

Lutz Auersch  
Samir Said  
Werner Rücker

**Das Fahrzeug-Fahrweg-  
Verhalten und die  
Umgebungserschütterungen  
bei Eisenbahnen**

243

**Forschungsbericht**



Die Aufgaben  
der Bundesanstalt  
stehen unter der Leitlinie:

## **Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik**

### **Die Aufgaben**

Die BAM ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

### **Die Tätigkeitsbereiche**

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfasst die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- Forschung und Entwicklung
- Prüfung, Analyse und Zulassung
- Beratung und Information.

### **Die nationale und internationale Zusammenarbeit**

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstitutionen eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Messwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MNPQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

### **Der Status**

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie Nachfolgeinstitution des 1871 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1600 Mitarbeiter, darunter mehr als 700 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Dr.-Ing. Lutz Auersch  
Dipl.-Ing. Samir Said  
Dr.-Ing. Werner Rücker

**Das Fahrzeug-Fahrweg-  
Verhalten und die  
Umgebungserschütterungen  
bei Eisenbahnen**

**Forschungsbericht 243**

Berlin, April 2001

Impressum

**Forschungsbericht 243**

Das Fahrzeug-Fahrweg-Verhalten im Hinblick  
auf die Prognose von Zugschütterungen  
und die Optimierung von Minderungsmaßnahmen

Redaktionsschluss: April 2001

Herausgegeben von  
Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung-BAM

Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Telefon +49(0)30-81 04-0

Telefax +49(0)30-8 11 20 29

Copyright © 2001 by Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Herstellung und Verlag  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76,  
27511 Bremerhaven  
Telefon 0471-9 46 44-0  
Telefax 0471-9 45 44 77/88

Layout: BAM-Referat G.1

ISSN 0938-5533

ISBN 3-89701-565-X

## Zusammenfassung

In dem Forschungsvorhaben *Das Fahrzeug-Fahrweg-Verhalten im Hinblick auf die Prognose von Zug-erschütterungen und die Optimierung von Minderungsmaßnahmen* – Förderkennzeichen BMBF 9346 – wurden sehr komplexe, vielfältig ineinander verzahnte und simultane Fahrzeug-, Fahrweg-, Brücken- und Zugmessungen durchgeführt.

Es wird ein Schottergleis in ebener Streckenführung mit einem Schottergleis auf einer Brücke und mit der Festen Fahrbahn im Tunnel verglichen. Die Schwingungen aller Teilsysteme wurden während der Versuchsfahrten mit regelmäßig gestuften Fahrgeschwindigkeiten zwischen 16 und 160 km/h gemessen, außerdem bei Impulsanregungen der einzelnen Komponenten. Auf der theoretischen Seite wurden sehr verschiedenartige und sehr weitreichende Modellrechnungen zur Fahrzeug-Fahrweg- und zur Fahrweg-Untergrund-Wechselwirkung, weiterhin zur Erschütterungsemission, -transmission und schließlich zur Boden-Bauwerk-Wechselwirkung, das heißt zur Erschütterungsimmission in benachbarten Gebäuden ausgeführt. Mit diesem umfangreichen Arbeitsprogramm wurde die Relevanz verschiedener Anregungs- und Beanspruchungsanteile untersucht und eine Reihe von Messmethoden für diese Anteile herausgearbeitet, sowie Minderungsmöglichkeiten für die dynamischen Radlasten und für die Erschütterungen in der Umgebung von Bahnlinien zusammengestellt und bewertet.

**Stichworte:** Fahrzeugschwingungen  
Fahrwegnachgiebigkeit  
dynamische Radlasten  
Simultanmessungen  
Bodenerschütterungen  
Feste Fahrbahn  
Brückengleis  
Fahrgeschwindigkeit

## Abstract

The research project *The vehicle-track interaction with regard to the prediction of railway vibration and the optimization of reduction measures* consisted of a number of complex simultaneous vibration measurements of the vehicle, the track and the soil surface. A standard ballasted track was compared with a track on a bridge and with a slab track in a tunnel. The vibration of all components were measured during the test runs with train speeds of 16 to 160 km/h as well as under impulsive excitation of the different components. In addition to the experimental results presented here, numerical models of the dynamic track-soil interaction and of the vehicle-track interaction were examined. The work done gives a better insight of the excitation of railway vibration and the significance of certain source mechanisms.

**Key word:** Vehicle  
dynamics  
track compliance  
dynamic axle loads  
simultaneous measurements  
soil vibration  
slab track  
bridge track  
train speed  
railway vibration

# Inhalt

Zusammenfassung – deutsch	3	
Zusammenfassung – englisch	4	
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Überblick</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Fahrzeug-, Fahrweg- und Untergrundmessungen</b>	<b>8</b>
3.1.1	Fahrwegschwingungen	8
3.1.2	Fahrzeugschwingungen	10
3.1.3	Bodenerschütterungen	10
3.1.4	Vergleich der Fahrzeug-, Fahrweg- und Umgebungsschwingungen	11
<b>3.2</b>	<b>Fahrweg-Untergrund-Berechnungen</b>	<b>12</b>
3.2.1	Die Bedeutung der Untergrundsteifigkeit	13
3.2.2	Auswirkungen einer extremen Schichtung (Felsuntergrund, Tunnel- und Brückengleis)	14
3.2.3	Eine weiche Schicht auf einem steifen Untergrund (natürliche Schichtung)	14
3.2.4	Eine steife Schicht auf einem weichen Untergrund (Neubaustrecken)	15
3.2.5	Hochelastische Schienenlager	15
<b>3.3</b>	<b>Fahrzeugschwingungen und dynamische Radaufstandskräfte</b>	<b>16</b>
<b>3.4</b>	<b>Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung</b>	<b>16</b>
3.4.1	Das Gesamtsystem Fahrzeug - Fahrweg - Untergrund - Umgebung	16
3.4.2	Berechnung der dynamischen Last aus der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik	18
3.4.3	Berücksichtigung der Schwellenabstandsanregung (Parametererregung durch die Schwankung der Fahrwegsteifigkeit)	18
3.4.4	Die dynamischen Lastanteile	19
3.4.5	Kurz- und langwelliger Störkomplex und Langzeitwechselwirkungen	20
<b>3.5</b>	<b>Minderungsmaßnahmen im Ausbreitungsweg Fahrweg-Boden-Gebäude</b>	<b>21</b>
3.5.1	Minderungswirkungen des Fahrweges (Brücken-, Tunnel-, Plattengleis)	21
3.5.2	Minderungsmaßnahmen im Boden (Transmissionsbereich)	21
3.5.3	Minderungsmaßnahmen am Gebäude (Immissionsbereich)	22
<b>4</b>	<b>Zusammenfassende Diskussion der Mess- und Rechenergebnisse</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Die Wechselwirkung des Fahrzeugs mit den verschiedenen Fahrwegen (Ebene, Brücke, Tunnel)</b>	<b>23</b>
4.1.1	Der tieffrequentere, langwelligere Störkomplex	23
4.1.2	Der hochfrequentere, kurzwelligere Störkomplex	23
<b>4.2</b>	<b>Die Bodenerschütterungen beim Tunnelgleis und bei der ebenen Strecke</b>	<b>23</b>
<b>4.3</b>	<b>Ursachen des tieffrequenten Erschütterungsanteils</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>25</b>
<b>5.1</b>	<b>Anregungs- und Beanspruchungsanteile</b>	<b>25</b>
5.1.1	Lastanteile durch das Fahrzeug	25
5.1.2	Lastanteile durch den Fahrweg	25
5.1.3	Erschütterungsanteile durch den Boden	25
<b>5.2</b>	<b>Messmethoden für den Fahrzeug- und Fahrwegzustand und für die Lasten</b>	<b>26</b>
5.2.1	Die Fahrwegeigenschaften	26
5.2.2	Fahrwegfehler	26
5.2.3	Schienen- und Radsatzfehler	26

<b>5.3</b>	<b>Minderungsmöglichkeiten für die dynamischen Radlasten und die Erschütterungen</b>	<b>26</b>
5.3.1	Minderungsmöglichkeiten am Fahrzeug	26
5.3.2	Minderungsmöglichkeiten durch Fahrweg und Trasse	27
5.3.3	Minderungsmöglichkeiten im Boden und im Bauwerk	27
<b>5.4</b>	<b>Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkungen und ganzheitliche Modelle für Bahnsystem</b>	<b>27</b>
6	Literatur	28
7	Anhänge A, B, C und D	31

# 1 Einleitung

Bestehende und zukünftige Bahnsysteme sind eine wichtige Alternative zu den massiven Umweltproblemen durch Auto- und Flugverkehr. Die Umweltfreundlichkeit ist bei der Planung von Neubautrassen und bei der Entwicklung neuer Züge sicherzustellen. Im Interesse von Reisenden und Anwohnern müssen die Schwingungen im Fahrzeug, am Fahrweg und in der Umgebung klein sein, gleichzeitig vermeidet man unnötigen Verschleiß am Fahrweg (z.B. Schottereintrüttelung, Schienenverriffelung) und am Fahrzeug (Radsatzunrundheiten).

Die langjährigen Forschungsarbeiten eines Teams von Bauingenieuren, Physikern (Physik-Ing.), Informatikern und Messtechnikern ermöglichte es der BAM, die Dynamik des Schienenverkehrs branchenübergreifend in allen Teilbereichen Fahrzeug, Fahrweg und Untergrund zu behandeln.

Ausgangspunkt dieser Arbeiten war zunächst der starke Einfluss des Untergrundes auf die Schwingungen des Gleises und auf die Erschütterungsimmissionen neben Bahnrassen. Mit wesentlichen Beiträgen (u. a. zwei Dissertationen) zur Bodendynamik wurde das Instrumentarium (Finite-Element-Methoden, Randelementmethoden, Punktlastwellenfelder) zusammengetragen, mit dem die Wellenausbreitung und die Schwingungen flexibler Fundamente bei geschichteten Böden untersucht werden. Eine Vielzahl von Messkampagnen – wie z. B. bei den Versuchs- und Rekordfahrten des Intercity-Experimental auf der Neubaustrecke bei Würzburg – begleitete und lenkte diese Entwicklungen.

In diesem Forschungsvorhaben steht nun die Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik und die Erschütterungsemission im Mittelpunkt von theoretischen und experimentellen Untersuchungen. An derselben Neubaustrecke wurde erneut eine umfangreiche Messaktion durchgeführt, bei der gleichzeitig die Fahrzeugschwingungen in einem Versuchszug, die Fahrwegschwingungen an drei verschiedenen Gleissituationen (Feste Fahrbahn im Tunnel, Schottergleis auf der Brücke und in der Ebene) und die jeweiligen Umgebungserschütterungen erfasst wurden. Diese simultanen Messungen ermöglichen Rückschlüsse auf die dynamischen Radlasten, die auf die Schienen wirken. Diese Lasten zusammen mit den bewegten statischen Lasten sind die Ursache für die Erschütterungen der Umgebung, die in diesem Bericht im Vordergrund stehen, aber selbstverständlich auch für den Verschleiß des Fahrwegs und des Fahrzeugs.

Der Bericht umfasst neben der Darstellung der wesentlichen Messergebnisse in den weiteren Teilen theoretische Untersuchungen. Es wird die Nachgiebigkeit verschiedener Fahrwegsituationen (z.B. Feste Fahrbahn, Untergrundschichtung, elastische Schienenlager) berechnet und die typischen Auswirkungen diskutiert. Fahrzeugseitig werden recht aufwendige elastische Wagenkasten-, Drehgestell- und Radsatzmodelle mit der Finite-Element-Methode behandelt. Einige der elastischen Fahrzeugeigenschaften haben auch eine Bedeutung für die dynamischen Radlasten. Die Verknüpfung von Fahrzeug- und Fahrweg-Untergrund-Modellen zum Gesamtsystem, die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrweg und die daraus resultierenden Störkomplexe werden beschrieben. Als letz-

ter Untersuchungsteil werden Minderungsmaßnahmen im Ausbreitungsweg mit einem speziellen, die Besonderheiten des Bodens erfassenden Finite-Element-Verfahren behandelt.

In der zusammenfassenden Diskussion von Mess- und Rechenergebnissen werden einige wesentliche Aspekte wie etwa die Wirkung des Tunnel- oder des Brückengleises und die Ursachen des tieffrequenteren und in der Entfernung dominanten Erschütterungsanteils konkretisiert. Den Bericht beschließen sehr umfangreiche Schlussfolgerungen, die zum Teil – etwa bei den "neu entdeckten" Messmöglichkeiten – über das geplante Ziel des Vorhabens hinausgehen. Es wird die Bedeutung der einzelnen Erschütterungsursachen von Fahrzeug, Fahrweg und Untergrund genannt und die wesentlichen Minderungsmöglichkeiten werden aufgezeigt.

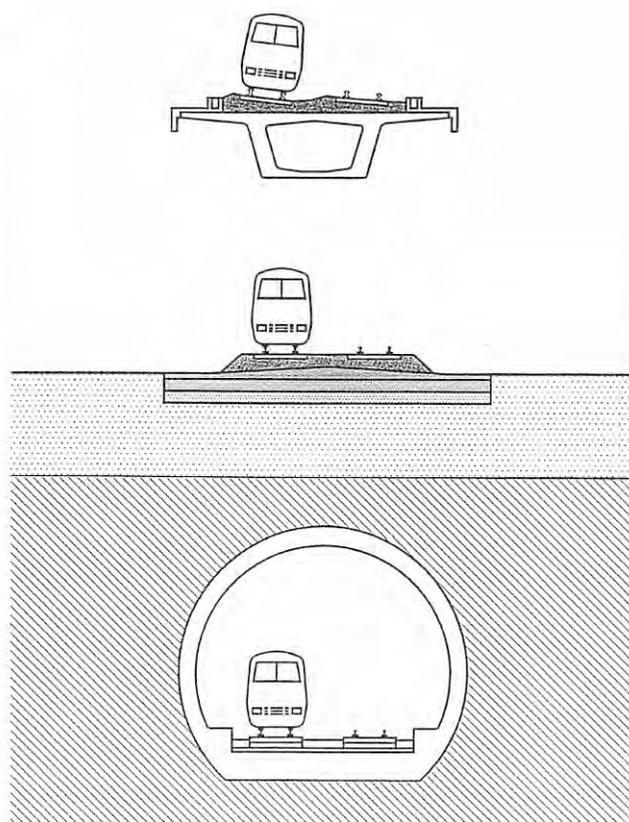


Abb. 1 Die Wechselwirkung des Fahrzeugs mit drei verschiedenen Fahrwegsituationen auf der Neubaustrecke bei Würzburg: Brücke, Ebene und Tunnel

## 2 Überblick

Das Forschungsvorhaben umfasst die Arbeitspakete

- A Fahrzeug- und Fahrwegmessungen,
- B Emissionsmodell und
- C Minderungsmaßnahmen,

wobei die Arbeitspakete B und C theoretische Untersuchungen sind. Es werden dabei sehr unterschiedliche, jeweils an das Problem angepasste Rechenmethoden verwendet. Im Arbeitspaket B "Emissionsmodell" muss das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund erfasst werden. Der Untergrund wird hier durch die Punktlastlösungen des geschichteten Bodens [13] in die Randelementmethode [11] eingebaut. Die Randelementmethode des Bodens wird mit der Finite-Element-Methode für den Fahrweg verknüpft [7]. Dieses gekoppelte Boden-Bauwerk-Rechenprogramm liefert die dynamischen Nachgiebigkeiten von Gleisen auf geschichtetem Untergrund. Das Fahrzeug kann einerseits – wie bei fahrdynamischen Untersuchungen üblich – als System starrer Körper, die durch Federn und Dämpfer verbunden sind, behandelt werden. In diesem Vorhaben wird zusätzlich das Verhalten elastischer Fahrzeugkomponenten untersucht. Dazu wurden diese Komponenten (Radsätze, Drehgestellrahmen, Wagenkasten) als Finite-Element-Modelle berechnet. Das Fahrzeugmodell wird mit der Fahrwegnachgiebigkeit am Radaufstandspunkt verknüpft, und mit diesem gekoppelten Fahrzeug-Fahrweg-Modell werden verschiedene fahrzeug- und fahrwegseitige Anregungsursachen untersucht.

Im Arbeitspaket C "Minderungsmaßnahmen" geht es genauer gesagt um Minderungsmaßnahmen im Ausbreitungsweg. Es wird mit einem speziellen Finite-Element-Programm [36] die Wellenausbreitung vom Fahrweg durch

den Boden und zum Teil auch in benachbarten Gebäuden berechnet. Es werden verschiedene Maßnahmen im Gleisuntergrund, im Ausbreitungsweg und am Gebäude betrachtet und deren Auswirkung auf das Erschütterungsniveau bestimmt.

Es wurden folgende Teilberichte mit zum Teil sehr umfangreichen Anlagen erstellt:

1. Schwingungsmessung am Fahrzeug, am Fahrweg und in der Umgebung an drei Streckenabschnitten bei Würzburg: Messzugfahrten und Impulsversuche in der Ebene, auf der Brücke und im Tunnel. April 1997; Verfasser: L. Auersch; weitere Bearbeiter: L. Preissler
2. Dynamische Nachgiebigkeiten von Eisenbahngleisen: Schottergleis und Feste Fahrbahn mit elastischen Schienenlagern auf homogenem und geschichtetem Untergrund. Februar 1997; Verfasser: L. Auersch
3. Fahrzeugschwingungen und dynamische Radaufstandskräfte eines Reisezugwagens, Juli 1998; Verfasser: M. Krüger
4. Maßnahmen zur Erschütterungsminderung an Bahnliesen; November 2000; Verfasser: L. Auersch; Bearbeiter: S. Said

Die Messungen wurden von W. Schmid und S. Said mit verschiedenen, in den Berichten 1 und 3 genannten Mess-teams, durchgeführt. Außerdem wurden Messaufträge an die Deutsche Bahn AG (Fahrwegmessungen im fahrenden Zug) und an die Universität Kassel (Fahrwegmessungen in der Werkstatt) vergeben, zu denen jeweils Messberichte vorliegen [46], [44]. Der Bericht [44] umfasst auch die Identifikation von Fahrzeugeigenschwingungen.

Ergänzende Werkstattversuche wurden von der BAM an Drehgestellen durchgeführt, zu denen die Universität Dresden erste Identifikationsrechnungen durchführte [25]. Die Leitung dieses umfangreichen Projektes hatte W. Rücker.

## 3. Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete

### 3.1 Fahrzeug-, Fahrweg- und Untergrundmessungen

Es wurde auf der Neubaustrecke bei Würzburg ein Streckenabschnitt ausgesucht, der folgende Fahrwegsituationen aufweist (Abb.1):

- Schottergleis in ebener Streckenführung,
- Überfahrt über eine Brücke und
- Streckenführung im Tunnel.

An allen drei Fahrwegsituationen wurden Messstationen zur Beobachtung der Fahrweg- und Umgebungsschwingungen eingerichtet (s. Anlage A). Auf dem gewählten Streckenabschnitt wurde ein Messzug eingesetzt, bei dem die Fahrzeugschwingungen in einem Messwagen aufgezeichnet wurden. Auf diese Weise hat man eine Simultanmessung der Fahrzeug-, Fahrweg- und Umgebungsschwingungen an drei Fahrwegsituationen (Ebene, Brücke und Tunnel). Zusammen mit der Variation der Zuggeschwindigkeit (neun Geschwindigkeiten zwischen 16 und 160 km/h) hat man insgesamt eine Matrix von

3 Teilsysteme x 3 Fahrwege x 9 Geschwindigkeiten = 81 Messungen.

Neben den Simultanmessungen wurden auch Versuche an den Teilsystemen mit künstlicher (Impuls-)Anregung durchgeführt, um Eigenschaften der drei verschiedenen Fahrwege, des Untergrundes und des Messfahrzeuges für die Interpretation der Messergebnisse und gegebenenfalls zur Modellbildung und Nachrechnung der Zugfahrten zur Verfügung zu stellen (s.1. Bericht [17]).

#### 3.1.1 Fahrwegschwingungen

Die bei den Fahrversuchen gemessenen Fahrwegschwingungen (Anlage D 1) weisen folgende allgemeine Merkmale auf: Jede Achsüberfahrt entspricht im Zeitverlauf einem Überfahrtimpuls, der im Wesentlichen – da es sich um ein Schwinggeschwindigkeitssignal handelt – aus einem (wellenähnlichen) Ab- und Aufwärtsimpuls besteht. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $v = 100$  km/h z. B. erkennt man im 2-Sekunden-Zeitausschnitt neben den 2 x 2 Achsen des Messwagens noch jeweils ein Drehgestell

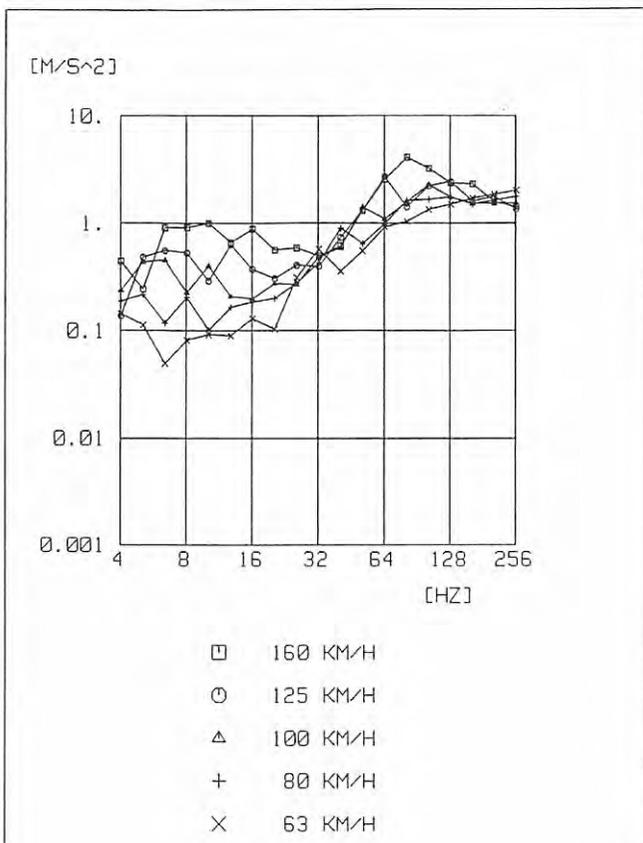


Abb. 2  
Terzspektrern der Radsatzbeschleunigungen für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten

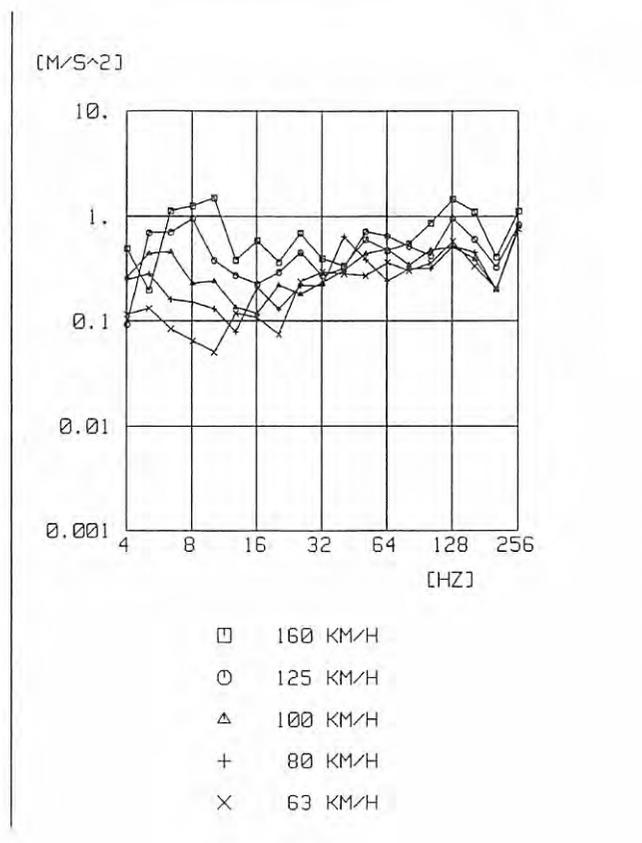


Abb. 3  
Terzspektrern der Drehgestellbeschleunigungen für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten

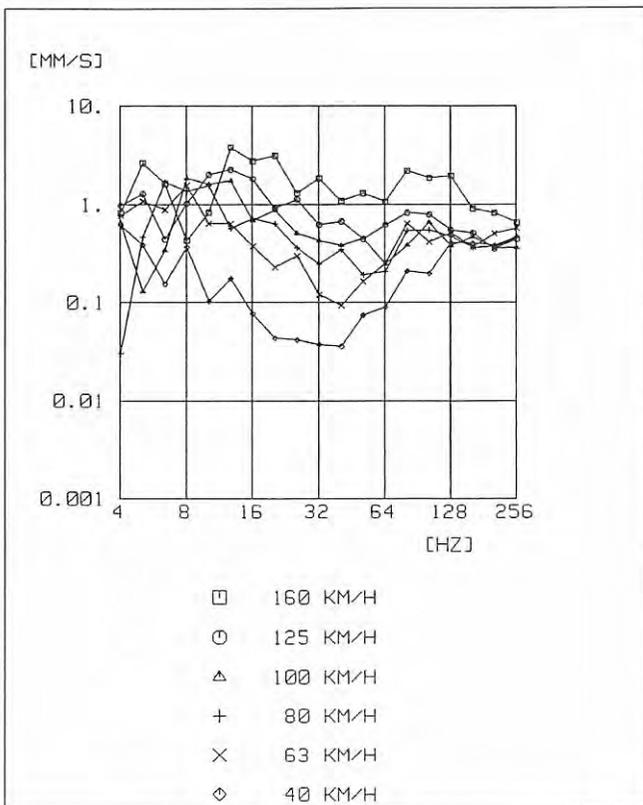


Abb. 4  
Terzspektrern der Schienenschwingungen für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten

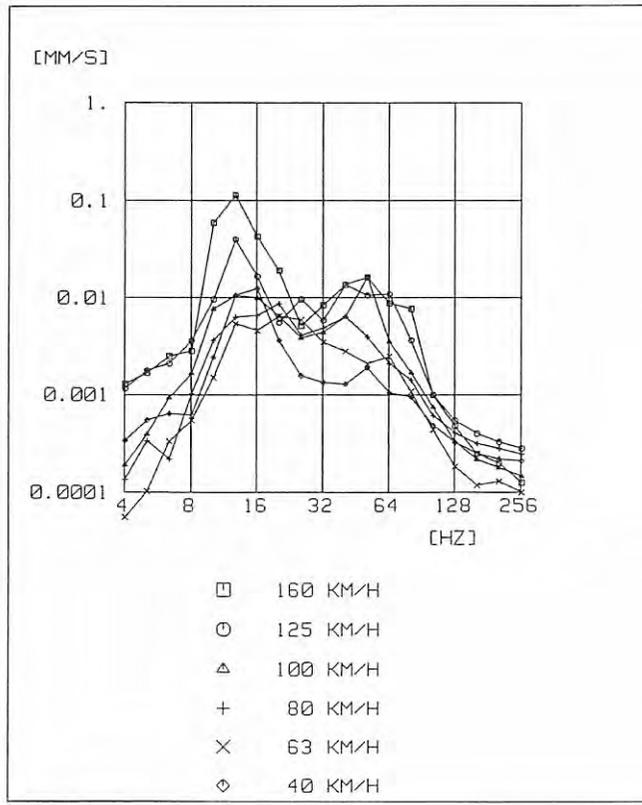


Abb. 5  
Terzspektrern der Bodenschwingungen in 40 m Abstand für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten

der benachbarten Wagen (Anlage D 1.6). Im Spektrum hat man ein charakteristisches Amplitudengebirge mit markanten Tälern und Spitzen. Die Einhüllende dieser Schwingungsgeschwindigkeitsspektren hat ihr Maximum etwa bei

$$f = 10 \text{ Hz} \times v / 100 \text{ km/h.}$$

Die Einhüllende entspricht (bis auf einen Faktor) in etwa dem Spektrum eines Überfahrtpulses. Die (Tal-)Einschnitte und die daraus entstehenden Spitzen beruhen auf der Abfolge der Achsen in einem charakteristischen Takt. Die genaue Lage der Spitzen und Einschnitte hängt noch ab von der Anzahl der Achsen, die in dem Zeitausschnitt erfasst wurden, und variiert deshalb etwas mit der Fahrgeschwindigkeit. Im groben Verlauf stimmen aber die Fahrwegspektren aller Geschwindigkeiten überein, es ist lediglich die Proportionalität der Frequenzen mit der Fahrgeschwindigkeit zu beachten. Kennt man die charakteristischen Frequenzen bei  $v = 100 \text{ km/h}$ , so erhält man die entsprechenden Frequenzen bei einer anderen Fahrgeschwindigkeit durch Multiplikation mit dieser Fahrgeschwindigkeit dividiert durch  $100 \text{ km/h}$ . Das Spektrum bei  $v = 100 \text{ km/h}$  hat folgende charakteristische „Spitzen“ bzw. „Berge“

$f_1(v = 100 \text{ km/h})$ : 3 Hz, 8 Hz + 11 Hz (+14 Hz), 20 Hz,

wobei die Spitzen bei 8 Hz und 11 Hz die größten Amplituden aufweisen. Die Trennung der drei Amplitudenbereiche beruht auf der Achsfolge eines Drehgestells. Die Spitzen werden umso deutlicher, je mehr Drehgestelle (oder Drehgestellpaare) und je genauer diese Drehgestelle im Zeitausschnitt erfasst werden.

Neben diesem tieferen, von den statischen Achslasten geprägten Frequenzbereich gibt es einen höheren Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz, bei dem in allen Fahrgeschwindigkeiten kleinere aber deutliche Schwingungen auftreten. Diese hochfrequenten Schwingungen sind Auswirkungen von dynamischen Achslasten, die im Weiteren durch die simultanen Messungen an Fahrweg, Fahrzeug und Umgebung analysiert werden sollen. Es ist möglich, dass auch im tieferen Frequenzbereich um

$$f = 10 \text{ Hz} \times (v / 100 \text{ km/h})$$

Auswirkungen dynamischer Achslasten auftreten. Diese dynamischen Lastanteile sind allerdings aus den Fahrwegmessungen schwer zu ermitteln, da hier die im gleichen Frequenzbereich auftretenden Auswirkungen der deutlich größeren statischen Lasten dominieren.

### 3.1.2 Fahrzeugschwingungen

Die Fahrzeugschwingungen weisen für die Komponenten

- Wagenkasten
- Drehgestell(-rahmen) und
- Radsatz

sehr unterschiedliche Charakteristiken auf (Anlage D 4):

Beim Wagenkasten dominieren sehr tieffrequente Schwingungen unter 5 Hz, der Drehgestellrahmen enthält wesentliche Amplituden im Bereich zwischen 5 Hz und 15 Hz, während der Radsatz typischerweise starke Anteile um etwa 70 Hz enthält. Diese Unterschiede beruhen auf der Wirkung der Primär- und Sekundärfederung, die Fahrweg- und Radsatzstörungen vom Wagenkasten fernhalten sollen.

Frequenzspitzen, die durchgängig bei allen Fahrgeschwindigkeiten auftreten und damit schwach gedämpften Eigenschwingungen oder festen periodischen Störungen zuzuordnen wären, sind nicht festzustellen. Eine bestimmte Anregungsfrequenz ist jedoch bei allen höheren Fahrgeschwindigkeiten deutlich festzustellen, wobei die Lage der Spitze sich mit der Fahrgeschwindigkeit verschiebt. Es handelt sich um die Schwingung, die durch die regelmäßige Auflagerung der Schienen im Schwellenabstand  $d = 0,6 \text{ m}$  entsteht und deren Frequenz

$$f = v / d, \text{ z. B. } f(v = 100 \text{ km/h}) = 46 \text{ Hz}$$

beträgt. Die zugehörigen Amplituden steigen ebenfalls stark mit der Fahrgeschwindigkeit an.

Auch der mittelfrequente Bereich (mit  $f = 5 \dots 15 \text{ Hz}$  angegeben) der Drehgestellschwingungen nimmt in seiner Stärke und in seiner Bandbreite mit der Fahrgeschwindigkeit zu. Dies deutet auf eine Anregung durch Fahrweg- und Radsatzunregelmäßigkeiten hin, und aus der höchsten Frequenz dieses Amplitudenbandes

$$f_{\text{max}}(v = 160 \text{ km/h}) = 15 \text{ Hz}$$

ergibt sich die minimale Wellenlänge der Fahrwegstörung zu

$$\lambda_{\text{min}} = v / f_{\text{max}} = 160 \text{ km/h} / 15 \text{ Hz} = 3 \text{ m.}$$

Es handelt sich hier also um langwellige Fahrwegstörungen, vermutlich um Gleislagefehler. Radsatzstörungen wie z. B. Flachstellen treten im Spektrum als scharfe Spitzen im Abstand der Radumlaufzeit  $f_r$  auf. Bei  $v = 160 \text{ km/h}$  (Anlage D 4.9) sind diese Anteile insbesondere am Radsatz  $1r$  deutlich bei den Frequenzen

$$f_i = 45, 60, 75, 90 \text{ Hz} \quad df = 15 \text{ Hz}$$

zu erkennen, bei einer Radumlaufzeit von

$$f_r = v / \pi d \approx 160 \text{ km/h} / \pi 90 \text{ cm} = 15 \text{ Hz}$$

(Laufkreisdurchmesser  $d \approx 90 \text{ cm}$ ).

### 3.1.3 Bodenerschütterungen

Die typischen Merkmale der Bodenerschütterungen sollen am Beispiel der Fahrgeschwindigkeit  $v = 140 \text{ km/h}$  (Anlage D 1.8) erläutert werden:

- In den Zeitverläufen sind an den gleisnächsten Punkten die Drehgestellvorbeifahrten zu erkennen, in weiteren Entfernungen (10 bis 20 m) noch deren hochfrequente Anteile, und in großen Entfernungen (ab etwa 40 m) hat man nur noch quasistationäre tieffrequenterer Schwingungen.
- Das Spektrum der Bodenschwingungen ist im Nahbereich noch relativ breitbandig. Mit zunehmender Entfernung bilden sich zwei markante Bereiche heraus: Ein mittlerer Frequenzbereich zwischen 10 und 20 Hz, der in großen Entfernungen dominiert, und ein hochfrequenter Bereich um 65 Hz, der in mittleren Entfernungen deutlich (bei  $r = 15 \text{ m}$  z. B. besonders prägnant) hervortritt. Bei Letzterem handelt es sich um die Auswirkungen der „Schwellenabstandsanregung“ mit der Frequenz  $f = v/d = 140 \text{ km/h} / 0,6 \text{ m} = 65 \text{ Hz}$ , die bei den Fahrzeugschwingungen auch als Frequenzspitze gemessen wurde. Bei den Bodenerschütterungen hingegen ist der Frequenzbereich infolge des Doppler-Effekts aufgeweitet.

- Für den mittleren Frequenzbereich gibt es zunächst keine eindeutige Erklärung, da sowohl bei den Fahrzeugmessungen größere Drehgestellschwingungen, als auch bei den Fahrwegmessungen das Maximum des „statischen“ Achsüberfahrtspektrums in diesem Frequenzbereich auftreten.
- Ein tieffrequenter Bereich bei etwa 5 Hz, der etwa dem Drehgestellimpuls zuzuordnen wäre, ist nur unmittelbar neben dem Schotter zu beobachten.

Bei den anderen Fahrgeschwindigkeiten sind im Prinzip die gleichen Beobachtungen zu machen, wobei sich allerdings die Frequenzen und Amplituden der oben genannten Bereiche verändern:

- Die Anregungsfrequenz des Schwellenabstandes hängt streng von der Fahrgeschwindigkeit ab und ist ab  $v = 40$  km/h mit  $f = 18$  Hz bis  $v = 160$  km/h ( $f = 74$  Hz) deutlich zu erkennen. Mit der Fahrgeschwindigkeit nehmen auch die Amplituden ab, bei den Geschwindigkeiten  $v = 25$  km/h ( $f \leq 12$  Hz) ist der Schwellenabstandsanteil nicht mehr zu erkennen.
- Der mittlere Frequenzbereich variiert in seiner Ausprägung bei Veränderung der Fahrgeschwindigkeit, ohne dass eine eindeutige Tendenz bei den Frequenzen zu erkennen ist. Bei allen Fahrgeschwindigkeiten ist ein Bereich zwischen 10 und 20 Hz deutlich ausgeprägt. Die Amplituden dieses Bereichs nehmen allerdings bei hohen Fahrgeschwindigkeiten  $v \geq 125$  km/h deutlich zu.
- Der tieffrequente „Drehgestellimpuls“ am Schotterbett ist wie die Schwellenabstandsanregung direkt von der Fahrgeschwindigkeit abhängig und verschiebt sich für die langsamen Geschwindigkeiten (bei  $v = 40$  km/h hat man  $f \approx 1,5$  Hz) zu sehr tiefen, kaum noch messbaren Frequenzen.

