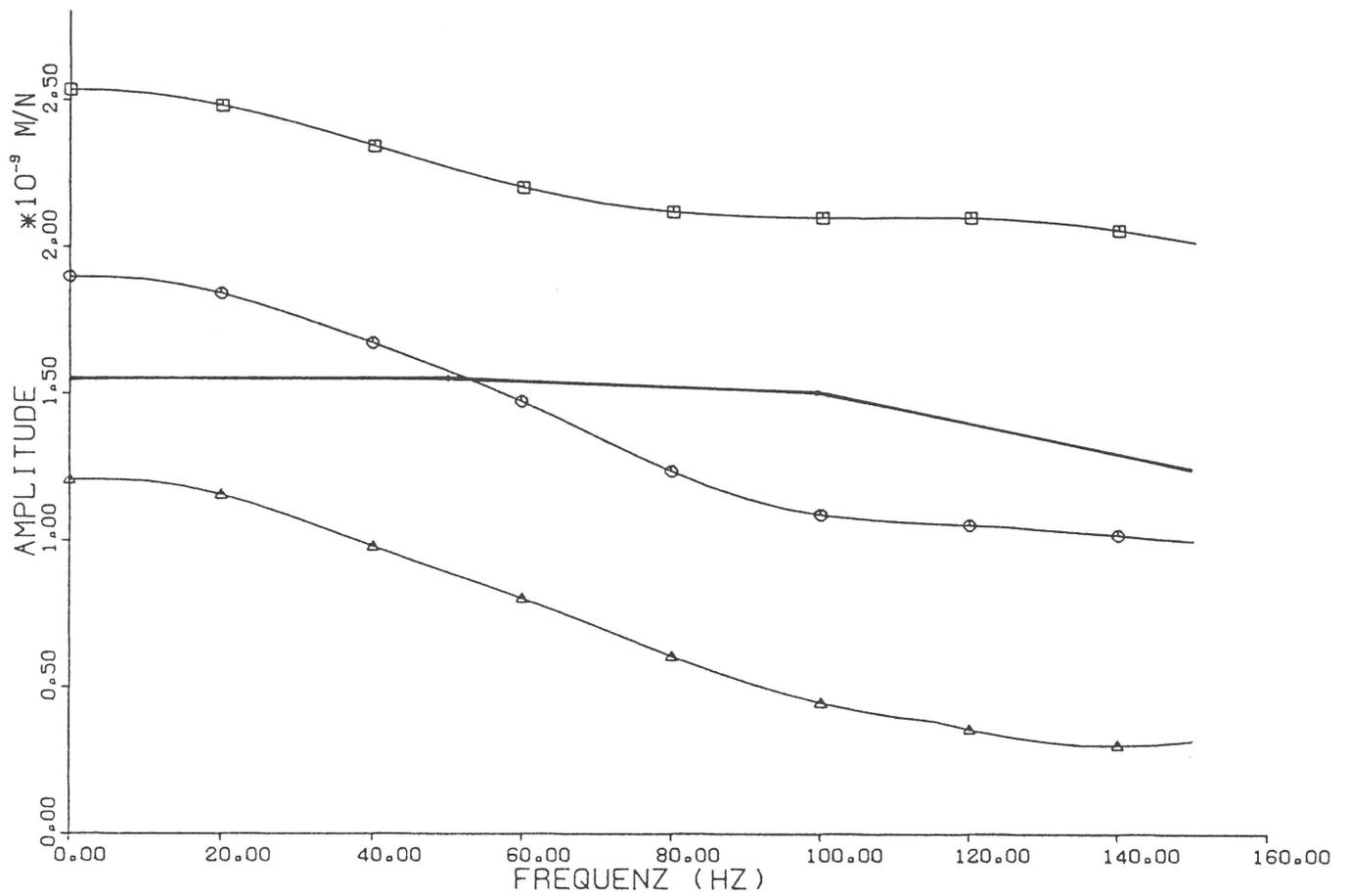


Bild 15  
 Vergleich der Nachgiebigkeiten des klassischen Fahrwegmodells (gebettete Schiene) und der Halbraummodelle (mit vollständiger Untergrundkopplung)

Mit dem Term  $k_1 u + k_3 u''$ , der auch als "Pasternak-Bettung" zur Unterscheidung von der "Winkler-Bettung" bezeichnet wird, kann die Steifigkeitsminderung infolge Untergrundkopplung angenähert werden. Der unsymmetrische Anteil  $k_2 u'$  könnte Fahrgeschwindigkeitseinflüsse auf die Biegelinie erfassen, die sich durch die Untergrundkopplung ergeben: Die Untergrundkopplung ist nämlich bei bewegter Last nicht mehr symmetrisch. Die endliche Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Untergrundes bewirkt, daß Punkte vor der bewegten Last später und schwächer von den durch die Last erzeugten Wellen beeinflusst werden als Punkte hinter der Last. Dies müßte zu einer Schrägstellung der Schiene unter der Last führen mit kleineren Verschiebungen vor der Last und größeren Verschiebungen

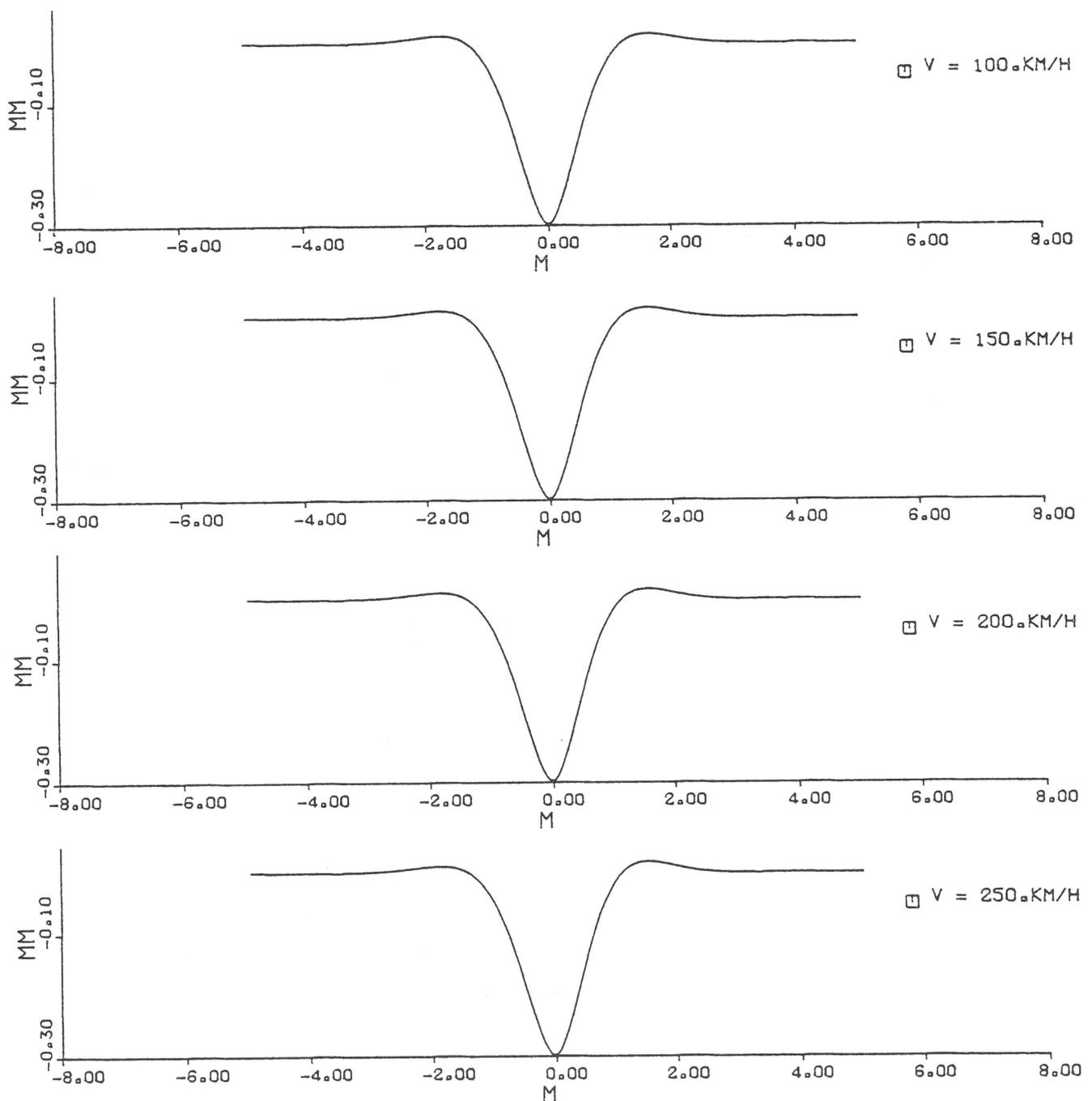


Bild 16  
Die Biegelinie der Schiene, Modell ohne Untergrundkopplung

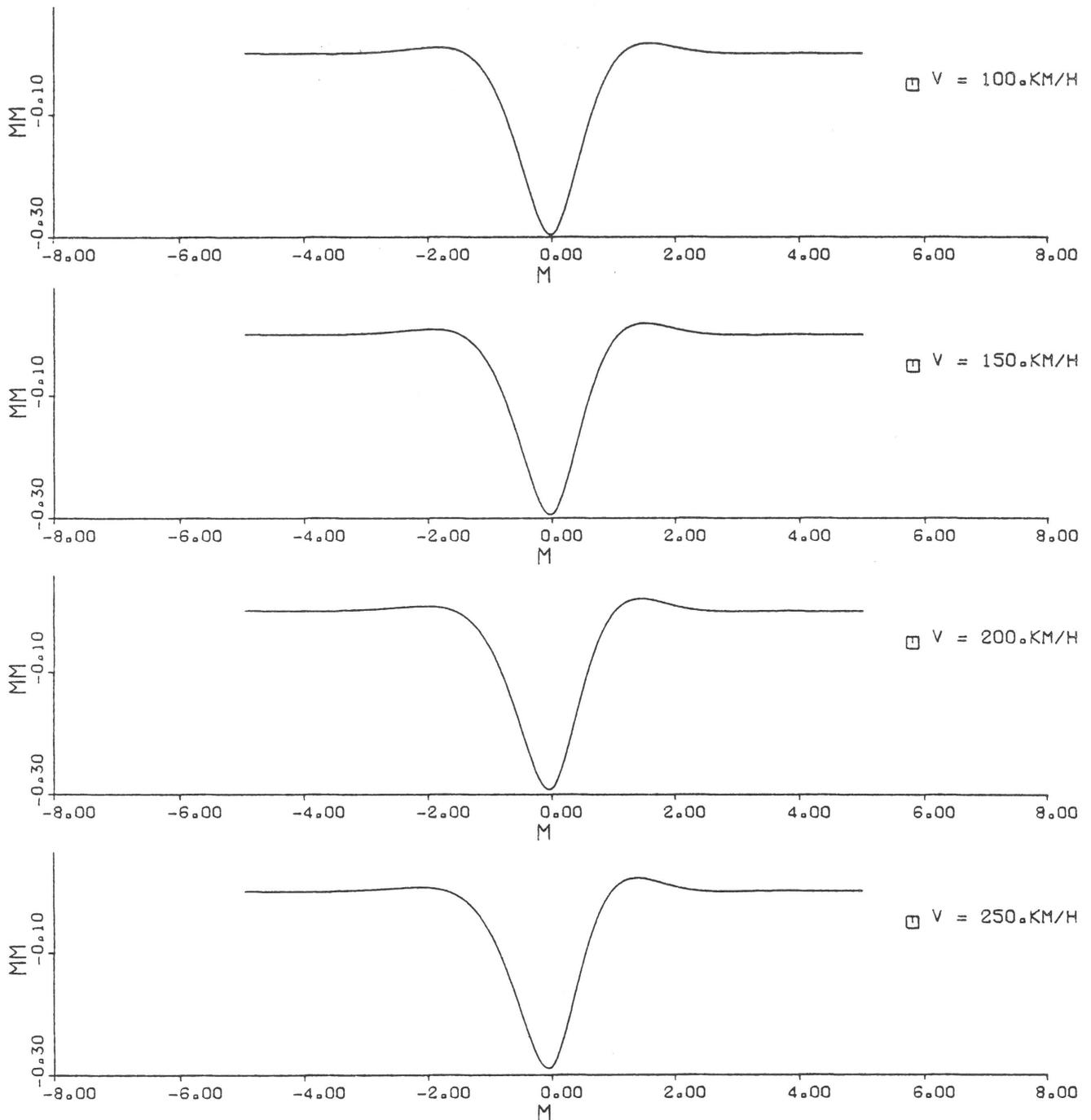


Bild 17  
Die Biegelinie der Schiene, Modell mit lokaler Untergrundkopplung

dahinter. Diese Auswirkungen der Untergrundkopplung sind in Bild 17 zu erkennen.

Zur Nachrechnung der Meßergebnisse wurden die Biegelinien unter der Achslast eines ICE-Triebkopfes bei den Geschwindigkeiten 100, 150, 200 und 250 km/h berechnet, und zwar mit dem klassisch gebetteten Modell (Bild 16)

$$k = 6,1 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2, \\ c = 8,2 \cdot 10^5 \text{ Ns/m}^2$$

und mit "lokalen Untergrundkopplungen" (Bild 17)

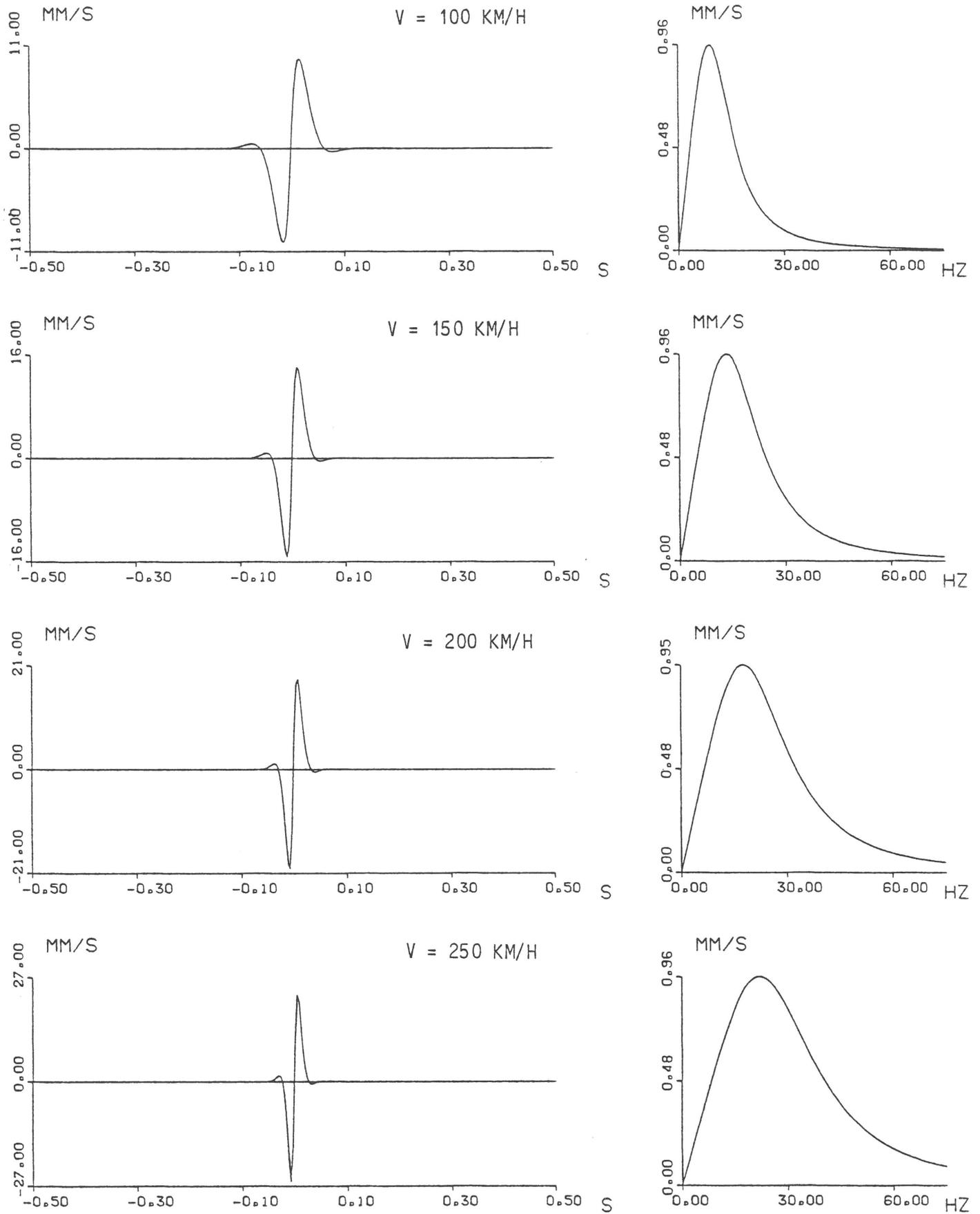


Bild 18  
 Schwinggeschwindigkeitszeitverlauf und -spektrum bei einer Achsüberfahrt,  
 verschiedene Fahrgeschwindigkeiten, Modell ohne Untergrundkopplung