### 3.1.4 Vergleich der Fahrzeug-, Fahrweg und Umgebungsschwingungen

In der Terzdarstellung der Anlage A lassen sich gut die spezifischen Merkmale der einzelnen Teilsysteme überblicken:

#### Teilsystem Fahrzeug

- Die Radsatzbeschleunigungen weisen insbesondere hohe Frequenzanteile auf. In *Abbildung 2* ist die Schwellenabstandsanregung gut zu erkennen, deren „Spitze“ sich mit der Fahrgeschwindigkeit zwischen 16 und 80 Hz verschiebt und deren Amplitude stark anwächst. Bei der Festen Fahrbahn (Anlage A 3.19) ist die Schwellenabstandsanregung wegen der elastischen Schienenlagerung kleiner. Statt dessen dominieren geringer gedämpfte Radsatz-Fahrweg-Untergrundschwingungen mit Frequenzen um 64 Hz.
- Am Drehgestellrahmen (*Abb. 3*) ist die Schwellenabstandsanregung noch mit Mühe zu erkennen (die linearen Spektren im Anhang D des Messberichtes sind deutlicher). Es dominieren jedoch insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten die im Bereich der Drehgestelleigenfrequenzen (5 bis 13 Hz) liegenden tieffrequenten Schwingungen infolge von Fahrwegschwankungen.

- Die Wagenkastenschwingungen (Anlage A 3. 9 f) sind im gesamten dargestellten Frequenzbereich um mindestens eine Größenordnung kleiner, da der Wagenkasten oberhalb seiner Starrkörpereigenfrequenzen ( $< 4$  Hz) von den Drehgestellen nahezu entkoppelt ist.

#### Teilsystem Fahrweg

- Im Gegensatz zu den Fahrzeugschwingungen werden die Fahrwegschwingungen ortsfest gemessen. Dadurch ergibt sich eine gänzlich andere Charakteristik (*Abb. 4*). Während in den Fahrzeugschwingungen die statischen Zugbelastungen überhaupt nicht erfasst werden, sind diese bei den Zugüberfahrten über das Gleis der entscheidende Schwingungsanteil. Es ist jeweils der wesentliche Achsüberfahrtsimpuls mit Frequenzen um
 
$$f = 10 \text{ Hz} \times v/100 \text{ km/h}$$
 und bei hohen Geschwindigkeiten auch ein tieffrequenteres kleineres Maximum
 
$$f = 5 \dots 6 \text{ Hz} \text{ bei } v = 160 \text{ km/h,}$$
 das sich infolge der Drehgestellkonfiguration ausprägt, zu erkennen.
- Diesen Schwingungen infolge der statischen Zuglasten überlagern sich die dynamischen Lastanteile. Insbesondere ist jeweils das Maximum für die Schwellenabstandsanregung zwischen 40 Hz und 80 Hz mit steigender Amplitude zu verfolgen.

#### Teilsystem Boden

Beim Teilsystem Boden sind in Anlage A 2 die Terzspektren mehrerer Messpunkte im Nah- und Fernfeld des Gleises zusammen aufgetragen. Es ergibt sich bei allen Geschwindigkeiten folgendes Bild: In den Bodenschwingungen dominieren zwei Frequenzbereiche, die Schwellenabstandsanregung mit geschwindigkeitsabhängiger Frequenz und charakteristischer Ausprägung im mittleren Entfernungsbereich (7 m bis 30 m) und ein mittelfrequenter bodentypischer Bereich zwischen 10 Hz und 20 Hz, der insbesondere im Fernfeld maßgeblich ist (*Abb. 5*). Ähnliche Spektren sind auch bei der Impulsanregung des Bodens gemessen worden. Neben dem Gleis wird wie beim Fahrweg die tieffrequente Drehgestellvorbeifahrt ( $f = 5$  Hz bei  $v = 160$  km/h) registriert. Die Achsimpulse, die sich beim Fahrweg als breiteres Frequenzband

$$f = 8 \dots 12 \text{ Hz} \text{ bei } v = 100 \text{ km/h} \text{ bzw.}$$

$$f = 12 \dots 20 \text{ Hz} \text{ bei } v = 160 \text{ km/h}$$

darstellen, sind ebenfalls im Nahfeld identifizierbar, treten aber eher als eine Spitze (z. B. 12 Hz für  $v = 160$  km/h) auf.

#### Teilsystem Brücke

Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten regt die Zugüberfahrt starke Eigenschwingungen der Brücke an, die bei

$$f = 7 \text{ Hz} \text{ für } v = 100 \text{ km/h} \text{ und bei}$$

$$f = 11 \text{ Hz} \text{ für } v = 160 \text{ km/h}$$

liegen. Im Terzmaßstab stimmen diese Frequenzen mit den oben genannten, im Boden beobachteten Achsüberfahrtsfrequenzen überein.

## Gesamtsystem Fahrzeug – Fahrweg – Umgebung

Für das Gesamtsystem Fahrzeug – Fahrweg – Umgebung ergeben sich somit folgende durchgängige bzw. sich überschneidende Merkmale:

- Die statischen Lastanteile sind insbesondere am Fahrweg und im unmittelbar benachbarten Boden als tief- und insbesondere mittelfrequenter Bereich  $f = 3 \dots 4 \text{ Hz} \times v/100 \text{ km/h}$  und  $f = 8 \dots 12 \text{ Hz} \times v/100 \text{ km/h}$  ausgeprägt. Bei Fahrgeschwindigkeiten über 100 km/h überlagert sich der mittelfrequente Achsimpulsanteil einerseits mit dem bodentypischen Frequenzbereich von 10 bis 20 Hz und führt zu großen Amplituden des Bodens insbesondere auch im Fernfeld, andererseits trifft er auch Eigenfrequenzen der Brücke, die infolgedessen erheblich stärker schwingt als bei rein quasi-statischer Verformung.
- Die Schwellenabstandsanzugung ist durchgängig in allen Teilsystemen zu beobachten. Am deutlichsten ist sie in ihrer Geschwindigkeitsabhängigkeit am Radsatz, das heißt unmittelbar am (mitbewegten) Entstehungsort zu verfolgen. Erst im Fernfeld des Gleises ( $r = 50 \text{ m}$ ) verliert dieser Anteil infolge der Bodendämpfung an Bedeutung.
- Die Radsatz-Fahrweg-Eigenschwingung ist insbesondere an der geringer gedämpften „Festen Fahrbahn“ zu beobachten. Bei Geschwindigkeiten zwischen 125 und 160 km/h wird diese Eigenfrequenz, die je nach Fahrwegnachgiebigkeit zwischen 60 und 80 Hz liegt, durch die Schwellenabstandsanzugung getroffen und es ergeben sich deutlich größere Radsatz- und Fahrwegamplituden. Für größere Fahrgeschwindigkeiten und damit höhere Anregungsfrequenzen als die Radsatz-Fahrweg-Eigenfrequenz sollte die Schwellenabstandsanzugung und die Radsatzbewegung nicht weiter anwachsen. (Dies ist am gleichen Messort „Ebene“ 1986 und 1987 bei den Versuchs- und Rekordfahrten des Intercity Experimental (ICE-V) bis  $v = 300 \text{ km/h}$  durch Messungen der BAM auch nachgewiesen worden [10]).
- Die Ausbildung des bodentypischen Frequenzbereichs durch die statischen Achslastüberfahrten ist typisch für höhere Fahrgeschwindigkeiten ( $v > 100 \text{ km/h}$ ) und ist ebenfalls an Hand der ICE-Versuchsfahrten zunächst von Huber (IBF Karlsruhe [24]) durch Analysen im Zeitbereich, später auch von der BAM [43] durch verfeinerte Frequenzanalysen nachgewiesen worden. Bei den hier dargestellten Messfahrten bis  $v = 160 \text{ km/h}$  ist dieser Effekt ebenfalls – allerdings nicht ganz so eindeutig wie beim ICE – zu beobachten. Er erklärt sich aus den zufälligen Änderungen der Bodeneigenschaften längs des Gleises. Dadurch breiten sich die Achsüberfahrtsimpulse einer Achse durch unterschiedliche Böden aus und bei der Überlagerung der Schwingungsantworten der Impulse von verschiedenen Anregungsorten, die im regelmäßigen Boden nur eine sehr tieffrequente quasi statische Bewegung ergeben müsste, verbleibt ein zufälliger Zerstreuungsteil im ursprünglichen Frequenzbereich der Impulsanzugung übrig. Es handelt sich somit um bodenabhängige Achsimpulsanteile, die in größeren Entfernungen die Umgebungserschütterungen beherrschen.

## 3.2 Fahrweg-Untergrund-Berechnungen

Die Berechnung der Nachgiebigkeit von Eisenbahngleisen war das zentrale Thema der Rad-Schiene-Forschung der 80er Jahre in der BAM. Es wurde ein Rechenverfahren für die dynamische Wechselwirkung von starren Schwellen auf dem homogenen Boden in sämtlichen Anregungsmoden entwickelt und die Ergebnisse mit Messungen an einem Gleis überprüft [37], [38]. Die Bedeutung der Bodenkopplung, die in den meisten Untersuchungen unberücksichtigt bleibt, wurde auf verschiedenen Tagungen, z. B. [6] und in einschlägigen Zeitschriften [55] herausgestellt. In der Folgezeit wurde die Methode auf flexible Fundamente (Schwellen) [12] und vor allem auf geschichteten Boden ausgedehnt [13], [14], [18]. Gute Übereinstimmungen des berechneten Gleisverhaltens mit Messungen wurde bei den ICE Versuchsfahrten [10], und mit dem Oberbaumesswagen [24], [12], erzielt. In der letzten Zeit wurden die bodendynamischen Methoden auch von der fahrzeugdynamischen Fachwelt zur Kenntnis genommen.

Es wurde ein Eisenbahngleis mit folgenden Merkmalen berechnet (Abbildung 6):

### zwei Schienen UIC 60 mit

Querschnittsfläche	$F = 7,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ,
Flächenträgheitsmoment	$J = 3,05 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ ,
Elastizitätsmodul	$E = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,15$ ,
Massendichte	$\rho = 7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,
elf Betonschwellen	
im Abstand von	$d = 0,6 \text{ m}$ mit
Länge	$b = 2,6 \text{ m}$ ,
Breite	$a = 0,26 \text{ m}$ ,
Höhe	$h = 0,2 \text{ m}$ ,
Massendichte	$\rho = 2,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,
Elastizitätsmodul	$E = 3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,15$ .

Dieses Gleis liegt auf Bodenschichten mit

Massendichte	$\rho = 2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,33$

und verschiedenen Schubmoduli

$$G = 2 \times 10^7; 4,5 \times 10^7; 8 \times 10^7; 1,8 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

entsprechend den Scherwellengeschwindigkeiten von  $v_s = 100; 150; 200; 300 \text{ m/s}$ .

Zusätzliche elastische Schienenlager und Betonplatten im und auf dem Boden sind jeweils bei den Ergebnissen definiert. Die berechneten Beispiele sind in der Übersicht (Abbildung 7) dargestellt.

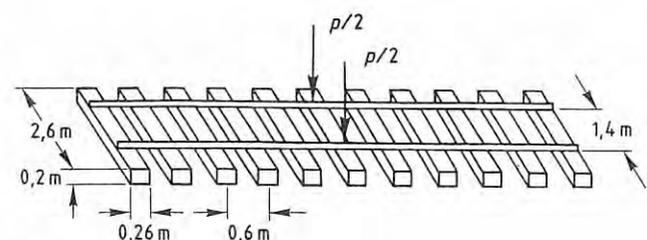


Abb 6  
Das Fahrwegmodell

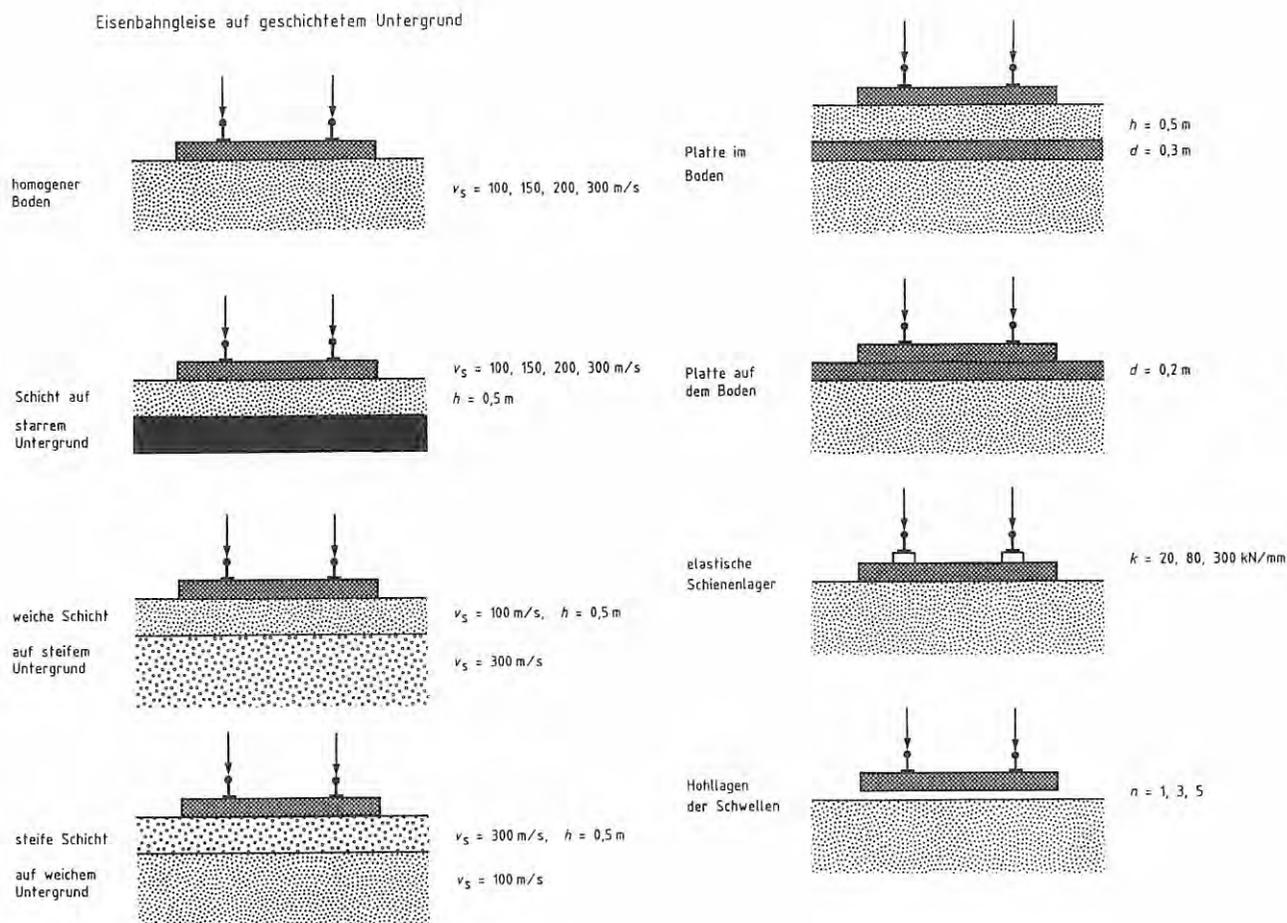


Abbildung 7 Übersicht über die berechneten Gleissysteme

### 3.2.1 Die Bedeutung der Untergrundsteifigkeit

Zur Demonstration des großen Einflusses des Untergrundes wird beim Standardgleis die Bodensteifigkeit variiert (Abb. 9). Die Scherwellengeschwindigkeit des Bodens wurde zu  $v_s = 100, 150, 200$  und  $300 \text{ m/s}$  gewählt, was Schubmoduli  $G$  zwischen  $2 \times 10^7$  und  $1,8 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  entspricht.

Die statische Nachgiebigkeit  $F_0$  des Gleises ist ganz entscheidend durch die Untergrundsteifigkeit geprägt. Es gilt annähernd  $F_0 \sim 1/G^{0,8}$ , was zwischen den Gesetzmäßigkeiten für ein starres Fundament  $F_0 \sim 1/G$  und für eine elastische Platte (bei Punktanregung)  $F_0 \sim 1/G^{2/3}$  liegt (s. [15]).

Die Nachgiebigkeiten werden mit zunehmender Frequenz kleiner, insbesondere für weichere Böden, so dass sich die mittelfrequenten Nachgiebigkeiten aneinander annähern. Im Phasenverlauf ist eine ähnliche Tendenz zu bemerken: Deutliche, (mindestens mit der Wellengeschwindigkeit proportionale) Unterschiede im tieffrequenten Bereich und eine Annäherung im mittleren Frequenzbereich. Es werden Phasen von  $-30$  bis  $-50$  Grad erreicht.

Beim weichsten Boden tritt im betrachteten Frequenzbereich (bis  $150 \text{ Hz}$ ) ein Phasenabfall unter  $-90$  Grad auf, der mit relativen Resonanzüberhöhungen der Gleisamplituden einhergeht. Bei einem extrem weichen Boden sind demnach Fahrweg-Untergrund-Resonanzen schon ab  $100 \text{ Hz}$  möglich. Beim nächst steiferen Untergrund ( $v_s = 150 \text{ m/s}$ ) deutet sich die Resonanz im Betrags- und Phasenang bei  $150 \text{ Hz}$  an.

Beim homogenen Boden ist die Dämpfung des Gleises stark ausgeprägt. Man hat im unteren Frequenzbereich linear mit der Frequenz zunehmende Phasen. Das entspricht dem Verhalten von einem mit einer Feder parallel wirkenden Dämpfer. Diese Abstrahlungsdämpfung geht beim geschichteten Boden zumindest teilweise verloren.

### 3.2.2 Auswirkungen einer extremen Schichtung (Felsuntergrund, Tunnel- und Brückengleis)

Als Extrembeispiel einer Untergrundsichtung soll hier eine Schicht mit starrer Fixierung in der Tiefe betrachtet werden. Es wird eine  $0,5 \text{ m}$  dicke Schicht mit verschiedenen Steifigkeiten untersucht (Abbildung 9).

Es fällt im Vergleich zum unbegrenzten Halbraum in Abbildung 8 sofort auf, dass bei der Schicht auch bei steiferen

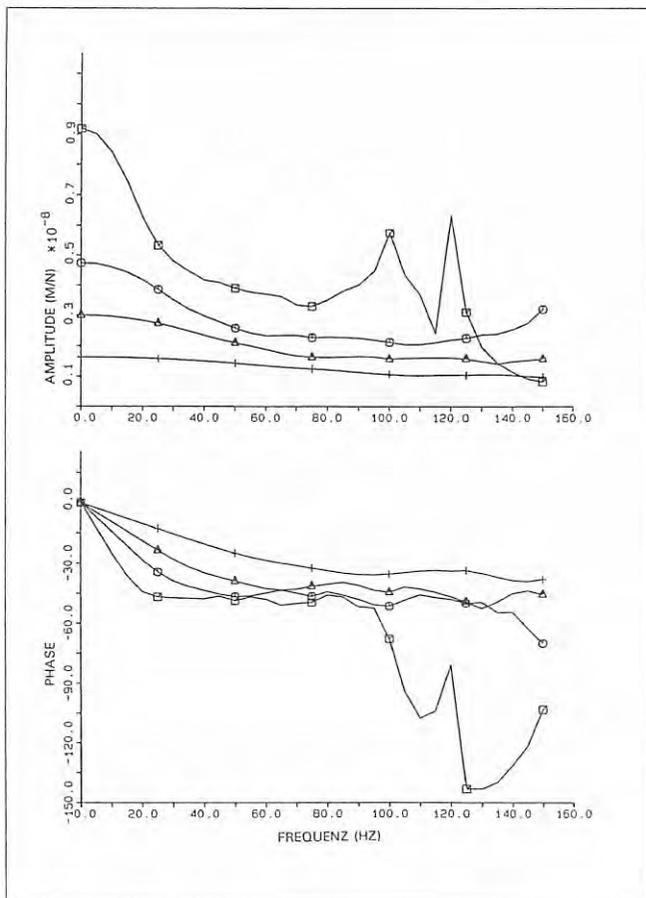


Abb. 8  
Schottergleis auf homogenem Untergrund mit  
 $v_s = (\square)$  100 m/s,  $\circ$  150 m/s,  $(\Delta)$  200 m/s,  $+$  300 m/s

Materialien ausgeprägte Resonanzen im Frequenzbereich bis 150 Hz auftreten. Gleichzeitig ist die tieffrequente Phase nahezu null. Man hat also nur eine geringe Dämpfung. Der Phasenabfall in der Resonanz ist jeweils sehr markant. Bei einer normalen Bodensteifigkeit von  $G = 8 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> bzw.  $v_s = 200$  m/s liegt die Resonanz bei 140 Hz und einer Überhöhung von  $V = 4$ . Bei  $v_s = 300$  m/s, tritt bis 150 Hz keine Resonanz auf. Die harte Schichtgrenze bewirkt hier aber noch eine größere Steifigkeit und vor allem die Verhinderung jeglicher Abstrahlungsdämpfung, die für den unbegrenzten Boden typisch ist.

Die Eigenfrequenzen des Gleises auf der Bodenschicht sind deutlich niedriger als beim homogenen Boden. Die statischen Steifigkeiten sind jedoch deutlich größer. Die Nachgiebigkeiten liegen zwischen  $F_0 = 0,9 \dots 3,5 \times 10^{-9}$  m/N (Schicht) im Vergleich zu  $F_0 = 1,6 \dots 9,1 \times 10^{-9}$  m/N (Halbraum) beim Halbraum. Eine Schicht hat auch ohne das massebehaftete Gleis eine Eigenfrequenz, die bei  $f_0 = v_s/2h = 100, 150, 200, 300$  Hz liegt (s. [14]). Durch die Masse des Gleises werden diese Schichtresonanzen noch zu tieferen Frequenzen verschoben zu

$$f_0 \approx 70, 105, 140 \dots \text{Hz.}$$

### 3.2.3 Eine weiche Schicht auf einem steifen Untergrund (natürliche Schichtung)

Bei einem normalen Boden sind die tieferliegenden Bodenschichten in der Regel steifer als die oberen Deck-

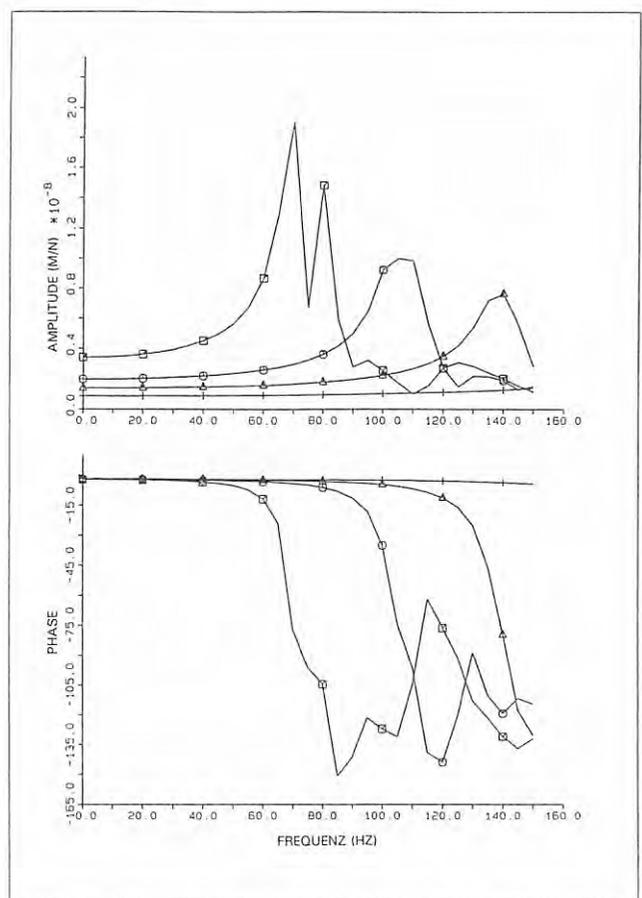


Abb. 9  
Schottergleis auf einer Schicht über starrem Untergrund,  
 $v_s = (\square)$  100 m/s,  $\circ$  150 m/s,  $(\Delta)$  200 m/s,  $+$  300 m/s

schichten, allerdings niemals unendlich steif wie im vorangehenden Abschnitt. Als Beispiel für eine realistische Bodenschichtung wird eine 0,5 m dicke Schicht des weichsten Materials ( $v_s = 100$  m/s) mit dem steifsten Untergrund ( $v_s = 300$  m/s) kombiniert. Das ist immer noch ein deutlicher Steifigkeitssprung von annähernd 1 : 10.

Bei der Gleisnachgiebigkeit (Abb. 10) treten, wie auch bei der starr fixierten Schicht in Abbildung 9, Resonanzen bei 60 Hz auf. Die Überhöhung ist aber bei der realen Schichtung nur noch unter  $V = 2$ . Die tieffrequente Dämpfung ist größer als bei der extremen Schichtung, aber im Vergleich zum Halbraum immer noch sehr klein. Die statische Nachgiebigkeit ist mit  $F_0 = 4,1 \times 10^{-9}$  m/N nur etwas größer als bei der starr fixierten Schicht ( $F_0 = 3,5 \times 10^{-9}$  m/N).

### 3.2.4 Eine steife Schicht auf einem weichen Untergrund (Neubaustrecken)

Eine steifere Deckschicht tritt normalerweise nur bei einem gefrorenen Boden oder einem ausgetrockneten Tonboden oder aber bei einer Bodenverbesserung für eine Gründung auf. Bei der Bahn hat man diese letztgenannte Situation insbesondere bei den Neubaustrecken für den Hochgeschwindigkeitsverkehr.

Es wird, wie im vorangehenden Abschnitt, ein deutlicher Steifigkeitsunterschied mit Wellengeschwindigkeiten von 300 m/s und 100 m/s bei einer Schichtdicke von  $d = 0,5$  m betrachtet (Abbildung 11). Im tiefen Frequenzbereich folgen der Betrags- und der Phasengang annähernd den

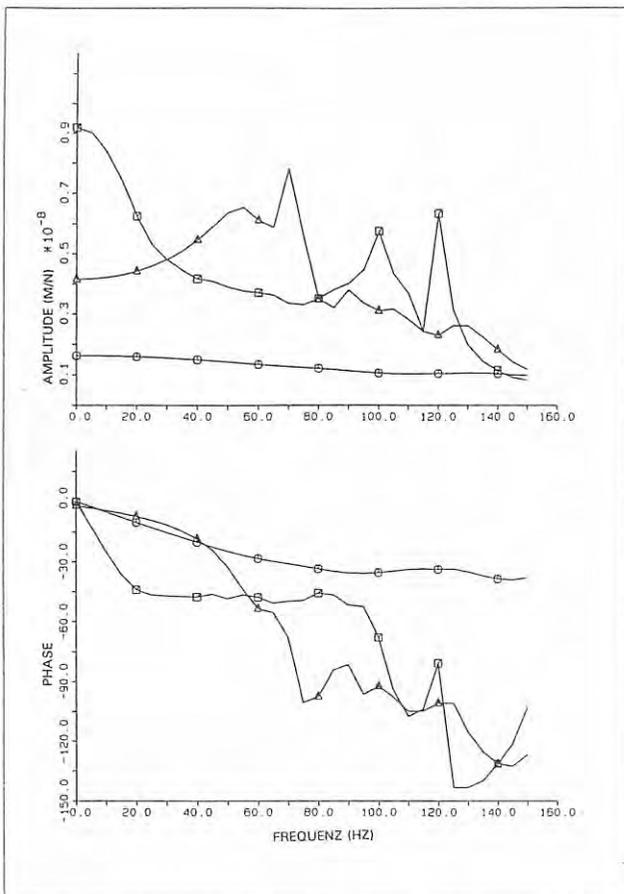


Abb. 10  
Schottergleis auf einer weichen Schicht über steiferem Untergrund ( $\Delta$ ) im Vergleich zum weichen ( $\square$ ) und zum steifen (o) Halbraum

Kurven für das unterliegende weichere Bodenmaterial. Dabei ist die Nachgiebigkeit durch die steife Deckschicht etwas reduziert (von  $F_0 = 9,1 \times 10^{-9}$  m/N beim homogenen Halbraum auf  $F_0 = 6,0 \times 10^{-9}$  m/N beim Halbraum mit steifer Deckschicht), die Phase ist sogar etwas größer als beim weichen Boden. Bei höheren Frequenzen nähert sich der Frequenzgang der Nachgiebigkeit der steiferen Deckschicht an.

Man kann also mit der dünnen steifen Deckschicht die statischen Einsenkungen nicht wesentlich reduzieren. Bei höheren Frequenzen ist aber das steifere Material maßgeblich. Man hat eine große dynamische Steifigkeit und die Resonanzen des weichen homogenen Bodens werden unterdrückt.

### 3.2.5 Hochelastische Schienenlager

Die größere Steifigkeit der festen Fahrbahn und die erhöhte dynamische Steifigkeit bei einer steifen Deckschicht (Neubaustrecken) sind für die Fahrzeugdynamik unerwünscht. Deshalb werden vermehrt hochelastische Schienenlager bei neuen Strecken eingebaut. Jedes einzelne Schienenlager hat dabei eine Steifigkeit von  $k = 80$  kN/mm beim Schottergleis und  $k = 20$  kN/mm bei der festen Fahrbahn. Beim normalen Schottergleis ist die Steifigkeit der Zwischenlage erheblich größer, etwa  $k = 300$  kN/mm.

Zunächst sind die Nachgiebigkeiten beim Schottergleis auf steifem Boden ( $v_s = 300$  m/s) mit verschiedenen Zwischen-

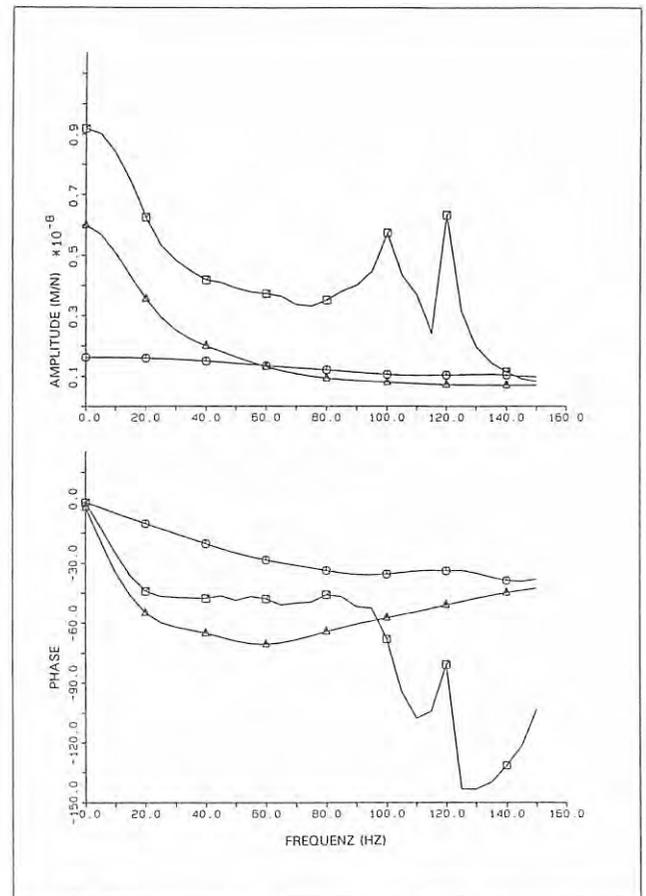


Abb. 11  
Schottergleis auf einer steifen Schicht über weichem Halbraum ( $\Delta$ ) im Vergleich zum weichen ( $\square$ ) und zum steifen (o) Halbraum

lagen in *Abbildung 12* dargestellt. Man hat einerseits mit den weicheren Zwischenlagen einen Nachgiebigkeitsgewinn. Andererseits hat man geringere Phasen und damit einen Dämpfungsverlust. Betrachtet man schließlich ein Gleis mit den hochelastischen Schienenlagern ( $k = 20$  kN/mm, *Abb. 13*), so hat man neben einer verschwindenden Dämpfung auch noch eine reine Fahrwegresonanz bei 110 Hz, bei der die Schiene auf den weichen Lagern schwingt.

Für die Fahrzeugdynamik sind die Radsatz-Fahrweg-Eigenschwingungen maßgeblich, s.[8] und [10]. Die veränderte Fahrwegsteifigkeit führt zu einer Verstimmung dieser Eigenschwingungen, die positive Wirkungen (insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten) zeigen kann, s. [31].

## 3.3 Fahrzeugschwingungen und dynamische Radaufstandskräfte

Im Bericht 3 [28] stehen die Fahrzeugmodelle im Vordergrund. Es wurden die Eigenfrequenzen und Eigenformen eines Reisezugwagens und seiner Komponenten (Wagenkasten, Drehgestellrahmen, Radsatz) ermittelt und mit Messungen abgeglichen. Die hochfrequenten Eigenformen der Radsätze hängen wesentlich auch von der Nachgiebigkeit der Radaufstandspunkte ab. Insbesondere ergibt der Untergrund eine stärkere Bedämpfung auch der elastischen Eigenformen.

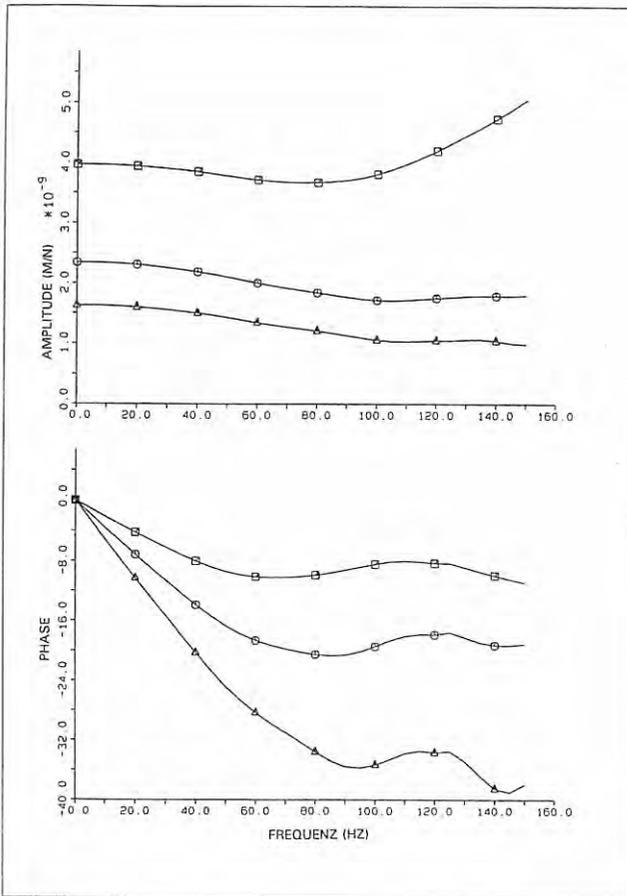


Abb. 12  
Schottergleis ohne (Δ) und mit elastischen Zwischenlagen:  
□ k = 80 kN/mm, ○ k = 300 kN/mm

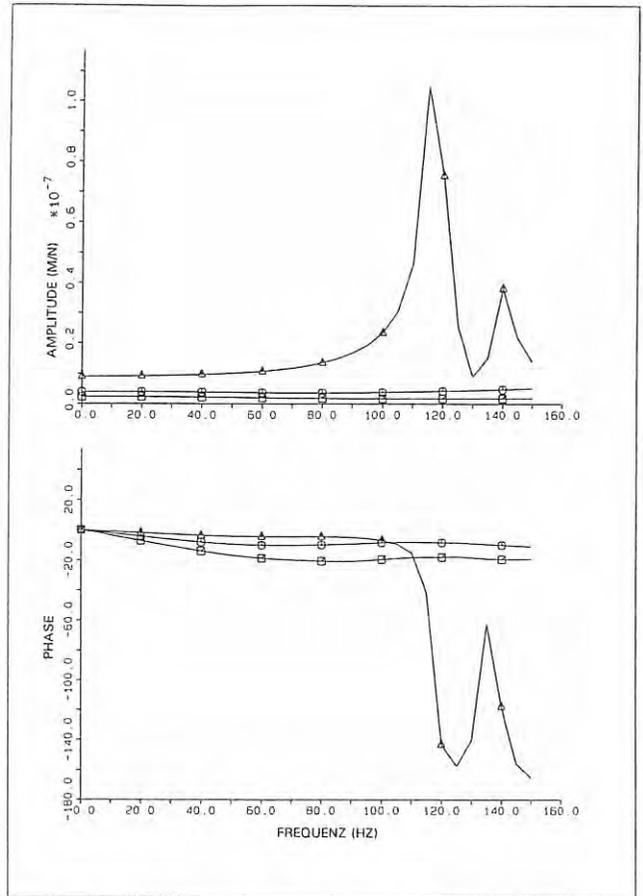


Abb. 13  
Schottergleis mit hochelastischem Schienenlager Δ k = 20 kN/mm  
(○ k = 80 N/mm, □ k = 300 kN/mm)

Im zweiten Schritt werden die dynamischen Auflagerkräfte (Achslasten) bei einer Anregung etwa durch Störwege (Gleislage- und Laufflächenfehler) berechnet. Hier wurde gleich mit der Fahrwegrückkoppelung gerechnet, um die ungekoppelt auftretenden starken höherfrequenten Resonanzspitzen zu vermeiden. Im tiefen Frequenzbereich bis mindestens 30 Hz sind gekoppelte und ungekoppelte Rechnung jedoch praktisch identisch. Der Vergleich von verschiedenen Starrkörpermodellen mit entsprechenden flexiblen Strukturen zeigt schließlich den notwendigen Modellierungsaufwand, der bei der Analyse der Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik je nach interessierenden Frequenzbereich betrieben werden muss.