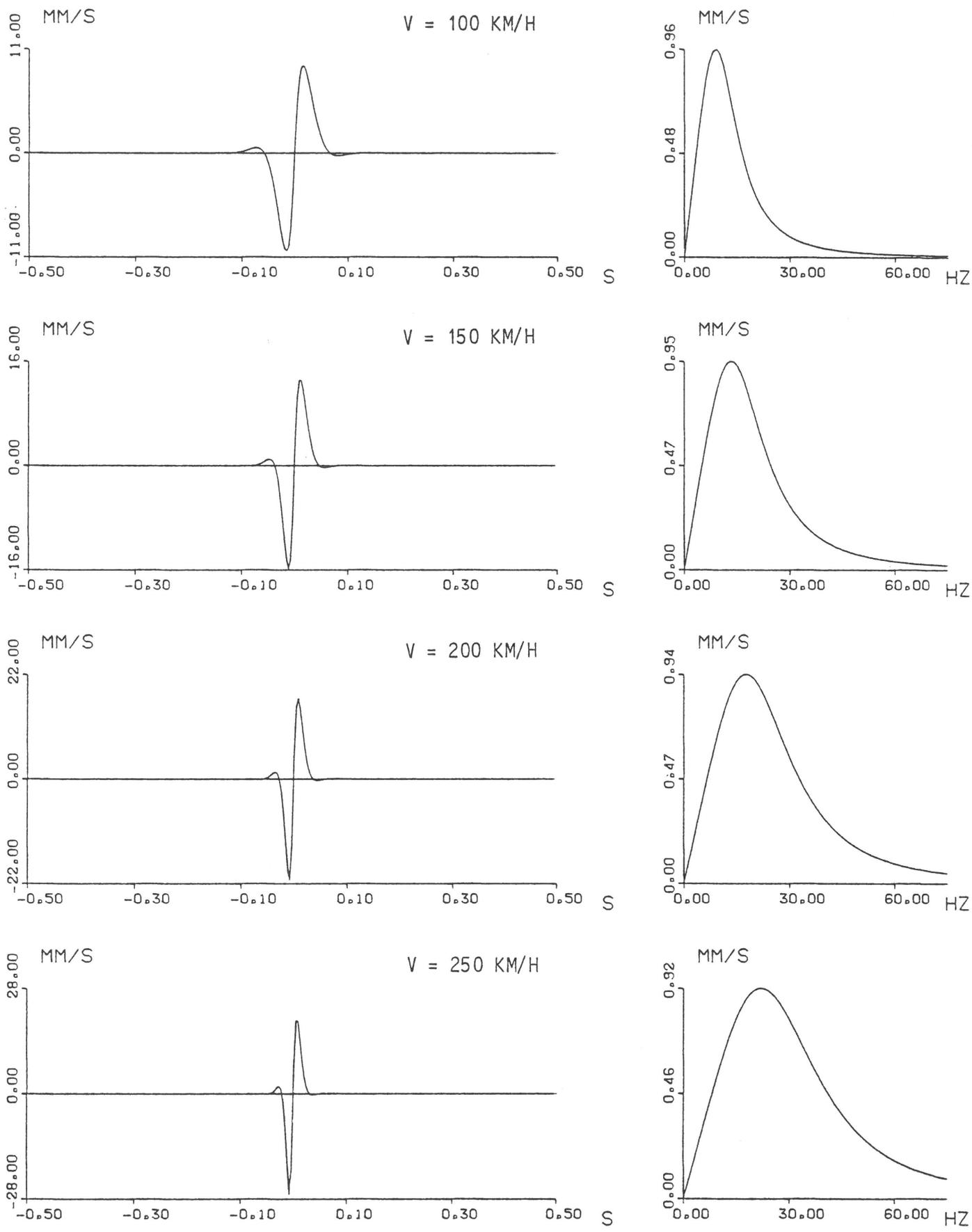


Bild 19  
 Schwinggeschwindigkeitszeitverlauf und -spektrum bei einer Achsüberfahrt,  
 verschiedene Fahrgeschwindigkeiten, Modell mit lokaler Untergrundkopplung

$$\begin{aligned}
k_1 &= k , \\
c &= 8,2 \cdot 10^5 \text{ Ns/m}^2 , \\
k_2 &= -v_Z \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^2 , \\
k_3 &= 0 .
\end{aligned}$$

Bild 18 und 19 zeigen die aus diesen Biegelinien entstehenden Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe eines ortsfesten Fahrwegpunktes (z. B. eines Schwellenmeßpunktes). Die Abwärts- und Aufwärtsbewegungen, die beim klassischen Modell und bei  $v_Z = 100 \text{ km/h}$  noch nahezu gleich sind, unterscheiden sich mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit und bei Berücksichtigung der Untergrundkoppelung: Der Abwärtsimpuls wird schärfer, der Aufwärtsimpuls weicher.

### 2.4.3 Diskussion von "kritischen" Geschwindigkeiten

Im Zusammenhang mit dem Hochgeschwindigkeitsschienenverkehr wird häufiger von "kritischen" Geschwindigkeiten gesprochen. Die folgende Übersicht (Bild 20) soll zeigen, daß diese "kritischen" Geschwindigkeiten für die Praxis des Hochgeschwindigkeitsverkehrs kaum eine Bedeutung haben dürften.

Zunächst sind die maßgeblichen Geschwindigkeiten aufgeführt, das ist die Fahrgeschwindigkeit  $v_Z$  des Zuges, die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $v_U$  des Untergrundes (Scher- oder Rayleighwelle) und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_{WU}$  des Fahrweges. Letztere wird durch die Eigenschaften des Fahrweges und des Untergrundes, im hier interessierenden tiefen Frequenzbereich praktisch nur vom Untergrund, bestimmt. (Ein versteifender Einfluß der Schiene ist erst oberhalb der "Koinzidenzfrequenz", bei der die Biegewellengeschwindigkeit  $v_B$  der Schiene mit der Untergrundwellengeschwindigkeit übereinstimmt, zu erwarten. Bei tieferen Frequenzen könnte es einen verlangsamenden Einfluß der Fahrwegträgheit geben, wenn man z. B. auch Teile des Schotters in die Trägheit des Fahrweges miteinbezieht. Erst bei sehr hohen Frequenzen nähert sich die Wellengeschwindigkeit  $v_{WU}$  des Fahrweges der Biegewellengeschwindigkeit  $v_B$  der Schiene an.)

Als nächstes sind charakteristische Frequenzen zu betrachten. Man hat die relativ tiefe Frequenz  $f_B$ , die sich aus dem Vorbeiziehen der Biegelinie der Schiene ergibt, und die Schwellenabstandsfrequenz  $f_S$ , die die Parametererregung infolge der diskreten Schienenstützung charakterisiert. Den fahrgeschwindigkeitsabhängigen Frequenzen stehen die Systemeigenfrequenzen von Radsatz und Untergrund  $f_0$  und von Fahrweg und Untergrund  $f_{WU}$  gegenüber.

Mit diesen Geschwindigkeiten und Frequenzen ergeben sich nun einige sogenannte "kritische" Fahrgeschwindigkeiten: Die Geschwindigkeit  $v_1$  bei Erreichen der

### Geschwindigkeiten

Fahrgeschwindigkeit	$v_Z = 0 - 100 \text{ m/s} = 0 - 360 \text{ km/h}$
Scherwellengeschwindigkeit (normaler Untergrund)	$v_U = 100 - 500 \text{ m/s}$
Biegewellengeschwindigkeit Schiene und Schwellen	$v_B = \sqrt[4]{\frac{EJ}{\rho F}} \sqrt{\omega} = 250 \text{ m/s (100 Hz)}$
Wellengeschwindigkeit Fahrweg und Untergrund	$v_{WU} \approx v_U = 100 - 500 \text{ m/s (} f \ll f_{WU} \text{)}$

### Frequenzen

statische Einsenkung (Biegewellenlänge $\lambda_B$ )	$f_B = \frac{v_Z}{\lambda_B} = 0 - 50 \text{ Hz}$
Schwellenabstand $d_S$	$f_S = \frac{v_Z}{d_S} = 0 - 170 \text{ Hz}$
Radsatz — Untergrund — Eigenfrequenz	$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{WU}}{m_R + m_S}} = 30 - 150 \text{ Hz}$
Fahrweg — Untergrund — Eigenfrequenz	$f_{WU} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_U}{\rho F}} = 70 - 350 \text{ Hz}$

### kritische Geschwindigkeiten

„Schallmauer“ des Untergrundes  $v_1 = v_U = 360 - 1800 \text{ km/h}$

„Instabilität“ der Schwellenabstandsanregung

$$f_S = 2f_0 \implies v_2 = \frac{d_S}{\pi} \sqrt{\frac{k_{WU}}{m_R + m_S}} = 120 - 600 \text{ km/h}$$

„Biegewellenresonanz“

$$f_B = f_{WU} \implies v_3 = \frac{\lambda_B}{2\pi} \sqrt{\frac{k_U}{\rho F}} = 1000 - 2500 \text{ km/h}$$

Bild 20

"Kritische" Geschwindigkeiten und Frequenzen des Systems  
Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund

Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_U$  des Untergrund, die Geschwindigkeit  $v_2$ , bei der die Parameteranregung  $f_S$  die Radsatz-Untergrund-Eigenschwingung  $f_0$  gerade im doppelten Takt "aufschaukeln" könnte, und die eher theoretisch interessante Geschwindigkeit  $v_3$ , bei der die statische Biegelinie gerade die Fahrweg-Untergrund-Eigenfrequenz  $f_{WU}$  anregen würde. (Letztere Geschwindigkeit ist die klassische kritische Geschwindigkeit des gebetteten Balkens, die den Grenzfall kennzeichnet, bei dem auch schon eine statische bewegte Last nicht mehr stehende, das heißt mit der Last mitbewegte Wellen erzeugt, sondern von der Last fortschreitende Biegewellen.)

Während die klassische kritische Geschwindigkeit  $v_3$  ("Biegewellenresonanz") gänzlich außerhalb realistischer Geschwindigkeiten liegt, liegen die anderen beiden "kritischen" Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  im Bereich des Möglichen. Zur Instabilität der Schwellenabstandsanregung ( $v_2$ ) wurde bereits in Abschnitt 2.2.2 ausgeführt, daß bei den relativ kleinen regulären Steifigkeitsschwankungen des Schwellen-Schotter-Untergrund-Gleises und infolge der Abstrahlungsdämpfung des Untergrundes Instabilitäten praktisch ausgeschlossen werden können. Als relevante kritische Geschwindigkeit verbleibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Untergrundes ( $v_1 = v_U$ ).

Die Übersicht in Bild 20 zeigt, daß im Extremfall sehr hoher Fahrgeschwindigkeit  $v_Z = 360$  km/h und weichem Boden  $v_U = 100$  m/s diese Geschwindigkeiten allerdings zusammenfallen können. Für den Normalfall scheint auch diese Grenzsituation ("Schallmauer") ohne Relevanz zu sein. (Böden mit kleinerer Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_U < 100$  m/s bedürfen einer gesonderten Betrachtung, da sie kaum als normaler Untergrund bezeichnet werden können. Hier dürften schon statische Gründe für mögliche Schäden vorliegen, für die die Dynamik der Zugvorbeifahrt lediglich der Auslöser sein kann. Messungen von Behnke /10/, der im Auftrag der Bundesbahn Schadensfälle bei sehr weichem Heide- und Moorboden untersucht hat, deuten ebenfalls auf diese Zusammenhänge.)

### 3. Nachrechnung der Versuchsfahrten des Hochgeschwindigkeitszuges Intercity Experimental (ICE) und Vergleich mit den Meßergebnissen

Nachdem im vorangehenden Abschnitt 2 die Berechnungsverfahren und eine Reihe von Zwischenergebnissen, die für die Simulation der Versuchsfahrten und der dabei auftretenden Erschütterungen notwendig sind, ausführlich beschrieben wurden, können sich die Ausführungen dieses Abschnitts auf die Beschreibung der Endergebnisse und den Vergleich mit den Meßergebnissen beschränken.

#### 3.1 Fahrwegbewegungen

Es wurden die Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe eines Schwellenmeßpunktes bei Überfahrt eines viergliedrigen ICE-Zuges mit den in Bild 21 dargestellten Achsabständen und Achslasten berechnet. Es wird das klassische Fahrweg-Untergrund-Modell (gebetteter Balken) mit "lokaler Untergrundkopplung" (s. Abschnitt 2.4.2) zugrundegelegt - Schiene UIC 60, Untergrund mit  $v_S = 270$  m/s. Bild 22 zeigt die Rechenergebnisse für die Fahrgeschwindigkeiten  $v = 100, 150, 200$  und  $250$  km/h.

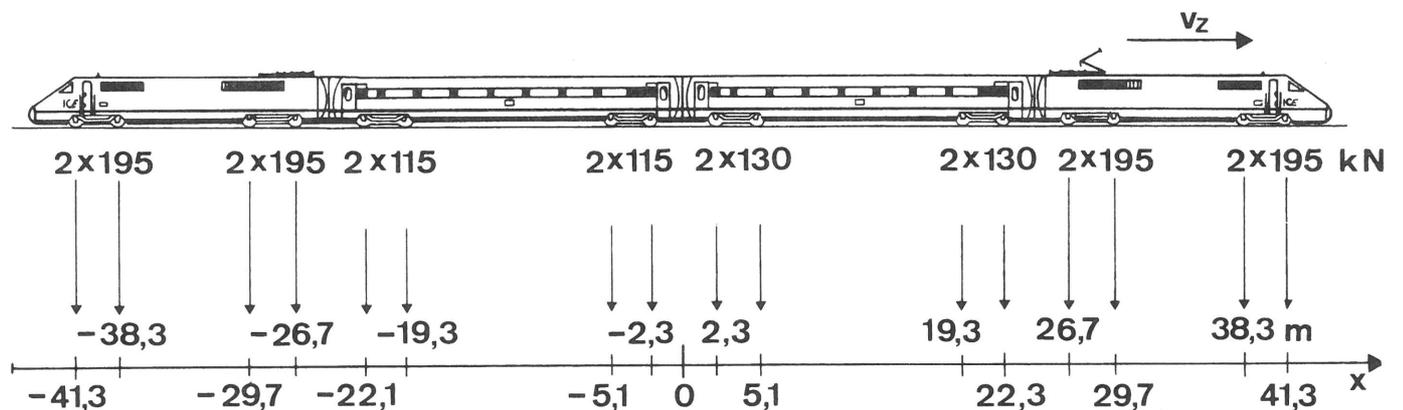


Bild 21

Achslastkonfiguration des viergliedrigen Intercity Experimental

Die Zeitverläufe bestehen jeweils aus den Überfahrtimpulsen der einzelnen Achsen, wobei zu jeder Achse ein negativer und ein positiver Maximalwert gehört. Dieses Schwinggeschwindigkeitsmaximum nimmt mit der Fahrgeschwindigkeit zu. Die zugehörigen Spektren sehen für alle Fahrgeschwindigkeiten nahezu gleich aus, sie sind lediglich mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit im Frequenzmaßstab gedehnt. Die Spektren spiegeln in ihrer Breitbandigkeit die Schärfe der Überfahrtimpulse, in den relativen Maxima bestimmte wiederkehrende Achsabstände wieder (dies wird auch durch den Vergleich mit den Spektren einer einzelnen Achsüberfahrt in Bild 18 und 19 deutlich).

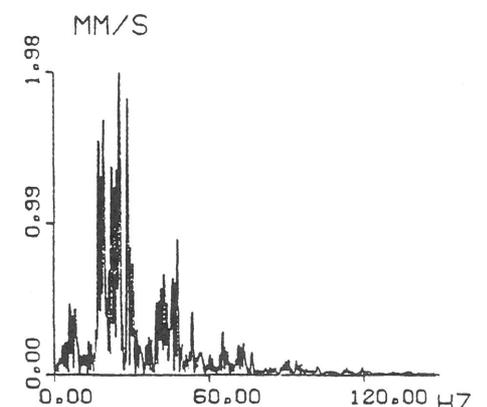
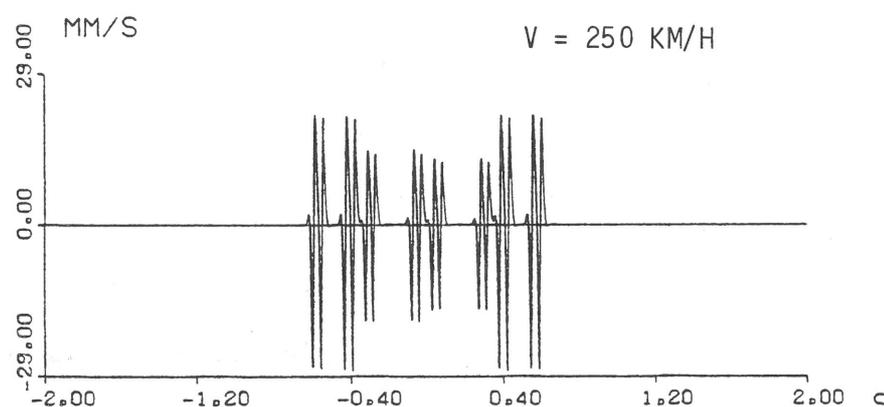
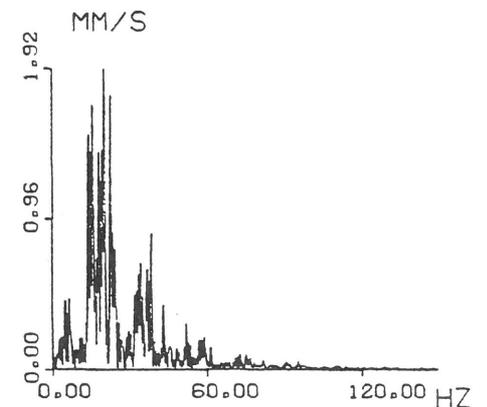
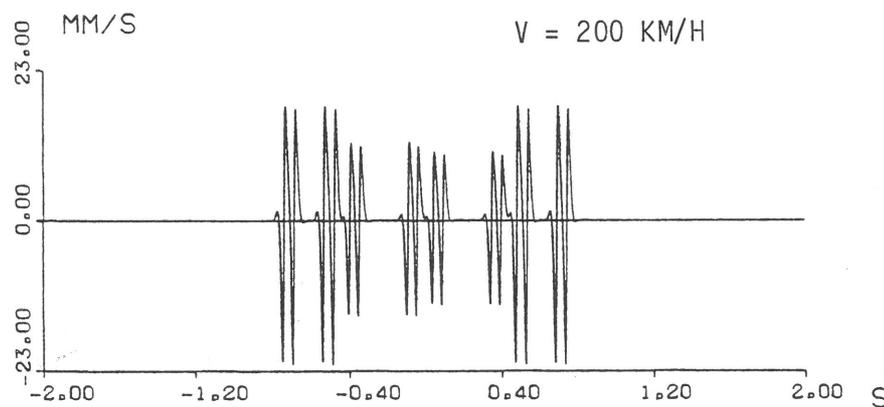
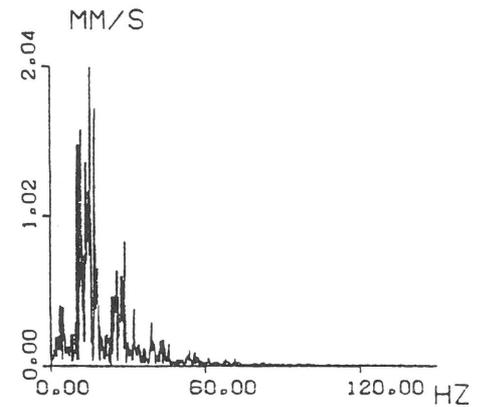
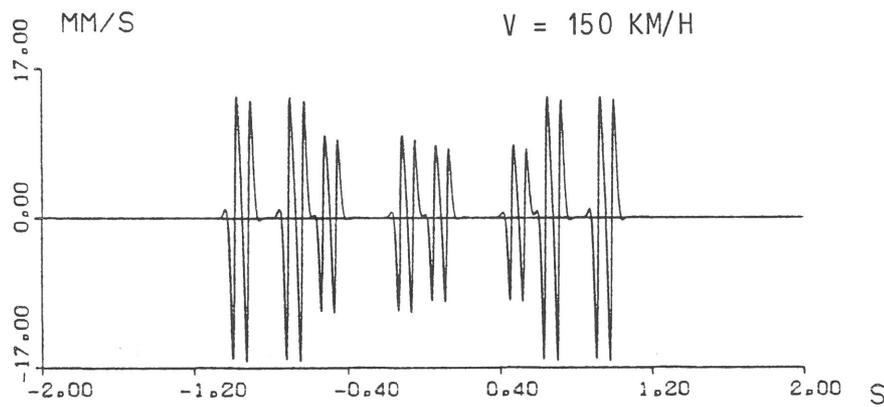
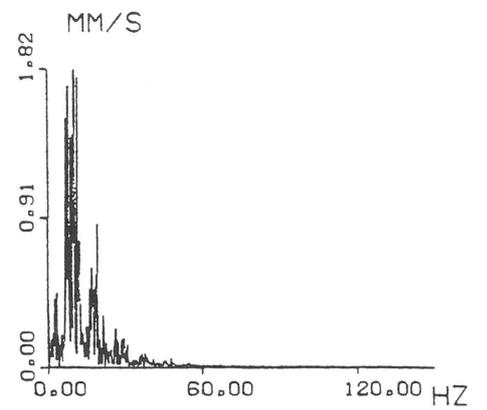
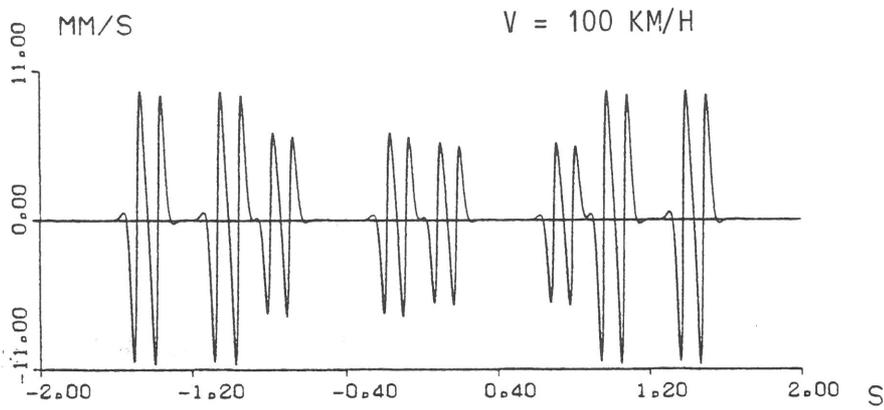


Bild 22  
Schwinggeschwindigkeiten des Fahrwegs bei Überfahrt eines viergliedrigen ICE,  
Rechenergebnisse (nur mit statischen Lasten)

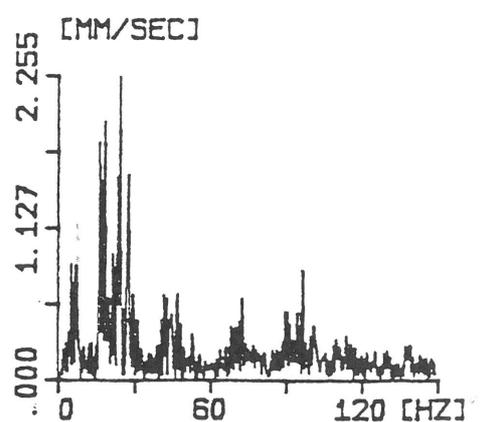
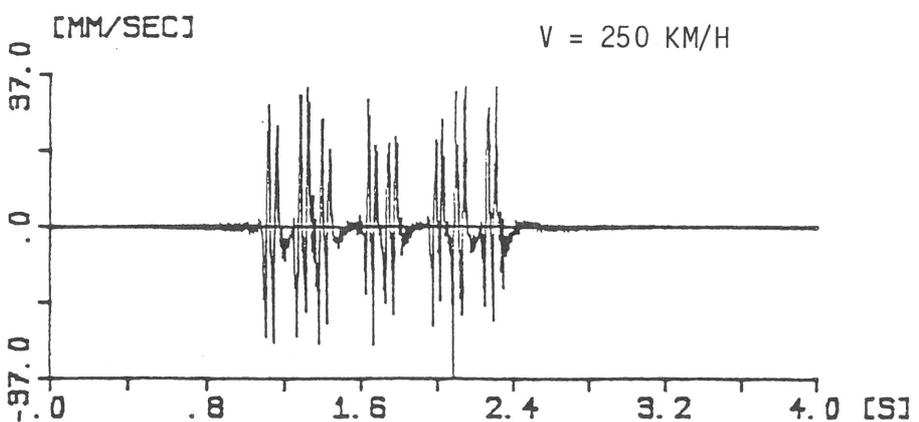
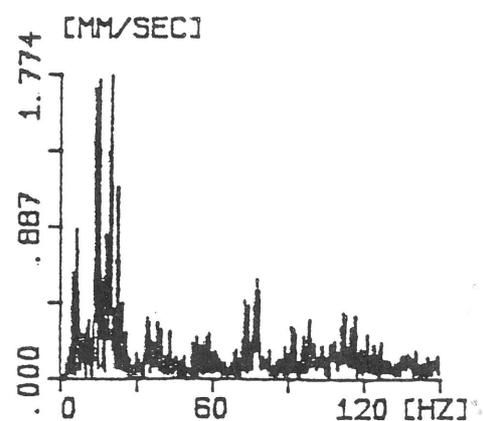
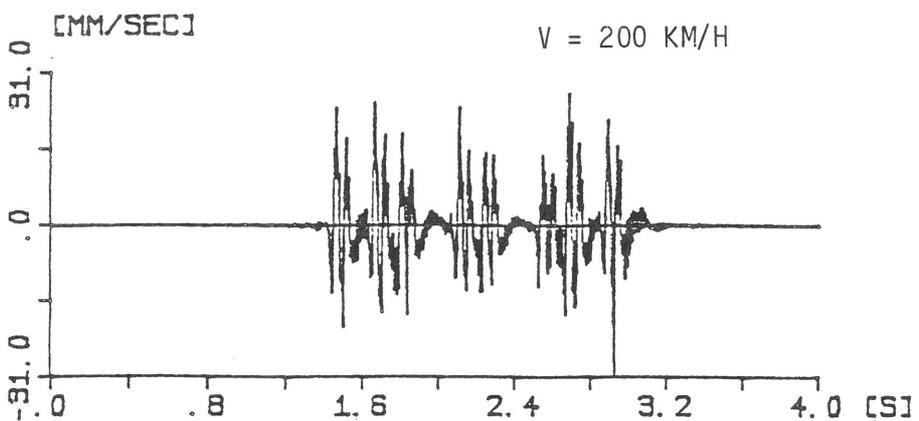
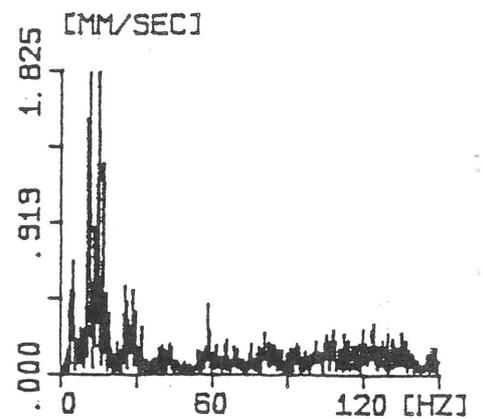
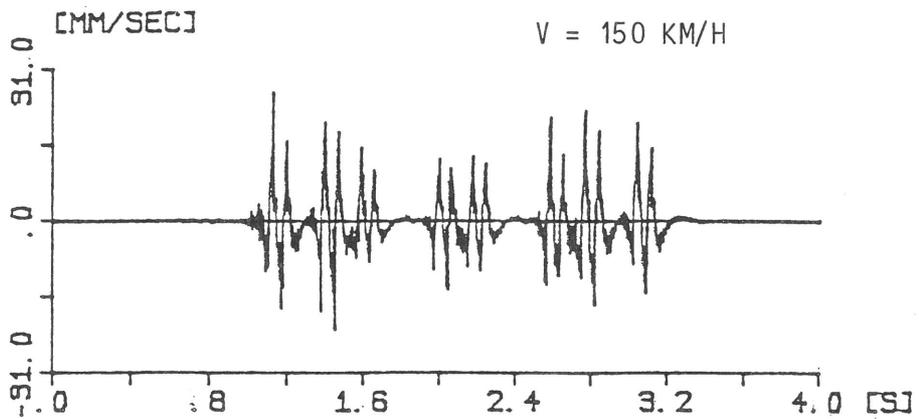
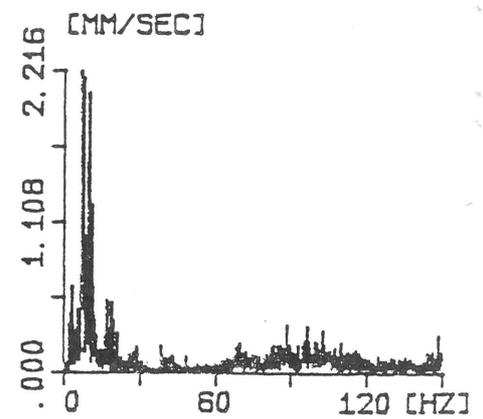
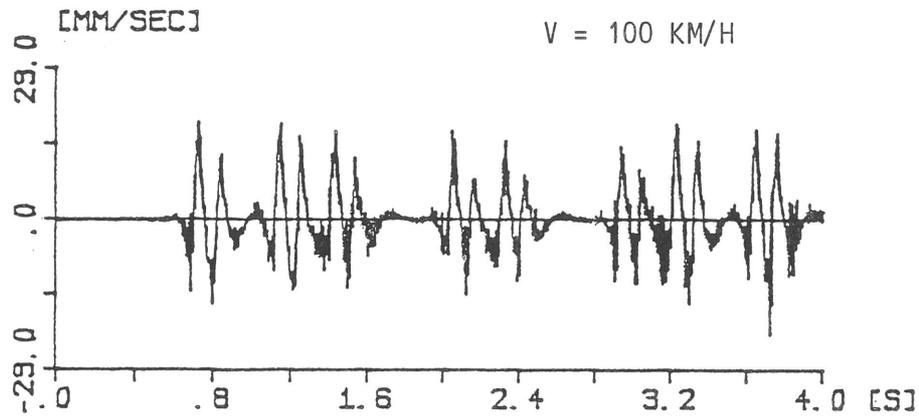


Bild 23  
Schwinggeschwindigkeiten des Fahrwegs bei Überfahrt eines viergliedrigen ICE,  
Meßergebnisse der dritten Meßserie

Zum Vergleich sind den Rechenergebnissen die Meßergebnisse in Bild 23 gegenübergestellt. Man erkennt, insbesondere beim Vergleich der Spektren, daß die berechneten Fahrwegbewegungen infolge der statischen Achslasten sehr gut mit den Meßergebnissen übereinstimmen. Dieser "statische" Anteil ist auch bereits das Wesentliche der gemessenen Fahrwegschwingungen. Das Fahrwegverhalten ist demnach hauptsächlich von den statischen Lasten bestimmt. Durch den Vergleich der Meßergebnisse mit den Rechenergebnissen, die nur den statischen Lastanteil enthalten, erkennt man bei der Messung auch höherfrequente Anteile, die dynamischen Lasten zugeordnet werden müssen.

### 3.2 Die Erschütterungen in der Umgebung

Es werden die Erschütterungen in der Umgebung für die Versuchsfahrten mit dreigliedrigem ICE-Zug gemäß Bild 24 berechnet. Als Anregung wirken dabei bewegte, zeitlich stationäre Kräfte, von denen der statische (Eigengewichts-) Anteil ebenfalls aus Bild 24 abgelesen werden kann. Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die im vorigen Abschnitt 3.1 berechneten Schienen- bzw. Schwellenbewegungen keineswegs als Anregung für die Erschütterungsausbreitung anzusehen sind. Die Fahrwegbewegungen stellen genauso wie die Umgebungserschütterungen lediglich Antworten auf die vorbeifahrenden statischen und dynamischen Achslasten dar, die sich gegenseitig nicht beeinflussen. Die Berechnungen dieses Abschnitts zeigen sogar, daß die Antworten des Systems Fahrweg-Untergrund eine grundsätzlich andere Charakteristik aufweisen als die Antworten des "Systems Umgebung".