### 3.4 Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung

Die Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung ist bereits im BAM-Bericht 155 "Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental" [8] sehr allgemein untersucht worden. Die neuen, detaillierten Berechnungen des Fahrzeug- und Fahrwegverhaltens der Abschnitte 3.2 und 3.3 fügen sich nahtlos in die damals gewählte Beschreibung ein.

### 3.4.1 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 Schräglaufkräfte) bestimmt wird, oder bei der Fahrweg-(Schienen-)belastung, die hauptsächlich vom Zuggewicht (den Achslasten) bestimmt ist, die Wechselwirkungen des Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Systems mit et-

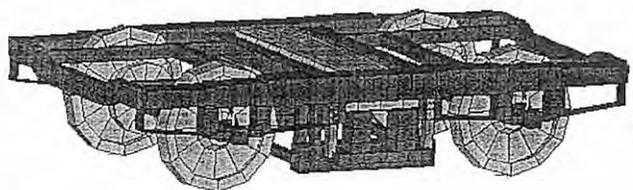


Abb. 14  
Das Rechenmodell des Drehgestells

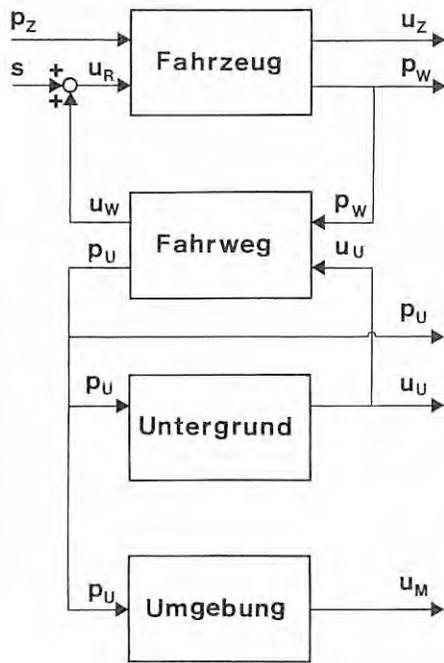


Abb. 15  
Das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrgang-Untergrund-Umgebung

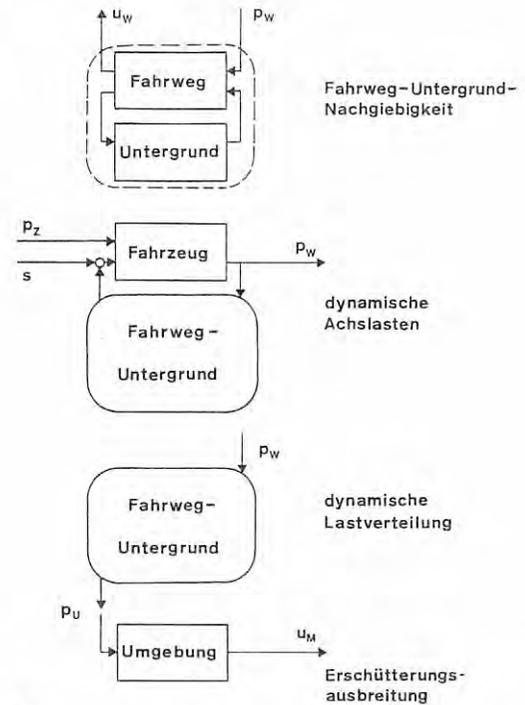


Abb. 16  
Lösungsschritte zur Fahrzeug-Fahrgang-Untergrund Dynamik und zur Erschütterungsausbreitung

was größerer Berechtigung oft vernachlässigt werden, soll in diesem Bericht gerade durch die umfassende Berücksichtigung aller Systemkoppelungen eine bessere Einsicht in die Entstehung der Schienenverkehrserschütterungen gewonnen werden.

Die Verknüpfungen der Komponenten Fahrzeug, Fahrgang, Untergrund und Umgebung zum Gesamtsystem werden an *Abbildung 15* erläutert. 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 Fahrgang und Untergrund verborgen und beruht auf der Ortsabhängigkeit der Fahrgangeigenschaften durch die diskrete Lagerung auf einzelnen Schwellen und auf zufälligen Schwankungen der Untergrund-(Schotterbett-)eigenschaften. Die Komponenten Fahrzeug und Fahrgang stellen sich formal in gleicher Weise dar: Sie reagieren auf eine Kraft- und eine Fuß-

punktanregung 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 Fahrgang (Schienen und Schwellen), der darauf mit Schienenverschiebungen  $u_w$  an den Radaufstandspunkten und Auflagerkräften  $p_u$  (unter den Schwellen) reagiert. Bei der Kopplung Fahrzeug – Fahrgang 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.

Das Verknüpfungsdiagramm (Abb. 15) ist sehr allgemein, da noch keinerlei Einschränkungen hinsichtlich bestimmter Fahrzeug-, Fahrgang- 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 Finite-Element- oder Mehrkörperprogrammen und detaillierte Untergrundberechnungen 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. Große Sorgfalt muss dabei auf die richtige (nicht notwendigerweise detaillierte) Berücksichtigung

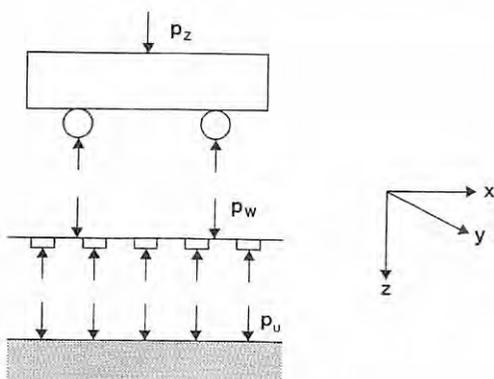


Abb. 17  
Koordinatensystem und Definition der Schnittkräfte

der Steifigkeitsschwankungen des Fahrwegs (Parametererregung) gelegt werden.

Die Berechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik geschieht in mehreren Teilschritten (Abb. 16): Zunächst wird die Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit, das heißt, der Zusammenhang zwischen den Radaufstandskräften  $p_w$  berechnet, wobei auch die Nachgiebigkeitsunterschiede durch die diskrete Schienenauflagerung auf Einzelschwellen ermittelt werden. Diese Nachgiebigkeit wird an ein geeignetes Fahrzeugmodell gekoppelt, mit dem dann die dynamischen Achslasten  $p_w$  bei vorgegebenen äußeren Kräften  $p_z$  oder Störwegen  $s$  berechnet werden. Diese dynamischen Achslasten  $p_w$  können dann als Ausgangspunkt für die Berechnung der Erschütterungsausbreitung dienen. Dabei wird zunächst die dynamische Lastverteilung durch den Fahrweg berücksichtigt und schließlich die Schwingungen  $u_m$  in der Umgebung der Trasse berechnet.

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

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. Abb. 17):

$$F_w(f, v_z) \gg F_w(f, v_z = 0) \text{ Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit}$$

$$K_z(f) \text{ Fahrzeugsteifigkeit (Trägheit)}$$

$$u_R = u_w + s \tag{2}$$

$$p_w = G_z p_z - K_z u_R \tag{1}$$

$$u_w = F_w p_w \tag{3}$$

$$p_w = (I + K_z F_w)^{-1} (G_z p_z - K_z s). \tag{4}$$

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)  $(I + K_z F_w)^{-1} G_z$  für die Kräfte  $p_z$  und  $-(I + K_z F_w)^{-1}$  für die Störwege  $s$ .

### 3.4.3 Berücksichtigung der Schwellenabstandsanzregung (Parametererregung durch die reguläre Schwan- kung der Fahrwegsteifigkeit)

Die diskrete Schienenstützung auf den Schwellen (bzw. allgemein eine Schwankung der Fahrweg-Untergrund-Nachgiebigkeit) bringt gegenüber dem kontinuierlichen Fahrweg 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

$$K_w u_w = p_w, \tag{3'}$$

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

$$(K_z + K_w) u_R = G_z + K_w s. \tag{5}$$

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

$$[K + K_1(t)] u = p \tag{6}$$

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 System instabil sein können.

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

$$\begin{aligned} u_0 & \text{ aus } K u_0 = p \\ u_1 & \text{ aus } K u_1 = -K_1(t) u_0 \\ & \dots \\ u_n & \text{ aus } K u_n = -K_1(t) u_{n-1} \end{aligned} \tag{7}$$

$$K \left( \sum_{i=0}^n u_i \right) = -K_1(t) \left( \sum_{i=0}^{n-1} u_i \right) + p.$$

Die Näherungslösung nach dem (n+1)ten Schritt

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

erfüllt die Gleichung (6) bis auf einen kleinen Restfehler

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

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

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

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

$$p_1 = -K_z u_1 = K_z K^{-1} K_1(t) K^{-1} p \tag{10}$$

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

$$f_s = v_z/d \tag{11}$$

als Grundfrequenz und vernachlässigbaren höheren Frequenzanteilen (s. detailliertere Untersuchungen von z. B. Korb [27]), das heißt, nahezu eine harmonische Zeitfunktion sind, kann man Gleichung (9) schreiben als

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

bzw. Gleichung (10) als

$$p_1 = K_z(f_s) K^{-1}(f_s) K_1(f=0) K^{-1}(f=0) p_0 \tag{13}$$

Die dynamische Last aus Schwellenabstands-anregung lässt sich nunmehr mit den bisherigen Rechenergebnissen im Frequenzbereich gemäß Gleichung (13) ermitteln.

Dabei ist  $K_z$  die dynamische Steifigkeit des Fahrzeugs,  $K_1$  die Schwankung der Fahrweg-Untergrund-Steifigkeit,  $K^{-1}$  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)

$$[K + K_1(t)] u = 0 \tag{14}$$

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 [26]). Wegen der vorhandenen Dämpfung durch den Untergrund (mindestens  $D = 0,1$  aufgrund der Abstrahlung) sind bei Steifigkeitsschwankungen  $K_1/K$  kleiner 30 Prozent 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.

### 3.4.4 Die dynamischen Lastanteile

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

- dem Fahrzeuggewicht
- der Schwellenabstands-anregung infolge des Fahrzeuggewichts
- den Auswirkungen von Störwegen (Gleislagefehler, Schienenunebenheiten, Radunrundheiten) und
- von äußeren “Maschinenkräften”.

Die frequenzabhängigen Berechnungsvorschriften (Übertragungsfunktionen), die im vorangehenden Abschnitt abgeleitet wurden, sind in der folgenden Tabelle 1 noch einmal zusammengefasst.

$p_0$	Fahrzeuggewicht
$f = 0 \text{ Hz}$	
$p_1 = K_z K^{-1}(0) K^{-1}(0) p_0$	
$f = v_z / d$	Schwellenabstand
$p_2 = - (I + K_z F_w)^{-1} K_z s$	
$f = v_z / l$	Störwege
$p_3 = - (I + K_z F_w)^{-1} G_z p_z$	
$f = f_z$	äußere “Maschinenkräfte”

Tabelle 1 - Dynamische Lastanteile

Ein wesentliches Ergebnis der Berechnungen ist, dass die dynamischen Lasten  $p_1$  und  $p_2$  zunächst deutlich mit der Fahrgeschwindigkeit (bzw. der Frequenz) zunehmen. Sie erreichen bei einer bestimmten Frequenz bzw. Fahrgeschwindigkeit ein Maximum und bleiben bei weiterer Geschwindigkeits- und Frequenzsteigerung annähernd konstant. Dieses für den Hochgeschwindigkeitsverkehr wichtige Ergebnis beruht auf dem Überschreiten der Radsatz-Untergrund-Eigenfrequenz. Oberhalb dieser Eigenfrequenz werden 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 Schwellenabstands-anregung  $p_1$ :

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

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 Fahrweg-trägheit wieder etwas kleiner werden. Dieses Ergebnis – Beschränktheit der dynamischen Last bei hohen Geschwindigkeiten – gilt nicht nur für die regulären Fahrweg-schwankungen 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

$$p_1 = K_z (K_w + K_z)^{-1} p_1' \tag{18}$$

$$p_2 = -K_w (K_w + K_z)^{-1} K_z s \tag{19}$$

$$= -K_z (K_w + K_z)^{-1} K_w s.$$

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. Es bleibt noch zu ergänzen, dass langwelligere Störwege, die mit der Fahrgeschwindigkeit zu Frequenzen unter 50 Hz führen, nicht zur Radsatz-, sondern auch Drehstellträgheiten hervorrufen. Der tief-frequente Bereich dürfte demnach nicht so gleichmäßig mit  $f^2$  gegen  $p_2(0) = 0$  gehen. Die genauen Verhältnisse hängen noch von der speziellen Drehstellgeometrie und -abstimmung ab.

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.

### 3.4.5 Kurz- und langwelliger Störkomplex und Langzeitwechselwirkungen

In diesem Abschnitt sollen die Unregelmäßigkeiten im gesamten Bahnsystem genauer betrachtet werden. Bei einem idealen Bahnsystem sind diese Größen allesamt null. Dieser Idealzustand ist aber praktisch nie, selbst bei den ICE-Versuchsfahrten auf neuem Gleis nicht, erreichbar. Im Gegenteil, selbst die kleinsten Abweichungen von der Perfektion ergeben dynamische Lasten bzw. Kontaktkräfte, die ihrerseits neue Imperfektionen nach sich ziehen. Man hat hier sich verstärkende Regelkreise, die ab einem bestimmten Grad der Störungen aufwendige Gegenmaßnahmen erfordern. Man hat eine Wechselwirkung zwischen dynamischen Kräften und Systemfehlern, die mitunter auch als Langzeit-Wechselwirkung bezeichnet wird (Abb. 18), im Gegensatz zur Kurzzeit-Wechselwirkung, die die momentane Dynamik von Fahrzeug und Fahrweg als gekoppeltes System bestimmt.

Bei den Störungen unterscheidet man nach den Systemteilen, die von ihrem Idealzustand abweichen. Es gibt

- Unwuchten in rotierenden Fahrzeugteilen
- Laufflächenfehler der Räder
- Laufflächenfehler der Schienen
- Gleislagefehler
- Schottersetzungen
- unregelmäßige Untergrundsetzungen und Untergrundsteifigkeiten.

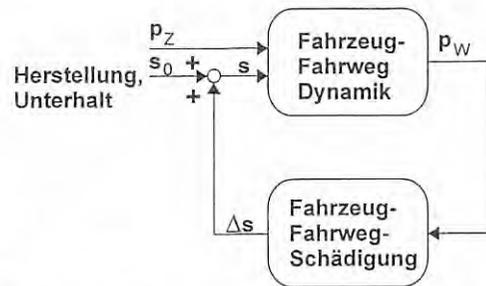


Abb. 18  
Langzeitwechselwirkung zwischen dynamischer Lasterzeugung und Systemschädigung

Nicht alle diese Störungen lassen sich als Störwege behandeln. Bei der unregelmäßigen Untergrundsteifigkeit handelt es sich um eine Parametererregung analog der Schwellenabstandsanzregung, Rotorunwuchten ergeben Kraftanregungen, und die Setzungen ergeben sogar ein "nichtlineares" Problem mit veränderlicher Systemgliederung (s. BAM-Bericht 67 [30]). Auch der Charakter der verursachten Störschwingungen sind verschiedener Art; man hat rein harmonische Schwingungen bei Unwuchterregung, breitbandige Störungen bei den Rad- und Gleisfehlern, und schließlich bei den Nullsetzungen unter den Schwellen auch Stoßanteile.

Eine weitere Unterteilung der Störungen erfolgt nach dem Frequenz- beziehungsweise Wellenlängenbereich. Für die Störungen im Rad-Schiene-Kontaktbereich hat man kleine Wellenlängen und hohe Frequenzen. Für die Störungen im Gleis-Untergrund-Bereich hat man große Wellenlängen und tiefe Frequenzen. Die Wellenlänge hat den Vorteil, von der Fahrgeschwindigkeit unabhängig zu sein, die Frequenzen sind dafür bei den dynamischen Untersuchungen vertrauter. Als festen Bezugspunkt kann man die Schwellenabstandsanzregung, die heutzutage immer vorhanden ist, wählen. Der Wellenlänge von  $\lambda = 0,6$  m entspricht bei  $v = 100$  km/h eine Frequenz von  $f = 46$  Hz. Nullsetzungen der Schwellen können höchstens im halben Schwellentakt  $\lambda \geq 2 d = 1,2$  m,  $f(100 \text{ km/h}) \leq 23$  Hz stationäre Schwingungen erzeugen. Radunrundheiten haben den Radumfang als maximale Wellenlänge und entsprechend eine Mindestfrequenz von  $\lambda \leq 2 \pi r \approx 3$  m,  $f(100 \text{ km/h}) > 10$  Hz. Tatsächlich treten aber insbesondere Vielfache dieser Grundfrequenz auf, während die Mindestfrequenz hauptsächlich bei Radunwuchten und Flachstellen vorkommt.

Man kann schließlich eine weitere Wellenlänge angeben, die aber nicht zu den Störwellenlängen gezählt werden kann, das ist die Biegewellenlänge des Gleises unter der statischen Last (elastische Länge des Gleis-Untergrund-Systems). Sie stellt nur für den ortsfesten Gleispunkt eine Schwingfrequenz dar und sie erzeugt keine zusätzlichen dynamischen Kräfte. Für einen Gleismesspunkt ist die Überfahrt der statischen Kräfte jedoch der überragende Anteil. Diese Wellenlänge hängt von der Schienen- und Fahrbahnbiegesteifigkeit und ganz entscheidend auch von der Untergrundsteifigkeit ab. Bei genügend steifen Untergrund liegt die elastische Gleislänge bei etwa fünf Schwellenabständen, so dass man wiederum

$$\lambda \approx 3 \text{ m } f(100 \text{ km/h}) \approx 10 \text{ Hz}$$

wie bei den groben Radstörungen hat.

Insgesamt ergeben sich zwei "Störkomplexe": der hochfrequente Komplex aus

- Schwellenabstand
- Radunrundheiten
- langen Schienenriffeln

und der tief- bzw. mittelfrequente Komplex aus

- Gleisbiegung (nur für den Fahrweg und Untergrund)
- Gleislage
- Schotter- und Untergrundsetzungen und
- Steifigkeitsschwankungen des Fahrweg-Untergrund-Systems.

Hierzu kommen fahrgeschwindigkeitsunabhängige Eigenschwingungen des Fahrzeugs, zum mittelfrequenten Komplex die Wagenkastenbiegungen und die Drehgestellkippschwingungen, zum hochfrequenten Bereich die Achsbiegungen und die gekoppelte Radsatz-Fahrweg-Untergrund-Eigenschwingung.

Die Momentandynamik des Fahrzeug-Fahrweg-Systems liefert die dynamischen Kräfte. In diesem Forschungsvorhaben sind die statischen und dynamischen Kräfte die Anregung für die Erschütterungen in der Umgebung. Die Auswirkung dieser Kräfte auf die Entwicklung von Schäden und Störgrößen wird an dieser Stelle nicht untersucht. Tatsächlich ist die Bedeutung der hier untersuchten dynamischen Kräfte für die Unterhaltungs- und Schadensproblematik noch viel größer als für die Erschütterungen. Hier sind Untersuchungen einer Vielzahl von Schädigungsmechanismen notwendig. Die BAM hat hierzu insbesondere das Setzungsverhalten sehr intensiv unter quasi-statischer und dynamischer Belastung untersucht (Holzlöhner [22], Dietrich [23]).

### 3.5 Minderungsmaßnahmen im Ausbreitungsweg Fahrweg-Boden-Gebäude

Die Untersuchungen in diesem Arbeitspaket knüpfen an die Ergebnisse der Forschungsberichte 92 "Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden" [2] und 199 "Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahn-Tunneln und dicht benachbarten Gebäuden" [40] an. Mit einem Finite-Element-Programm, das die unendlich ausgedehnten Bodenbereiche seitlich des Finite-Element-Gebietes realitätsnah berücksichtigt [36], werden verschiedene Fahrwegsituationen und Minderungsmaßnahmen nachgebildet und die Erschütterungsreduktion für die Bodenoberfläche beziehungsweise für bestimmte Gebäudepunkte (Wand-, Decken-, -mittel- und -eckpunkte) ermittelt. Es werden Minderungsmaßnahmen im Emissions-, im Transmissions- und im Immissionsbereich betrachtet, entsprechend der obigen Gliederung Fahrweg-Boden-Gebäude.

#### 3.5.1 Minderungswirkungen des Fahrweges (Brücken-, Tunnel-, Plattengleis)

Zunächst hat man gegenüber der elementarsten Erschütterungsquelle – der Punktlast – durch die Lastverteilung über die Schwellenbreite eine mit der Frequenz zunehmende Erschütterungsminderung. Die Lage des Schwellen-

gleises auf einen Damm oder in einem Einschnitt ergibt – außer bei den tiefen Frequenzen – eine weitere Abminderung um 50 bis 80 Prozent. Dies sind soweit Ergebnisse der ersten Untersuchung [2],

Innerhalb dieses Vorhabens wurden nun insbesondere das Brücken- und das Tunnelgleis näher untersucht. Im Brückengleis sorgt die Trägheitswirkung der Brückenpfeiler für eine Reduktion der Erschütterungen. Je größer die Pfeilermasse ist, desto tiefer liegt die Pfeiler-Untergrund-Eigenfrequenz. Oberhalb dieser Frequenz werden die Erschütterungen vermindert. Die Erschütterungsreduktion wird mit zunehmender Frequenz und bei größeren Pfeilermassen stärker.

Beim Tunnelgleis ergibt sich ebenfalls eine Erschütterungsreduktion im Vergleich zur oberirdischen Streckenführung. Die Gründe hierfür sind aber vielfältiger als beim Brückengleis. Einerseits ergibt schon die Verlagerung der Erschütterungsquelle (etwa einer Punktlast) in die Tiefe eine Reduktion. Hierzu kommt die Lastverteilung über eine größere "Fahrwegbreite". Allerdings ist der Unterschied zwischen der schmalen starren Schwelle und der breiten, aber flexiblen Tunnelsohle nicht so gravierend. Dies wird auch unmittelbar beim Vergleich an der Bodenoberfläche (Plattengleis gegenüber Schwellengleis) deutlich. Schließlich ist auch die Gründung auf einer steiferen Bodenschicht in der Tiefe ebenfalls erschütterungsmindernd. Auch dieser Effekt kann zunächst an elementaren Erschütterungsquellen (z. B. an einer Punktlast) nachgewiesen werden. Es gibt also eine ganze Reihe von Gründen, die für geringere Erschütterungen neben einem Tunnelgleis sprechen.

Insgesamt zeigt sich bei diesen theoretischen Studien, dass die Streckenführung in der Ebene die größten Erschütterungen ergibt. Die neuen Berechnungen ergeben für das Brücken- und das Tunnelgleis noch stärkere Reduktionen, als bereits früher [2] für das Gleis auf dem Damm und im Einschnitt ermittelt wurde.

#### 3.5.2 Minderungsmaßnahmen im Boden (Transmissionsbereich)

Prinzipiell sind die Erschütterungsamplituden neben Bahnlagen von der Steifigkeit des Bodens abhängig. Dies war schon bei der Tunnellage auf einer Felsschicht angesprochen worden. Ein steiferer Boden ergibt kleinere Erschütterungen, es sei denn man hat (z. B. im Fernbereich, bei hohen Frequenzen oder bei sehr weichen Böden) eine starke Wirkung der Materialdämpfung, die bei weicheren Böden ebenfalls die Amplituden stark reduziert.

Die Minderungswirkung steiferer Böden kann man schlecht als Maßnahme direkt ausnutzen. Es wird hier jedoch die Wirkung eines steifen Bodenbereichs unter dem Gleis betrachtet, der etwa durch Bodenaustausch und Bodenverdichtung bei Neubaustrecken angestrebt wird. Tatsächlich ergibt sich dabei eine gewisse Reduktion der Erschütterungen sowohl im Gleisbereich als auch in der weiteren Umgebung. Im entgegengesetzten Fall eines weicheren Bodenbereichs unter dem Gleis, ergeben sich erwartungsgemäß größere Amplituden des Gleises, die sich erstaunlicherweise aber auch in der normal steifen Umgebung fortsetzen.

Eine gewisse Minderung wird auch durch eine Einbauplatte im Boden unter dem Gleis erzielt. Es wird unter der

Schotterschicht quasi eine Tunnelsohle nachgebildet. Die Minderung hängt vermutlich mit der Versteifung des Gleisbereichs zusammen. Weitere Minderungsmaßnahmen sind im Ausbreitungsweg zwischen Gleis und Gebäude möglich. Sehr wirksam ist die Trennung durch einen offenen Schlitz im Boden. Je tiefer der Schlitz, desto stärker ist die Wirkung. Wichtig ist das Verhältnis von Schlitztiefe zur Wellenlänge. Steife Einbauten im Boden, z. B. eine Betonwand, können unter bestimmten Umständen ebenfalls die Wellenausbreitung behindern. Umfangreiche Finite-Element-Rechnungen von Haupt [21] zeigen eine Reduktion, die im Wesentlichen nur von der auf die Wellenlänge bezogenen Störkörperquerschnittsfläche abhängt, vorausgesetzt die Störkörper sind steif genug. Bei der hier untersuchten dünnen Betonwand ist dies erst bei hohen Frequenzen der Fall und man hat einen geringeren Effekt als bei einem kompakten Störkörper.

Steifere Bodenbereiche im Ausbreitungsweg sind ebenso wenig wirksam wie weiche Bereiche. Die Amplituden in dem jeweils gestörten Bodenbereich sind zwar entsprechend der Bodensteifigkeit kleiner oder größer, im Fernfeld ist dieser Unterschied dann aber nicht mehr erheblich. Theoretisch müsste mit immer weicheren Füllmaterialien tendenziell ähnliche Minderungswirkungen wie bei einer Schlitzwand erzielt werden. Dies ist aber kein praktisch sinnvoller Vorschlag. Sinnvoller ist es, die gute Wirkung von offenen Schlitz mit einer geeigneten Stabilisierung des Schlitzes zu verbinden, um eine dauerhafte Minderungsmaßnahme im Ausbreitungsweg zu erzielen.

### 3.5.3 Minderungsmaßnahmen am Gebäude (Immissionsbereich)

Es wird das gleiche sechsgeschossige Gebäude behandelt wie im BAM-Bericht199 [40], als Anregung wird eine Tunnelstrecke betrachtet. Es werden wiederum Minderungswirkungen durch den Vergleich verschiedener Bauwerk-Boden-Konstellationen ermittelt.

Dabei ist das typische Schwingungsverhalten von Gebäuden zu beachten [3], [4]. Fundament und Wand-(eck-)punkte sind gegenüber dem ungestörten Freifeld in der Regel infolge der Bauwerksträgheit oder auch aufgrund von Wellenlaufeffekten [7], [11] in den Amplituden reduziert. Die Deckenmitten sind oft gegenüber dem Freifeld verstärkt [9], Deckenviertelpunkte weisen bei der zweiten Deckeneigenfrequenz Überhöhungen auf, ebenso die Horizontalschwingungen der Wandmitten im höheren Frequenzbereich. Außerdem spielen zwei globale Bauwerk-Boden-Eigenfrequenzen als Kenngrößen eine Rolle [3].

Bei allen Berechnungen stellte sich als einzige eindeutige Minderungsmaßnahme die weiche Abfederung des gesamten Gebäudes heraus. Alle weiteren Maßnahmen weisen uneinheitliche Tendenzen auf. Bei der Vielzahl der Gebäudeparameter ist im konkreten Fall eine genaue Modellierung der jeweiligen Gebäude-Boden-Situation notwendig.

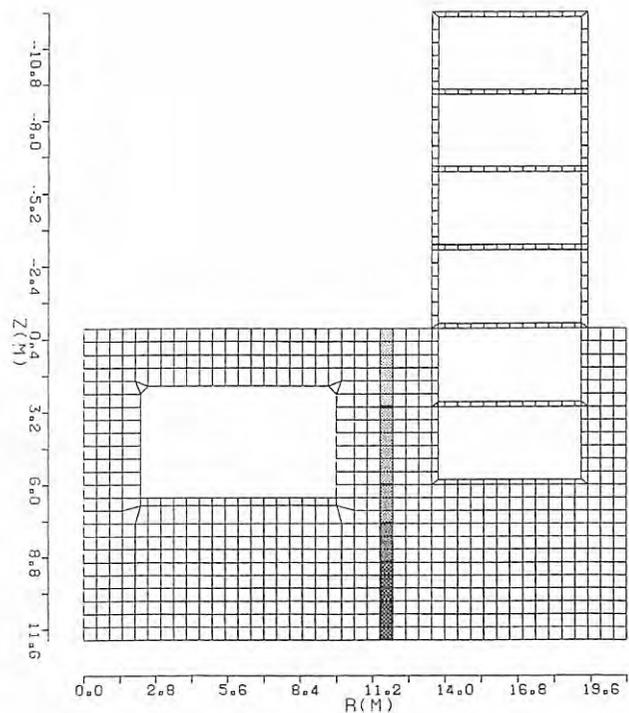


Abb. 19  
Ein Rechenmodell zu den Minderungsmaßnahmen im Ausbreitungsweg

## 4. Zusammenfassende Diskussion der Mess- und Rechenergebnisse

### 4.1 Die Wechselwirkung des Fahrzeugs mit den verschiedenen Fahrwegen (Ebene, Brücke, Tunnel)

Um die Wechselwirkung von Fahrzeug und Fahrweg zu studieren, ist es am zweckmäßigsten, die Radsatzbeschleunigungen zu betrachten. Es sind in den Anlagen C 3 die Terzspektren der Radsätze beim Tunnel- und beim Brückengleis und beim Gleis in der Ebene dargestellt. Es lassen sich insbesondere in der Ebene deutlich die beiden Frequenzbereiche unterscheiden, die im Abschnitt 3.4.5 als Störkomplexe herausgearbeitet wurden.

#### 4.1.1 Der tieffrequentere, langwelligere Störkomplex

Der langwelligere Störkomplex weist einige Besonderheiten auf. Beim Gleis in der Ebene ist eine ganz deutliche Frequenzverschiebung mit der Fahrgeschwindigkeit zu verfolgen. Gleichzeitig nehmen die Amplituden deutlich in etwa mit

$$A \sim v^2$$

zu. Weiterhin zeigt der Vergleich aller vier Räder eines Drehgestells (Anlagen C 3.1 bis 3.4) eine fast vollständige Übereinstimmung. Der Frequenzbereich reicht bei  $v = 160$  km/h von 6 bis 16 Hz, dem entsprechen Wellenlängen von 3 bis 8 m.

Bei den anderen Fahrwegssituationen tritt dieser Frequenzbereich anders und nicht ganz so regelmäßig wie bei der Ebene auf. Für die regelmäßigen tieffrequenten Amplituden kann man schlussfolgern, dass es sich um eine determinierte Anregung durch Gleisfehler handelt. Man kann die Radsatzbeschleunigungen direkt in Störwege umrechnen, da es sich weit unterhalb der Radsatz-Fahrweg-Untergrund-Eigenfrequenz um quasistatische Antworten handelt. Man hat entweder direkt die Gleislagefehler oder die Einsenkungsunterschiede infolge der Steifigkeitsschwankung des Untergrundes. Die Übereinstimmung aller vier Räder besagt, dass es sich nicht um langwellige Schienenfehler handeln kann und dass es eher Untergrundschwankungen als Schottersetzungen sind, (zu diesem Thema s. auch [20]).

#### 4.1.2 Der hochfrequentere, kurzwelligere Störkomplex

Der hochfrequentere Störkomplex liegt in der Umgebung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Eigenfrequenz. Die Radsatzantworten hängen deshalb stark von der Fahrwegssituation ab. Gemäß den Berechnungen in Teil 3.2 erwartet man für die Feste Fahrbahn mit weichen Zwischenschichten eine tiefere und weniger gedämpfte Radsatz-Fahrweg-Eigenfrequenz. Dies wird durch die Messergebnisse im Tunnel bestätigt. Diese Eigenfrequenz scheint in diesem Fall bei 64 Hz zu liegen, da bei allen Fahrgeschwindigkeiten hier ein Maximum auftritt. Bei höheren Frequenzen nehmen die Radsatzantworten ab.

Beim Schottergleis in der Ebene sind die hochfrequenten Amplituden (über 64 Hz) hingegen größer als bei der Feste Fahrbahn. Ein deutliches relatives Maximum wird jeweils bei der Schwellenabstandsfrequenz erreicht, das entsprechend der Theorie mit  $A \sim v^2$  ansteigt. Die Radsatz-Fahrweg-Eigenfrequenz wird hier mit der Schwellenabstandsanregung offensichtlich noch nicht erreicht. Die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten bei höheren Fahrgeschwindigkeiten sind aber am Intercity Experimental untersucht worden [10].

Die Unterschiede der verschiedenen Radmesspunkte deuten auf Radstörungen hin, die auch durch das diskrete Frequenzraster der Schmalbandspektren bestätigt werden. Außerdem gibt es Hinweise auf eine weitere Fahrzeug-Fahrweg-Eigenfrequenz, die vermutlich mit der Achsbiegung verbunden ist. Aufgrund des stark dynamischen Verhaltens in diesem Frequenzbereich, ist ein unmittelbarer Rückschluss von den Radsatzbeschleunigungen auf die Störgrößen nicht möglich. Prinzipiell lassen sich jedoch mit der Kenntnis der Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik aus den Radsatzbeschleunigungen die Störgrößen, das heißt Radsatz-, Schienen- und Gleislagefehler, aber auch die damit verbundenen dynamischen Lasten ermitteln.

### 4.2 Die Bodenerschütterungen beim Tunnelgleis und bei der ebenen Strecke

Die Bodenerschütterungen bei unterschiedlichen Streckenführungen sind sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht worden. Übereinstimmend sind die Amplituden bei der Streckenführung im Tunnel kleiner als in der Ebene. Während bei den Berechnungen die erschütterungsmindernde Wirkung von der Tiefenlage der Quelle im Tunnel herrührt, sind die Wirkungen bei den Messungen nicht so einfach zuzuordnen. Man hat eine ganze Reihe von Unterschieden zwischen den Messsituationen beim Tunnel und in der Ebene:

Tunnel	Ebene
Feste Fahrbahn	Schottergleis
Anregung im Fels	Anregung im Lockerboden
Gerade	Kurve.

Man stellt im Vergleich der Abbildungen C 2.10 und C 2.11 eine deutliche Reduktion des tieferen Frequenzbereichs beim Tunnelgleis fest.

Diese Abminderung könnte schon allein eine Auswirkung des steiferen Untergrundes sein, so wie dies auch die Vergleichsrechnungen in [13] zeigen. Bei hohen Frequenzen ergibt dann die geringere Dämpfung des Felsbodens eher wieder größere Amplituden. Die Abminderung als Folge der Tiefenlage der Quelle wird mit der Frequenz stärker. Sie könnte die gemessenen Effekte allein nicht erklären.

Man könnte deshalb vermuten, dass die gesamte Gleissituation, das heißt die Feste Fahrbahn im Tunnel im Vergleich zum Schottergleis in der Ebene eine andere Erschüt-

terungsanregung ergibt. So könnten die vergleichsweise stärkeren hochfrequenten Schwingungen beim Tunnelgleis von der schwächer gedämpften Radsatz-Fahrweg-Eigenfrequenz herrühren. Die Reduktion im tiefen Frequenzbereich kann eine Folge der größeren Fahrwegsteifigkeit und breiteren Lastverteilung sein. Schließlich können auch die dynamischen Kräfte selbst in diesem Frequenzbereich kleiner sein. Mit anderen Worten: Die Messergebnisse am Tunnel legen auch den Schluss nahe, dass die Gleisfehler kleiner sind. Dies wäre auch mit der besonderen, nämlich in mehrerer Hinsicht steiferen Fahrwegsituation zu begründen. Letztlich führt die Ursachensuche auf die Frage, ob die tieffrequenten Erschütterungen die Auswirkungen der statischen Radlasten sind oder ob sie von dynamischen Kräften herrühren.