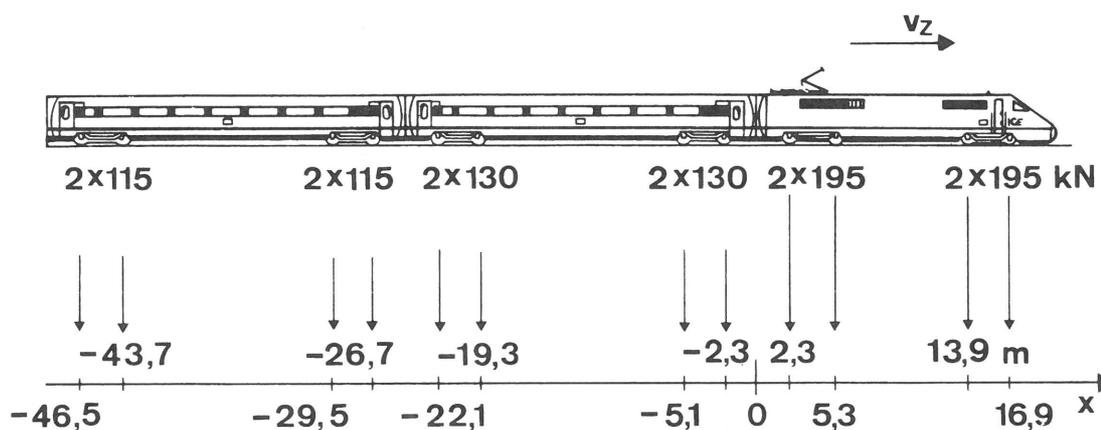


Bild 24

Achslastkonfiguration des dreigliedrigen Intercity Experimental

Zunächst soll dies an den Erschütterungen, die nur infolge der statischen Lastanteile  $p_0$  entstehen, erläutert werden. Bild 25 zeigt die Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe und die zugehörigen Spektren in 2,5, 5, 10 und 20 m Abstand von Gleismitte bei einer Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h. Man erkennt

V = 200.0 KM/H

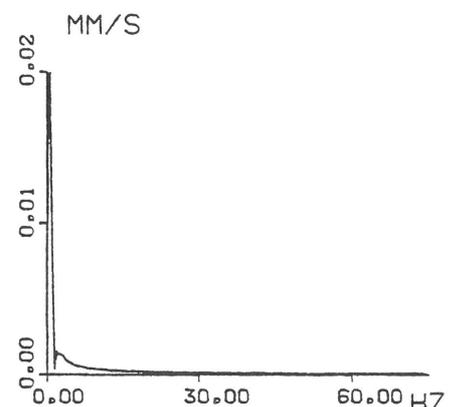
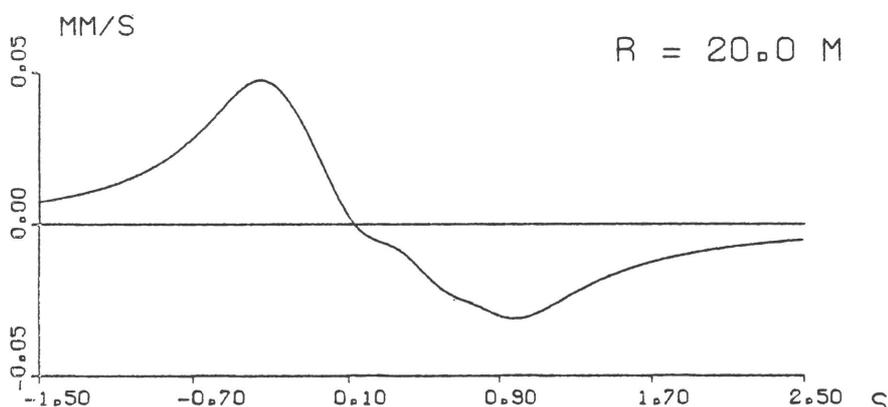
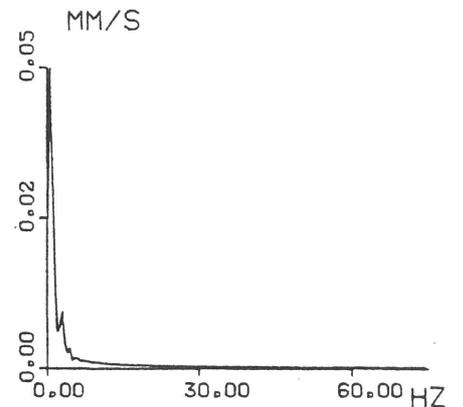
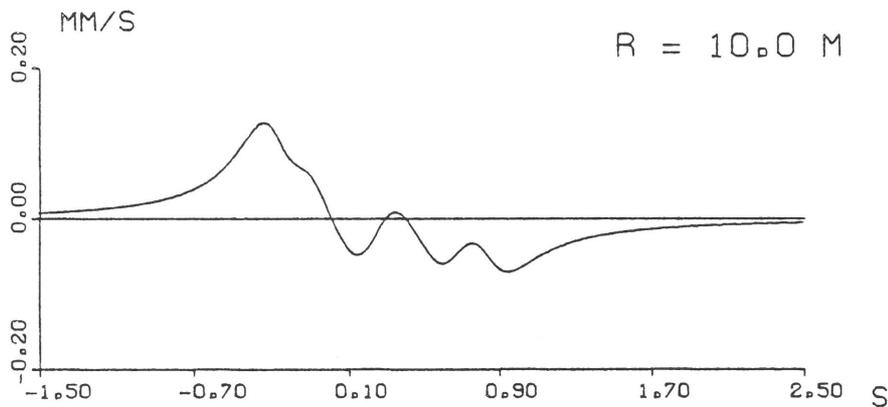
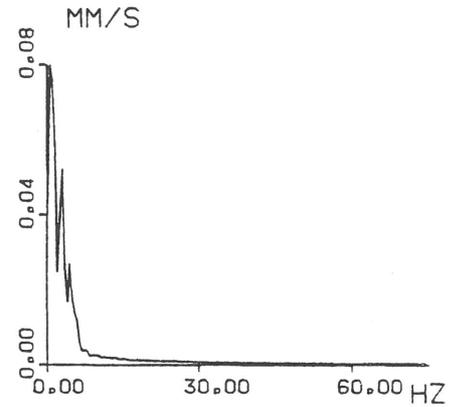
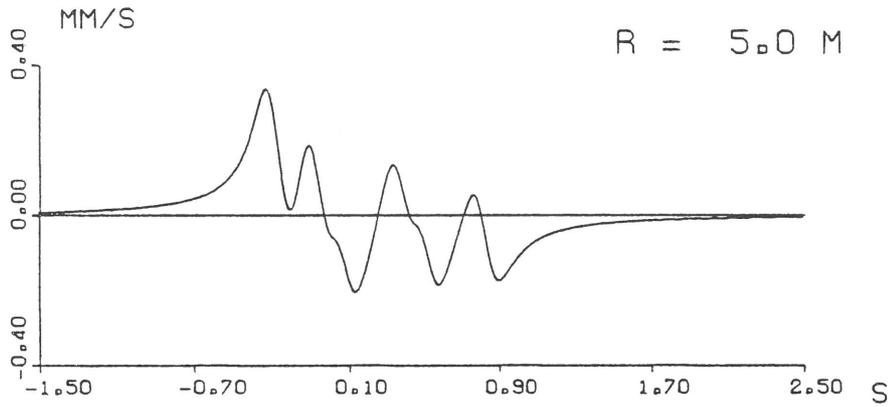
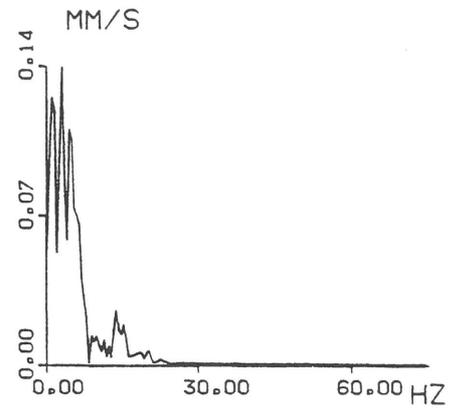
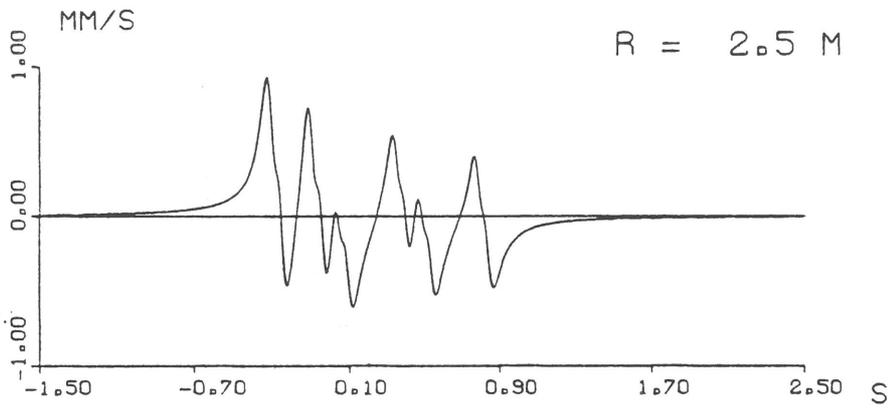


Bild 25

Schwingungsgeschwindigkeiten in der Umgebung bei Vorbeifahrt eines dreigliedrigen ICE, Rechengenergebnisse (nur mit statischen Lasten)

folgendes: Mit zunehmender Entfernung vom Gleis glätten sich die Zeitverläufe. Sieht man an der Schwelle (Bild 23) noch jede Achse, so erkennt man bei  $r = 2,5$  m noch alle Drehgestelle, bei  $r = 5$  m noch die Drehgestellpaare und bei  $r = 20$  m sieht man nur noch das einmalige Auf und Ab für den gesamten Zug (eine positive Schwinggeschwindigkeit bedeutet hier eine Bewegung nach unten). Die Maximalamplitude nimmt dabei stärker als mit  $u \sim r^{-1}$  ab. Der Glättung des Zeitverlaufs mit wachsender Entfernung entspricht im Spektrum eine Verschiebung zu sehr tiefen Frequenzen hin, die vom Menschen kaum noch wahrgenommen werden. Man kann somit insgesamt feststellen, daß die statischen Lasten  $p_0$  in ihrer Bedeutung auf die unmittelbare Gleisnähe (Fahrweg und "Untergrund") beschränkt bleiben. Die weitere Umgebung ist dagegen von den dynamischen Lastanteilen bestimmt (Bild 26).

Bild 26 zeigt die berechneten Erschütterungen infolge statischer und dynamischer Lasten bei einer Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h. Neben den Eigengewichtslasten  $p_0$  ist die Schwellenabstandsanregung  $p_1$ , so wie sie aus der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik (Abschnitt 2.2.3) fahrgeschwindigkeitsabhängig ermittelt wurde, sowie eine fahrgeschwindigkeitsunabhängige Last  $p_3$  ("Maschinenkraft") mit der Frequenz  $f = 25$  Hz und einer Amplitude  $p_3 = 0,05 p_0$  berücksichtigt. Das Ausbreitungsmedium Boden ist durch die Materialwerte

$$\begin{aligned}
 v_S &= 270 \text{ m/s} , \\
 \rho &= 1,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 , \\
 \nu &= 0,33 , \\
 D &= 0,03 \quad (\text{entspricht } G = G_0 (1 + i2D) ,
 \end{aligned}$$

charakterisiert. Für das Ausbreitungsgesetz wird nur die Nahfeldasymptote ( $n = 1$ , s. Abschnitt 2.3.2) der Punktlastlösung ausgewertet. Dies entspricht in etwa den Ergebnissen der harmonischen Wellenfeldmessungen am Meßort. Zum Vergleich sind in Bild 27 die gemessenen Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe der entsprechenden Meßpunkte bei  $r = 2,5, 5, 10, 20, 50, 100$  Metern wiedergegeben. Messung und Rechnung stimmen qualitativ und quantitativ sehr gut überein. Beeindruckend ist dabei, daß durchgängig alle wesentlichen Merkmale der Messungen in den Rechenergebnissen wiederzufinden sind, zumal wenn man bedenkt, daß die Eingabedaten der Rechnung (bis auf die Last  $p_3$ ) von den Meßergebnissen unbeeinflusst sind. (Es handelt sich hier nicht um eine Kurvenanpassung /"curve fitting".) Insbesondere liegt allen Berechnungen (Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit, Parametererregung, Gleisverformung und Erschütterungsausbreitung) der gleiche Untergrund mit  $v_S = 270$  m/s zugrunde.

V = 200.0 KM/H

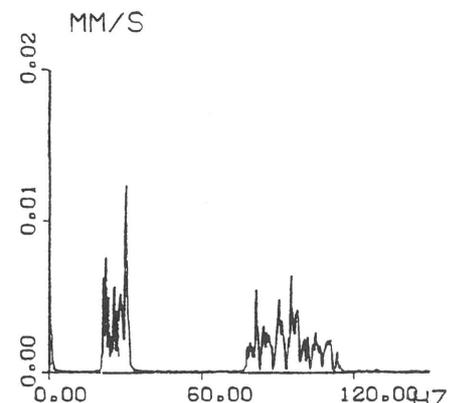
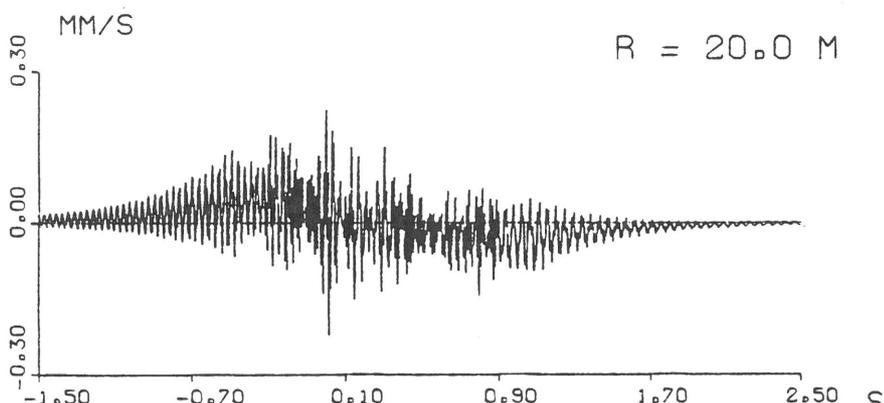
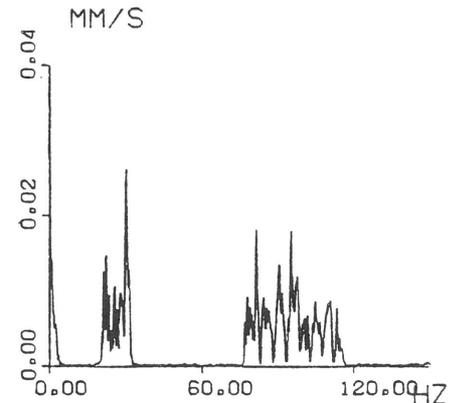
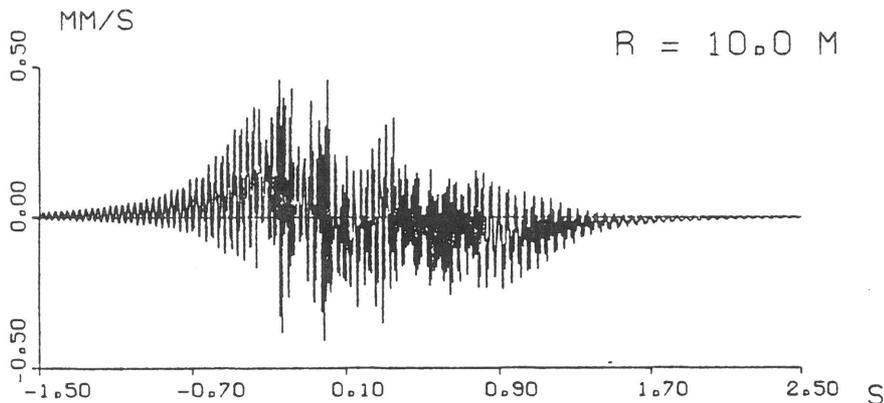
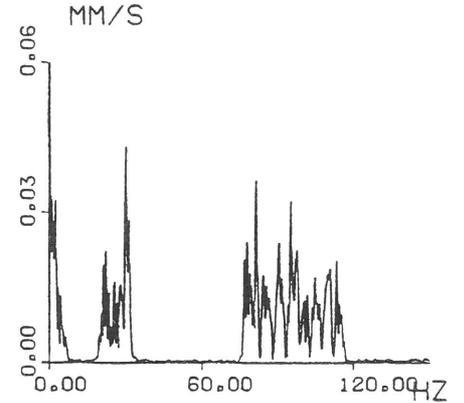
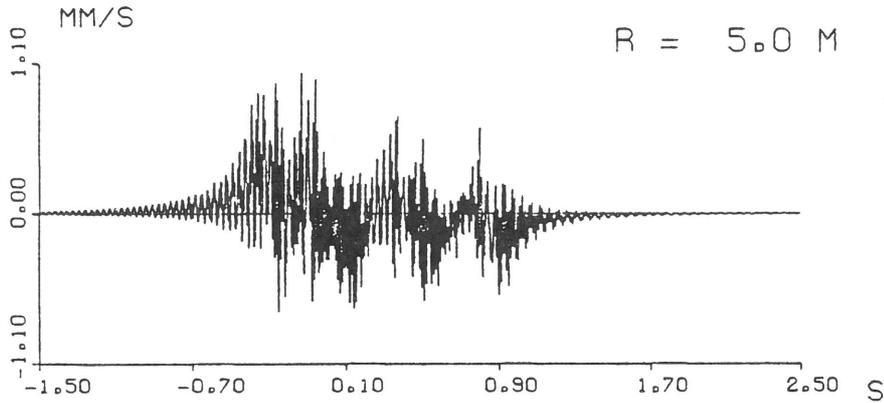
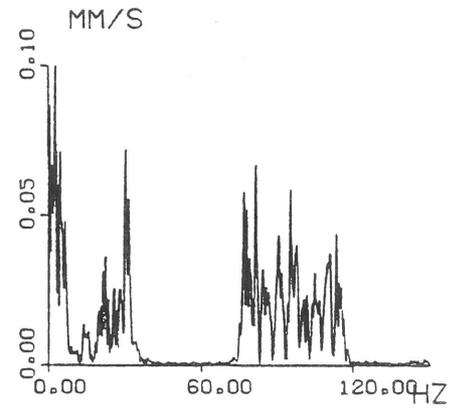
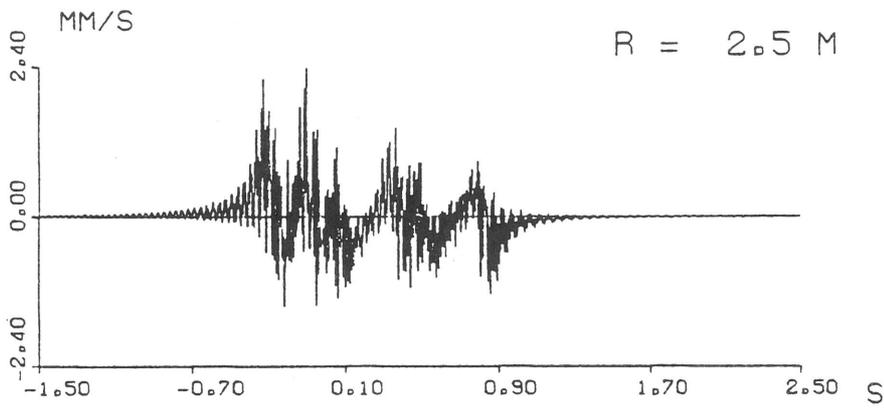