Bevor dieser Punkt im nächsten Abschnitt behandelt wird, sollen auch einige Bemerkungen zum Kurvengleis in der Ebene gemacht werden. Die größeren Erschütterungen in der Ebene können auch mit der stärkeren Horizontal-dynamik der Kurvenfahrt zusammenhängen. Von Bedeutung werden weniger die horizontalen Kräfte an sich sein, vielmehr können sie zusammen mit den vertikalen Kräften eine schnellere Setzung des Fahrwegs und damit eine größere Störanregung bewirken. Diese Frage ist auch im Hinblick auf die geplante Neigetechnik-ICEs von Bedeutung.

Der Vergleich des Normalgleises mit dem Gleis auf der Brücke wurde bei den Berechnungen kurz behandelt. Für die Erschütterungen in der Umgebung wurde die Minderungswirkung der massiven Brückenpfeiler demonstriert. Eine weitere Minderung ist aufgrund der Ausmittlung der dynamischen Lasten über einen Brückenabschnitt zu erwarten. Andererseits zeigen die Messungen verstärkte Schwingungen des Brückengleises in bestimmten, zur jeweiligen Fahrgeschwindigkeit passenden Brückeneigenfrequenzen. Bei Messungen an der Magnetbahn-Teststrecke im Emsland [19] sind diese Eigenschwingungen auch im weiter entfernten Boden zu beobachten. Außerdem scheinen dort die Gesamterschütterungen am aufgeständerten Fahrweg deutlich kleiner als beim ebenerdigen Gleis zu sein, so wie dies nach der Theorie auch zu erwarten ist.

### 4.3 Ursachen des tieffrequenten Erschütterungsanteils

Es gibt zwei Ursachen für die Bodenerschütterungen im unteren Frequenzbereich zwischen 10 und 30 Hz: Die erste Ursache ergibt sich aus den Wechselwirkungen zwischen langwelligen Gleisfehlern und Fahrwegschwingungen. Die zweite Ursache liegt in der Zerstreuung der Überfahrtpulse durch einen unregelmäßigen Boden, so wie es eingehend in [24] und [43] beschrieben und am Intercity Experimental untersucht wurde. Im ersten Fall hat man dynamische Kräfte, im zweiten Fall sind die dominierenden statischen Lastanteile das Entscheidende.

Zur Klärung der Frage, welche Bedeutung die beiden Erschütterungsursachen haben, sollen die Simultanmessungen an Fahrzeug, Fahrweg und Boden herangezogen werden. Die Ursachenklärung war eine wesentliche Motivation für diese sehr aufwendige simultane Vorgehensweise. Man kann prüfen, ob bestimmte Erklärungsmuster

durchgängig mit den Messungen an allen Teilsystemen zusammenpassen.

Für die Anregung durch Gleisstörungen hat man als einen Ausgangspunkt die gemessenen Radsatzbeschleunigungen  $b$ , die sich aber auch leicht in Radsatzverschiebungen  $u = b/w^2$  umrechnen lassen. Im hier interessierenden unteren Frequenzbereich entsprechen die Radsatzverschiebungen praktisch den Gleisfehlern  $s = u$ , (bzw. mittelbar den Steifigkeitsschwankungen  $dK \approx u K_w^2 / \rho_0$ ). Das Fahrzeug antwortet auf diese Anregung mit dynamischen Radaufstandskräften  $p \approx K_z s$ . Dabei geht insbesondere die Dynamik des Drehgestells und des elastischen Wagenkastens ein. Die dynamischen Kräfte erzeugen Wellen im Boden, deren Schwinggeschwindigkeitsamplituden ebenfalls gemessen wurden. Eine überschlägige Berechnung der Fahrzeugdynamik und der Wellenausbreitung ergibt bei einer Beschleunigungsamplitude von etwa

$$b = 1 \text{ m/s}^2$$

des Radsatzes ( $m \approx 1500 \text{ kg}$ ) eine dynamische Kraftamplitude von

$$p \approx 1,5 \text{ kN}$$

und für die Schwinggeschwindigkeit des Bodens ( $v_s \approx 250 \text{ m/s}$ )

$$v \approx 0,05 \text{ mm/s für } f = 16 \text{ Hz .}$$

Dies stimmt größenordnungsmäßig gut mit den Messungen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 160 km/h überein, so dass die Gleisfehler schon allein die gemessenen Erschütterungen erklären könnten.

In einem zweiten Schritt muss man sich auch die Frequenzverteilung der gemessenen Radsatz-, Fahrweg- und Bodenschwingungen ansehen. Die Radsatzbeschleunigungen und damit auch die Radkräfte sind relativ gleichmäßig für alle tieferen Frequenzen, das heißt die Terzamplituden sind annähernd konstant. Die Bewegung der einzelnen Radlast führt für einen ortsfesten Beobachter zu einer Verschmierung der einzelnen Frequenzanteile, so dass das Bodenspektrum eher noch gleichmäßiger zu erwarten wäre. Die Abfolge der Achsen zerklüftet ein ursprünglich glattes Spektrum, das entstehende Amplitudengebirge kann man am Gleismesspunkt betrachten. Die gemessenen Spektren zeigen nun aber keine besondere Ähnlichkeit weder mit dem Achsfolgespektrum des Fahrzeugs noch mit dem gleichmäßigen Radsatzspektrum. Lediglich das Maximum bei 12,5 Hz stimmen beim Boden- und beim Achsfolgespektrum überein. Beim Boden ist die Amplitudenspitze viel ausgeprägter als beim Achsfolgespektrum des Fahrwegs und erst recht beim Anregungsspektrum des Radsatzes.

Die Messungen legen nahe, nochmals nach möglichen Eigenfrequenzen im Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund zu suchen. In dem interessierenden Frequenzbereich zwischen 8 und 20 Hz liegen in der Tat einige Eigenfrequenzen des Systems:

- elastische Wagenkasteneigenfrequenzen (siehe Anlage B)
- Hub- und insbesondere Nickeigenfrequenzen des Drehgestellrahmens und schließlich
- Bodeneigenfrequenzen infolge Schichtung.

Die theoretische Analyse zeigte jedoch, dass die Auswirkungen dieser Eigenschwingungen, also etwa die dynamischen Radsatzkräfte oder die Resonanzstärken bei

Bodenschichtungen nicht so stark ausfallen, so dass sie die Ausprägung des Amplitudenmaximums an den Bodenpunkten erklären könnten. Außerdem ist zu beachten, dass die Lage des Amplitudenmaximums mit der Fahrgeschwindigkeit wechselt. Das bedeutet, auch Systemresonanzen geben keine ausreichende Begründung für die gemessenen Bodenamplituden ab.

Man könnte aus den bisherigen Betrachtungen schlussfolgern, dass nur die zweite Anregungsursache, nämlich die Zerstreung der Überfahrtimpulse durch einen unregelmäßigen Boden, die passende Erklärung der Messergebnisse liefern würde. Tatsächlich erwartet man bei diesem Phänomen, dass das Spektrum des Bodens Ähnlichkeiten mit dem Achsfolgespektrum des Gleises hat. Diese Ähnlichkeit ist jedoch, wie schon oben ausgeführt, nicht so überzeugend, zumindest deutlich geringer als bei den ICE-Messungen [43].

Als Konsequenz der bisherigen Untersuchungen muss man also bei der Prognose von Zugserschütterungen davon ausgehen, dass beide Anregungsursachen mit sehr ähnlichen Frequenzspektren (und -spitzen) und annähernd gleichem Frequenzbereich auftreten. Das heißt sowohl die Zerstreu-

ung der überwiegend statischen Radlasten als auch die dynamischen Radlasten infolge von Gleisfehlern sind bei der Prognose zu berücksichtigen.

In dem Forschungsvorhaben "Das Fahrzeug-Fahrweg-Verhalten im Hinblick auf die Prognose von Zugserschütterungen und die Optimierung von Minderungsmaßnahmen" wurden sehr komplexe, vielfältig ineinander verzahnte und simultane Fahrzeug-, Fahrweg-, Brücken- und Zugmessungen durchgeführt. Auf der theoretischen Seite wurden sehr verschiedenartige und sehr weitreichende Modellrechnungen zur Fahrzeug-Fahrweg- und zur Fahrweg-Untergrund-Wechselwirkung, weiterhin zur Erschütterungsemission, -transmission und schließlich zur Boden-Bauwerk-Wechselwirkung, das heißt zur Erschütterungsimmission in benachbarten Gebäuden ausgeführt. Mit diesem umfangreichen Arbeitsprogramm eines Teams von Physikern und verschiedenen Ingenieurwissenschaftlern wurde die Relevanz verschiedener Anregungs- und Beanspruchungsanteile untersucht und eine Reihe von Messmethoden für diese Anteile herausgearbeitet, sowie Minderungsmöglichkeiten für die dynamischen Radlasten und für die Erschütterungen in der Umgebung von Bahnlinien zusammengestellt und bewertet.

## 5. Schlussfolgerungen

### 5.1 Anregungs- und Beanspruchungsanteile

In der folgenden Zusammenfassung wird häufig nach dem tieffrequenten und langwelligen Komplex und dem hochfrequenten und kurzwelligen Komplex unterschieden.

#### 5.1.1 Lastanteile durch das Fahrzeug

Im tieffrequenten Bereich liegen die elastischen Biege-eigenfrequenzen des Wagenkastens und die Eigenfrequenzen des Drehgestells, die nach den Messergebnissen miteinander verknüpft zu sein scheinen. Das charakteristische Schwingungsverhalten des jeweiligen Fahrzeugs macht sich in der Regel weniger durch Resonanzspitzen als durch eine generelle Beeinflussung des Amplitudenniveaus bemerkbar. Im hochfrequenten Bereich sind Biegeschwingungen der Achsen von Bedeutung. Die Achsbiegung macht sich in mindestens einer Radsatz-Fahrweg-Eigenschwingung bemerkbar, zumindest beeinflusst sie die Lage dieser Frequenz. Bei der Diskussion der dynamischen Lastanteile darf natürlich nicht der ganz entscheidende Beanspruchungsanteil aus der Gewichtslast des Zuges vergessen werden.

#### 5.1.2 Lastanteile durch den Fahrweg

Der Fahrweg (einschließlich des Untergrundes) prägt ganz entscheidend die Radsatz-Fahrweg-Eigenfrequenz. Beim Messort Tunnel (feste Fahrbahn, weiche Schienenlager) war diese Eigenfrequenz besonders stark ausgeprägt. Die diskrete Schienenlagerung auf Schwellen führt zur Schwellenabstands-anregung, die beim Schottergleis besonders deutlich bei den verschiedenen und insbesondere bei den hohen Fahrgeschwindigkeiten verfolgt werden konnte. Das Zusammenfallen der Schwellenabstands- mit der Radsatz-

Fahrweg-Frequenz führt bei der festen Fahrbahn im Tunnel zu besonders großen dynamischen Lasten.

Bei den tieferen Frequenzen stellen die Fahrwegfehler eine wesentliche Anregungsursache dar, die durch die simultane Fahrzeugmessung nachgewiesen wurde. (Die kurzwelligen Schienenfehler sind hingegen wegen der Dominanz der Radlaufflächenfehler kaum auszumachen).

#### 5.1.3 Erschütterungsanteile durch den Boden

Es gibt einen Erschütterungsanteil, der nicht durch dynamische Radlasten sondern durch einen unregelmäßigen Bodenaufbau zustande kommt: Das ist der Zerstreuteil der Achsüberfahrtimpulse, der bei den Versuchsfahrten des Intercity Experimental praktisch nachgewiesen wurde. Die Impulsmessungen auf dem Boden zeigten darüber hinaus, dass der Zerstreuteil durchaus in die Größenordnung der direkten Impulsantworten kommen kann.

Ein geschichteter Boden weist Eigenfrequenzen auf, wobei die berechneten Amplitudenüberhöhungen nicht besonders groß sind. Die Messergebnisse beim Schienenverkehr, die eine Massierung der Erschütterungen in einem mittelfrequenten Bereich trotz der weiten Variation der Fahrgeschwindigkeit aufweist, deuten auf solche Bodeneffekte hin. Dies kann allerdings weder bei den ortsfesten Impulsmessungen, noch beim Zerstreuteil infolge eines Ortswechsels bestätigt werden.

Ganz allgemein ist jedoch von großer Wichtigkeit, dass der Boden bei gleicher Kraftanregung - durch einen Zug oder durch einen Impuls - ganz entscheidend die Antwortspektren sowohl in der Amplitude als auch in der Frequenzverteilung prägt.

## 5.2 Messmethoden für den Fahrzeug- und Fahrwegzustand und für die Lasten

Bei den simultanen Schwingungsmessungen am Fahrzeug, am Fahrweg und im Boden haben sich eine Reihe von erfolgversprechenden Mess- und Analysemethoden herauskristallisiert, mit denen bestimmte Fahrzeug- und Fahrwegzustände und -belastungen ermittelt werden können.

### 5.2.1 Die Fahrwegeigenschaften

Die statische Fahrwegnachgiebigkeit kann aus den Fahrwegschwingungen bei den Zugüberfahrten ermittelt werden. Die notwendigen Auswerteschritte sind im Messbericht [17] beschrieben. Für Vergleichszwecke reichen unter Umständen schon die Frequenzspektren der originalen Zeitverläufe, (beim Vergleich etwa zwischen Tunnel- und Brückengleis). Die hochfrequenten Störschwingungen lassen sich herausfiltern und die Aufnehmercharakteristiken lassen sich eliminieren. Schließlich könnte man die Spektren auch durch die Achsabstandsspektren dividieren, um die Antwort auf eine Einzelachse zu bekommen. Die Zeitverläufe dieser Schienenschwingungen geben die Biegelinie infolge der im wesentlichen statischen Belastung wieder.

Die dynamische Fahrwegnachgiebigkeit (bei Frequenzen bis über 100 Hz), die für die Verschleißproblematik von großer Bedeutung ist, lässt sich am besten mit einem Oberbaumesswagen bestimmen, so wie er im Rahmen der Rad-Schiene-Forschung in den 80er Jahren zur Verfügung stand. Die gemessenen Ergebnisse stimmen sehr gut mit den berechneten Fahrwegnachgiebigkeiten überein. Die statische Vorlast des Gleises hat einen Einfluss auf die Nachgiebigkeit.

Die Impulsversuche sind eine bedeutend einfachere Methode, um zu Gleisnachgiebigkeiten zu kommen. Die statische Gleisbelastung ist hierbei zumindest problematisch. Die Impulsversuche dienen hauptsächlich der groben Identifizierung verschieden steifer und verschieden stark gedämpfter Gleissysteme (etwa im Vergleich Schottergleis - feste Fahrbahnen - weiche Schienenlager). Mit den Impulsversuchen werden Hohllagen des Schottergleises erkannt.

### 5.2.2 Fahrwegfehler

Der gesamte Fahrwegfehler, der sich aus Gleislagefehlern (auch Hohllagen), Schottersetzungen und Untergrundschwankungen zusammensetzt, kann sehr verlässlich durch die Schwingungsmessung am Radsatz bestimmt werden. Die Radsatzbewegungen geben bis mindestens 30 Hz direkt die Gleisfehler wieder.

Störungen im Rad-Schiene-Kontaktbereich, das heißt Schienenunebenheiten und Radsatzunrundheiten, sind kurzweiliger und damit hochfrequenter. Die Radsatzantworten sind dann auch von der Fahrwegnachgiebigkeit beeinflusst. Hinzu kommen elastische Schwingungsformen des Radsatzes. Schließlich sind die Fehler der beiden Schienen nicht unbedingt korreliert, die Unrundheiten gelten erst recht nur für das jeweilige Rad.

### 5.2.3 Schienen- und Radsatzfehler

Aus dem eben Gesagten folgt, dass die kurzweiligeren Schienen- und Radsatzfehler nur sehr grob aus den Fahrzeug- (Radsatz-)messungen zu ermitteln sind. Der hochfrequente Anteil ist jedoch sehr gut aus den Schwingungsmessungen am Fahrweg zu bestimmen. Der dominierende Schwingungsanteil aus der Überfahrt der statischen Last ist eindeutig tieffrequenter, so dass der hochfrequente Fahrweganteil eindeutig den dynamischen Lasten insbesondere den Schienen- und Radsatzfehlern zugeordnet werden kann. Bei der Zuordnung ist allerdings die Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt und die Frequenzaufweitung durch den Impulscharakter zu beachten. Man hat eine mittlere Radsatzanregung durch mehrere Achsen. Die Messungen an den vier Rädern deuten darauf hin, dass die Radsatzanteile (Unrundheiten und Biegung) den Schienenanteil deutlich überwiegen.

## 5.3 Minderungsmöglichkeiten für die dynamischen Radlasten und die Erschütterungen

### 5.3.1 Minderungsmöglichkeiten am Fahrzeug

Es muss gleich zu Anfang herausgestellt werden, dass selbstverständlich die Reduktion des Gewichts des Zuges ganz entscheidend die Beanspruchungen und die Schwingungsanregungen vermindert. Das Fahrzeuggewicht geht nicht nur direkt in die Beanspruchung des Gleises (und auch der Radlaufflächen) ein, sie ist vielmehr auch bei vielen Anregungsursachen ein maßgeblicher Parameter. So sind zum Beispiel die dynamischen Kräfte aus den regulären und aus den unregelmäßigen Steifigkeitsschwankungen des Fahrwegs proportional zur Gewichtslast.

Ein weiterer wichtiger Fahrzeugparameter, mit dem man die dynamischen Kräfte minimieren kann, ist die ungefederte Fahrzeugmasse. Sie bestimmt im mittleren Frequenzbereich maßgeblich die dynamischen Radaufstandskräfte bei Anregung durch Fahrwegfehler und bestimmte Radsatzfehler (Flachstellen).

Bei tieffrequenter Anregung des Fahrzeugs ist eine genauere Analyse des gesamten Fahrzeugs mit Radsätzen, Drehgestellrahmen und eventuell sogar elastischem Wagenkasten notwendig, um die dynamischen Lasten zu bestimmen. Das notwendige Instrumentarium, mit dem man letztendlich zu gleisfreundlichen Fahrzeugen kommen kann, wurde in diesem Forschungsvorhaben vorgestellt und am Beispiel des Reisezugwagens, der als Messfahrzeug diente, vorgeführt.

Das Werkzeug, das aus einer Verknüpfung von Finite-Element- oder Mehrkörper-Fahrzeugmodellen mit realistischen Fahrwegmodellen besteht, muss noch bei vielen verschiedenen aktuellen und zukünftigen Fahrzeugkonzepten angewendet werden, um die zusätzlichen fahrzeugseitigen Minderungsreserven auszuloten, sowohl im Hinblick auf die Erschütterungsanregung als auch und insbesondere mit Zielrichtung auf die Gleisbeanspruchung und die Gleischädigung.

Bei den hohen Frequenzen bzw. den kurzweiligen Störungen ist anders als bei den tiefen Frequenzen die Fahrwegnachgiebigkeit maßgeblich beteiligt (s. 5.3.2). Im Bereich der Radsatz-Fahrweg-Eigenfrequenzen sind sowohl Radsatz- als auch Fahrwegeigenschaften von Bedeutung, sie legen zumindest zusammen die Lage dieses Frequenzbereiches fest. Die Dämpfung der Resonanzen wird allerdings hauptsächlich durch den Untergrund hervorgerufen und auch für die Amplituden und Kräfte oberhalb der Resonanzen ist die dynamische Fahrwegsteifigkeit entscheidend.

### 5.3.2 Minderungsmöglichkeiten durch Fahrweg und Trasse

Das günstigste dynamische Verhalten hätte ein Gleis auf weichem Untergrund. Vorhandene Gleis- und Fahrzeugstörungen ergäben nur geringe dynamische Radlasten, das heißt eine geringere Gleisbeanspruchung und Erschütterungsanregung. Eigenschwingungen wären durch die Abstrahlung in den homogenen Boden ausreichend gedämpft. Auf der anderen Seite hätte man allerdings auch größere Fahrwegbewegungen und vor allem auch eine viel größere Fahrwegschädigung: Das Gleis würde sich sehr schnell in den Boden einrütteln. Deshalb steht dieses Fahrwegoptimum (der weiche Untergrund) auch nur im Konjunktiv, er ist nicht praktikabel. Auch bei der Berechnung der Erschütterungsausbreitung erwies sich ein weicher Gleisuntergrund als ungünstiger, während bei einem mit Zielrichtung auf die Gleisbeanspruchung und die Gleis-schädigung versteiften Gleisbereich die Umgebungser-schütterungen deutlich kleiner werden.

Ein steifer Gleisuntergrund vermindert – neben der Erschütterungsausbreitung – die Gleissetzungen und damit auch die tieffrequenten Störkräfte. Die hochfrequenten Störkräfte sind hingegen stärker und führen zu einem stärkeren Verschleiß bei den Rädern und bei der Schiene. Versucht man diesen Nachteil des steifen Gleisuntergrundes mit weichen Schienenlagern auszugleichen, so verliert man die Abstrahlungsdämpfung des Bodens und bekommt stärkere Resonanzen.

Auch mit der Festen Fahrbahn hat man ein deutlich steiferes Gleis mit erheblich kleineren Setzungen. Um die hochfrequenten Störkräfte klein zu halten, verwendet man bei der Festen Fahrbahn elastische Schienenlager. Die damit fehlende Abstrahlungsdämpfung und Resonanzverstärkung wurde bei den Messungen auch beobachtet.

Aus den Ausführungen wird deutlich, dass es den optimalen Fahrweg nicht gibt. Der Fahrweg muss immer wieder an die Anforderungen durch das Fahrprogramm (Achslasten, Fahrgeschwindigkeiten, Zughäufigkeiten), die Zugtypen, die Unterhaltungskosten für Fahrzeug und Fahrweg und die Bewertung von Komfort und Erschütterungsbelastung unter Berücksichtigung der Herstellungskosten angepasst werden. Berechnungsverfahren für flexible Gleiskonstruktionen auf geschichtetem Untergrund sind hierfür ein wichtiges Hilfsmittel.

Während bei der Fahrwegkonstruktion keine eindeutigen und endgültigen Aussagen zur Schwingungsminderung möglich sind, ergaben die Untersuchungen zur Trassenlage Folgendes: Neben der Streckenführung auf dem Damm und im Einschnitt führt auch das Gleis im Tunnel

und auf der Brücke zu geringeren Erschütterungen in der Umgebung. Auch die Messungen scheinen das zu bestätigen, mit der Einschränkung, dass beim Messort Tunnel nicht nur die Trassenlage sondern auch der Fahrweg anders als in der Ebene war. Die Rechenergebnisse zum Tunnel und zum Brückengleis werden zusätzlich durch Messergebnisse der Universität Karlsruhe [32] und durch Messergebnisse an der Magnetbahn-Versuchsanlage bestätigt.

### 5.3.3 Minderungsmöglichkeiten im Boden und im Bauwerk

Von den untersuchten Minderungsmaßnahmen im Boden erwies sich die Versteifung des Gleisuntergrundes – wie schon im vorangehenden Abschnitt erwähnt – und ein Schlitz mit ausreichender Tiefe als wirkungsvoll. Nicht wirkungsvoll ist hingegen eine Betonwand im Boden. Eine Minderung der Bodenerschütterungen ist mit kompakteren Störkörpern bei ausreichender Querschnittsfläche möglich (s. z. B. [21]).

Beim Bauwerk lassen sich die Bahnerschütterungen am erfolgreichsten durch eine vollständige Abfederung des Gebäudes reduzieren, insbesondere dann, wenn damit eine direkte Verbindung zwischen (Tunnel-) Gleis und Bauwerk unterbrochen wird. Alle weiteren untersuchten Minderungsmaßnahmen im Boden und im Bauwerk sind nur bedingt wirksam. Das unterstreicht die Notwendigkeit die Eisenbahnerschütterungen möglichst schon bei ihrer Entstehung im Wechselspiel von Fahrzeug und Fahrweg einzudämmen.

## 5.4 Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkungen und ganzheitliche Modelle für Bahnsysteme

Die dargestellten verschiedenen hoch- und tieffrequenten Lang- und Kurzzeitwechselwirkungen von Fahrzeug und Fahrweg sind bei der Optimierung eines Bahnsystems vollständig und gleichzeitig in Betracht zu ziehen. Die einseitige "Optimierung" einer Teilkomponente, zum Beispiel die Versteifung des Unterbaus, führt in der Regel zu einer stärkeren Beanspruchung der anderen Systemteile, die daraufhin ebenfalls neu "optimiert" werden müssen. Eindeutig sinnvoller ist es, das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund ganzheitlich zu betrachten. Für jede Transportaufgabe lassen sich dann jeweils für alle Teilsysteme akzeptable Lösungen finden, die zusammen ein vernünftiges Bahnsystem ergeben.

Mit dieser ganzheitlichen Betrachtungsweise lassen sich dann auch unterschiedliche Bahnsysteme wie Nahverkehrs- [5], Fernverkehrs- und Hochgeschwindigkeits-eisenbahnen [39], Untergrund- [36], Straßen- [1] und Hochbahnen, Güterzüge sowie Nahverkehrs- [33], [34], Fernverkehrs- und Hochgeschwindigkeitsmagnetbahnen bewerten und vergleichen. Die Anwendung der vorgestellten Methoden auf alle diese Bahnen verspricht weitere wesentliche Erkenntnisse zur Dynamik der Verkehrssysteme.

## 6 Literatur

1. Auersch, L. und Krüger, F.:  
Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Nahverkehrs in Geländeniveau.  
Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben TV 7954, Bericht 9 der Reihe „Lärminderung im Schienennahverkehr“, Berlin/Köln 1983
2. Auersch, L.:  
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden.  
BAM-Forschungsbericht 92, 1983
3. Auersch, L.:  
Berechnung des Schwingungsverhaltens von Gebäuden bei Einwirkung von Erschütterungen.  
Bauingenieur 59, S. 309-317, 1984
4. Auersch, L.:  
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen.  
Ergebnisse von Modellrechnungen.  
BAM Forschungsbericht 108, 1984
5. Auersch, L., Hebener, H. und Rücker, W.:  
Theoretische und messtechnische Untersuchungen zur Emission, zur Ausbreitung durch den Boden und zur Übertragung in Gebäude.  
Bericht zum BMFT Vorhaben TV 8329, Bericht 19 der Reihe „Lärminderung im Schienennahverkehr“, Berlin, 1986
6. Auersch, L., Rohrmann, R., Rücker, W. und Said, S.:  
Fahrzeug – Fahrweg – Untergrund – Umgebung: Theoretische, rechen- und messtechnische Untersuchungen.  
VDI-Berichte 635, S. 59-87, 1987
7. Auersch, L.:  
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen.  
BAM-Forschungsbericht 151, 1988
8. Auersch, L.:  
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrsererschütterungen:  
Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental.  
BAM-Forschungsbericht 155, 1988
9. Auersch, L. und Ebner, B.:  
Erschütterungsimmissionen in Gebäuden -  
Eine Parameterstudie und messtechnische Untersuchungen zur Deckenresonanz.  
Bautechnik 65, S. 271-276, 1988
10. Auersch, L.:  
Zur Parametererregung des Rad-Schiene-Systems:  
Berechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Dynamik und experimentelle Verifikation am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental.  
Ingenieur-Archiv 60, S. 141-156, 1990
11. Auersch, L. und Schmid, G.:  
A simple boundary element formulation and its application to wavefield excited soil-structure interaction.  
Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol. 19, S. 931-947, 1990
12. Auersch, L.:  
Dynamic soil-structure interaction of rigid and flexible foundations.  
Proc. 5th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Karlsruhe 1991, S. 467-478
13. Auersch, L.:  
Wave propagation in layered soil: theoretical solution in wavenumber domain and experimental results of hammer and railway traffic excitation.  
Journal of Sound and Vibration 173, S. 233-264, 1994
14. Auersch, L.:  
Some effects of the layering of the soil on wave propagation and foundation vibration.  
Proc. 7th Conf. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Computational Mechanics Publ., Southampton, S. 283-290, 1995
15. Auersch, L.:  
Dynamic plate – soil interaction – finite and infinite, flexible and rigid plates on homogeneous, layered or Winkler soil  
Soil Dynamics and Earthquake Engineering 15, S. 51-59, 1996
16. Auersch, L.:  
Dynamische Nachgiebigkeiten von Eisenbahngleisen: Schottergleis und Feste Fahrbahn mit elastischen Schienenlagern auf homogenem und geschichtetem Untergrund.  
Bericht zum BMFT-Vorhaben TV 9346, BAM Berlin, 1997
17. Auersch, L.:  
Schwingungsmessung am Fahrzeug, am Fahrweg und in der Umgebung an drei Streckenabschnitten bei Würzburg: Messzugfahrten und Impulsversuche in der Ebene, auf der Brücke und im Tunnel.  
Bericht zum BMFT-Vorhaben TV 9346, BAM Berlin, 1997
18. Auersch, L.:  
Vehicle-track-interaction and soil dynamics.  
in: L. Palkovics (Hrsg.): Dynamics of Vehicles on Road and Tracks, Proceedings of the 15th IAVSD-Symposium, Budapest, 1997
19. Bothe, G. H. R., Wedemann, K. E. und de Fresse, D.:  
Experimentelle Untersuchungen zur Abschätzung von Schwingungsbelastungen für die Umwelt.  
VDI Berichte 1345, S. 109-116, 1997
20. Fröhling, R. D.:  
Low Frequency Dynamics Vehicle/Track Interaction: Modeling and Simulation  
in: L. Palkovics (Hrsg.): Dynamics of Vehicles on Road and Tracks, Proceedings of the 15th IAVSD-Symposium, Budapest, 1997
21. Haupt, W.:  
Verhalten von Oberflächenwellen im inhomogenen Halbraum mit besonderer Berücksichtigung der Wellenabschirmung.  
IBF Bericht Nr. 74, Karlsruhe, 1978
22. Holzlöhner, U.:  
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn.  
BAM-Bericht 48, Berlin, 1977

23. Holzlöhner, U., Dietrich, T., Ache, W. und Rücker, W.:  
Untergrund Rad/Schiene Sackung des Gleisoberbaus:  
untere Schranken. Dynamische Rückwirkung des Gleis-  
oberbaus: Diskretes Modell, analytisch.  
Schlussbericht zum BMFT Vorhaben TV 7817-2, BAM  
Berlin, 1981
24. Huber, G.:  
Erschütterungsausbreitung beim Rad/Schiene-System  
Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und  
Felsmechanik  
Universität Karlsruhe, Heft 115, 1988
25. Koepp, T.:  
Abgleich des FE-Modells eines Wagendrehgestells mit  
experimentellen Ergebnissen der Modalanalyse.  
Bericht für die BAM, Technische Universität Dresden, 1996
26. Klotter, K.:  
Technische Schwingungslehre I.  
Springer, Berlin, 1951
27. Korb, J.:  
Parametererregung beim Rad-Schiene-System.  
VDI-Berichte 381, S. 99-104, 1980
28. Krüger, M.:  
Fahrzeugschwingungen und dynamische Radaufstands-  
kräfte eines Reisezugwagens.  
Bericht zum BMFT-Vorhaben TV 9346, BAM Berlin, 1998
29. Kurze, U. J. und Wettschurek, R.:  
Erschütterungen in der Umgebung von flach liegenden  
Eisenbahntunneln im Vergleich mit freien Strecken.  
Acustica 58, S. 168-176, 1985
30. Matthees, W.:  
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und  
vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher  
Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung.  
BAM Bericht 67, 1980
31. Müller-Boruttau, F. und Ebersbach, D.:  
Elastische Zwischenlagen im Gleis lösen Schwingungs-  
probleme.  
Tagungsband Systemdynamik der Eisenbahn,  
Hennigsdorf 1994, Hestra-Verlag Darmstadt, S. 87-95
32. Prange, B.:  
Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart, Erschütterungs-  
technische Untersuchung.  
IBF Auftrag Nr. 254 für die Deutschen Bundesbahn,  
Karlsruhe, 1982 (zitiert in [29])
33. Richter, T. und Rücker, W.:  
Schwingungen-, Luftschall- und Körperschallmessungen  
an der Magnetbahnanlage Berlin und am Flughafen  
Frankfurt.  
Messbericht für die Magnetbahn GmbH, Geotechnik und  
Dynamik (GuD), Berlin, 1989
34. Richter, T. und Rücker, W.:  
Untersuchungen zur dynamischen Beanspruchung des  
M-Bahn-Fahrweges.  
Bericht für die Magnetbahn GmbH, Geotechnik und  
Dynamik (GuD), Berlin, 1991
35. Rohrmann, R. und Rücker, W.:  
Dynamische Bodenkenwerte für Schotteroberbau aus  
Halbraumtheorie – Eine Studie für schnellfahrende Züge.  
Eisenbahntechnische Rundschau 9 (1987) S. 587-591
36. Rücker, W.:  
Ermittlung der Schwingungsanregung beim Betrieb  
schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln  
BAM-Forschungsbericht 64, 1980
37. Rücker, W.:  
Dynamische Wechselwirkung eines Schienenschwellen-  
systems mit dem Untergrund.  
BAM-Forschungsbericht 78, 1981
38. Rücker, W.:  
Dynamic interaction of a railroad-bed with the subsoil.  
Soil Dynamics & Earthquake Eng. Conf., Southampton, S.  
435-448, 1982
39. Rücker, W., Auersch, L. und Hebener, H.:  
Prognosemodell für die Erschütterungsausbreitung  
schnellfahrender Züge.  
Forschungsbericht zum BMFT-Vorhaben 8214, BAM  
Berlin, 1985
40. Rücker, W. und Said, S.:  
Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und  
dicht benachbarten Gebäuden.  
BAM-Bericht 199, 1994
41. Rücker, W., Auersch, L. und Said, S.:  
Reduzierung von Schienenverkehrserschütterungen.  
DACH-Tagung, Zürich, 1997
42. Said, S., Auersch, L. und Rücker, W.:  
Maßnahmen zur Erschütterungsminderung an Bahnlinien  
und benachbarten Gebäuden.  
Bericht zum BMFT-Vorhaben TV 9346, BAM Berlin, 2000
43. Said, S., Auersch, L. und Rücker, W.:  
Auswertung von Erschütterungsmessungen der BAM  
während der ICE-Streckenversuche und weiterer Messun-  
gen innerhalb des Rad/Schiene-Forschungsprogramms.  
Forschungsbericht für das BZA München, Berlin, 1990
44. Ulrich, H., Weiland, M., Schedlinski, C. und Link, M.:  
Experimentelle Modalanalyse an einem Schnellzugwagen  
der Deutschen Bahn AG.  
Bericht für die BAM, Universität Kassel, 1994
45. Wedemann, K. E.:  
Prognosemodell zur Erschütterungsemission von Magnet-  
bahnsystemen.  
Fortschritte der Akustik, DAGA 96, S. 254-255, 1996
46. Zakel, H. A., Willenbrink, L. et. al.  
Körperschallmessungen an einem Bm 235-Wagen bei der  
Fahrt auf verschiedenen Oberbauten der Neubaustrecke  
Fulda-Würzburg.  
Bericht für die BAM, Deutsche Bahn AG Forschungs- und  
Technologiezentrum, München, 1997