Bild 26  
Schwinggeschwindigkeiten in der Umgebung bei Vorbeifahrt eines dreigliedrigen ICE,  
Rechenergebnisse (statische und dynamische Lasten)

V = 200,0 KM/H

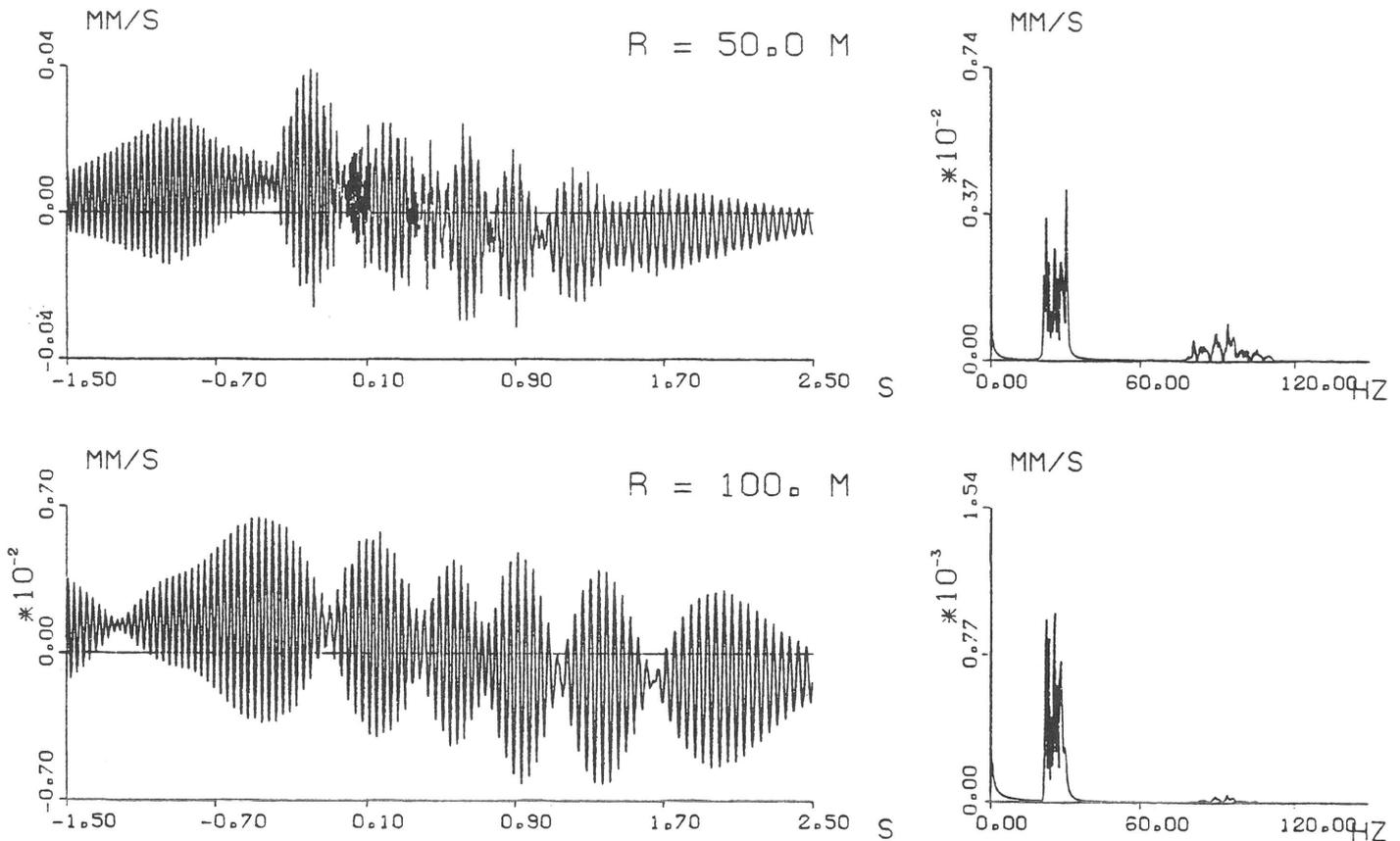


Bild 26 a

Aus den Meß- und Rechenergebnissen lassen sich gleichermaßen folgende Merkmale der Schienenverkehrserschütterungen ableiten:

- Alle Lastanteile erfahren durch die Bewegung des Zuges eine deutliche Aufweitung des Frequenzbereiches. Diese Frequenzaufweitung ist in unmittelbarer Gleisnähe am stärksten - hier ist auch der Puls- oder Stoßcharakter der Anregung am stärksten - und nimmt mit der Entfernung ab.
- Der Doppler-Effekt, das ist die Frequenzerhöhung bei Herannahen, eine Frequenzverminderung nach Vorbeifahrt des Zuges bewirkt ebenfalls eine Aufweitung des Frequenzinhalts. Die Ursache des Doppler-Effekts (Frequenzverschiebung) ist die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit im Untergrund, während der erstgenannte Effekt (Frequenzaufweitung) auf das Amplituden-Abstandsgesetz zurückzuführen ist. Der Doppler-Effekt ist auch noch in größeren Entfernungen wirksam.
- Die statischen Lasten werden erst durch die Bewegung und die damit verbundene Frequenzaufweitung wahrnehmbar. Ihre Bedeutung ist daher auf die Gleisnähe beschränkt, ebenso die mit den statischen Lasten verbundenen "Achsabstandsfrequenzen". (Bei den Messungen ist das "Herausfiltern" der statischen Frequenzanteile mit zunehmender Entfernung noch deutlicher als bei den Rechnungen, da die Meßaufnehmer Frequenzen unter 2 Hz nicht mehr bzw. nur sehr vermindert registrieren können.)

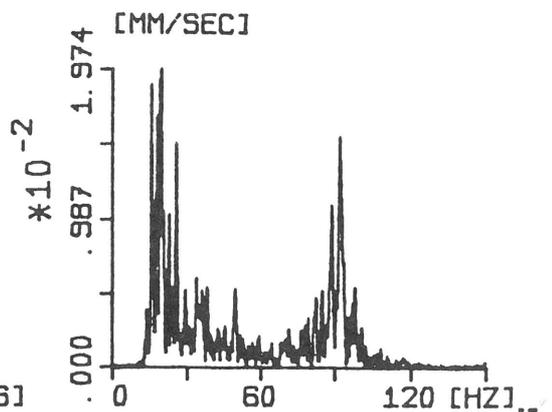
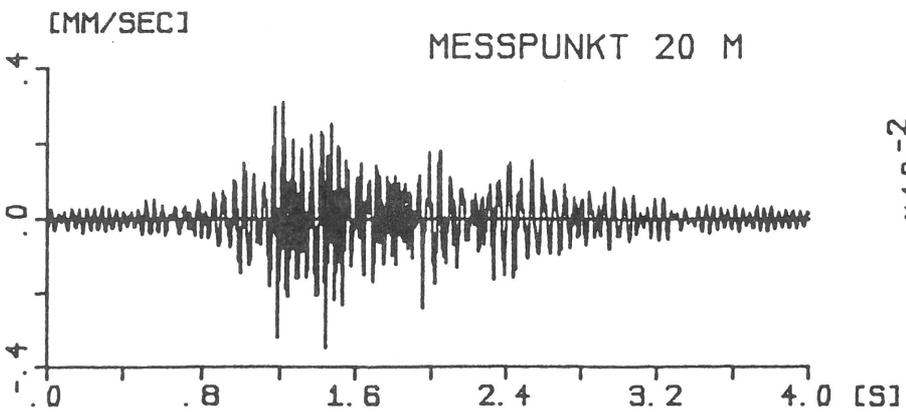
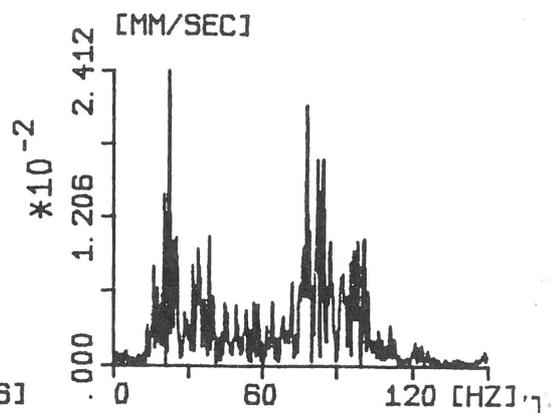
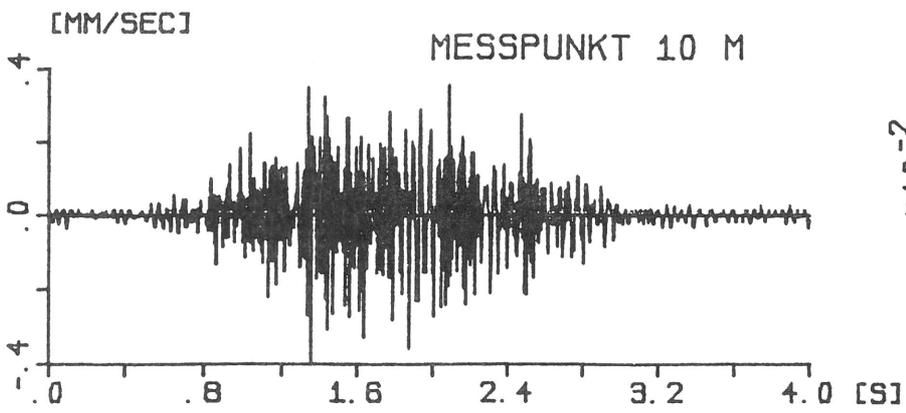
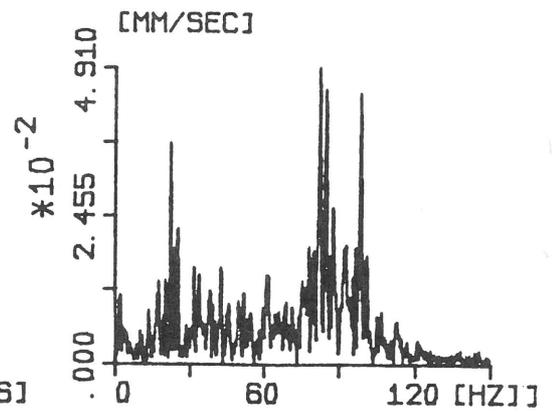
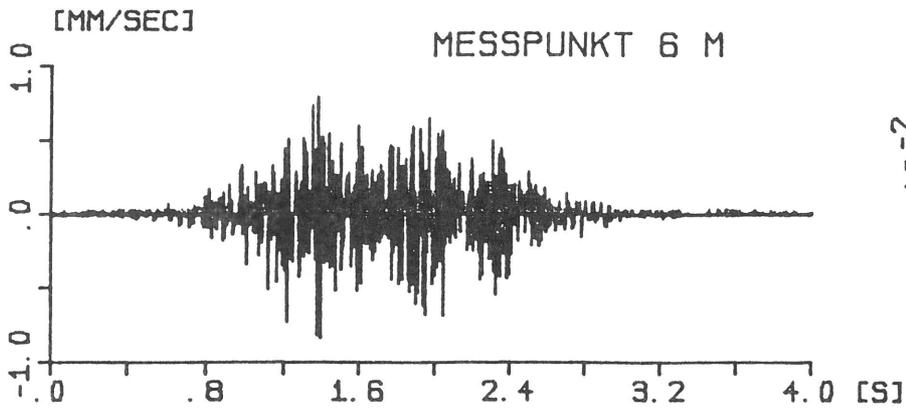
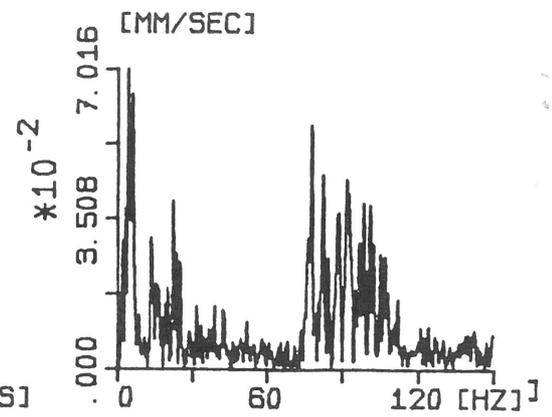
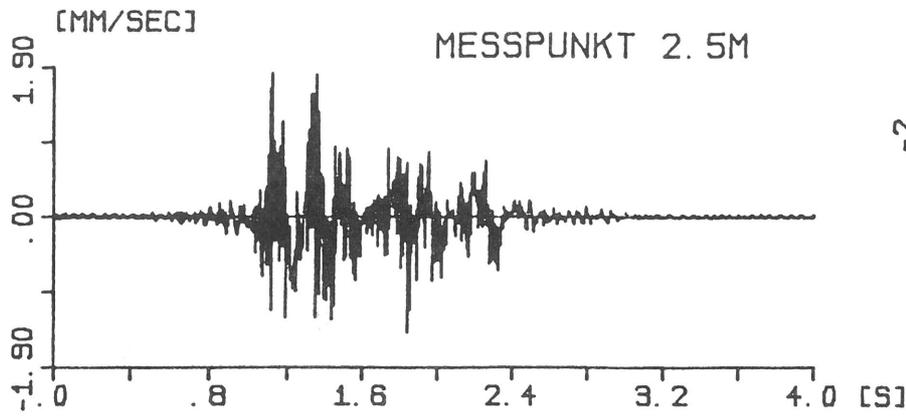


Bild 27  
Schwinggeschwindigkeiten in der Umgebung bei Vorbeifahrt eines dreigliedrigen ICE,  
Meßergebnisse der ersten Meßserie

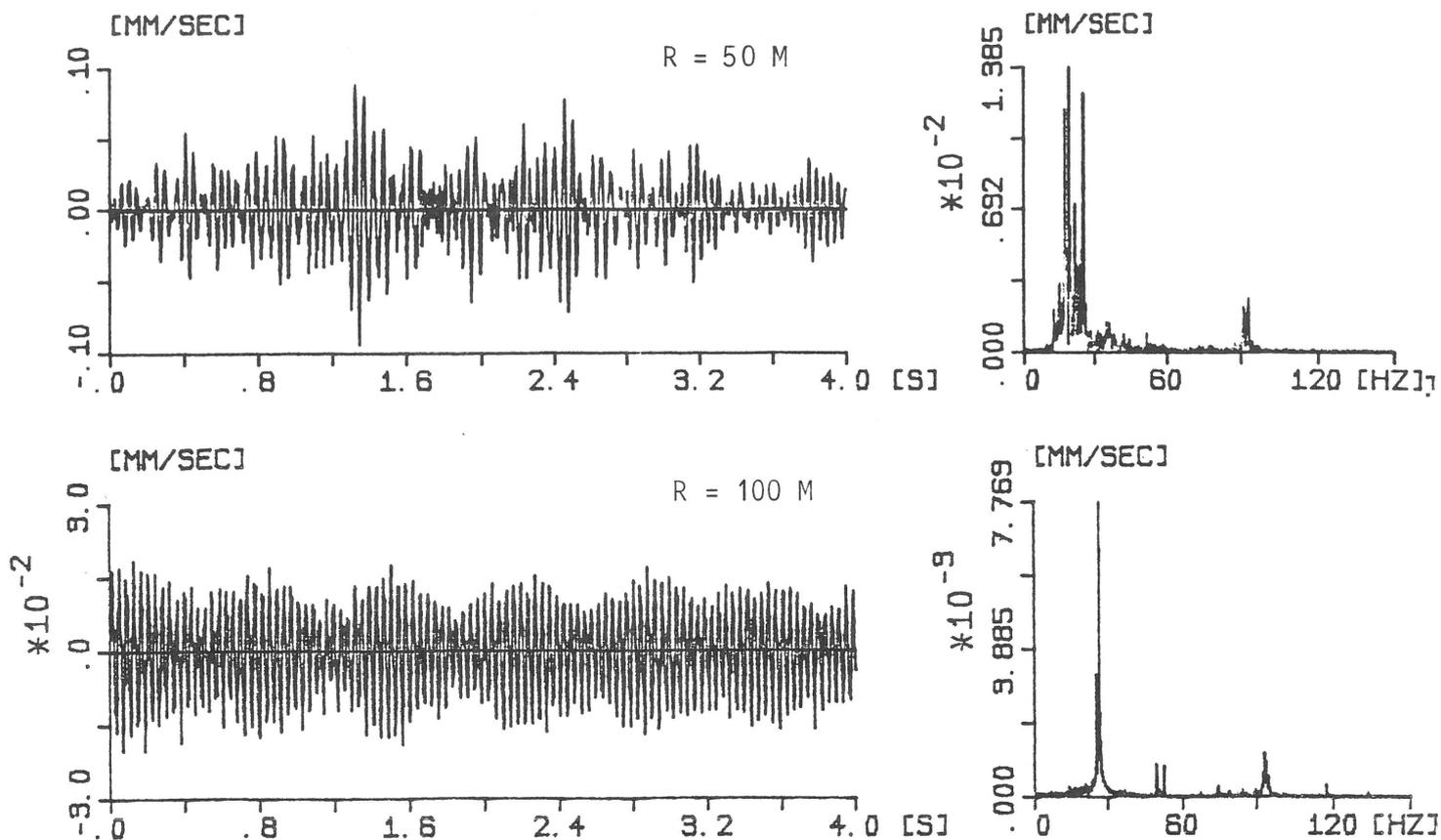


Bild 27 a

- Die Schwellenabstandsanregung ist bei diskret gestützter Schiene immer vorhanden. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten liegt die Frequenz dieses Lastanteils (hier bei  $f = 93 \text{ Hz}$ ) allerdings sehr hoch, so daß die Materialdämpfung diesen Anteil aus den Erschütterungen der Umgebung ziemlich rasch herausfiltert und die Reichweite dieser Anregung auf 20 m beschränkt bleibt.
- Die Anregung im mittleren Frequenzbereich tritt demgegenüber erst in größerer Entfernung als wesentlicher Bestandteil der Erschütterungen hervor. Daß hier eine harmonische Anregung vorliegt, ist erst in einer Entfernung von 50 oder 100 Metern zu erkennen.