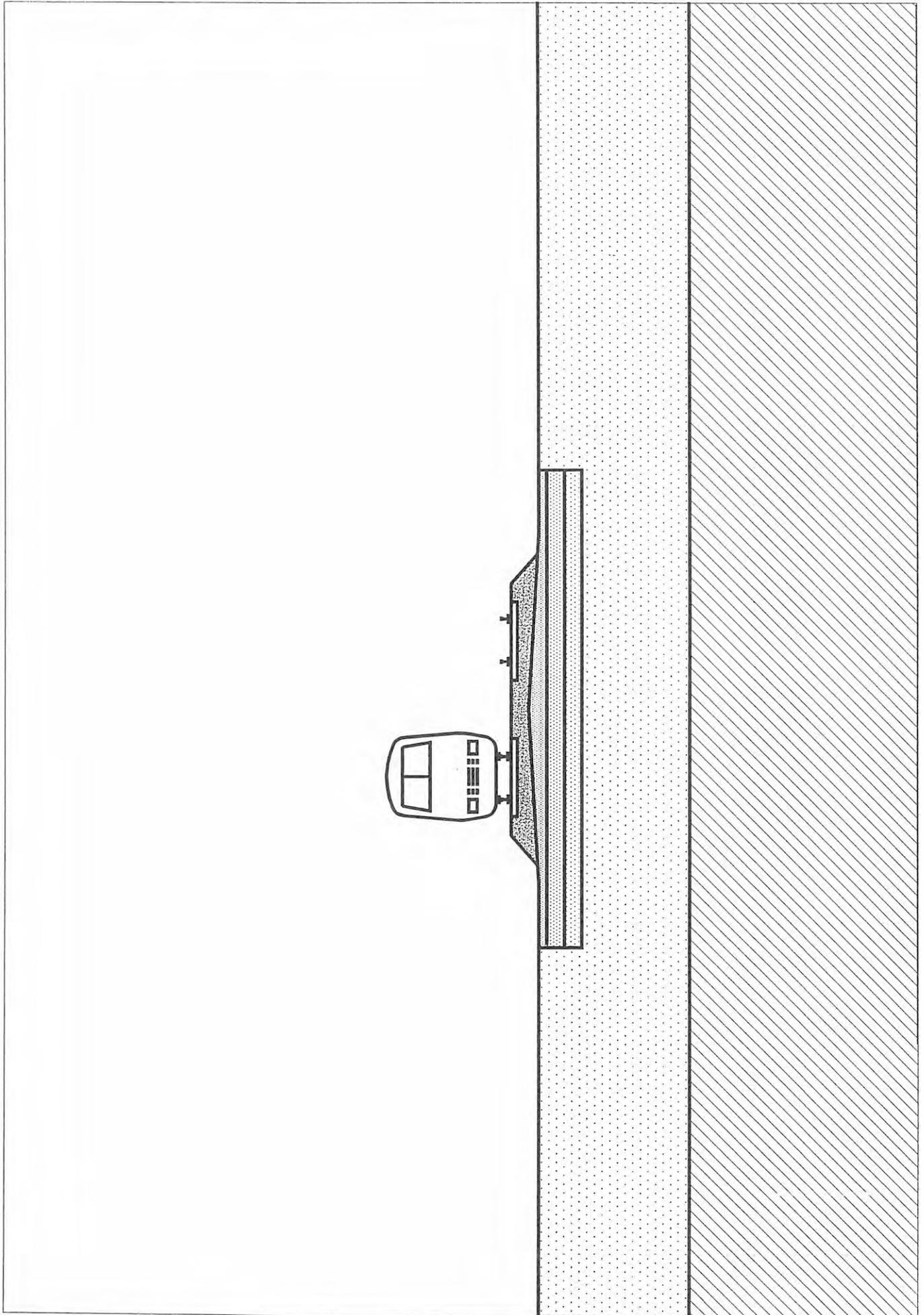
## **7 Anhänge A, B, C und D**

## Anlage A

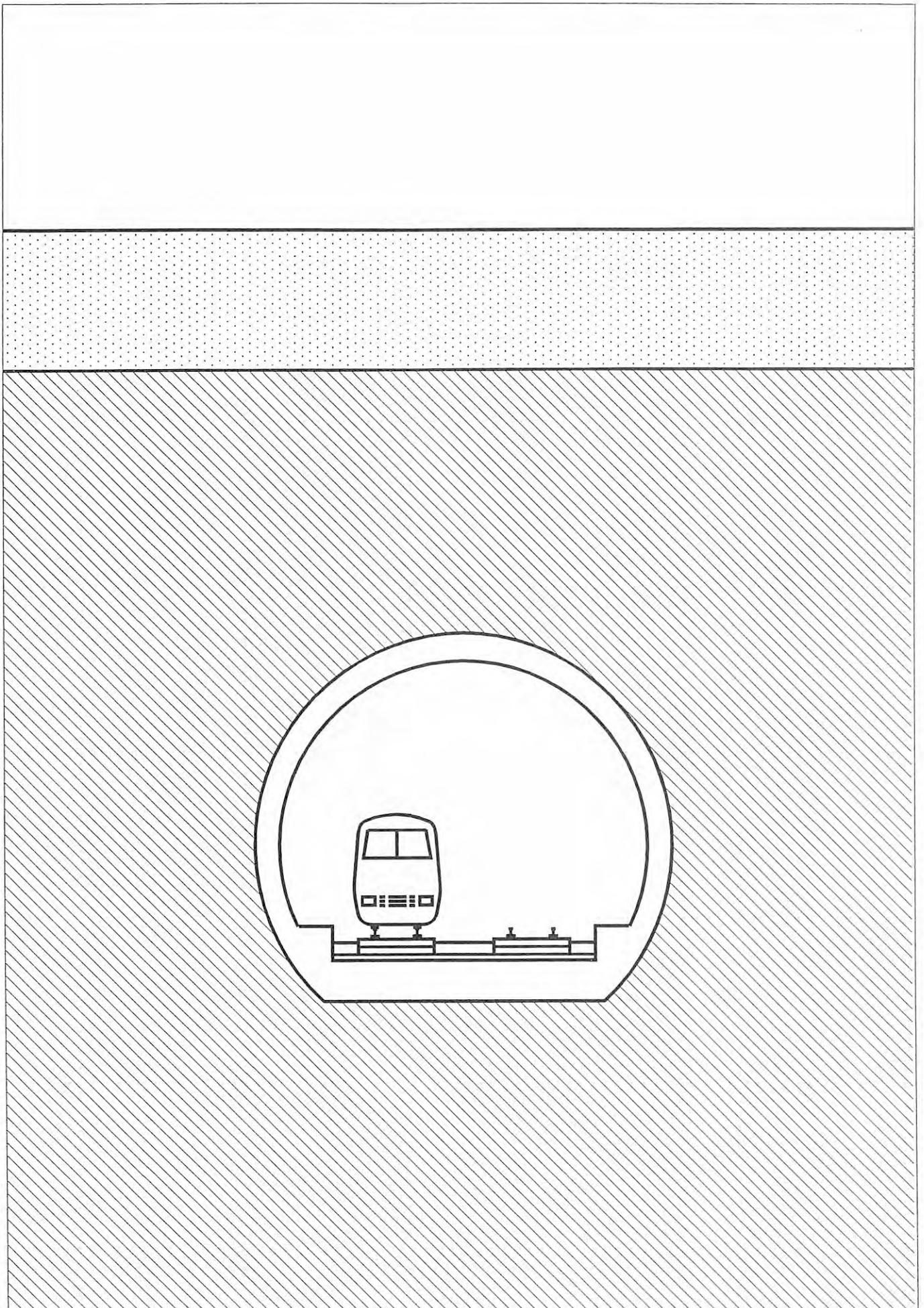
### Dokumentation des Versuchsprogramms

- A 1.1 - Fahrwegssituation im Mühlbergtunnel, Feste Fahrbahn
- A 1.2 - Fahrwegssituation in der Ebene, Schottergleis
- A 1.3 - Meßobjekt Brücke über die Straße Wiesenfeld-Karlburg
  
- A 2.1 - Meßpunktanordnung an den Meßstationen Brücke und Ebene
- A 2.2 - Meßpunktanordnung an der Meßstation Tunnel
  
- A 3.1 - Meßpunktanordnung im Gleis, Meßstation Ebene
- A 3.2 - Meßpunktanordnung im Gleis, Meßstation Brücke
- A 3.3 - Meßpunktanordnung im Gleis, Meßstation Tunnel
  
- A 4 - Dokumentation der Zugmessungen (DB AG)

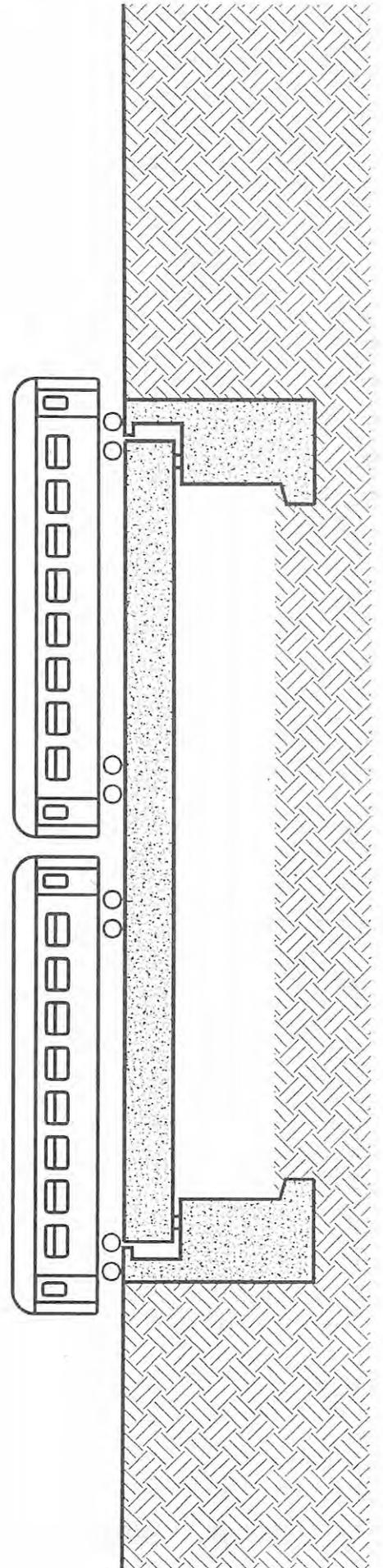
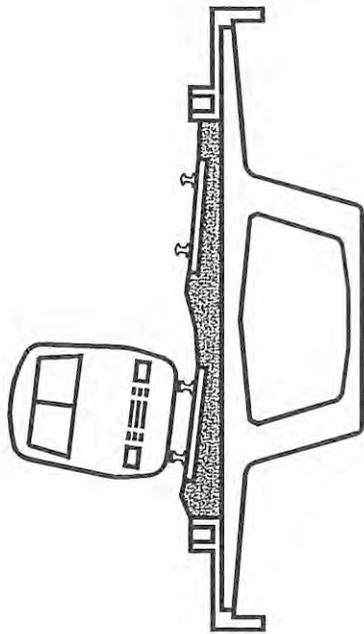
A 1.2 - Fahrwegssituation in der Ebene, Schottergleis



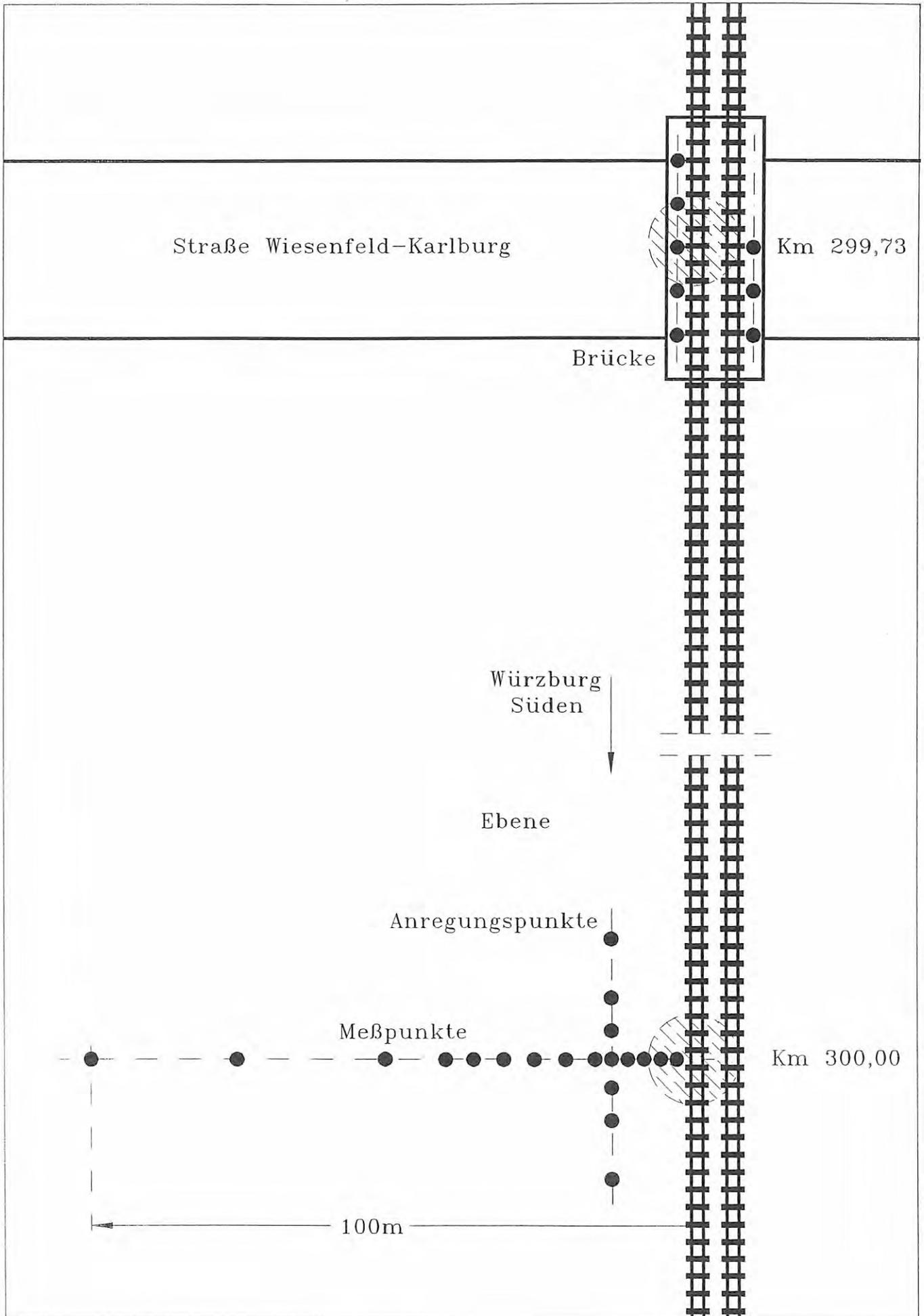
A 1.1 - Fahrwegssituation im Mühlbergtunnel, Feste Fahrbahn



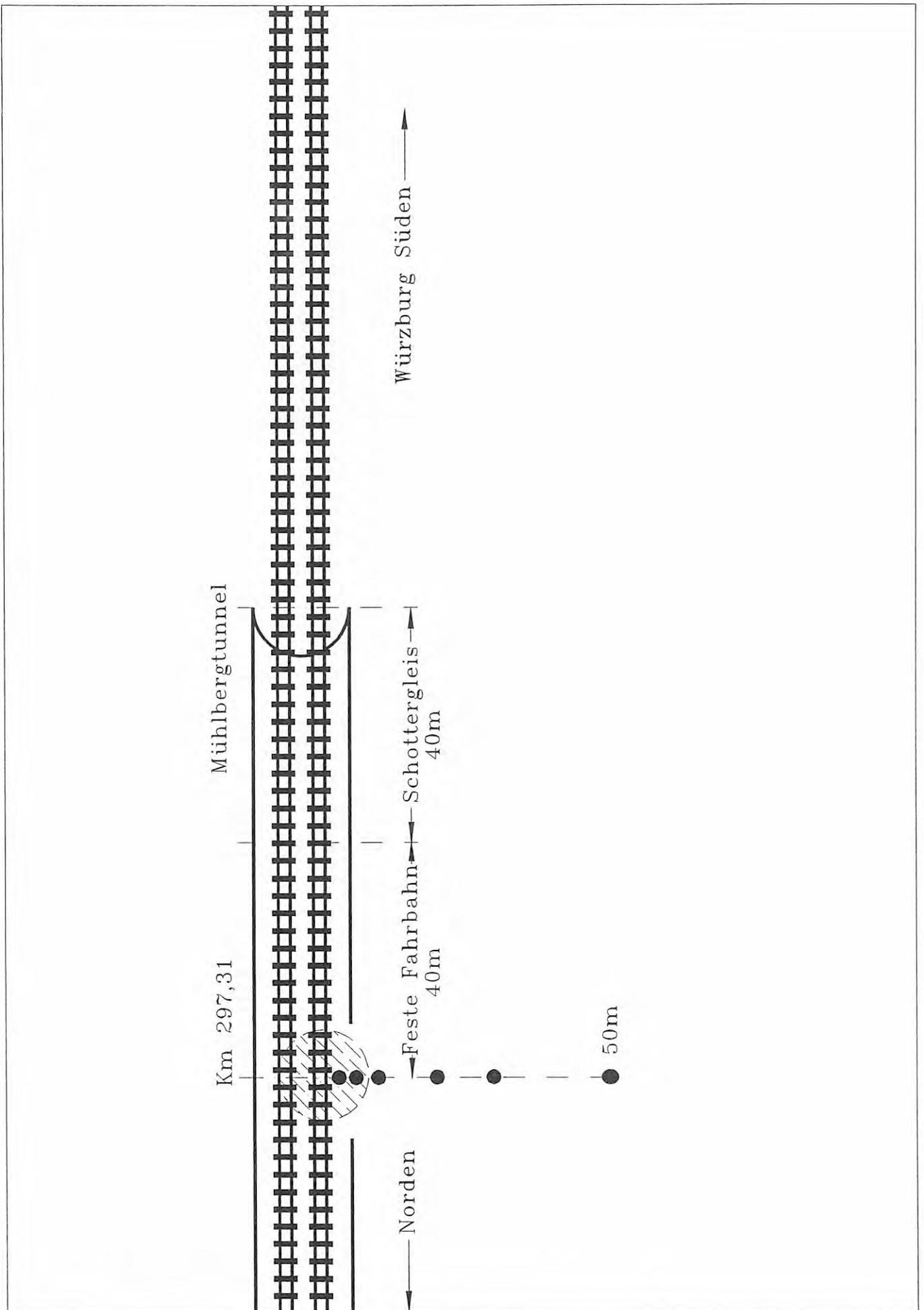
A 1.3 - Meßobjekt Brücke über die Straße Wiesenfeld-Karlburg



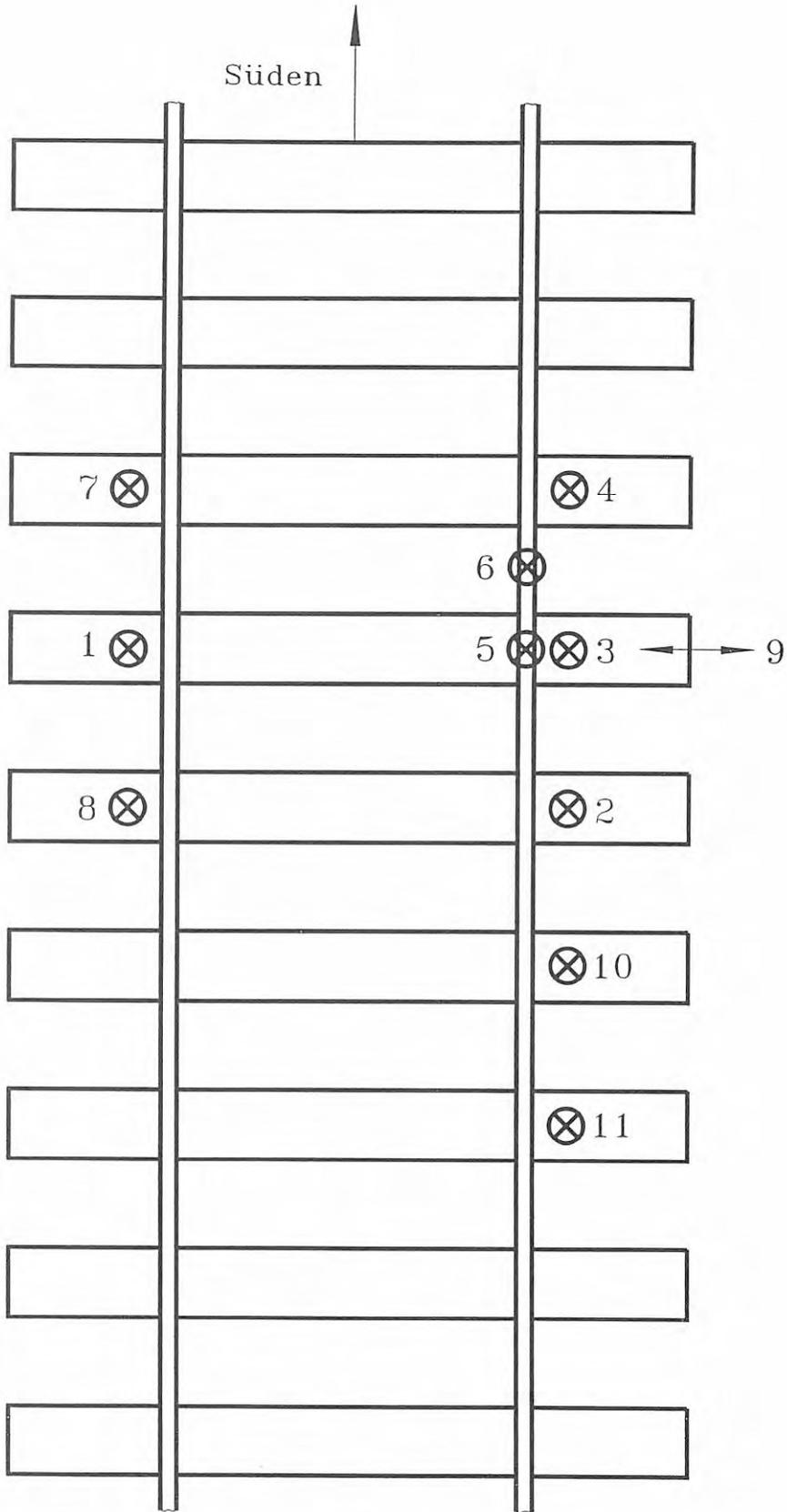
A 2.1 - Meßpunktanordnung an den Meßstationen Brücke und Ebene



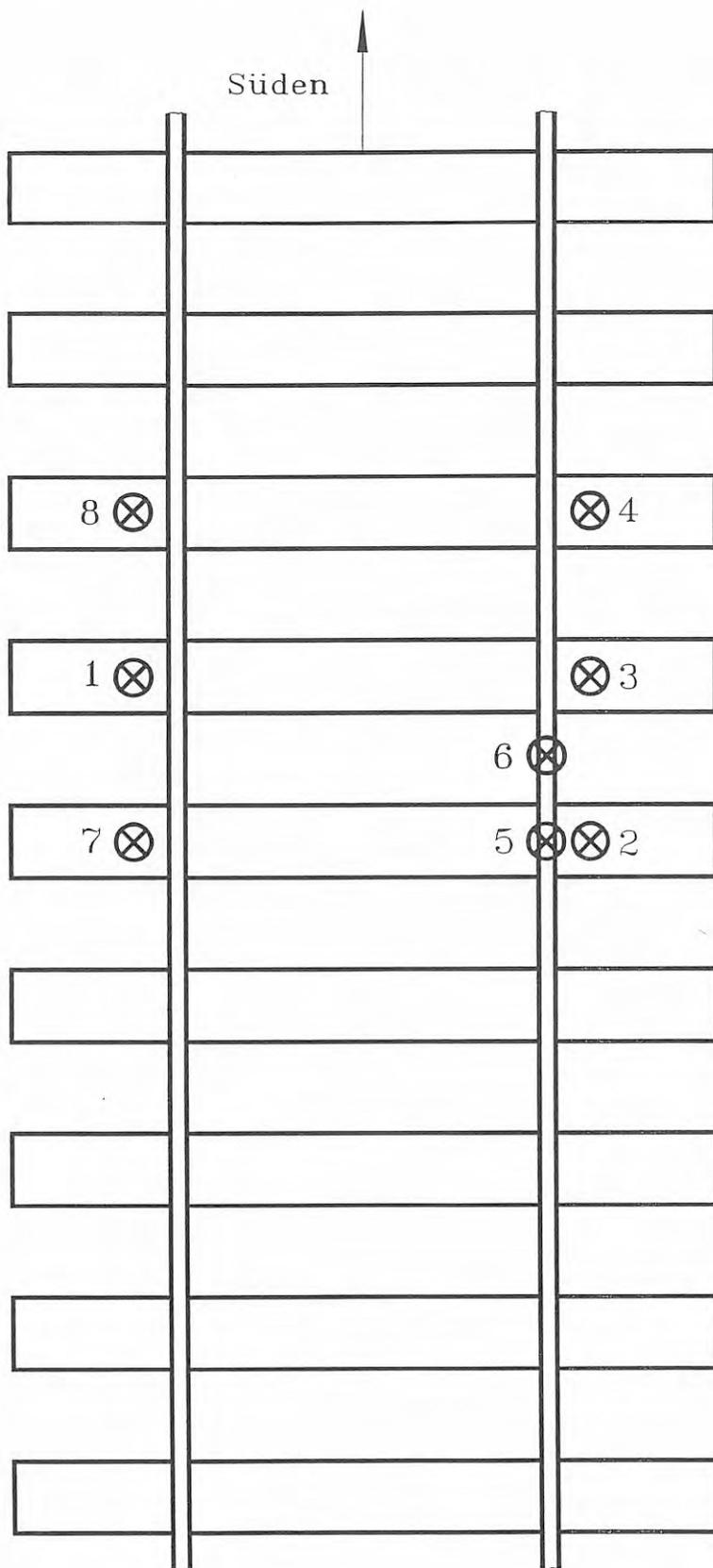
A 2.2 - Meßpunktanordnung an der Meßstation Tunnel



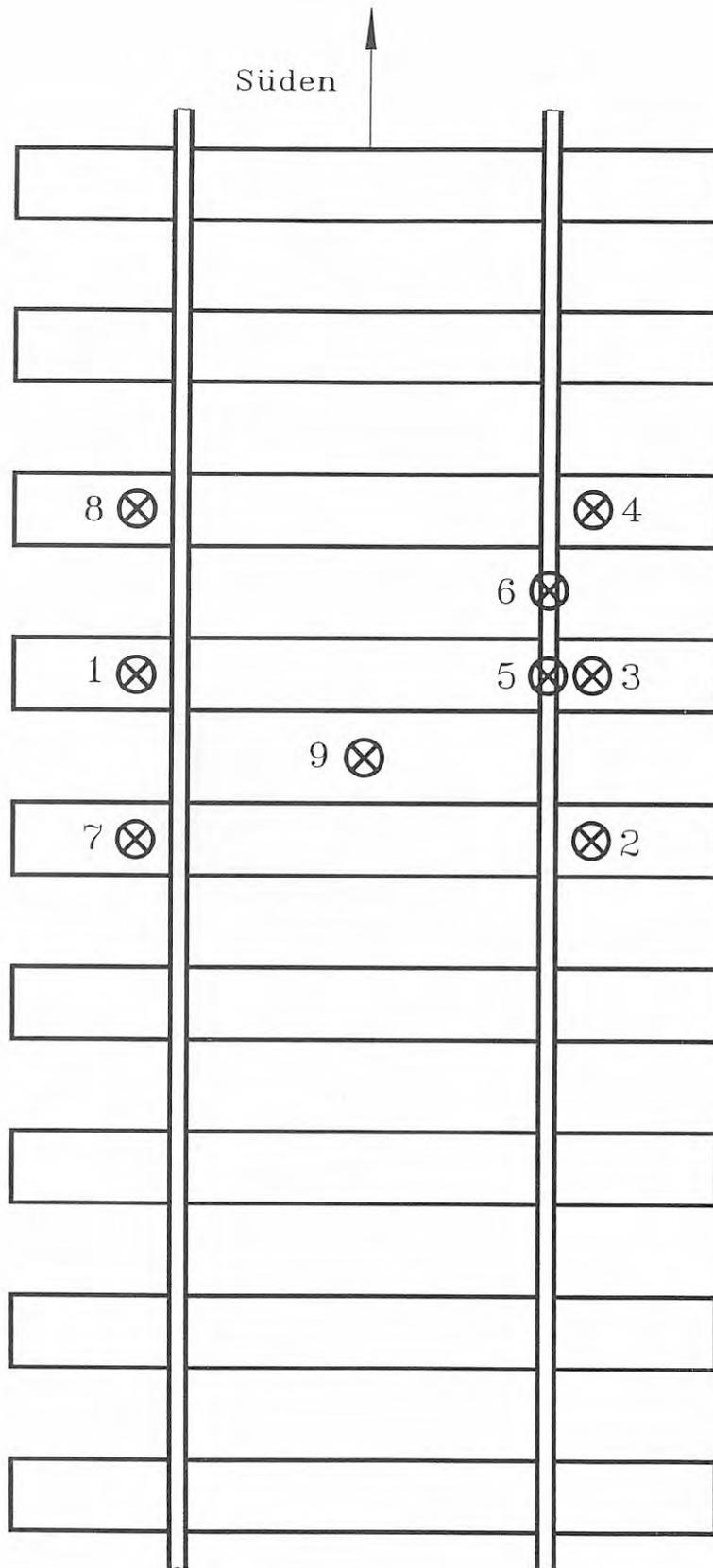
A 3.1 - Meßpunktanordnung im Gleis, Meßstation Ebene



A 3.2 - Meßpunktanordnung im Gleis, Meßstation Brücke



A 3.3 - Meßpunktanordnung im Gleis, Meßstation Tunnel



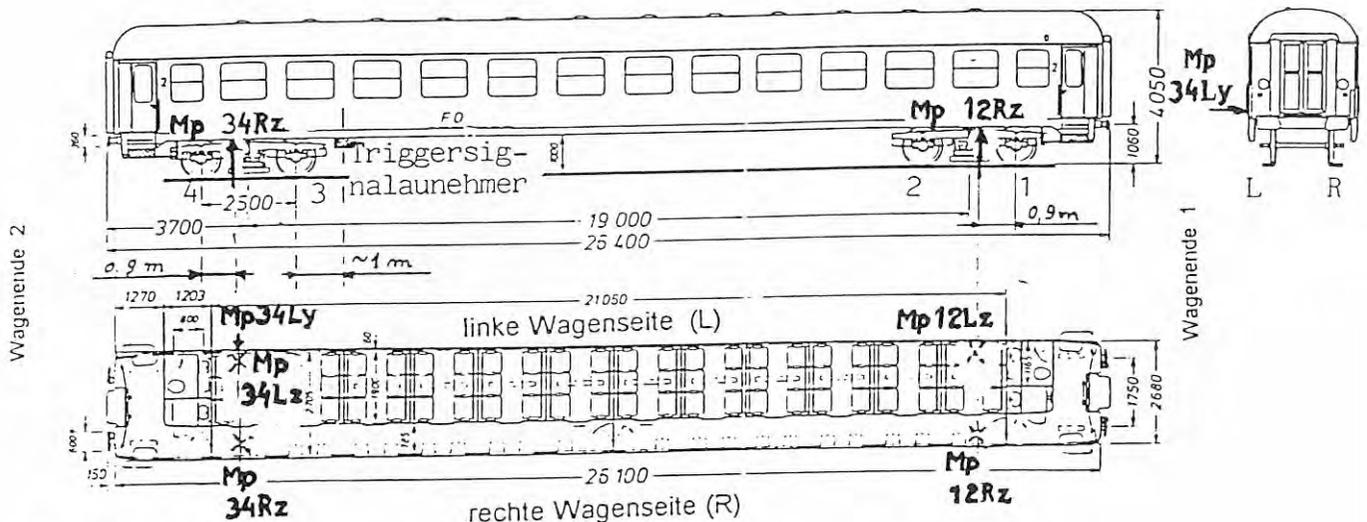
Meßobjekt. Meßpunkte (Mp)

Vierachsiger Schnellzugwagen  
2. Klasse

B m 235.0

Wagennummer

51 80 22 - 90 344



Technische Daten:

Drehgestelle:	
Bauartbezeichnung	Minden - Deutz 36
Schlüsselzahl	367
	Schlingerdampfer Anbau
Radsätze:	
Bauartnummer	93
Meßkreisdurchmesser	950 bis 900 mm
Radsatzlager- Mittelentf.	2000 mm
Zulässige Radsatzlast	20 t
Bremsen:	
Bauart	KE-GPR-Mg (D)
Länge über Puffer	26,4 m
Durchschnittliches Eigen- gewicht	39 t
Höchstgeschwindigkeit	200 km/h

Meßpunkte (Mp) am Wagenkasten

- Mp 12Lz - in vertikal Richtung (z), linke Wagenseite am Wagenende 1 (zwischen den Radsätzen 1 und 2)
- Mp 12Rz - in vertikal Richtung (z), rechte Wagenseite am Wagenende 1 (zwischen den Radsätzen 1 und 2)
- Mp 34Lz - in vertikal Richtung (z), linke Wagenseite am Wagenende 2 (zwischen den Radsätzen 3 und 4)
- Mp 34Rz - in vertikal Richtung (z), rechte Wagenseite am Wagenende 2 (zwischen den Radsätzen 3 und 4)
- Mp 34Ly - in horizontal Richtung (y), linke Wagenseite am Wagenende 2 (zwischen den Radsätzen 3 und 4)

Meßpunkte am Drehgestell (Wagenende 2) - s. Anlage 2

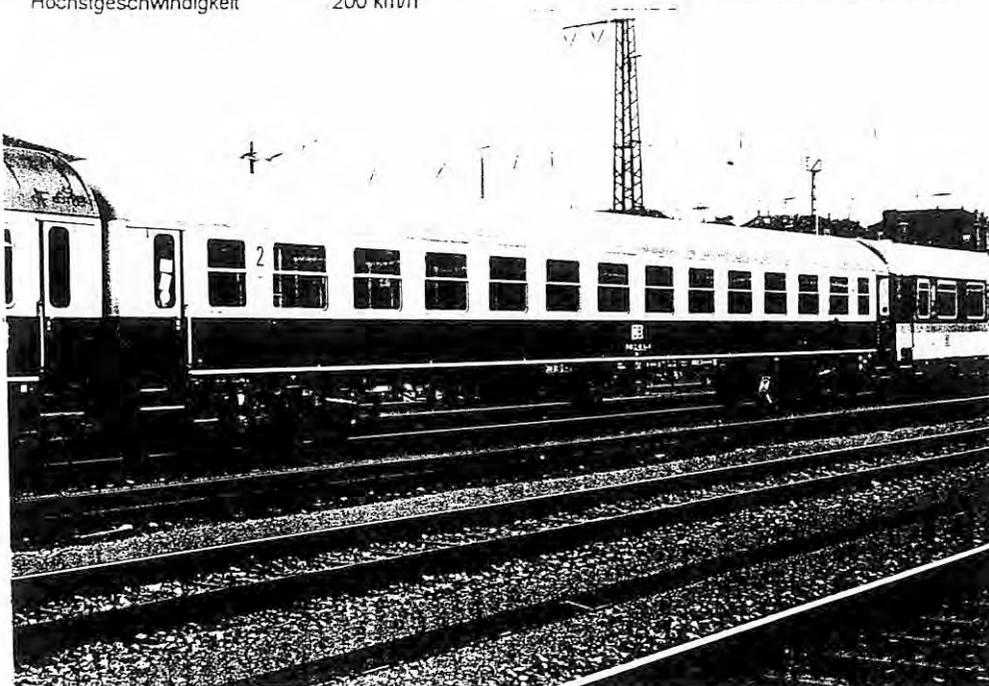


Bild 1 (5694015 / 26)  
Bm - Wagen (Seiten-  
ansicht)

Deutsche Bahn AG Forschung und Versuche München ZTV 325	KS- Messungen an einem Bm 235 Wagen auf verschiedenen Oberbauten der Neubaustrecke Fulda - Würzburg	Bericht 50047 vom 1997 Anlage 2 von 124
---	---	---

## Meßpunkte (Mp) am Drehgestell (Wagenende 2)

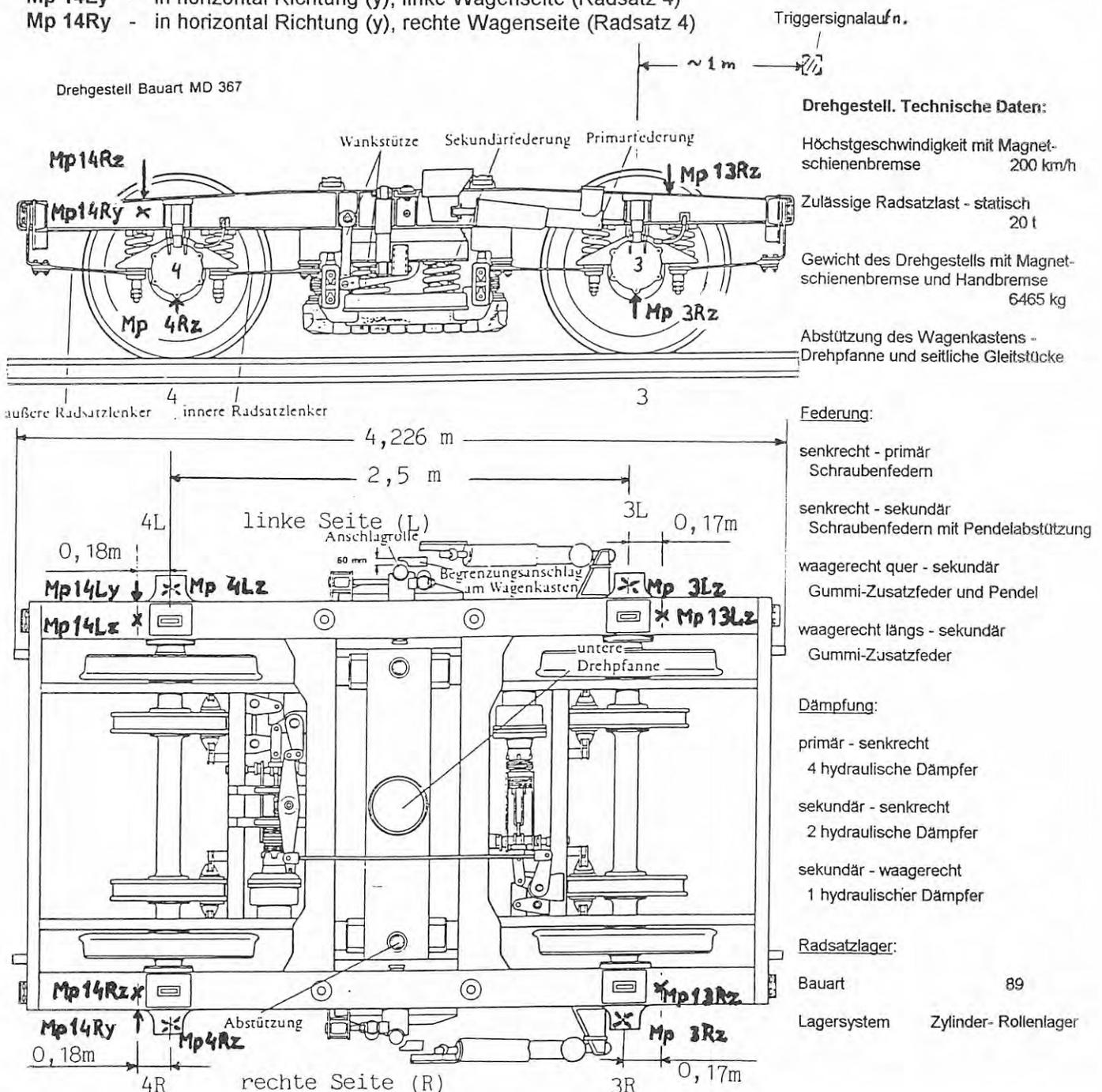
A

### Am Achslager:

- Mp 3Lz - in vertikal Richtung (z), linke Wagenseite (Radsatz 3)
- Mp 3Rz - in vertikal Richtung (z), rechte Wagenseite (Radsatz 3)
- Mp 4Lz - in vertikal Richtung (z), linke Wagenseite (Radsatz 4)
- Mp 4Rz - in vertikal Richtung (z), rechte Wagenseite (Radsatz 4)