Die vorgenannten Merkmale lassen sich auch in den Ergebnissen für die anderen Fahrgeschwindigkeiten wiederfinden. Die Rechenergebnisse für  $v = 100, 150, 200, 250$  und  $300 \text{ km/h}$  sind im Anhang A dieses Berichtsteils dokumentiert und können mit den entsprechenden Meßergebnissen im Anhang C1 des Berichtsteils III verglichen werden.

### 3.3 Der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit

Für den Hochgeschwindigkeitsverkehr ist von großer Bedeutung, wie die Erschütterungen in der Umgebung mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit ansteigen. In Bild 28 sind alle für diese Frage relevanten Rechenergebnisse zusammengefaßt:

Es wurden die maximalen Schwinggeschwindigkeitsamplituden der Zeitverläufe ausgewertet und über die Fahrgeschwindigkeit aufgetragen, und zwar in gleicher Weise und im gleichen Maßstab wie in den Bildern 8 und 15 des Berichtsteils III (Messungen). Auch hierbei ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen.

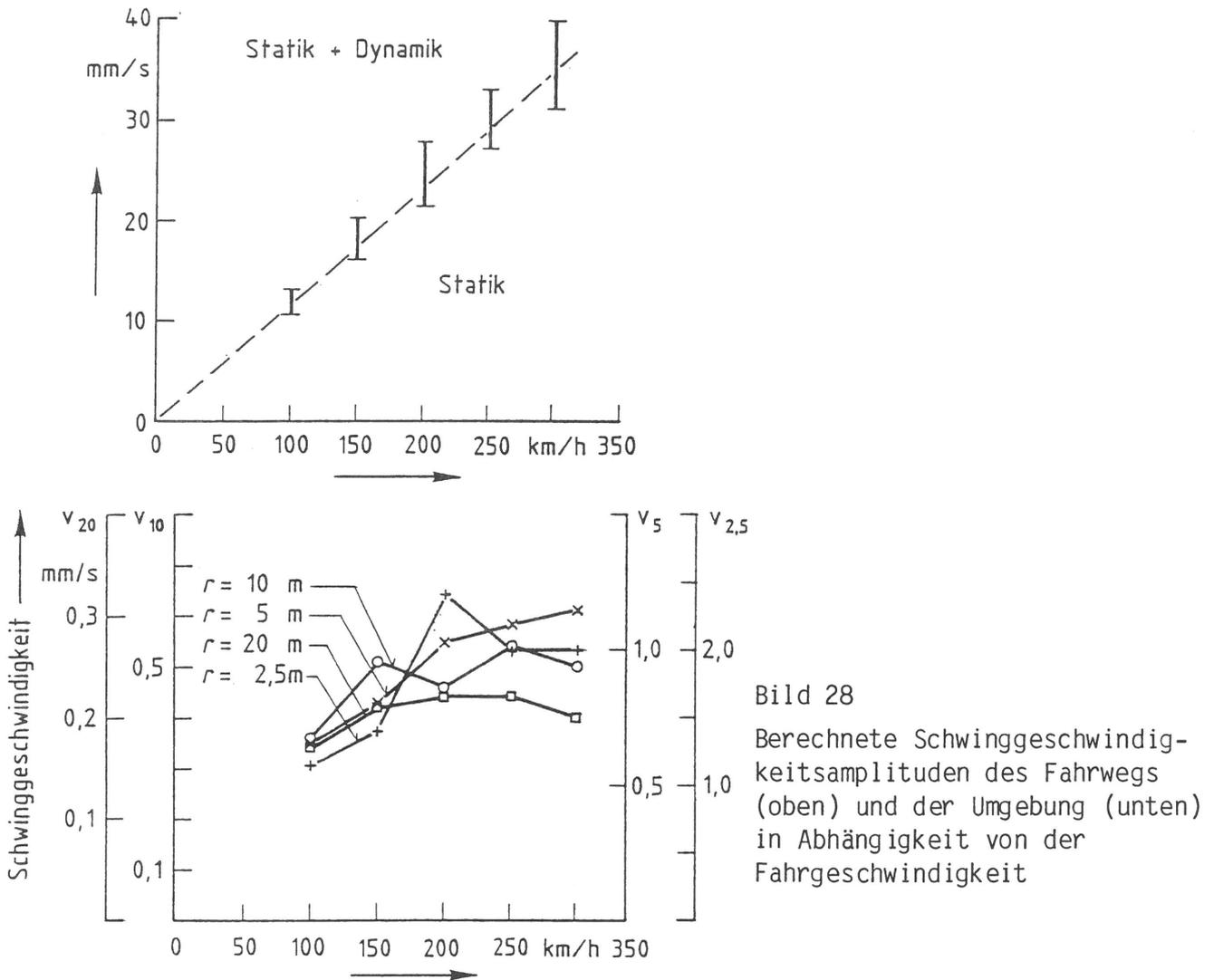


Bild 28  
Berechnete Schwinggeschwindigkeitsamplituden des Fahrwegs (oben) und der Umgebung (unten) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit

Bei den Fahrwegamplituden (Bild 28 oben) sind einerseits die maximalen Schwinggeschwindigkeiten bei der Berechnung nur mit statischen Lasten (Abschnitt 3.1) und andererseits mit statischen und dynamischen Lasten (wie in Abschnitt 3.2) angegeben. Der wesentliche Anteil sind die statischen Lasten, die nahezu linear mit der Fahrgeschwindigkeit zunehmende Schwinggeschwindigkeitsamplituden ergeben.

Bei den Erschütterungen in der Umgebung ist der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit deutlich geringer als beim Fahrweg. Man erkennt bei den maximalen Schwinggeschwindigkeitsamplituden die gleichen Tendenzen wie bei den Messungen: Deutliche Zunahmen mit der Fahrgeschwindigkeit sind nur zwischen 100 und 200 km/h zu erkennen, während oberhalb von 200 km/h eher zufällige Schwankungen um einen konstanten Wert vorliegen.

#### 4. Schlußfolgerungen aus den Meß- und Rechenergebnissen

Abschließend sollen aus den exemplarischen Ergebnissen zum Intercity Experimental, die in Messung und Berechnung sehr gut übereinstimmen, allgemeinere Schlußfolgerungen gezogen werden.

##### 4.1 Schwingungsmessungen an Schienenverkehrswegen - charakteristische Auswirkungen bewegter Lastgruppen

Die Schwingungsanregung durch einen fahrenden Zug stellt sich für verschiedene Beobachtungspunkte sehr unterschiedlich dar. Ein Beobachter im Fahrzeug sieht, wenn man von der Überfahrt über singuläre Stellen (z. B. Weichen) absieht, eine stationäre Anregung. Für einen Punkt des Fahrwegs bedeuten die Achsüberfahrten impulsartige Vorgänge. Diese Impulse sind auch noch im Untergrund des Fahrweges bzw. in der unmittelbaren Umgebung des Gleises erkennbar, ihre Bedeutung nimmt allerdings sehr schnell mit dem Abstand vom Gleis ab. In der weiteren Umgebung hat man dann wieder annähernd stationäre, nur wegen der endlichen Dauer der Vorbeifahrt transiente Schwingungen.

	Statik (Gewichtslasten)		Dynamik
Fahrzeug	$P_{stat}$	>	$P_{dyn}$
Fahrweg + Untergrund	$V_{stat}$ (Achsüberfahrten)	>	$V_{dyn}$
Umgebung	—		$V_{dyn}$

Bild 29

Bedeutung von Statik und Dynamik für die Komponenten Fahrzeug, Fahrweg, Untergrund und Umgebung

Der deutliche Unterschied zwischen den Schwingungen von Fahrweg und Untergrund, die von den statischen Achslasten wesentlich geprägt werden, und den Schwingungen in der Umgebung, die von den dynamischen Lasten erzeugt werden, ist bei Schwingungsmessungen an Schienenverkehrswegen zu beachten (s. Bild 29).

Ein charakteristischer Meßpunkt, der die dynamische Erschütterungsanregung möglichst unverfälscht wiedergibt, sollte im Abstand von etwa 10 m vom Gleis gewählt werden. In dieser Entfernung sind einerseits die statischen Anteile schon abgeklungen und andererseits die Materialdämpfungseinflüsse des Bodens noch nicht so stark ausgeprägt. Es ist jedoch - prinzipiell bei allen Fahrweg- und Umgebungspunkten - der Einfluß der Bodensteifigkeit zu beachten.

Die "Dynamik der Vorbeifahrt" verändert für einen ortsfesten Beobachter den Frequenzinhalt der bewegten Anregung. Neben der Frequenzaufweitung infolge der Impulscharakteristik im Nahbereich des Gleises hat man auch eine Frequenzaufweitung durch die endliche Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Bodens (Dopplereffekt), die auch noch in weiteren Entfernungen festzustellen ist. Bei der Interpretation von Messungen ist deshalb zu berücksichtigen, daß auch harmonische Anregungen meistens nur als Frequenzband sichtbar werden.

Das rasche Verschwinden der tiefen Frequenzen mit der Entfernung ist ebenfalls der "Dynamik der Vorbeifahrt" und nicht einer wesentlichen "Filtercharakteristik des Bodens" zuzuschreiben. Es handelt sich um die statischen Lastanteile, die nur im Nahbereich als Schwingungen wahrzunehmen sind.

#### 4.2 Erschütterungen durch Schienenverkehr, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten

Es sollen die wesentlichen Ergebnisse der Messungen und Berechnungen zum Intercity Experimental noch einmal genannt und zusammen mit früheren Messungen und Meßergebnissen anderer Autoren verallgemeinert werden.

- Die Erschütterungen, die bei den Versuchs- und Rekordfahrten des Intercity Experimental gemessen wurden, sind nicht stärker, zum Teil auch kleiner als die von Regelzügen in Nah- und Fernverkehr erzeugten Erschütterungen.
- Bei der Steigerung der Fahrgeschwindigkeit nehmen die Erschütterungen bis etwa 200 km/h zu und bleiben bei höheren Fahrgeschwindigkeiten in etwa konstant. Die Erschütterungsabnahme bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten ist schon häufiger ermittelt worden, z. B. /1/, /12/, sowie frühere Messungen der BAM /7/. Das Erreichen eines gewissen Maximums bei hohen Geschwindigkeiten wird auch bei Hölzl /12/ angedeutet.
- Die Parametererregung durch die mit der Schwellenabstandsfrequenz variierende Fahrwegsteifigkeit ist ein wesentlicher Bestandteil der Erschütterungen in der Umgebung. Diese Schwellenabstandsanregung wird häufiger bei Messungen festgestellt /1/, /6/, /18/.
- Die statischen Achslasten dominieren in den Schwingungen des Fahrwegs, in der Umgebung sind sie hingegen kaum - nur in der unmittelbaren Gleisnähe - zu bemerken. In der Literatur, insbesondere bei Messungen am Gleis oder im Tunnel, werden die statischen Anregungsanteile und die sich aus den Achsüberfahrten ergebenden Achsabstandsfrequenzen in ihrer Bedeutung für die Umgebung oft überschätzt.

- Bei der Steigerung der Fahrgeschwindigkeit verschiebt sich ein Teil der Anregungsfrequenzen wie die Schwellenabstandsfrequenz und - für den Fahrweg und den Nahbereich - die Achsabstandsfrequenzen proportional zur Geschwindigkeit. Es gibt jedoch auch fahrgeschwindigkeitsunabhängige Frequenzen - z. B. beim Intercity Experimental zwischen 15 und 30 Hz -, die Maschinenkräften oder Eigenschwingungen zugeordnet werden müssen.

#### 4.3 Der Einfluß der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik

Bei der Nachrechnung der Messungen zum Intercity Experimental ist die Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik von großer Bedeutung. Sie kann erklären, warum bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sowohl die dynamischen Lasten als auch die Erschütterungen nicht weiter zunehmen.

Das Zusammenwirken des Fahrzeugs mit dem Fahrweg ist von der vertikalen Eigenfrequenz des Systems ungefederte Fahrzeugmasse - Fahrweg-Untergrund ("Radsatz-Untergrund-Eigenfrequenz") geprägt. Unregelmäßigkeiten des Fahrweges (Gleislagefehler, Schienenunebenheiten, Steifigkeitsschwankungen) mit Anregungsfrequenzen unterhalb der Radsatz-Untergrund-Frequenz werden vom Radsatz ausgefahren, oberhalb der Radsatz-Untergrund-Frequenz jedoch gegen die Fahrweg-Untergrund-Steifigkeit "weggedrückt". Der Steigerung der Trägheitskräfte des Radsatzes bei niedrigen Frequenzen (Fahrgeschwindigkeiten) steht die annähernd konstante Fahrweg-Untergrund-Steifigkeit bei hohen Frequenzen gegenüber.