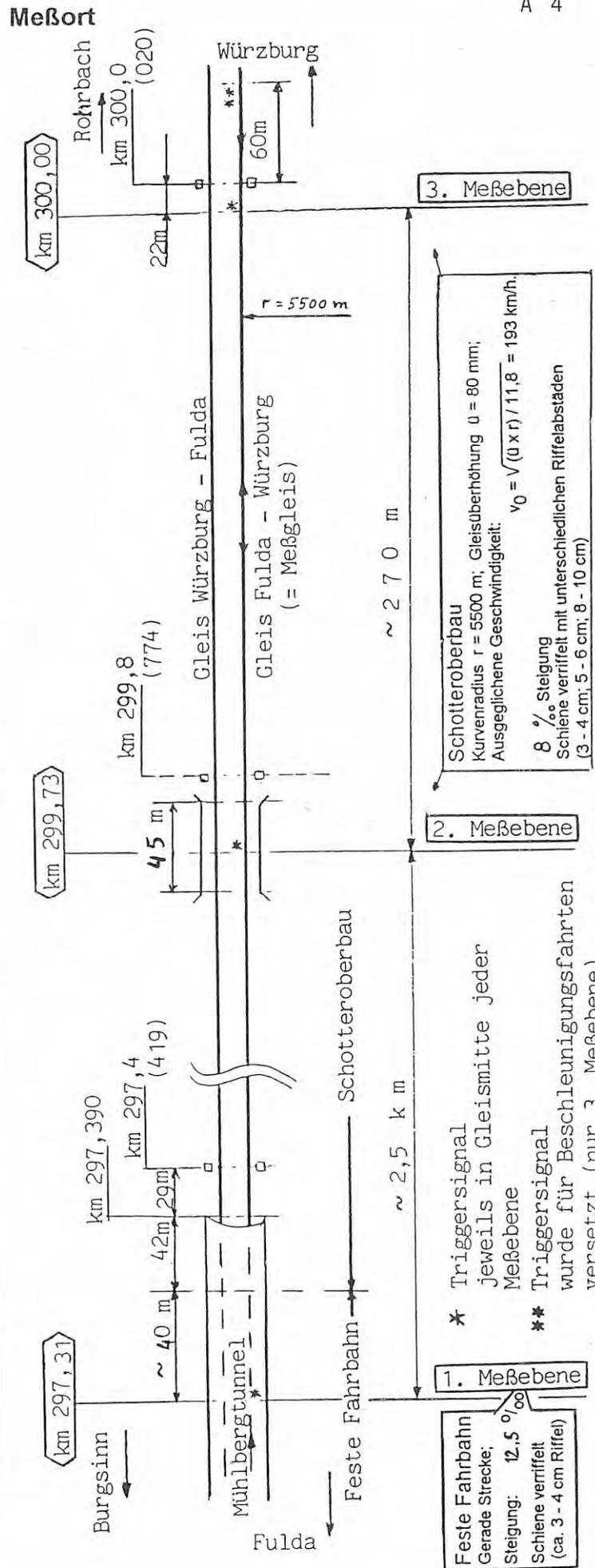
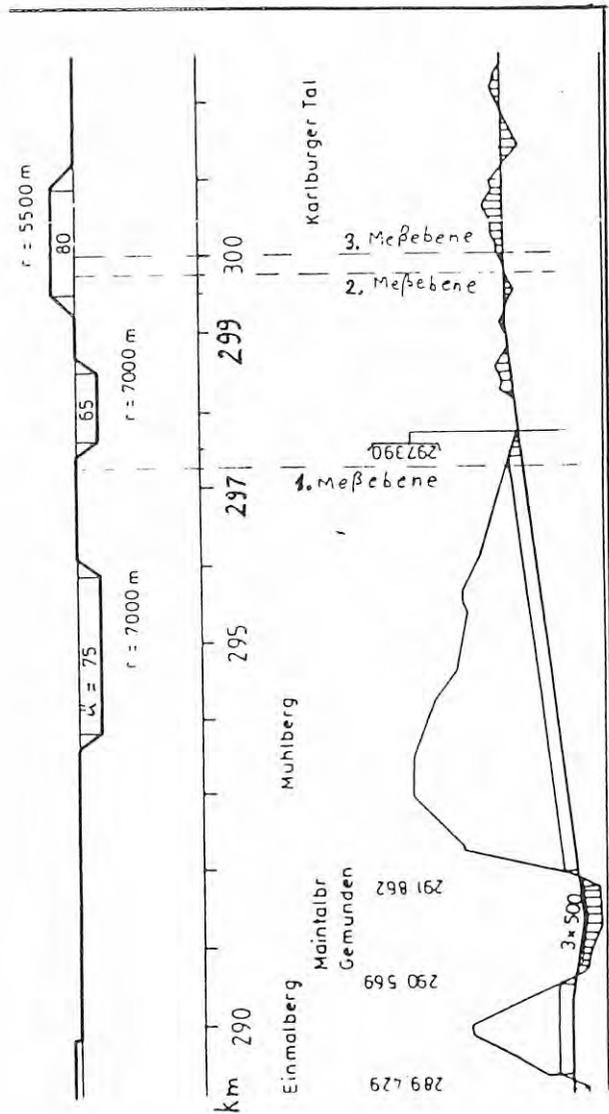
### Am Drehgestellrahmen (nach Primärfederung):

- Mp 13Lz - in vertikal Richtung (z), linke Wagenseite (Radsatz 3)
- Mp 13Rz - in vertikal Richtung (z), rechte Wagenseite (Radsatz 3)
- Mp 14Lz - in vertikal Richtung (z), linke Wagenseite (Radsatz 4)
- Mp 14Rz - in vertikal Richtung (z), rechte Wagenseite (Radsatz 4)
- Mp 14Ly - in horizontal Richtung (y), linke Wagenseite (Radsatz 4)
- Mp 14Ry - in horizontal Richtung (y), rechte Wagenseite (Radsatz 4)



Meßgleis : Fulda - Würzburg  
 (in beiden Richtungen)

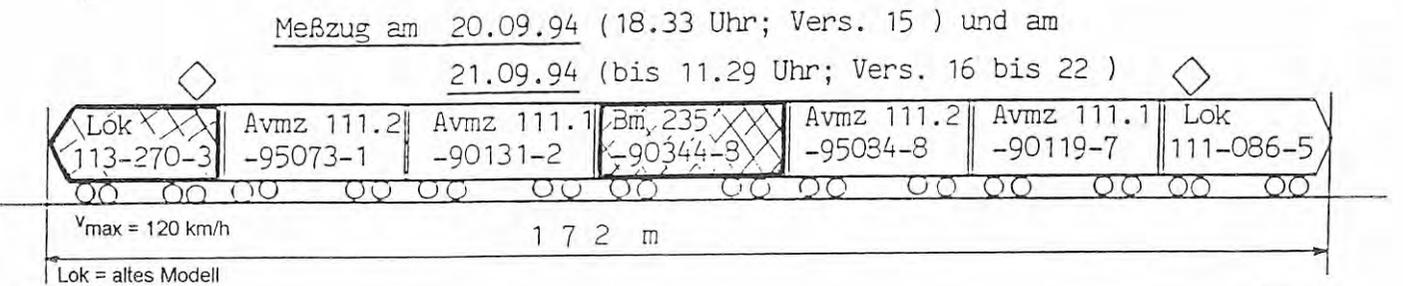
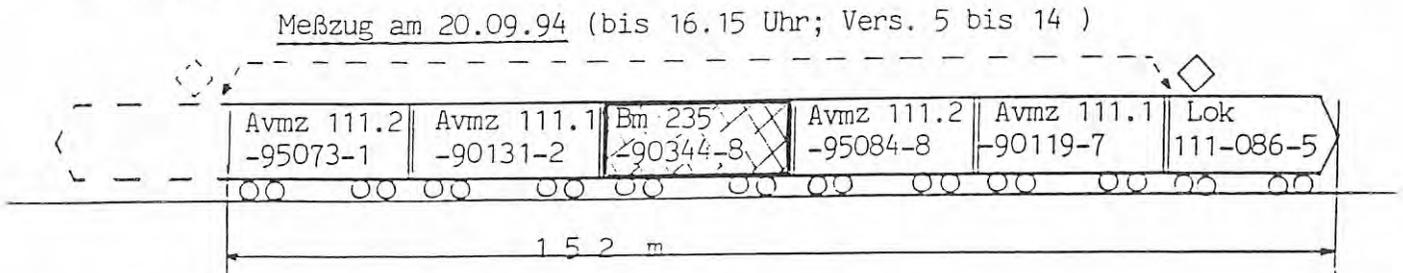
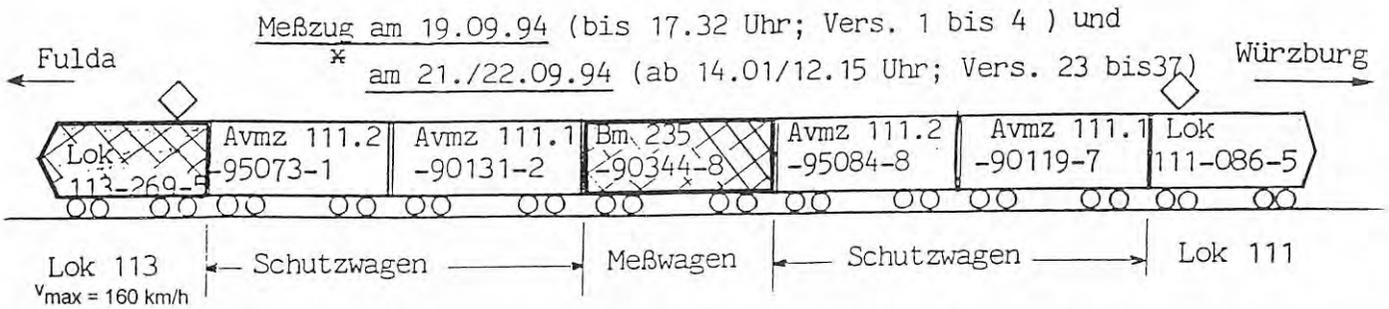
1. Meßebeene km 297,31 (Feste Fahrbahn; gerade Strecke)
2. Meßebeene km 299,73 (Schotteroberbau; Brücke; Kurve)
3. Meßebeene km 300,00 (Schotteroberbau; Kurve)



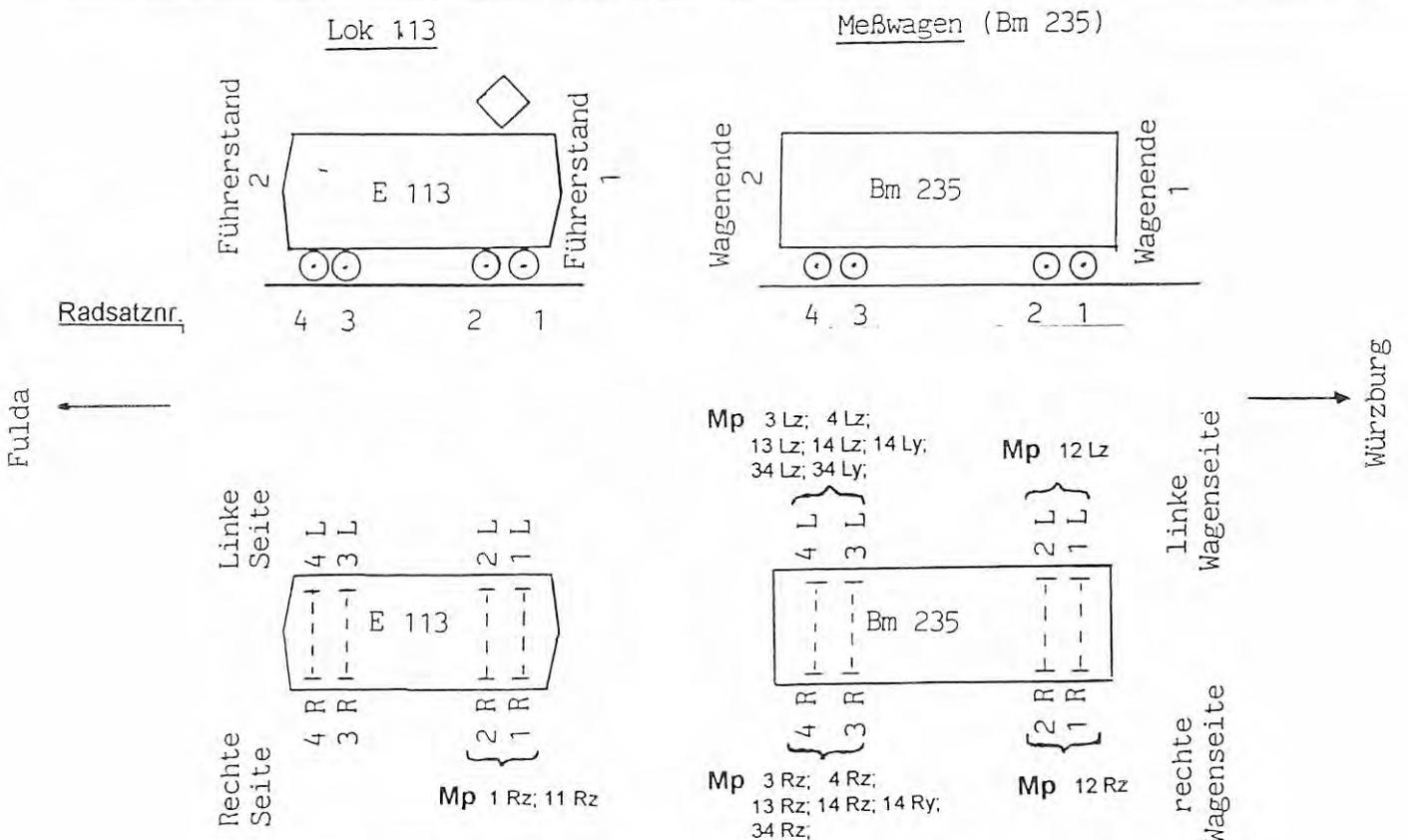
Schienen UIC 60 (Thyssen 86) auf Betonschwellen B70 mit Spannbügeln befestigt

### Meßzugbildung

A 4



\* Lok 113 mit neu abgedrehten Radsätzen (nach den eingefahrenen Flachstellen vom 19.09.94)



Deutsche Bahn AG Forschung und Versuche München ZTV 325	KS- Messungen an einem Bm 235 Wagen auf verschiedenen Oberbauten der Neubaustrecke Fulda - Würzburg	Bericht 50047 vom .1997 Anlage 10 von 124
---	---	---

Versuchsablauf

A 4

Vers. Nr.	v km/h	Richt.	Fahrten in Richtung Würzburg (Wü)												
			Vers. Nr.			Trigger-signal in Meßeb.			Lok E 113	Besonderheiten					
			Meßeb.	Meßeb.		Meßeb.									
			1	2	3	1	2	3							
1	160	Wü	1. ---> 2. ---> 3. Meßebene; Steigung; Traktion Lok E111 (Ausnahme geschob. MZ, Vers. 32 und 34)												
2	100	Fu													
3	16	Wü													
4	100	Fu													
5	80	Wü													
6	63	Fu	16	3-	1	2	3	x	x	x	*	FI	Ü. in 1. ME an Mp 3Rz; 4Rz, 14Rz, 12Rz, 34Rz wegen auflaufender Wagen		
7	80	Wü	16	16-	1	2	3	x	x	x	**		MZ geschoben (Lok E113)		
8	63	Fu	16	32-	1	2	3	x	x	x	*		MZ geschoben ; in 3. ME am Ende Kreuzung mit ICE		
9	160	Wü	16	34-	1	2	3	x	x	x	*				
10	140	Fu	25	18-	1	2	3	x	x	x	**				
11	40	Wü	25	28-	1	2	3	x	x	x	*		Ü. vor 1. ME am Mp 3Rz (Schienenstoß)		
12	125	Fu	40	11-	1	2	3	x				ohne E113			
13	125	Wü	40	20-	1	2	3	x	x	x	**				
14	25	Fu	40	26-	1	2	3	x	x	x	*		in 3. ME am Ende Kreuzung mit ICE		
15	125	Wü	80	5-	1	2	3	x				ohne E113			
16	16	Wü	80	7-	1	2	3	x	x			ohne E113			
17	63	Fu	125	13-	1	2	3	x	x	x		ohne E113			
18	25	Wü	125	15-	1			x			**		gebremst in 2. und 3. ME		
19	80	Fu	125	22-	1	2	3	x	x	x	**				
20	40	Wü	125	36-	1	2	3	x	x	x	*				
21	100	Fu	160	1-	1			x			*		in 1. ME zu späte Aufnahme; gebremst in 2. und 3. ME		
22	125	Wü	160	9-	1	2	3	x				ohne E113			
23	140	Fu	160	24-	1	2	3	x	x	x	*				
24	160	Wü	160	30-	1	2	3	x	x	x	*		Störung am 2-Kanal DAT- Recorder (Mp 34Ly)		
			Fahrten in Richtung Fulda (Fu)												
			3. ---> 2. ---> 1. Meßebene; Gefälle; Traktion Lok E 113 (Ausnahme Vers. ohne Lok E 113 )												
v km/h	Vers. Nr.	Richt.	Meßeb.			Trigger-signal in Meßeb.			Lok E 113	Besonderheiten					
			3	2	1	3	2	1							
25	14-	3	2	1	x	x			ohne E113	in 3. ME am Ende Kreuzung mit ICE					
30	63	3	2	1					ohne E113	in 3. ME keine Bandaufnahme					
31	8-	3	2	1	x	x			ohne E113						
32	17-	3	2	1	x	x	x	**		in 1. ME Kreuzung mit ICE					
33	29-	3	2	1	x	x	x	*							
34	19-	3	2	1	x	x	x	**							
35	27-	3	2	1	x	x	x	*							
36	2-	3	2	1	x	x	x	*	FI						
37	4-	3	2	1	x	x	x	*							
100	21-	3	2	1	x	x	x	**							
125	31-	3	2	1	x	x	x	*							
140	12-	3	2	1	x	x	x		ohne E113						
40 - 110	10-	3	2	1	x	x	x		ohne E113						
40 - 100	23-	3	2	1	x	x	x	*							
	25-	3	2	1	x	x	x	*							
	35-	3		1	x	x	x	*		Beschleunigungsfahrt in 3. + 2. ME und 1. ME					
	37-	3		1	x	x	x	*		Beschleunigungsfahrt in 3. + 2. ME und 1. ME					

ME = Meßebene  
Ü = Übersteuerung  
FI = Flachstelle  
MZ = Meßzug  
B = Beschleunigung

Beschleunigungsfahrten in Richtung Fulda von v = 40 km/h aufwärts (in 3.+2. ME; 1. ME)

Rechte Wagenseite = im Innenbogen (2. und 3. Meßebene)

\* Lok E113 - 269 - 5 ( v(max) = 160 km/h)

\* Lok E113 - 269 - 5 mit neu abgedrehten Radsätzen (nach eingefahrenen Flachstellen wegen eines Defektes im Bremssystem)

\*\* Ersatz- Lok E113 - 270 - 3 (altes Modell mit v(max) = 120 km/h)

## Anlage B

### Meßergebnisse für die Teilsysteme

B 1.1 - Tabelle der Eigenfrequenzen des Fahrzeugs

B 1.2 - Eigenformen des Fahrzeugs (Universität Kassel)

B 2.1 - Eigenformen der Brücke

B 2.2 - Eigenfrequenzen der Brücke im gemittelten Spektrum verschiedener  
Ausschwingungsvorgänge

B 1.1 - Tabelle der Eigenfrequenzen des Fahrzeugs

Eigenform-Nr.	Referenz	Eigenfreq. [Hz]	modale Dämpf. [%]	Bewertung 1)	Charakterisierung der Eigenform
1	1 Z	1.25	4.0	++	Wagenkasten und Drehgestelle: Drehung um X (Wanken) Bem.: die Eigenfrequenz liegt nach der Dämpferdemontage bei ca. 0.9 Hz
2	1 X	2.20	5.8		Wagenkasten und Drehgestelle: Translation in X
3	1 Y	3.14	2.3	+	Wagenkasten: Drehung um Z Drehgestelle: in Ruhe
4	1 Y	3.79	2.4	+	Wagenkasten: Drehung um X, Translation in Y Drehgestelle: in Ruhe
5	3 Z	4.10	4.1		Wagenkasten: leichte Drehung um X, leichte Drehung um Y Drehgestelle: quasi in Ruhe Bem.: die Eigenfrequenz liegt nach der Dämpferdemontage bei ca. 2.0 Hz
6	1 Z	8.75	2.1	+	Wagenkasten: 1. Biegung um Y Drehgestelle: Drehung um Y, gegenphasig
7	1 Z	9.50	3.1	+	Wagenkasten: 1. Biegung um Y Drehgestelle: Drehung um Y, gegenphasig, rechtes Drehgestell hat aber kleinere Amplituden als linkes Drehgestell
8	1 Y	11.00	1.4	++	Wagenkasten: 1. Biegung um Z Drehgestelle: leichte Drehung um Y, gegenphasig
9	1 Y	11.50	1.2	++	Wagenkasten: 1. Biegung um Z, leichte 1. Torsion um X Drehgestelle: dominante Drehung um Y, gleichphasig

Eigenform-Nr.	Referenz	Eigenfreq. [Hz]	modale Dämpf. [%]	Bewertung <sup>1)</sup>	Charakterisierung der Eigenform
10	1 Y	13.50	0.5	++	Wagenkasten: 1. Torsion um X, leichte 1. Biegung um Z, linkes Drehgestell: leichte Biegung um Y rechtes Drehgestell: quasi in Ruhe
11	1 Z	14.20	1.2	++	Wagenkasten: 1. Torsion um X, leichte 1. Biegung um Z, linkes Drehgestell: leichte Biegung um Y, leichte Torsion um X rechtes Drehgestell: leichte Torsion um X
12	1 Y	14.75	1.1	+	Wagenkasten: 1. Torsion um X, leichte 1. Biegung um Z, linkes Drehgestell: Drehung um Y rechtes Drehgestell: Drehung um X
13	3 Z	17.90	2.6	-	Wagenkasten: 2. Biegung um Y, leichte 1. Torsion um X, Drehgestelle: leichte Torsion um X,
14	3 Z	18.25	1.2	+	Wagenkasten: 2. Biegung um Y, leichte 2. Biegung um Z linkes Drehgestell: Torsion um X rechtes Drehgestell: leichte Torsion um X
15	1 X	18.75	2.0	++	Wagenkasten: dominante 2. Biegung um Y, leichte 2. Biegung um Z Drehgestelle: leichte Drehung um Y, gleichphasig
16	3 Z	19.75	1.7	+	Wagenkasten: 1. Torsion um X, leichte 2. Biegung um Z Drehgestelle: leichte Drehung um X

Tab. (Fortsetzung): Identifikationsergebnisse

Eigenform-Nr.	Referenz	Eigenfreq. [Hz]	modale Dämpf. [%]	Bewertung 1)	Charakterisierung der Eigenform
17	14 X	40.00	3.0	+	<p>Wagenkasten: in Ruhe linkes Drehgestell: dominante Biegung um Y rechtes Drehgestell: in Ruhe Bem.: Die Eigenform kann auch aus den Auswertungen der Datensätze <math>\bar{H}_{(10Z,*)}</math> und <math>\bar{H}_{(11Z,*)}</math> bestimmt werden. Eine entsprechende Eigenform, bei der nur das rechte Drehgestell dominiert, liegt bei ca. 41.0 Hz</p>

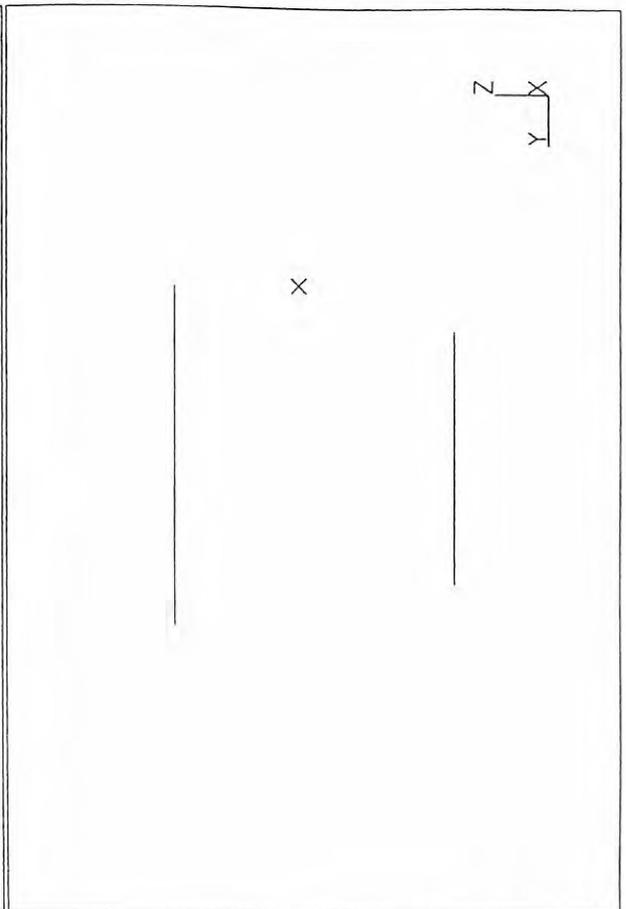
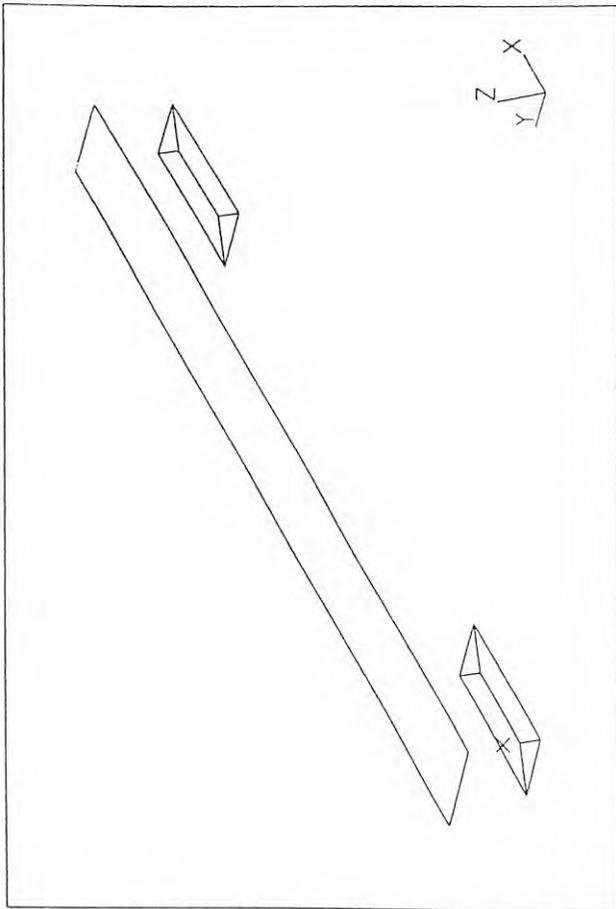
## 1) Bewertungsmaßstab

- = nicht eindeutig identifizierbar
- ++ = Vertrauenswürdig, eindeutig identifizierbar

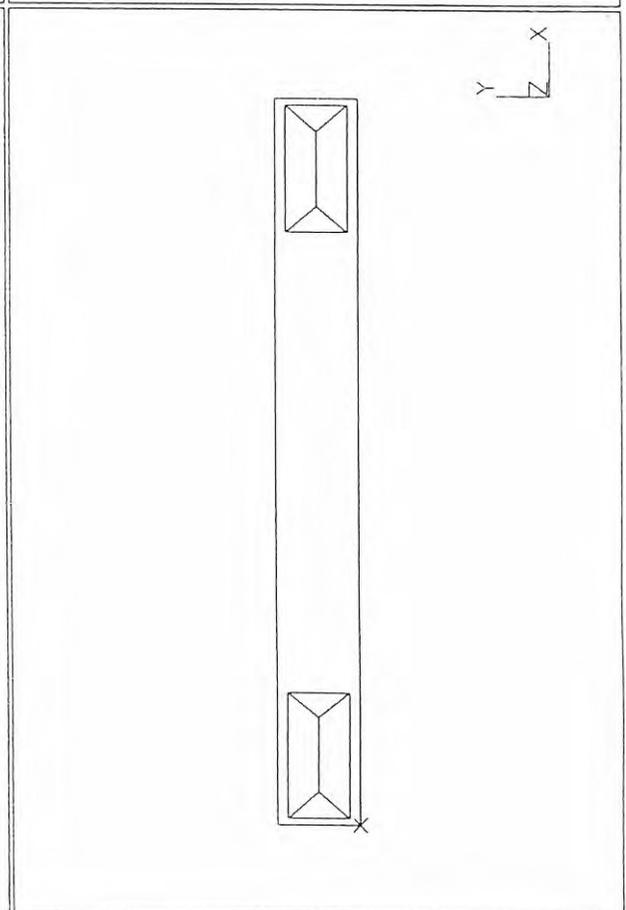
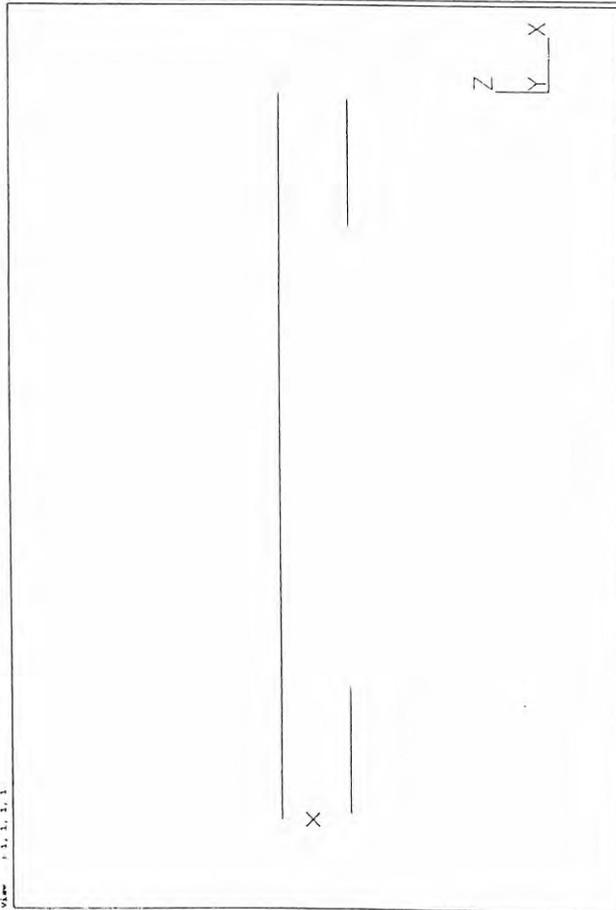
Tab. (Fortsetzung): Identifikationsergebnisse

B 1.2 - Eigenformen des Fahrzeugs (Universität Kassel)

11-007-14 11/01/01  
 Oella I RZ  
 Display : Name, Name, Name, Name



11-007-14 11/01/01  
 Oella I RZ

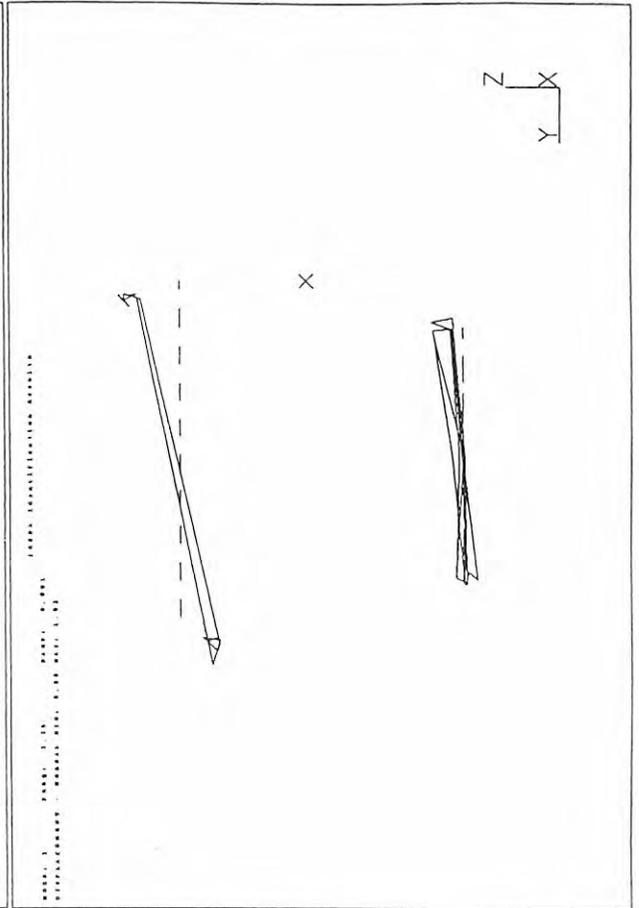
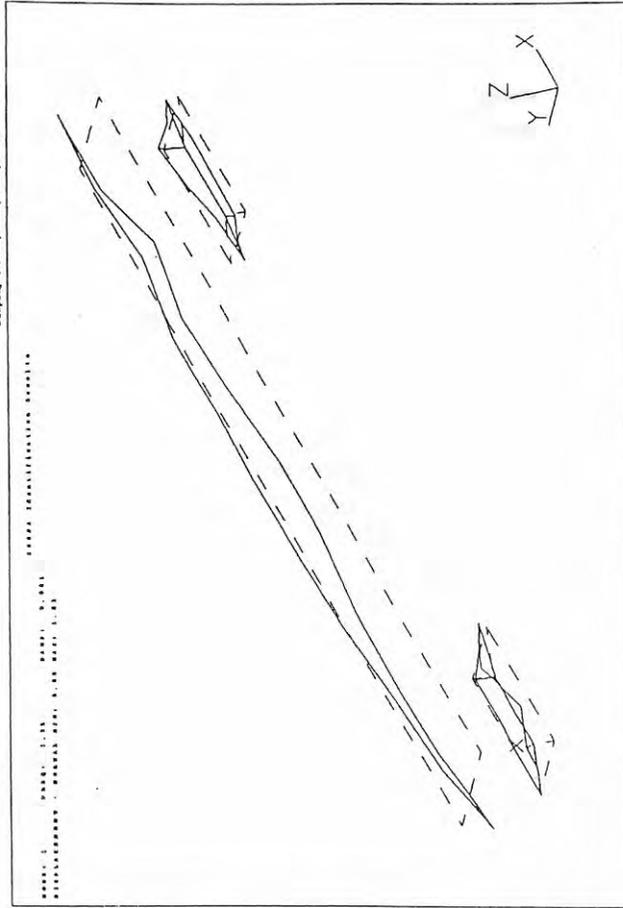


11-007-14 11/01/01  
 Oella I RZ

Bild a: Das Draftmodell des Wagens in den 4 Ansichten der Eigenformdarstellung

27-OCT-94 22:49:24

Display: Bone, Bone, Bone, Bone  
Delta: 100



SDRC I-DEAS VI.1: Test

Database: Test\_04\_Eisenbahnwagen - Marchburg August/Sept. 2004  
View: 1.1.1.1.1.1

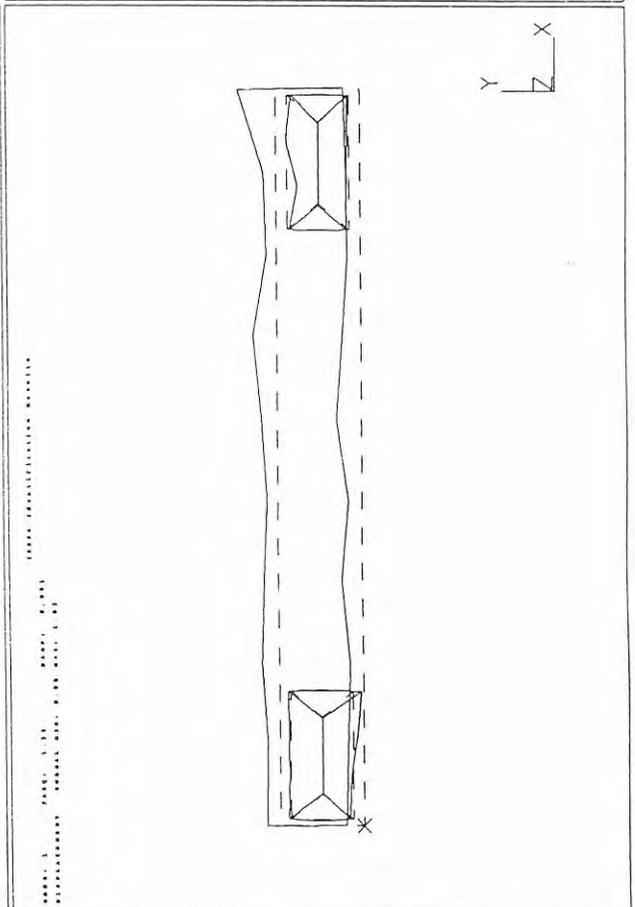
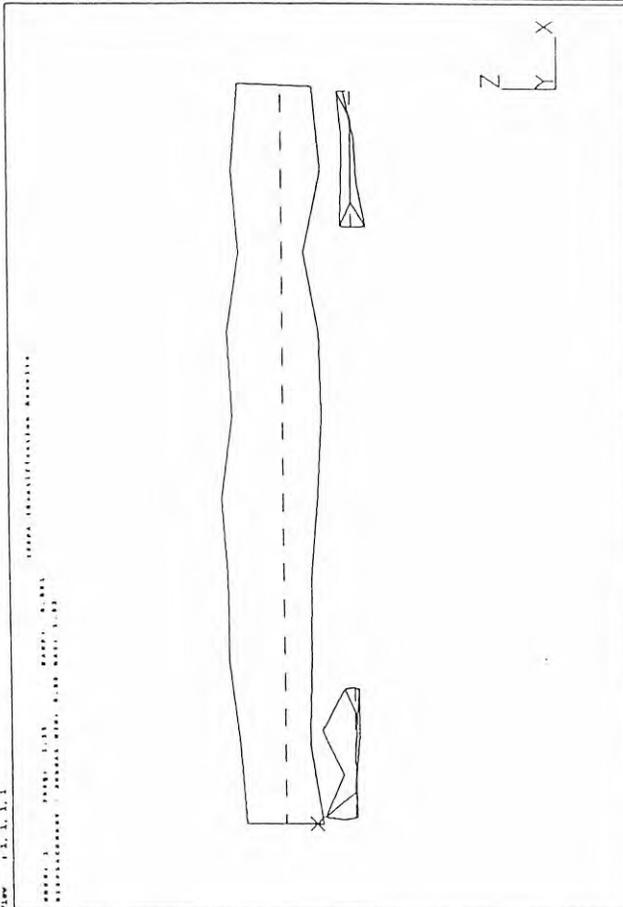
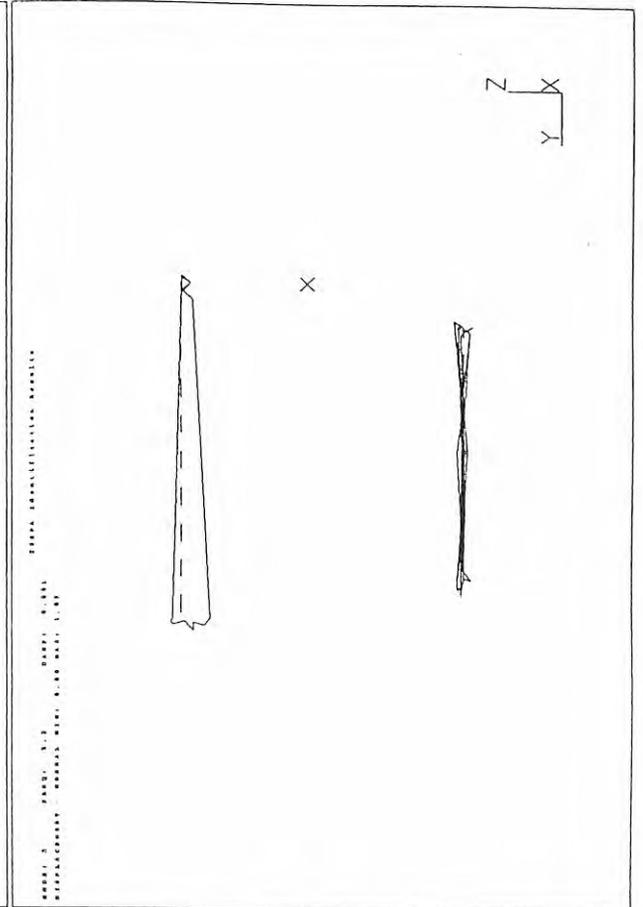
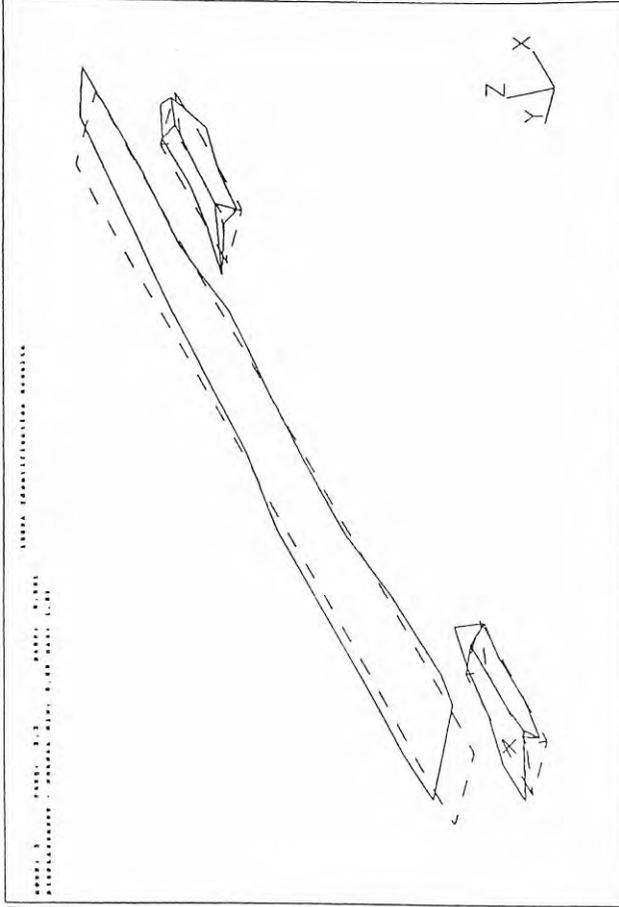


Bild b: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 1, 1.25 Hz

27-OCT-94 22:50:51  
 Display: I DEAS, DEAS, DEAS, DEAS, DEAS  
 DEAS I DE



SDRC I-DEAS VI.1.1: Teoc

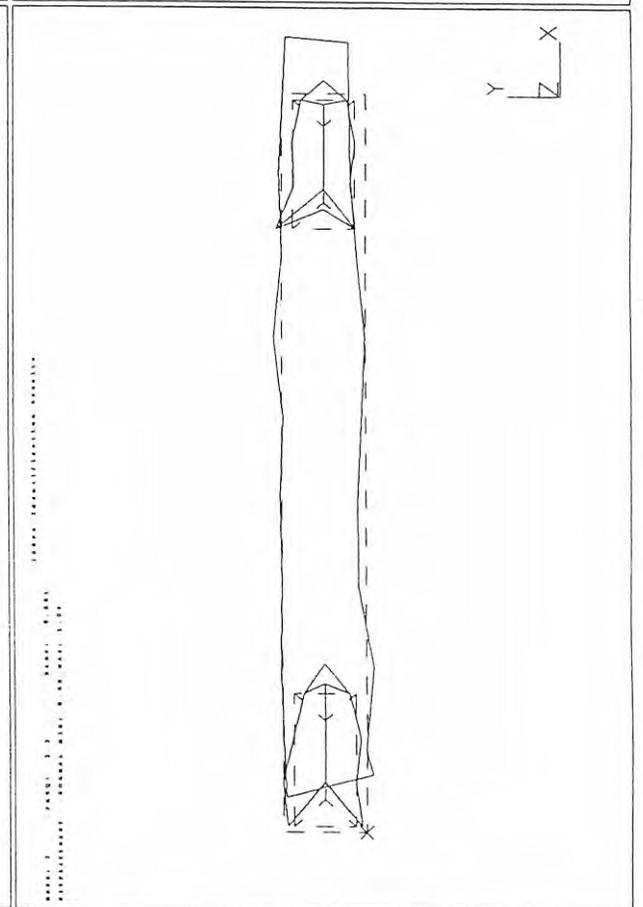
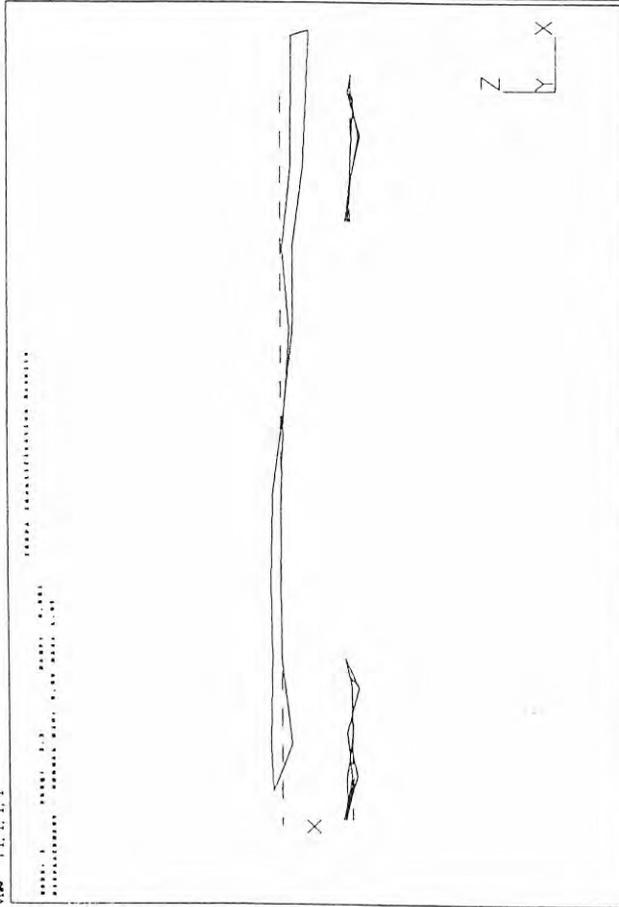


Bild c: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 2, 2.20 Hz

11. NOV. 94 19:58:26

Display / mode, zoom, pan, rotate

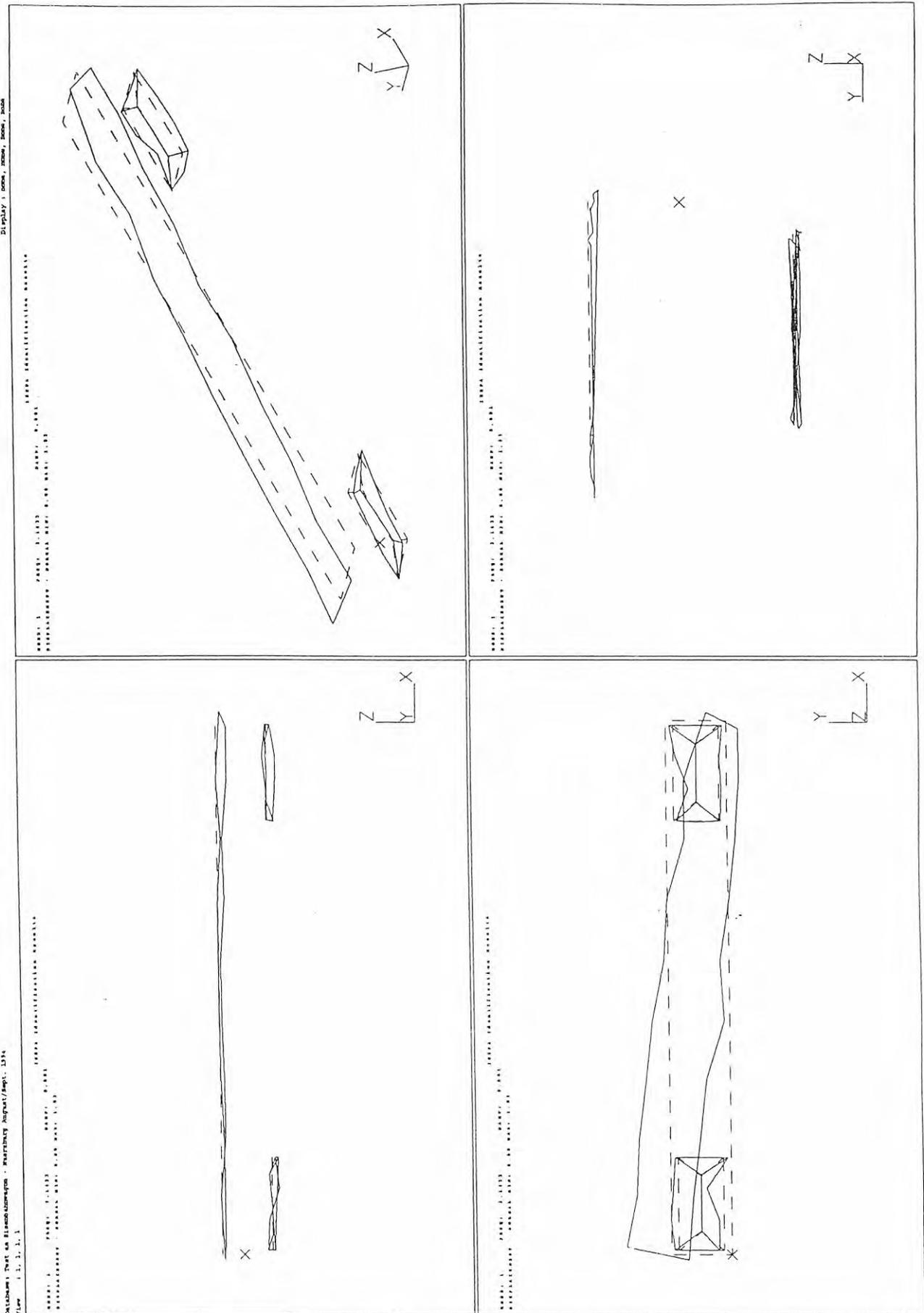


Bild d: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 3, 3.14 Hz

11-NOV-94 19:55:54

Display: none, none, none, none  
Date: 11/11/94

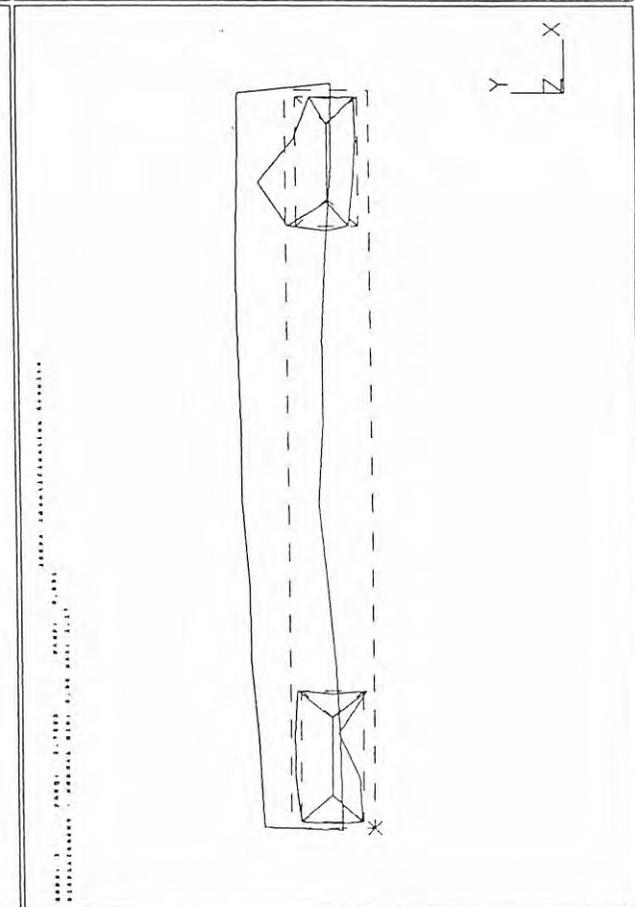
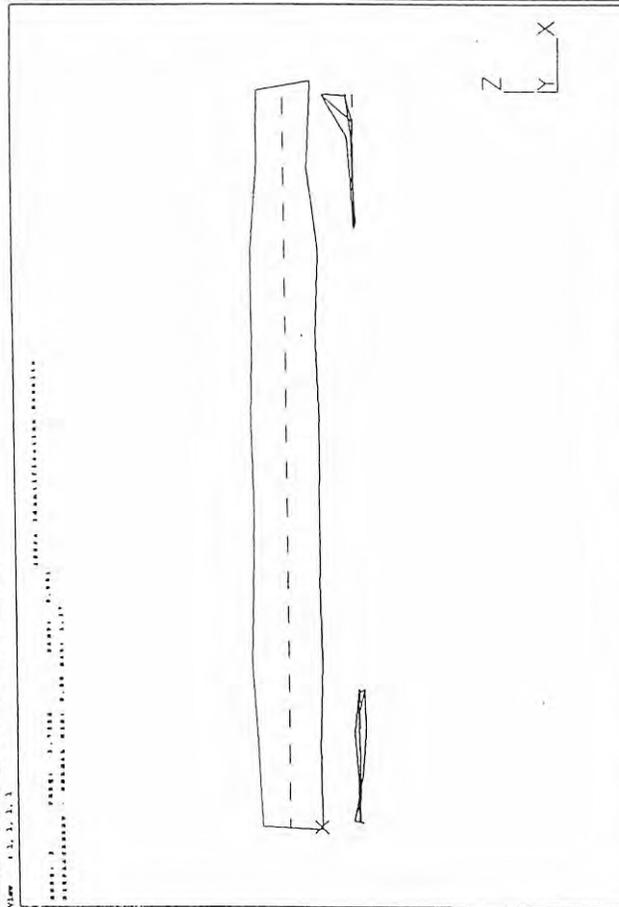
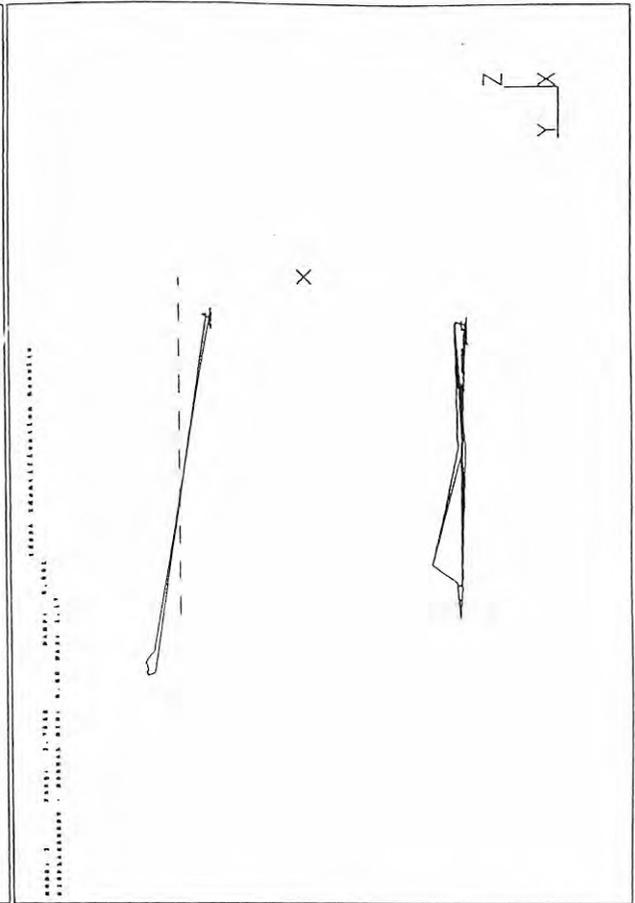
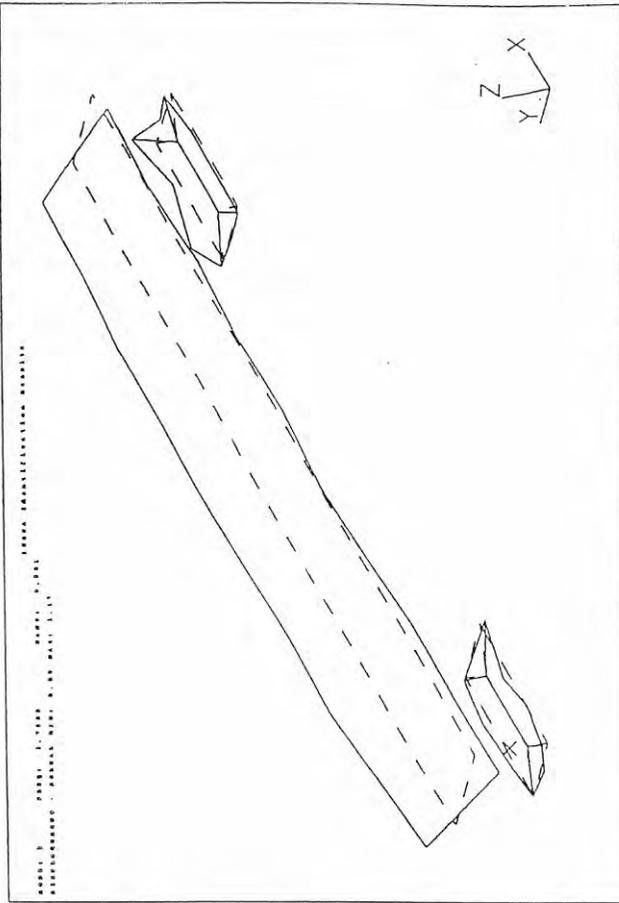
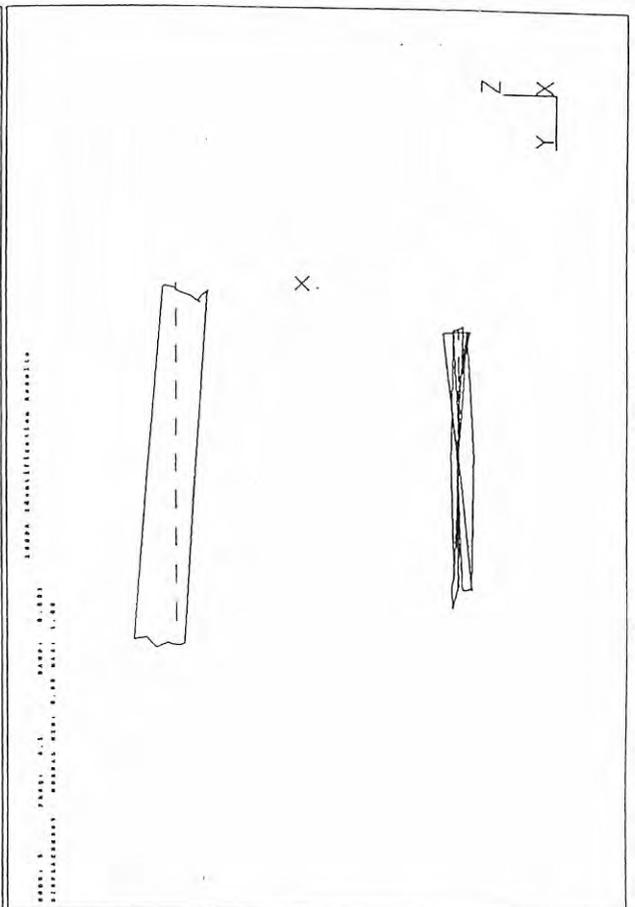
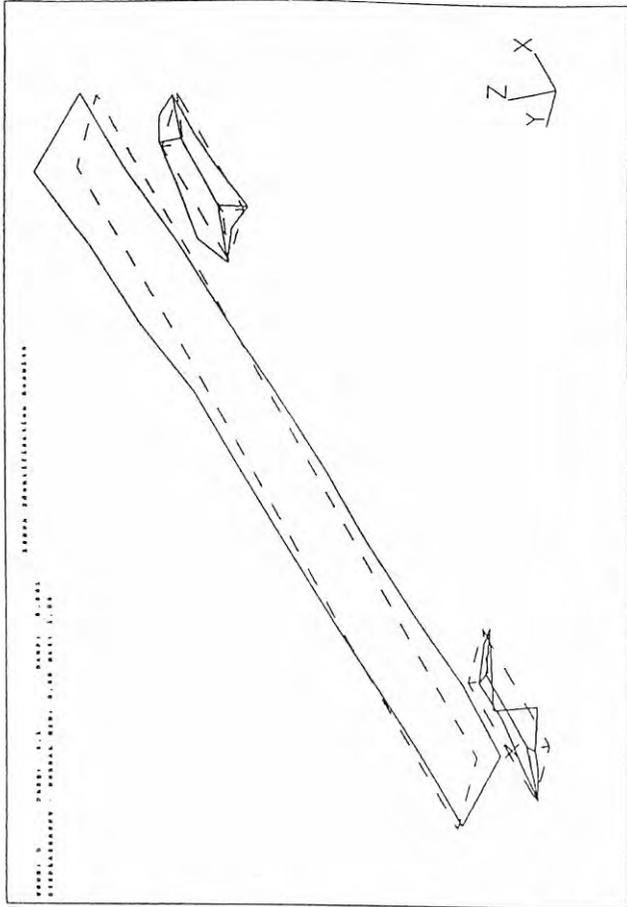


Bild e: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 4, 3.79 Hz

27-OCT-94 22:58:44

Display / Mode, Show, Hide, Zoom



SDRC I-DEAS V1.1: Text

DATE: 27 Oct 1994 22:58:44  
View: 1, 1, 1, 1

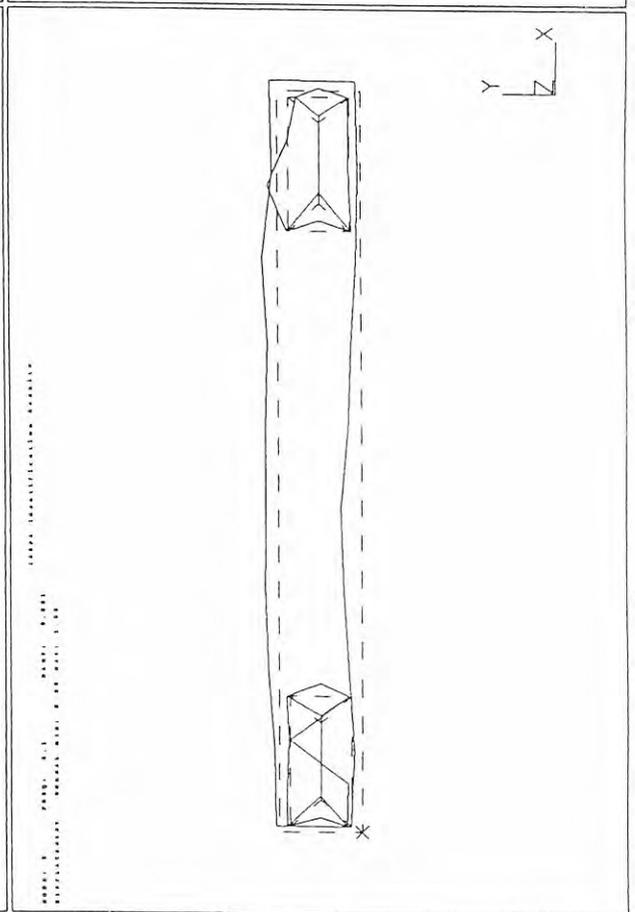
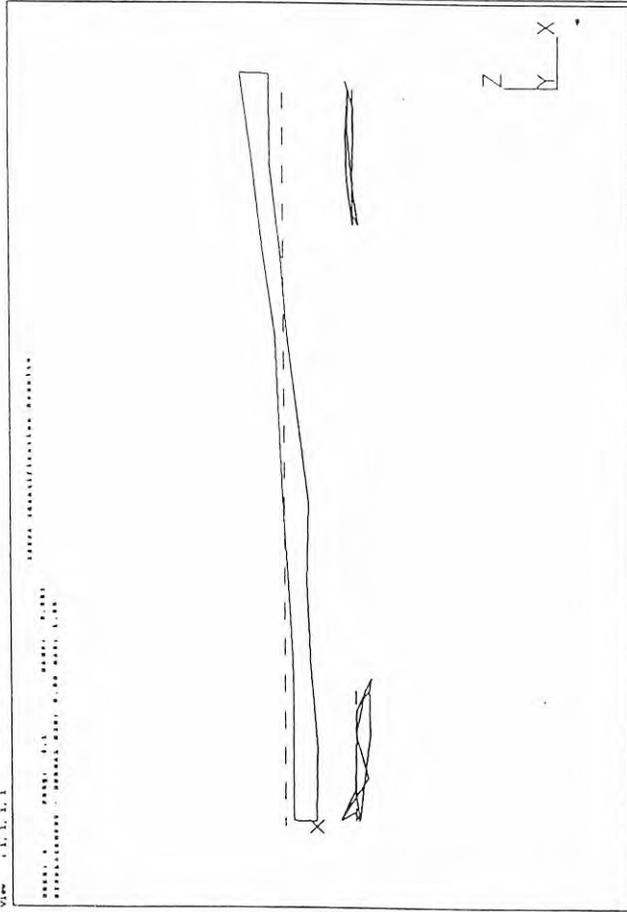


Bild f: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 5, 4.10 Hz

27-OCT-94 22:59:30  
Display: mode, zoom, done, done

SDRC I-DEAS V1.11 Test

Display: mode, zoom, done, done

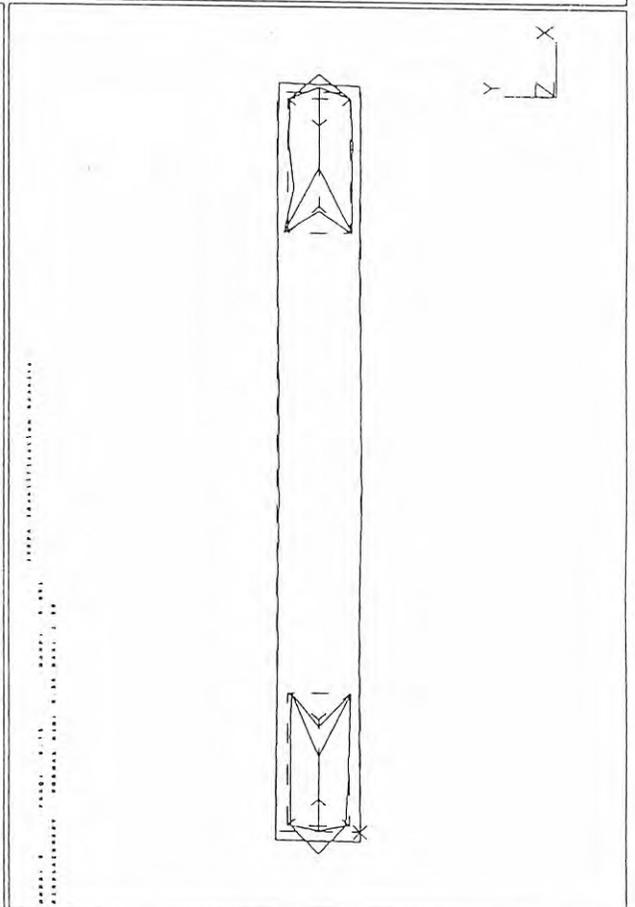
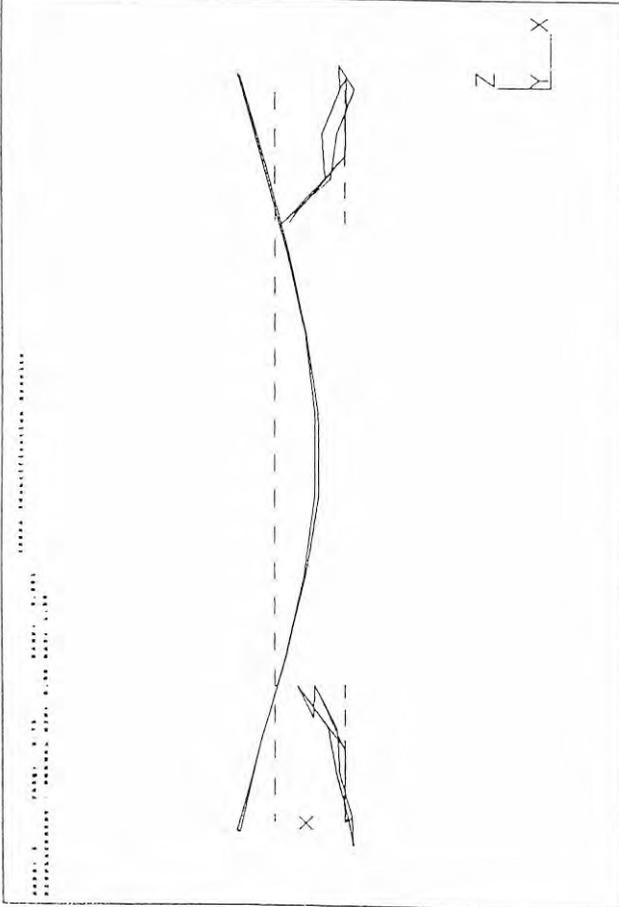
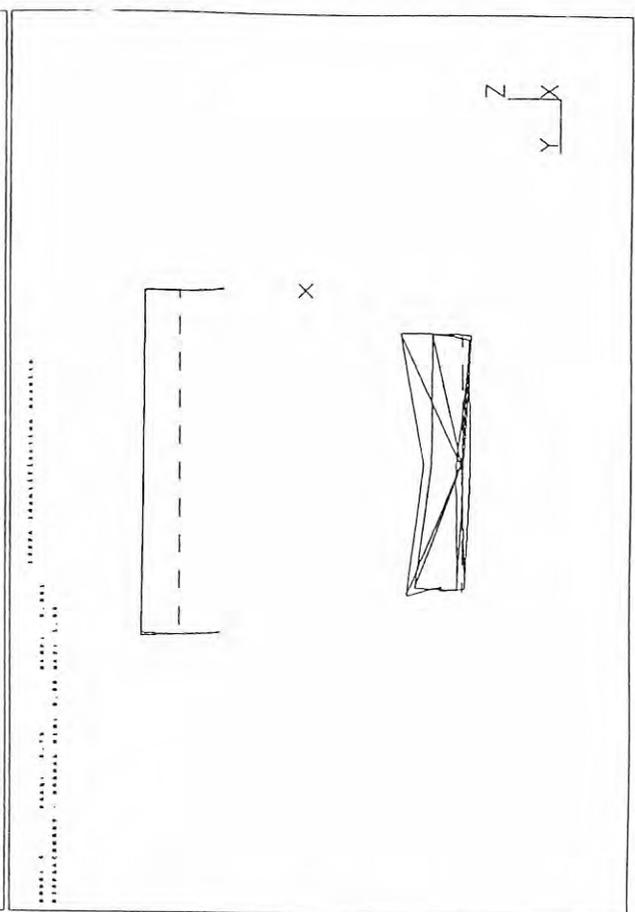
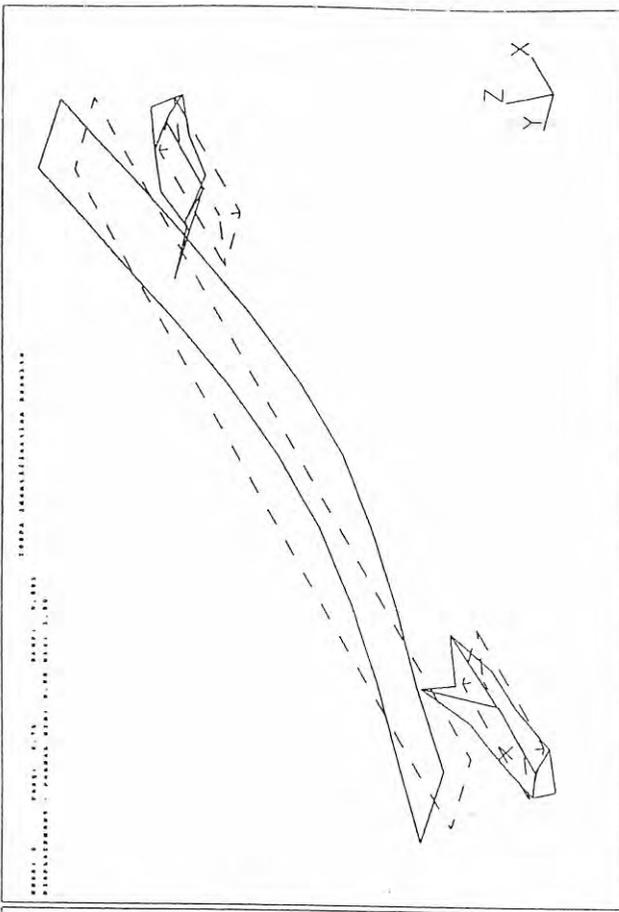
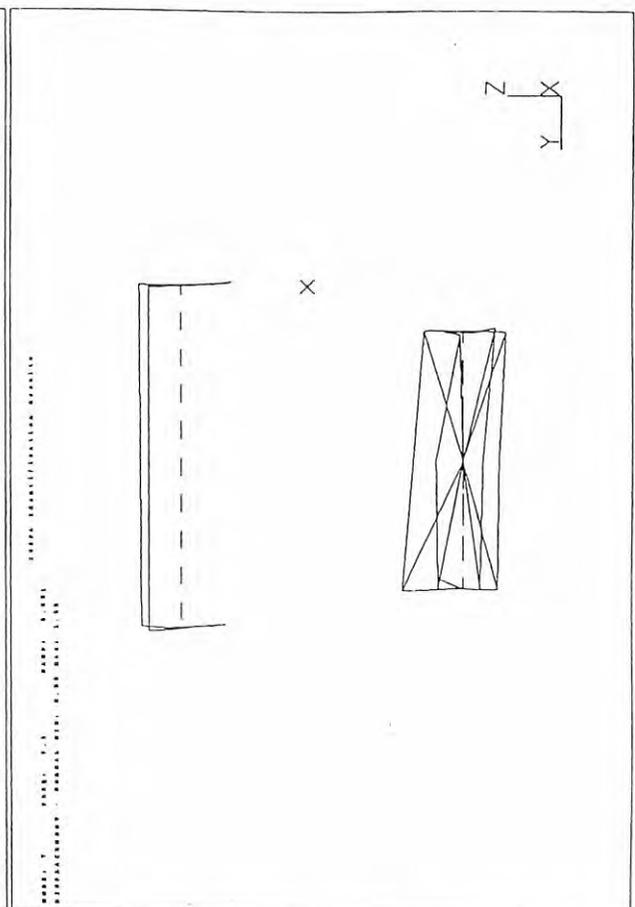
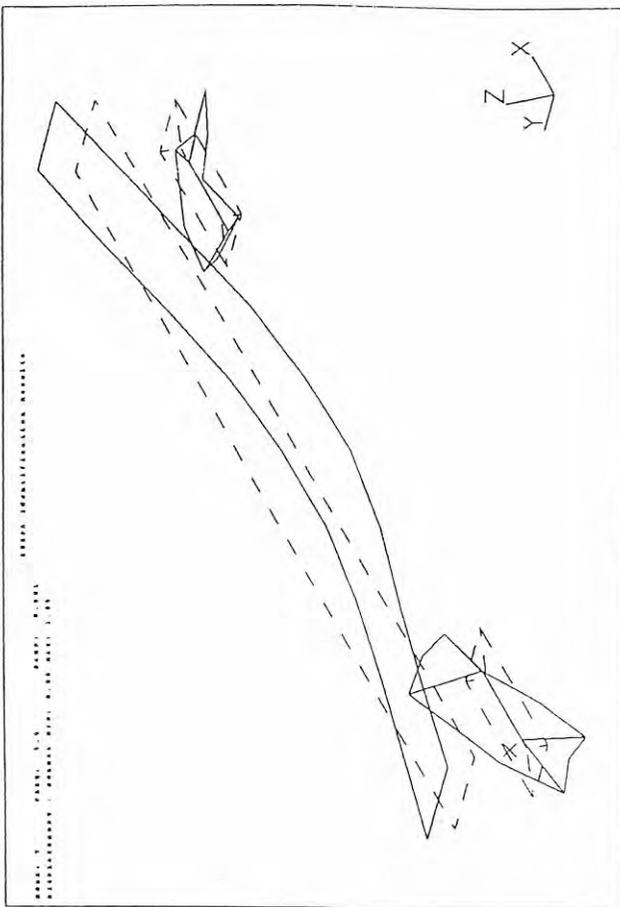