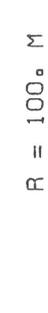
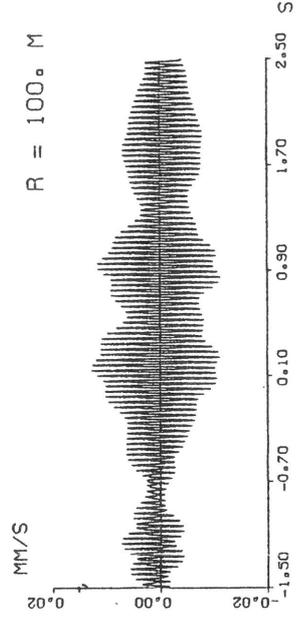
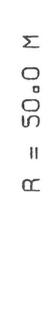
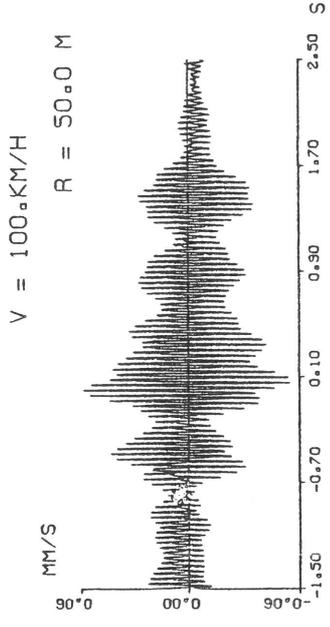
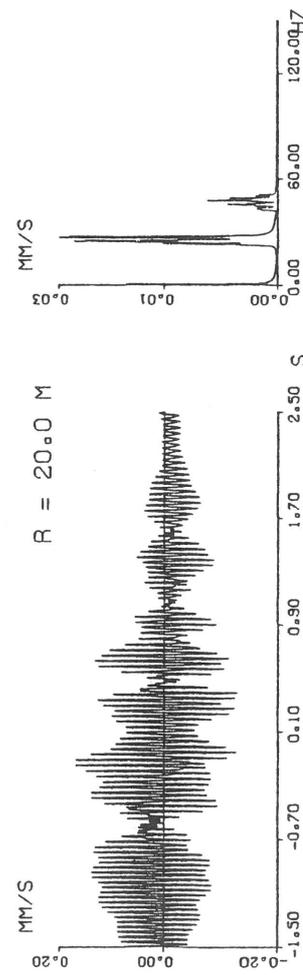
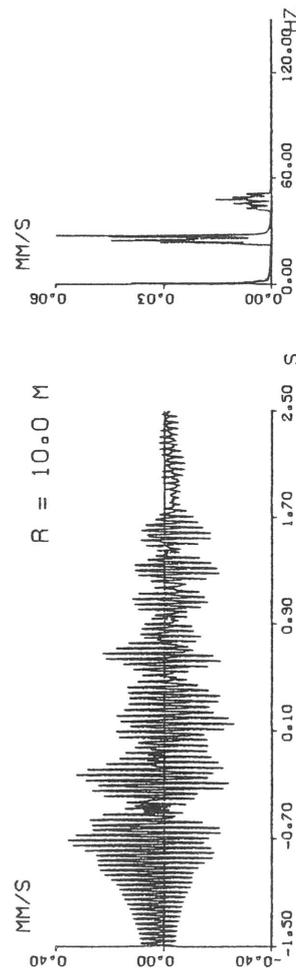
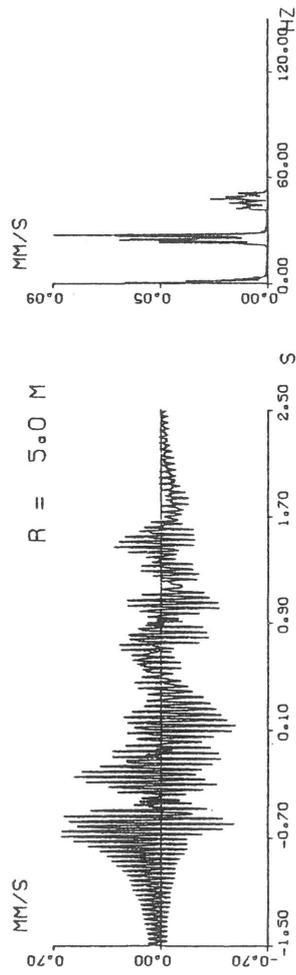
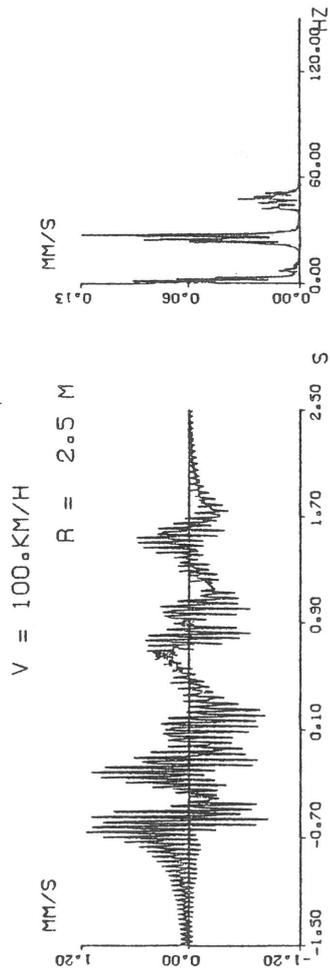
Die Radsatz-Untergrund-Eigenfrequenz, die der Nachrechnung und Interpretation der ICE-Messungen bei Würzburg zugrundeliegt (etwa 90 Hz), ist relativ hoch. Bei weicherem Untergrund und größerer ungefederter Fahrzeugmasse kann sie auch deutlich tiefer liegen. Auch die Dämpfung der Eigenfrequenz kann, z. B. bei größerer Masse oder bei verminderter Abstrahlungsmöglichkeit (im Tunnel), kleiner als bei den ICE-Messungen sein, so daß die Radsatz-Untergrund-Eigenfrequenz als eigener fahrgeschwindigkeitsunabhängiger Anteil der Erschütterungsanregung größere Bedeutung erhält.

#### 4.4 Anwendung der Ergebnisse: Ursachenklärung, Optimierung und Prognose

Die vorgestellten Methoden sollten genutzt werden, um die fahrzeug- und fahrwegdynamischen Ursachen von Schienenverkehrserschütterungen zu klären und schließlich einen Beitrag zur Optimierung von Fahrweg und Fahrzeugkomponenten zu leisten. Dazu sind weitere Fallstudien, die wie beim Intercity Experimental Meßergebnisse mit detaillierten, die jeweiligen Fahrzeug-, Fahrweg- und Untergrundparameter berücksichtigende Berechnungen vergleicht, notwendig und sinnvoll.

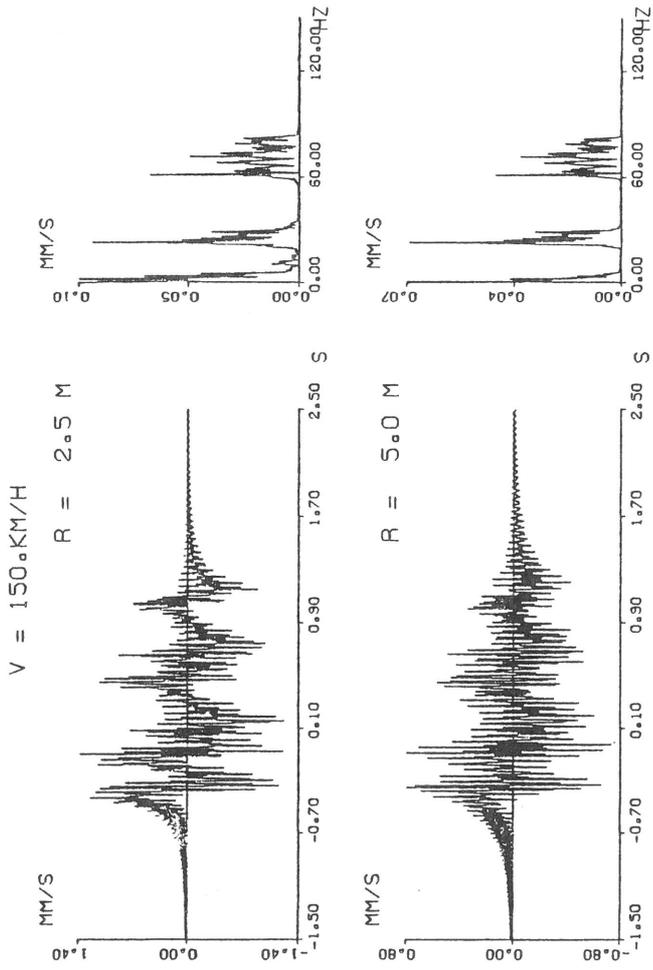
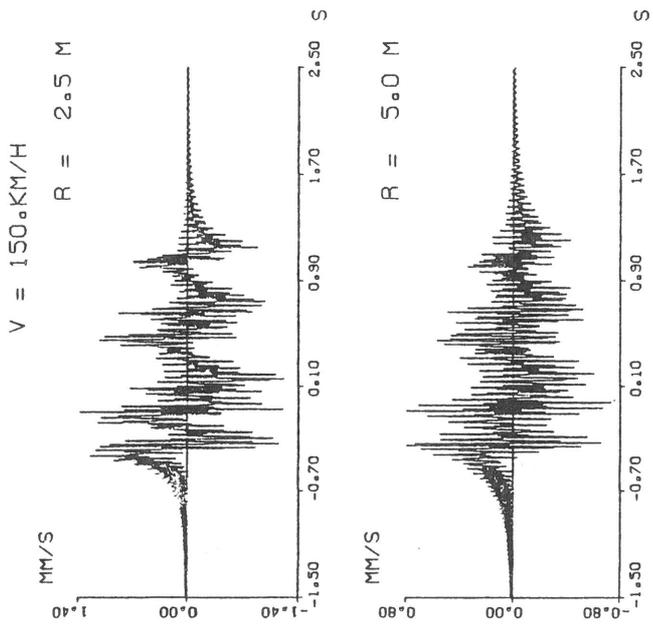
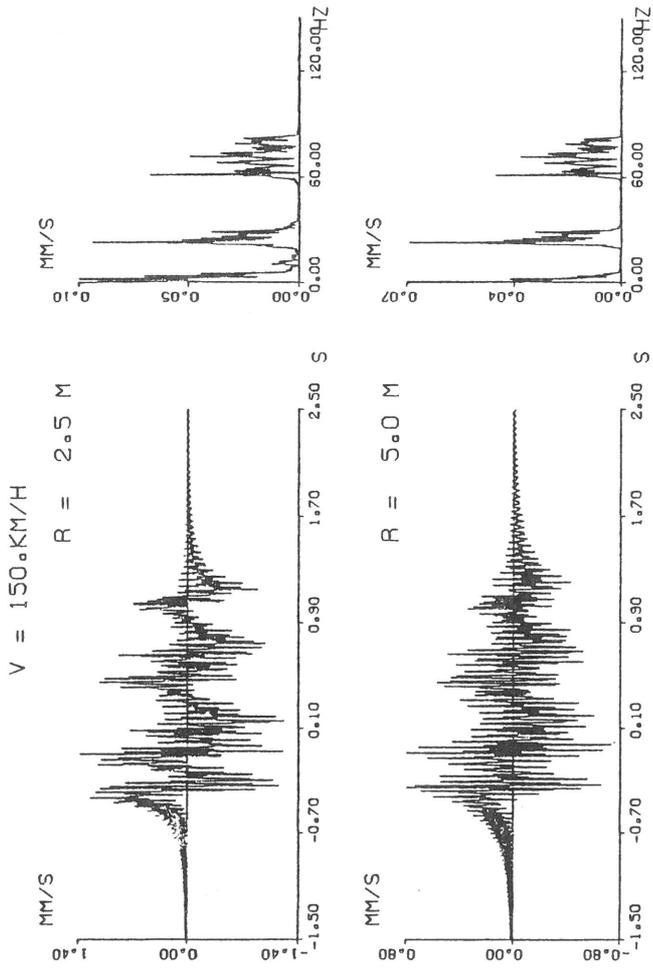
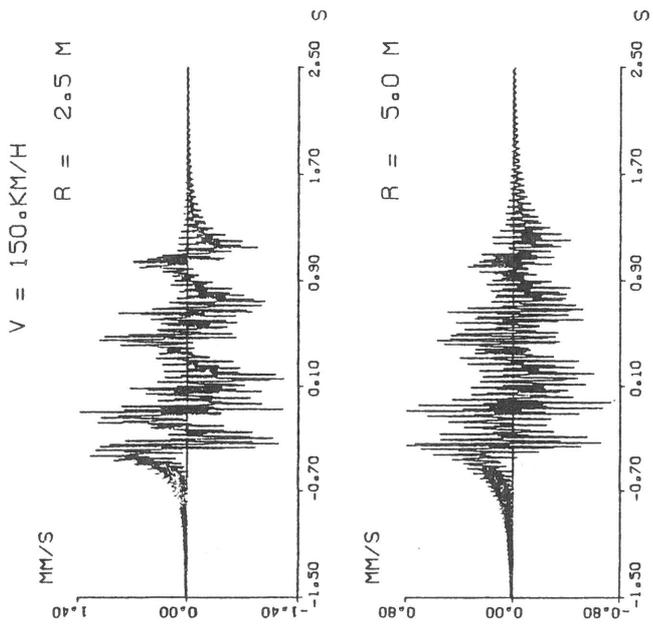
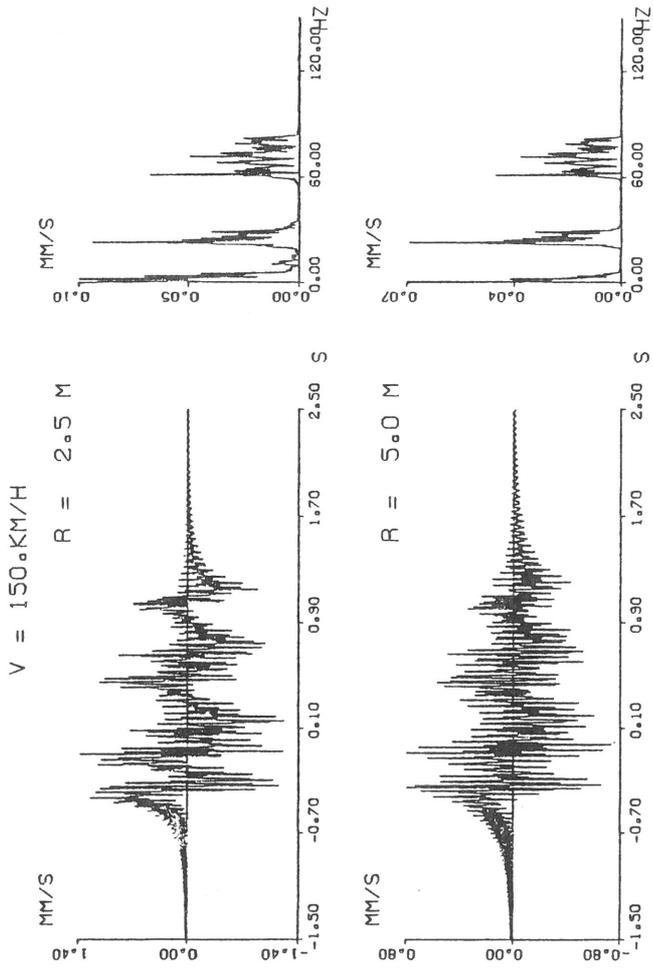
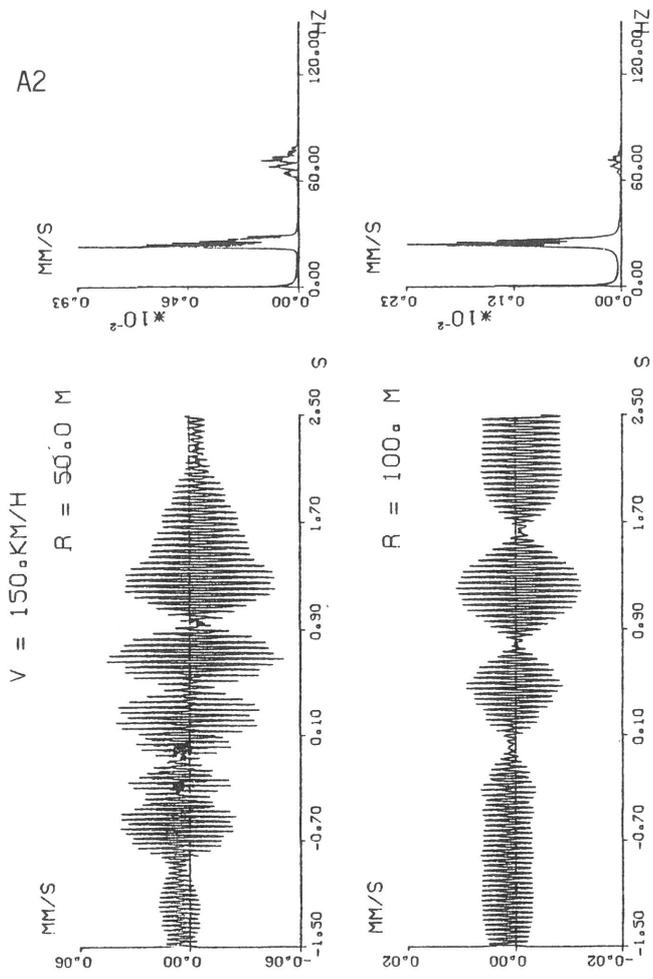
Die dargestellten Ergebnisse ermöglichen eine Prognose der Schienenverkehrsererschütterungen, wie sie bei der Planung von Neubaustrecken, aber auch bei Änderung des Fahrprogramms - Fahrgeschwindigkeit, Achslast - benötigt wird. Die Messungen am Intercity Experimental geben insbesondere wichtige Hinweise für die Einführung eines Hochgeschwindigkeitsverkehrs. Die wesentlichen Aussagen zur Prognose von Schienenverkehrsererschütterungen sind folgende:

- Die Erschütterungen der Umgebung werden durch die dynamischen Kräfte, die auf den Fahrweg wirken, erzeugt. Damit sind sie selbstverständlich von Fahrzeugeigenschaften und vom Zustand des Fahrwegs und der Räder abhängig.
- Ein wesentlicher, oft vernachlässigter Einflußfaktor auf die Erschütterungen der Umgebung sind die Bodeneigenschaften. Die Steifigkeit des Bodens bestimmt prinzipiell die Schwingamplituden bei vorgegebener Last. Für hohe Frequenzen und größere Entfernungen ist auch die Materialdämpfung des Bodens von Bedeutung.
- Der Zusammenhang zwischen den anregenden Kräften und den Schwingungen der Umgebung kann durch das Punktlastgesetz für einen elastischen, hysteretisch gedämpften Halbraum einfach beschrieben werden (s. Abschnitt 2.3). Aufgrund der Materialdämpfung ist dieses Gesetz frequenzabhängig.
- Die Überlagerung der Kräfte aller Achsen bzw. Räder und der zugehörigen Schwingantworten ist elementar möglich. Im Teil II des Berichts wird ein explizites Amplituden-Abstands-Gesetz angegeben, mit dem die Verteilung der Lasten über die Zuglänge näherungsweise berücksichtigt werden kann.
- Die Zuglänge hat einen Einfluß auf die Erschütterungen in größerer Entfernung (etwa im Abstand von einer halben Zuglänge), da dort die Gesamtanregung des Zuges zur Wirkung kommt. Der Nahbereich ist hingegen praktisch nur von jeweils einem Teil des Zuges beeinflusst.
- Die Bewegung der Last hat einen deutlichen Einfluß auf die Zeit- und Frequenzcharakteristik der Schwingungen, kann aber bei der Prognose der Erschütterungsstärke (Maximalwerte, Effektivwerte) näherungsweise unberücksichtigt bleiben.
- Für grobe Prognosen empfiehlt es sich, Ausbreitungsgesetze für gewisse Standardfälle (Anregungsbedingungen, Frequenzverteilungen, Bodenverhältnisse, Zuglängen) theoretisch zu ermitteln und gegebenenfalls zu vereinfachen. Für eine genauere Prognose sollten die Bodensteifigkeit und -dämpfung und damit die Ausbreitungscharakteristik vor Ort meßtechnisch ermittelt werden und in eine detailliertere Berechnung eingehen.

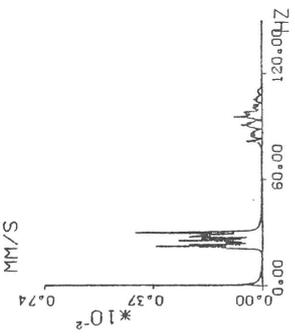
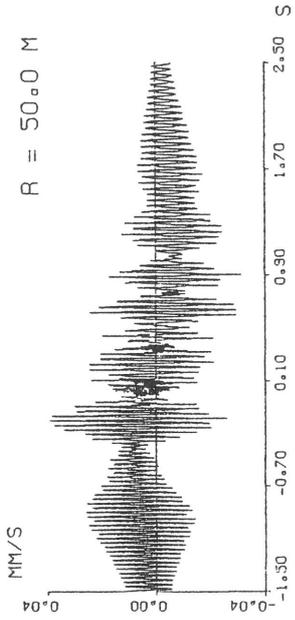


Anhang A - Berechnete Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe und -spektren, die von einem dreigliedrigen Intercity Experimental in der Umgebung erzeugt werden, Parameter: Fahrgeschwindigkeit und Abstand vom Gleis

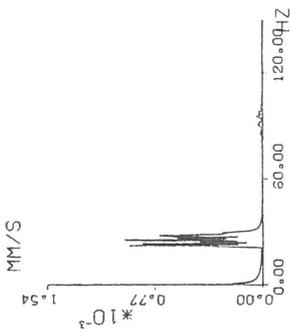
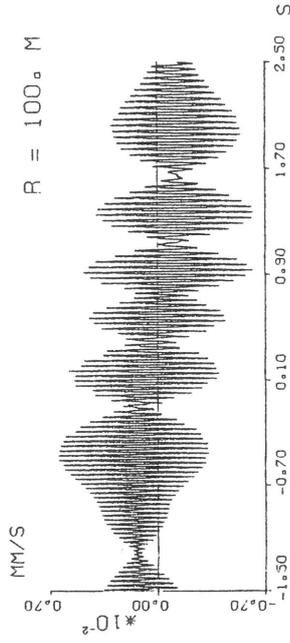
A2



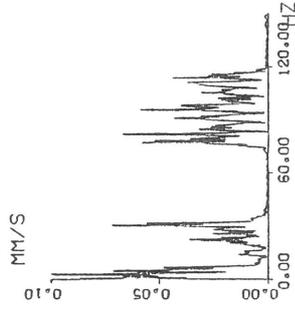
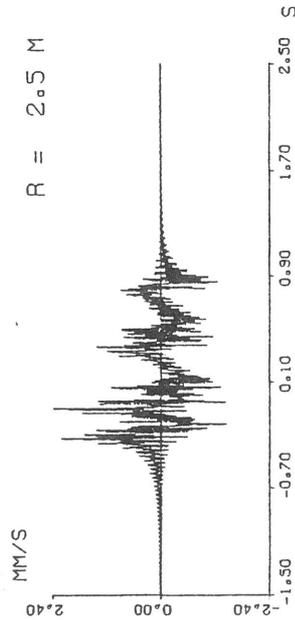
V = 200.0 KM/H  
R = 50.0 M



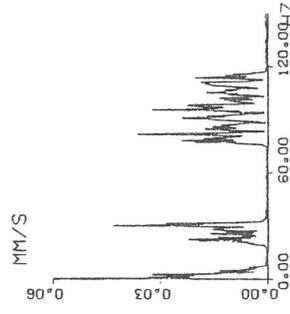
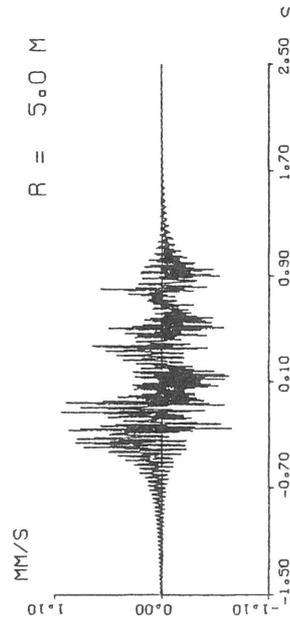
R = 100.0 M



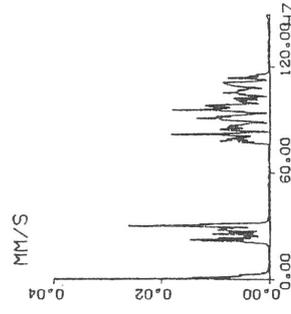
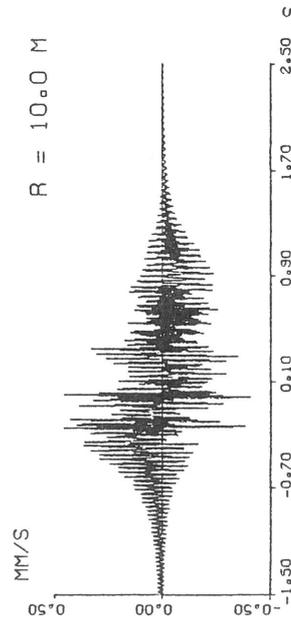
V = 200.0 KM/H  
R = 2.5 M



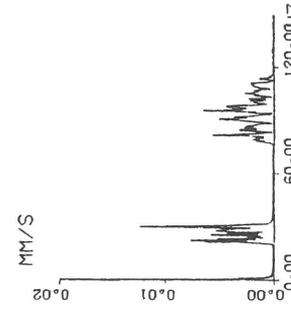
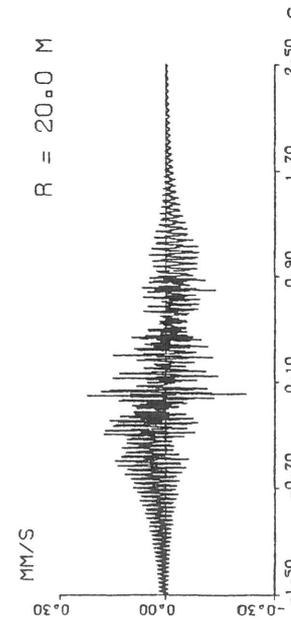
R = 5.0 M



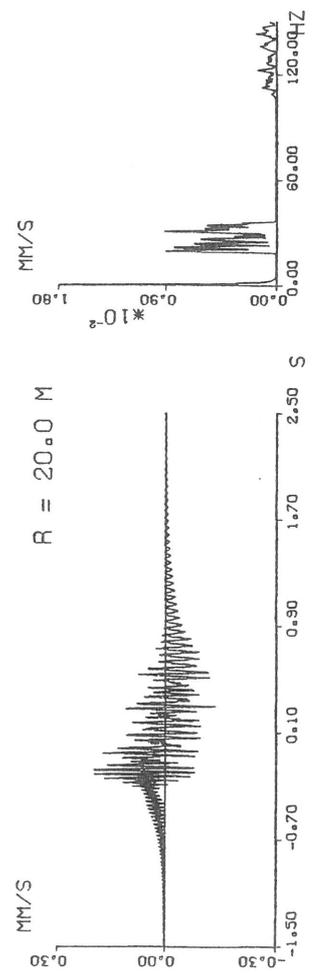
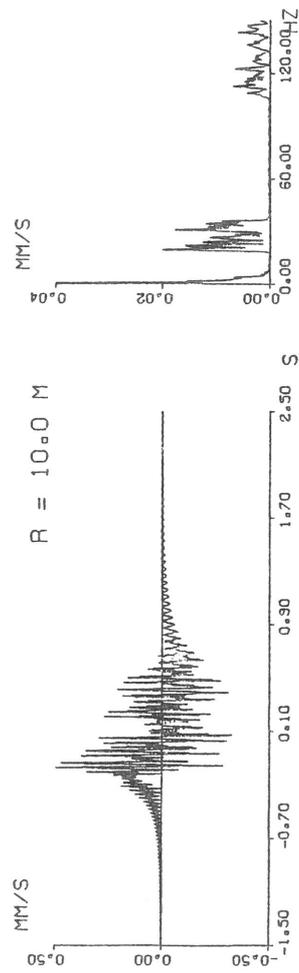
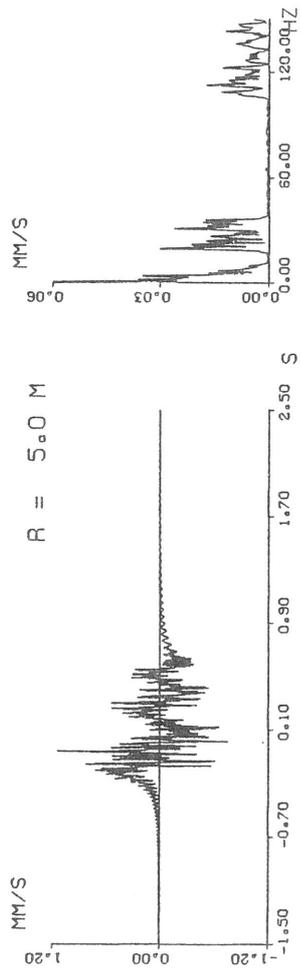
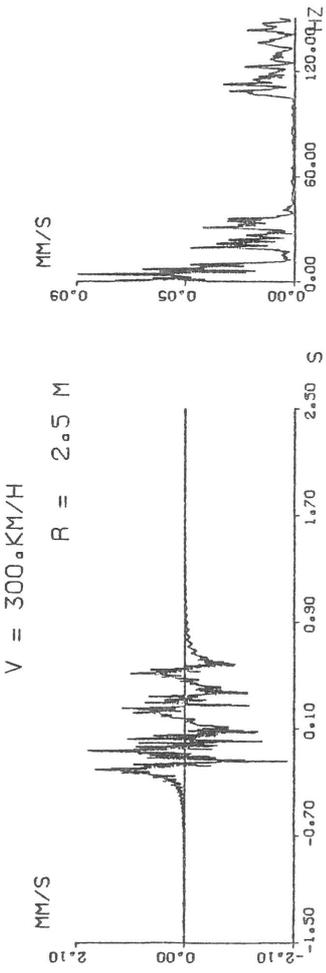
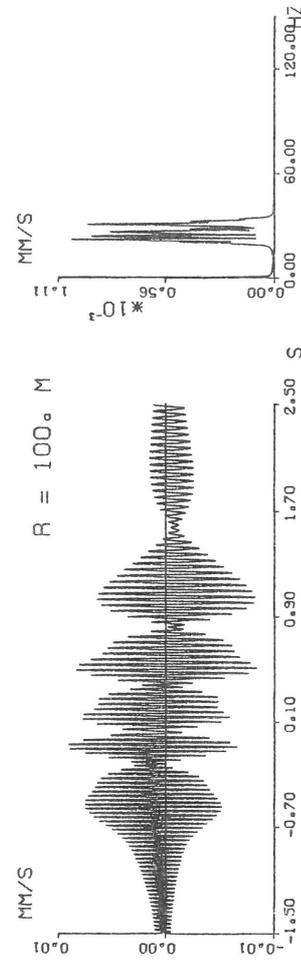
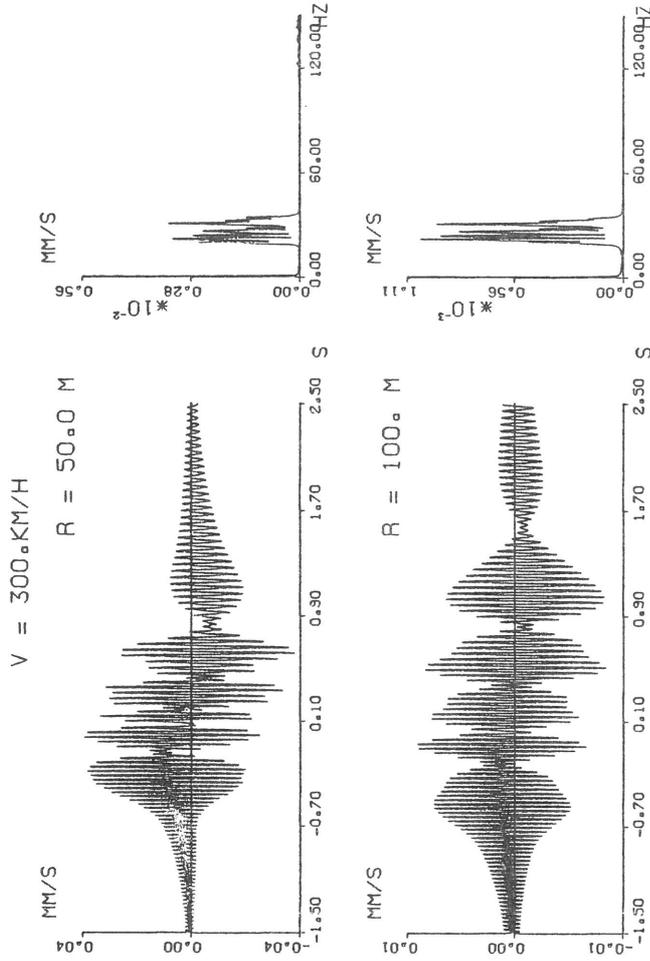
R = 10.0 M



R = 20.0 M









## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

**Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**  
von Dr.-Ing. Götz Andrae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**  
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren**  
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**  
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**  
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

**Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

**Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**  
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

**Beitrag zur Kenntnis der Schnitttiefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**  
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**  
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen  $760$  und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**  
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**  
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**  
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**  
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

**Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**  
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**  
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**  
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**  
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**  
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**  
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**  
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —**  
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**  
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**  
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**  
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**  
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**  
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**  
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen**  
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**  
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**  
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**  
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**  
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**  
von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**  
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**  
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

**Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**  
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**  
von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**  
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**  
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**  
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**  
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner

Nr. 49/Dezember 1977

**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**  
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**  
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andrae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflüßfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**  
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**  
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**  
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

- Nr. 54/Oktober 1978  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**  
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**  
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**  
**Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing**  
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**  
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 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/August 1979  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**  
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**  
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 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/Dezember 1979  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**  
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 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/Februar 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/Mai 1980  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**  
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 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/Mai 1980  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.**  
**Entwicklung eines vollzeuzentrischen Präzisions-Goniometers**  
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980  
**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**  
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**  
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 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/September 1980  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**  
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/November 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/November 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/November 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/November 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/April 1981  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**  
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/September 1981  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**  
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/Dezember 1981  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**  
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/Dezember 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/Dezember 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/April 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 Siegmund Ledworski
- Nr. 83/Juli 1982  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen**  
**— Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —**  
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/Juli 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/Oktober 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/November 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/Dezember 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/Februar 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/April 1983  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**  
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 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/April 1983  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**  
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**  
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 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/August 1983  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**  
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**  
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 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/November 1983  
**Typische Bruchflächenbildung 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/Dezember 1983  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren**  
**— Stretch- und Erholungsvermögen —**  
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 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/Januar 1984  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**  
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 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/März 1984  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton**  
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**  
von Dr.-Ing. Dierk Schnittger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**  
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**  
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Oktober 1984  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**  
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Oktober 1984  
**Korrosion von Stahlradiatoren**  
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Oktober 1984  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen**  
von Dipl.-Ing. Lutz Auersich
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985  
**Zur Wirkung der Schrumpfbinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulverschweißten Blechen aus St E 460 N**  
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 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/Februar 1985  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**  
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**  
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützwow
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 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/Juli 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/Juli 1985  
**Farbempfindungsmerkmal Elementarabunton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**  
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Oktober 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 Rudolph und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Oktober 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/Oktober 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/November 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/April 1986  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**  
von Dr.-Ing. Andreas Hecht
- Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzung und Wärmebehandlung**  
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**  
von J. Mischke  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/Juli 1986  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**  
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch
- Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**  
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas
- Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986 (vergriffen)  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolation von Flüssiggas-Lagertanks**  
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst
- Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**  
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/November 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 Dr.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/November 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/November 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/November 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/November 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/Januar 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/Januar 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/Februar 1987  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**  
von Dr. Götz Andreae und Gottfried Niessen
- Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/Februar 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/April 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/Mai 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/Mai 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/Juni 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/Juni 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/Oktober 1987  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**  
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Wolfgang Mathees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/Oktober 1987  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen 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/November 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/November 1987  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes**  
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Mathees, 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/November 1987  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**  
von Dr.-Ing. Ulrich Holzjöhner
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/November 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/Dezember 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/Mai 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/Mai 1988  
**Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**  
von Dr.-Ing. Ulrich Holzjöhner

Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/Mai 1988  
**VG3D Zeichenprogramm für die Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**  
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/Juni 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/Juli 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/Juli 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/Okttober 1988  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**  
von Dr. rer. nat. Konrad Breitzkreutz, Dr. rer. nat. Rüdiger Uttech, Dr.-Ing. Kurt Haedecke

Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/Okttober 1988  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**  
von Dr.-Ing. Lutz Auersch