Bild g: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 6, 8.75 Hz

27-OCT-94 23:00:20  
 Display: I DEAS, I DEAS, I DEAS, I DEAS, I DEAS



SDRC I-DEAS V6.1: Test

Database: Test\_01\_Eigenformen - Moritzburg August/Sept. 1974  
 View: 1, 2, 1, 1, 1

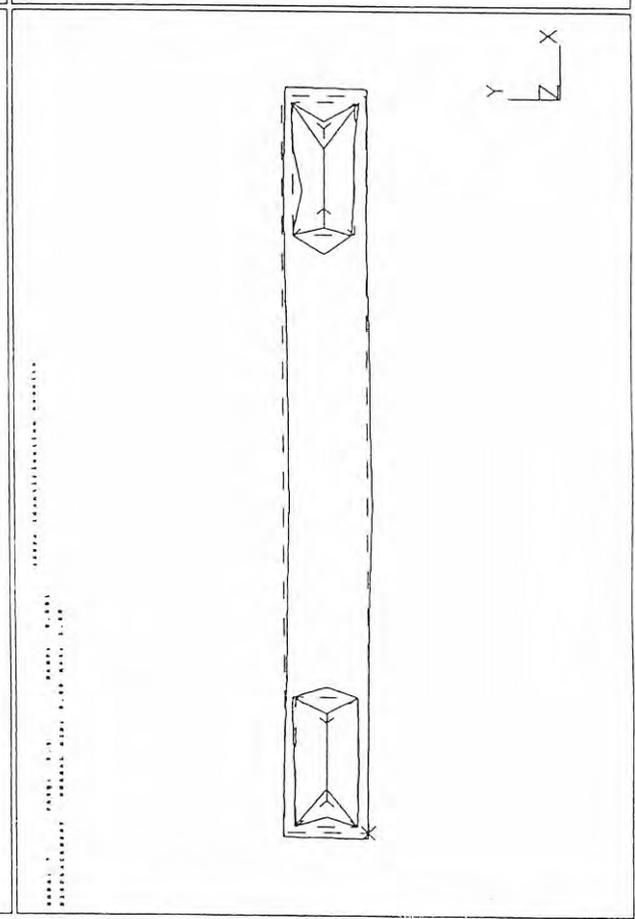
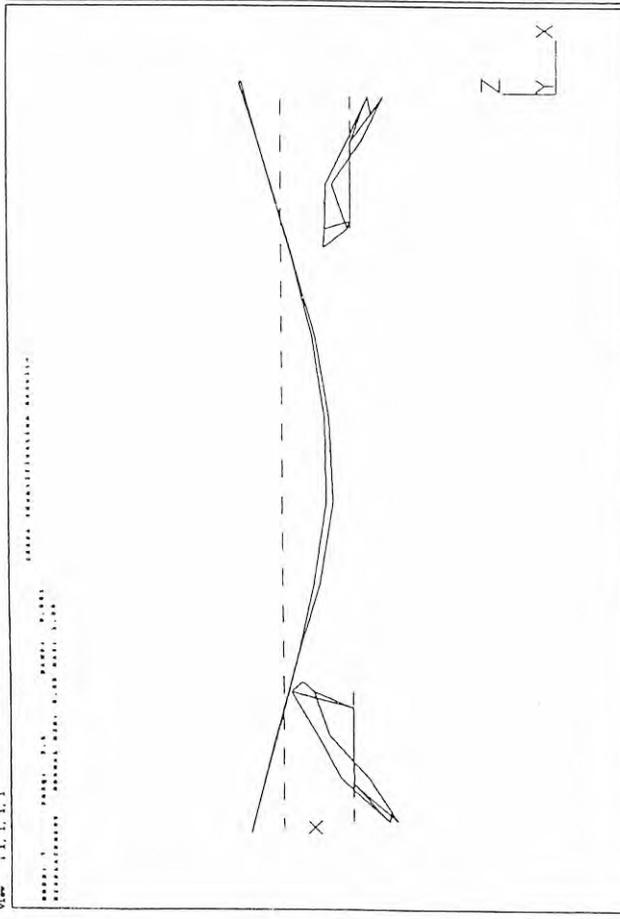
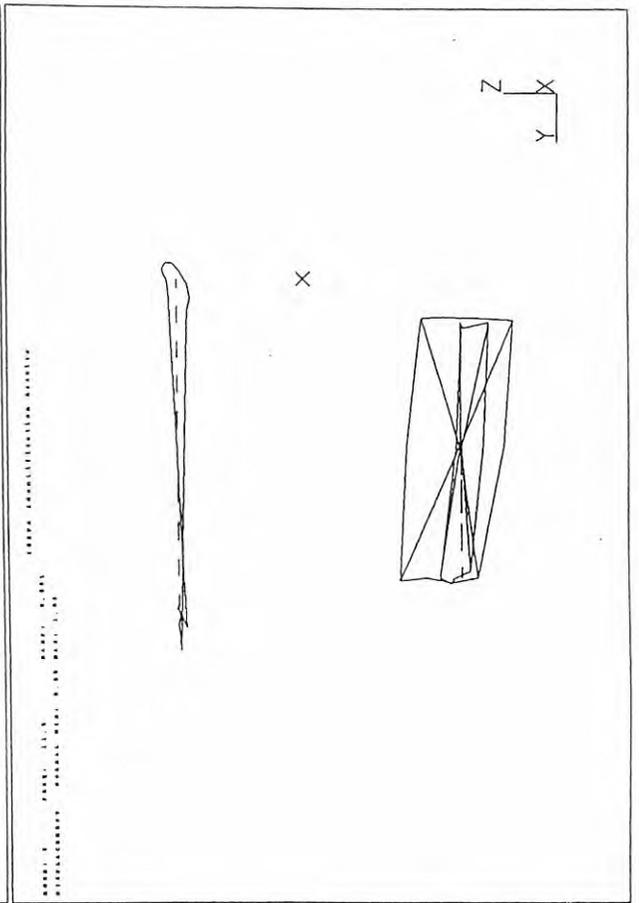
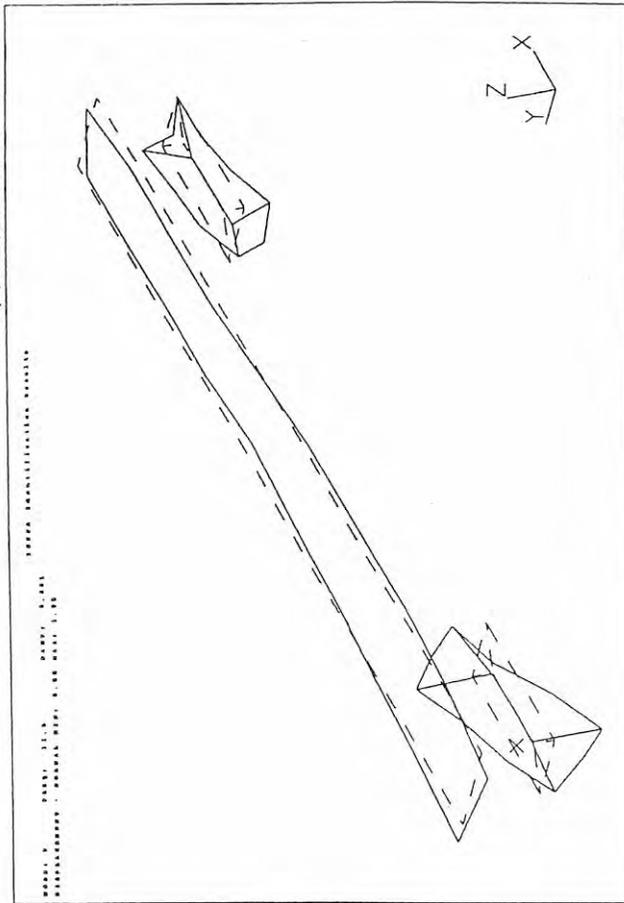


Bild h: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 7, 9.50 Hz



27-OCT-94 23:01:55  
 Display : none, none, none, none  
 CHL1 : 1 11



SDRC I-DEAS V1.1: Test

DATEIME: TEST AN KLEINSTRÖMUNG - FREIQUENZ ANALYSE / Sept. 1994  
 VIEW : 1, 1, 1, 1

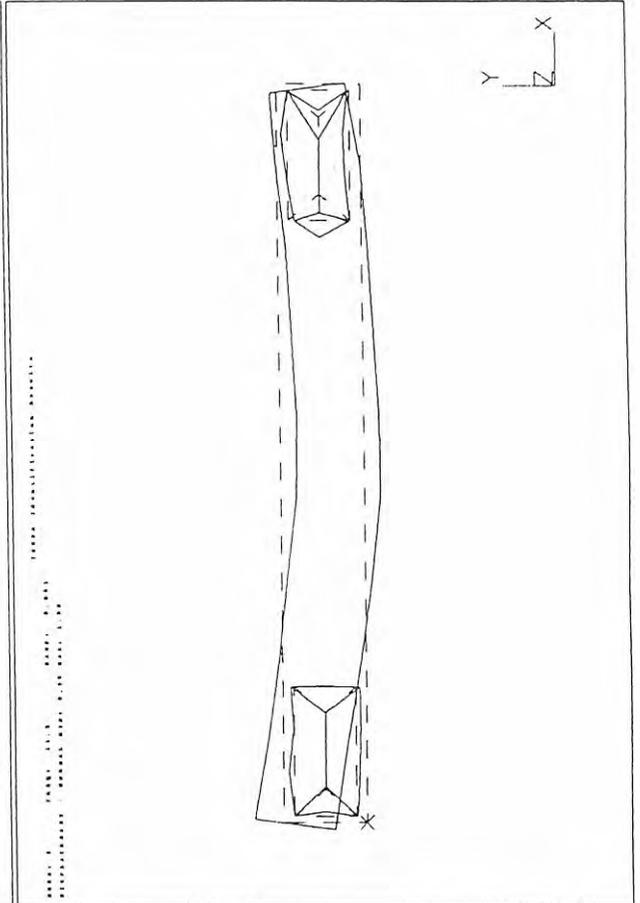
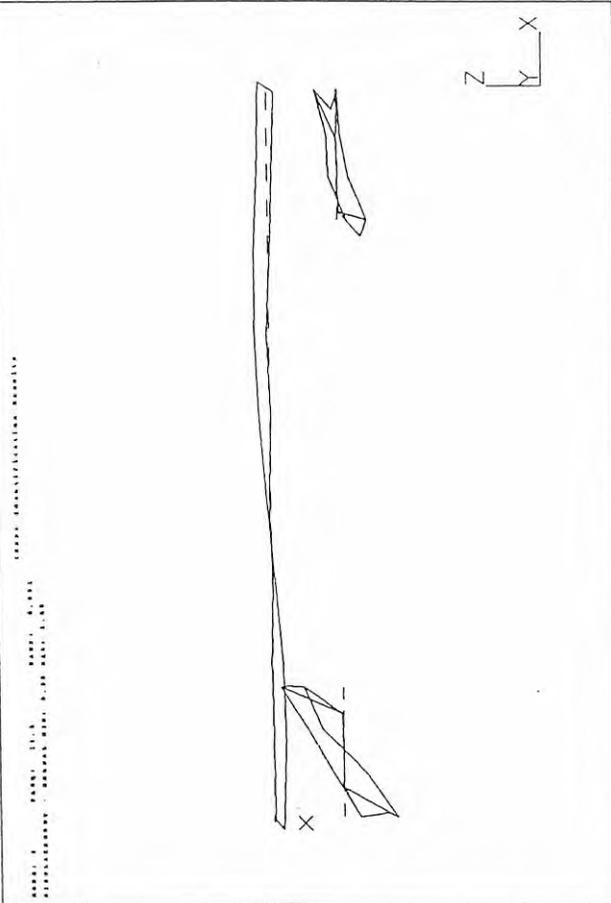


Bild j: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 9, 11.50 Hz

27-OCT-94 23:02:48  
Display: none, none, none, none

SDRC I-DEAS V1.1: TEST

Delaware, Part an Eisenbahnwagen - Harzbury August/Sept. 1994  
View: 1, 1, 1, 1

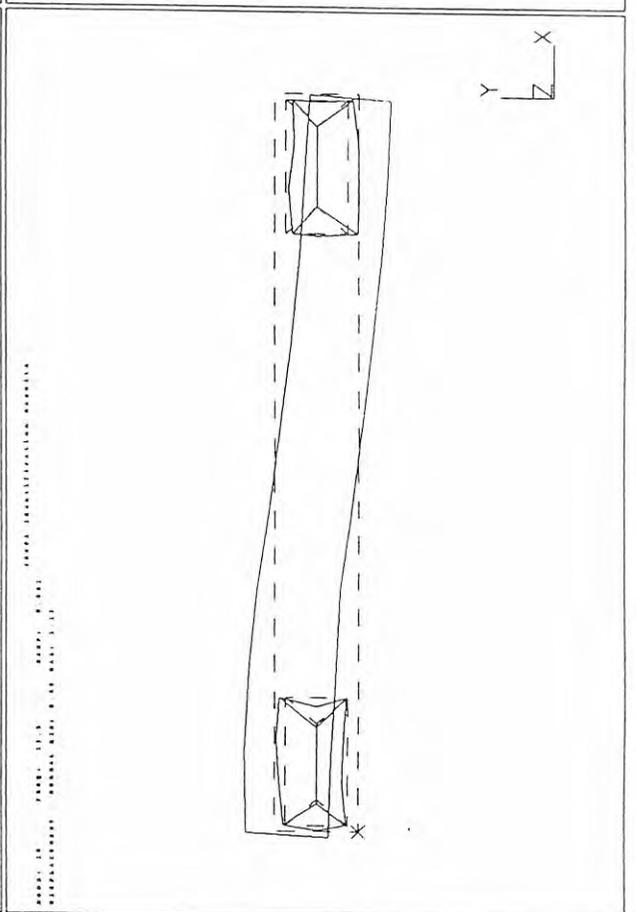
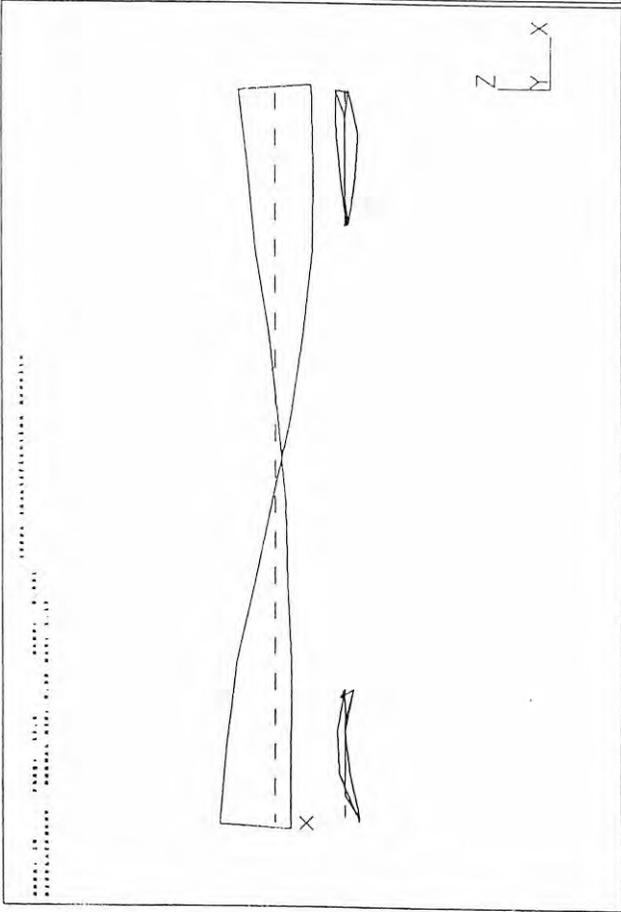
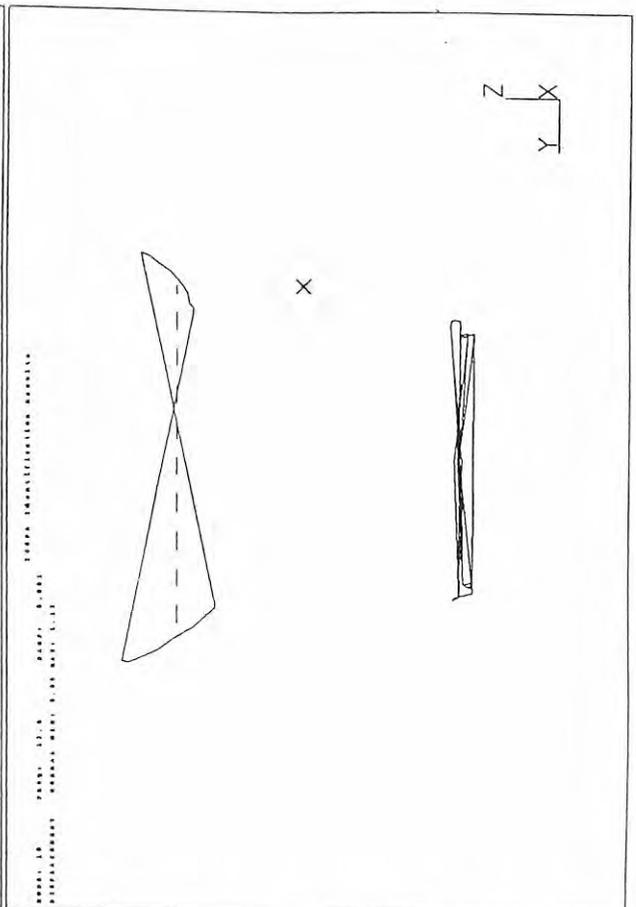
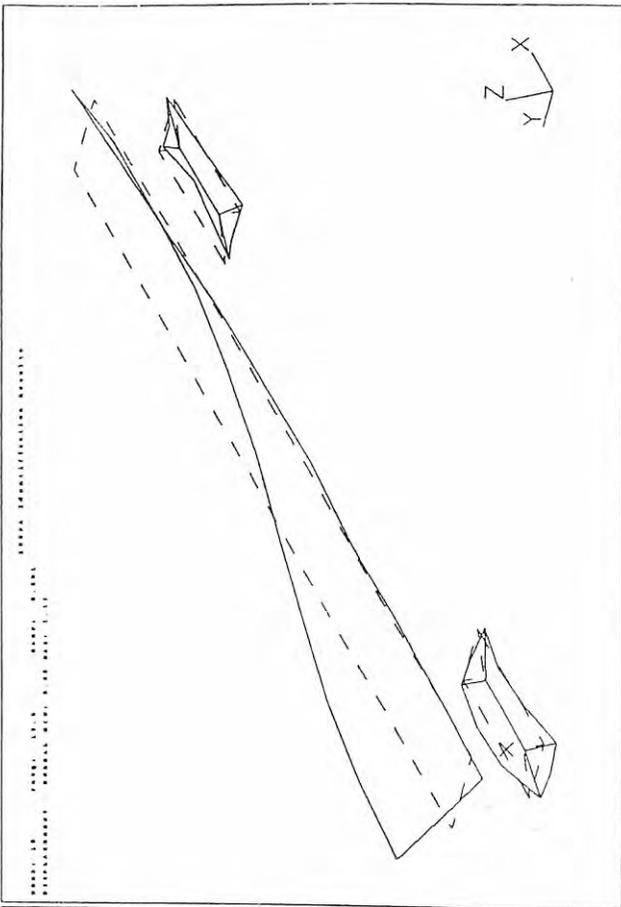


Bild k: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 10, 13.50 Hz

27-OCT-94 23:03:31

Dalla 1 81

Display / zoom, move, pan, etc.

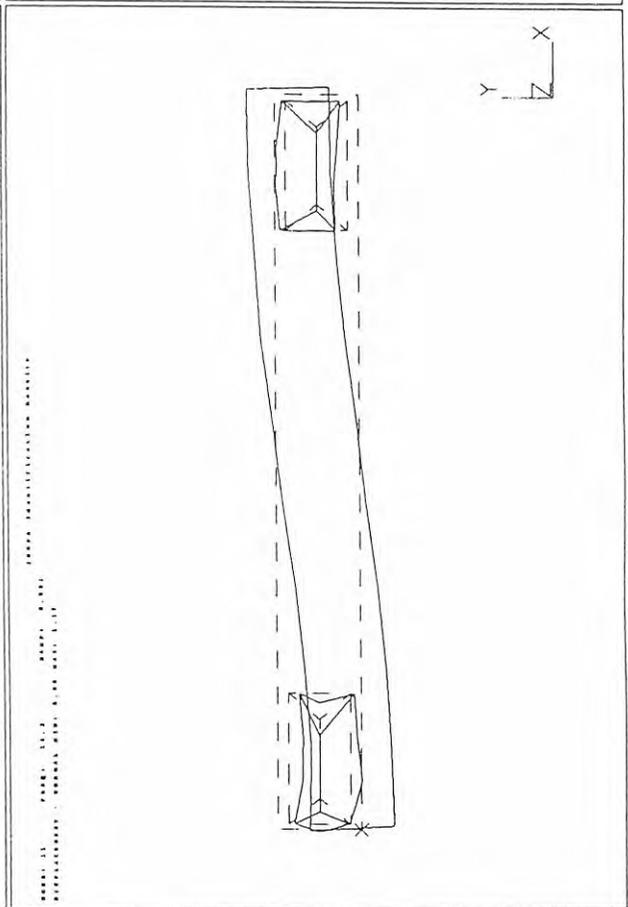
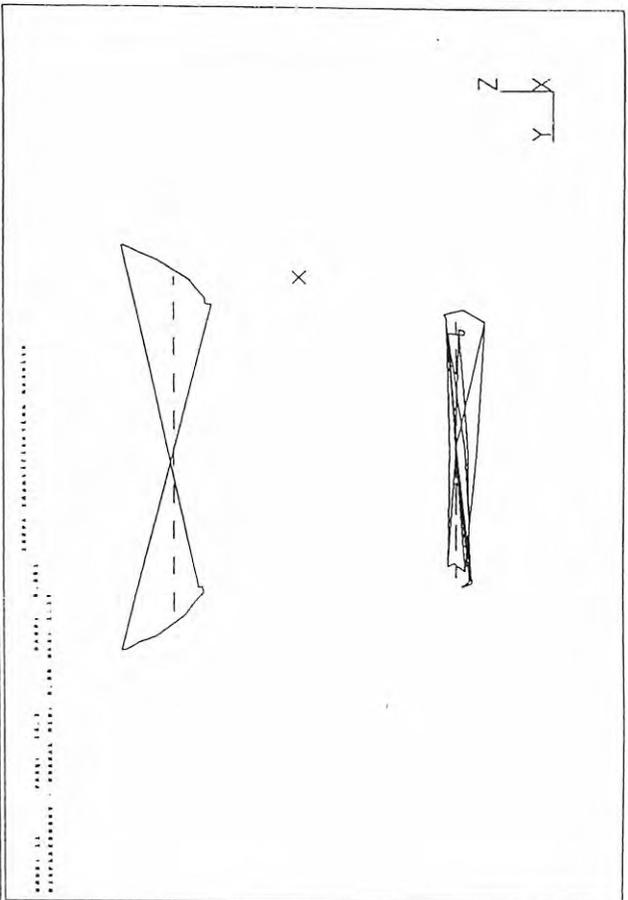
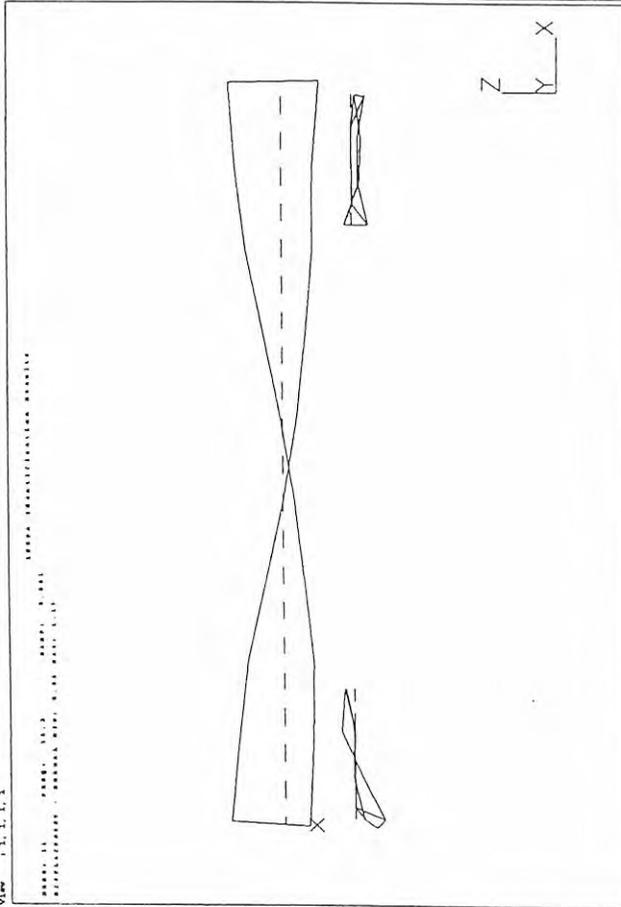
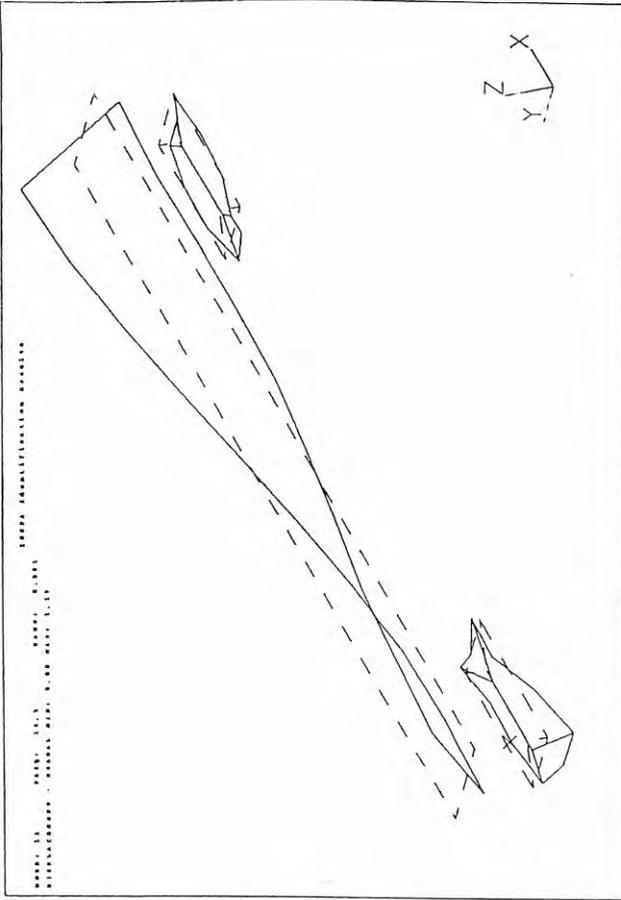
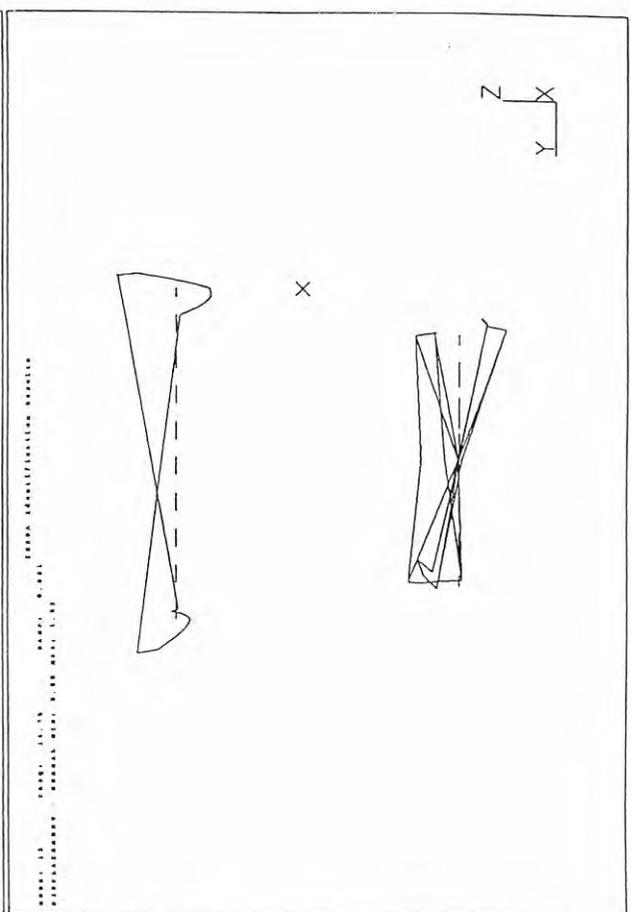
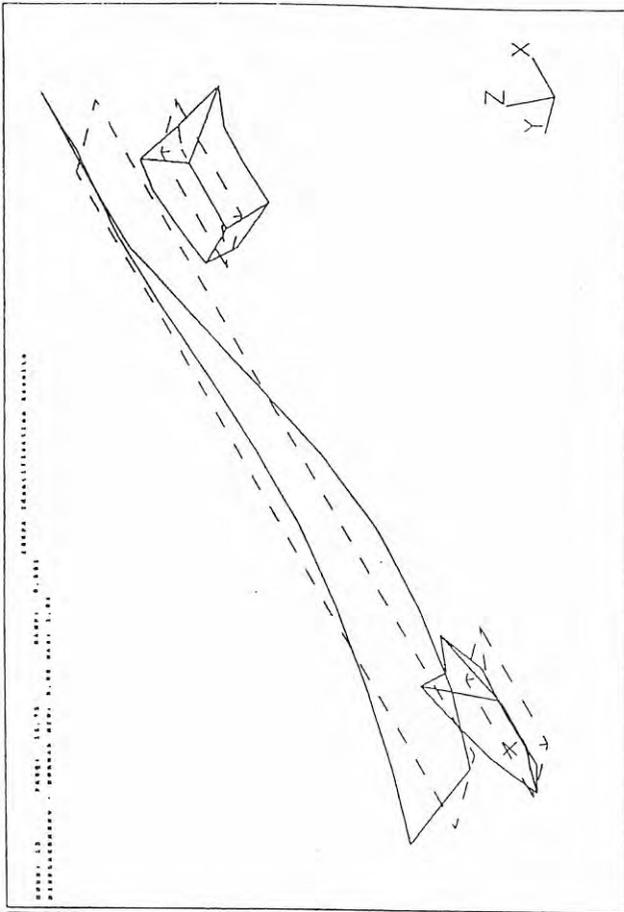


Bild 1: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 11, 14.20 Hz

27-OCT-94 23:04:14  
 Display: mode, none, none, none



SDRC I-DEAS VI.1: Test

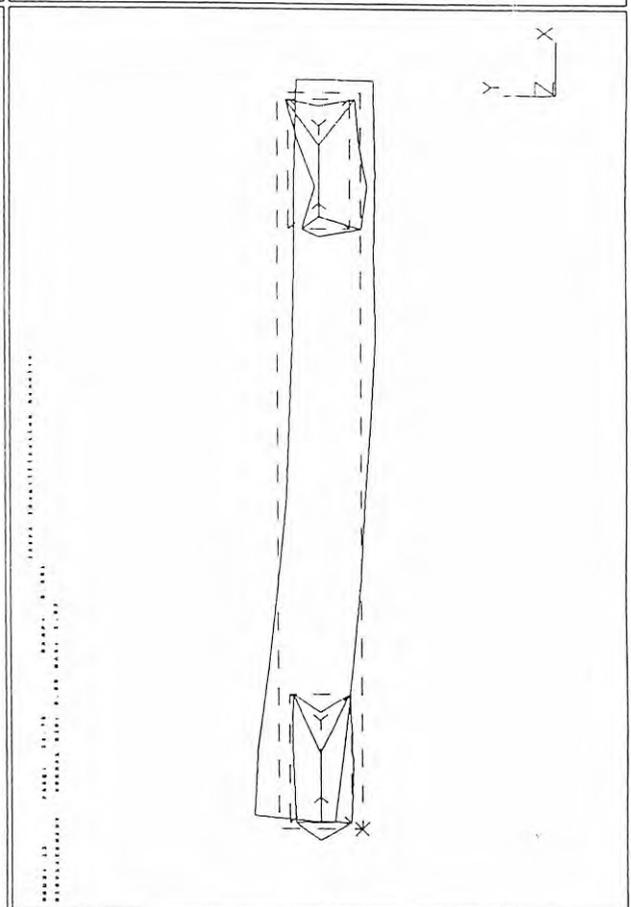
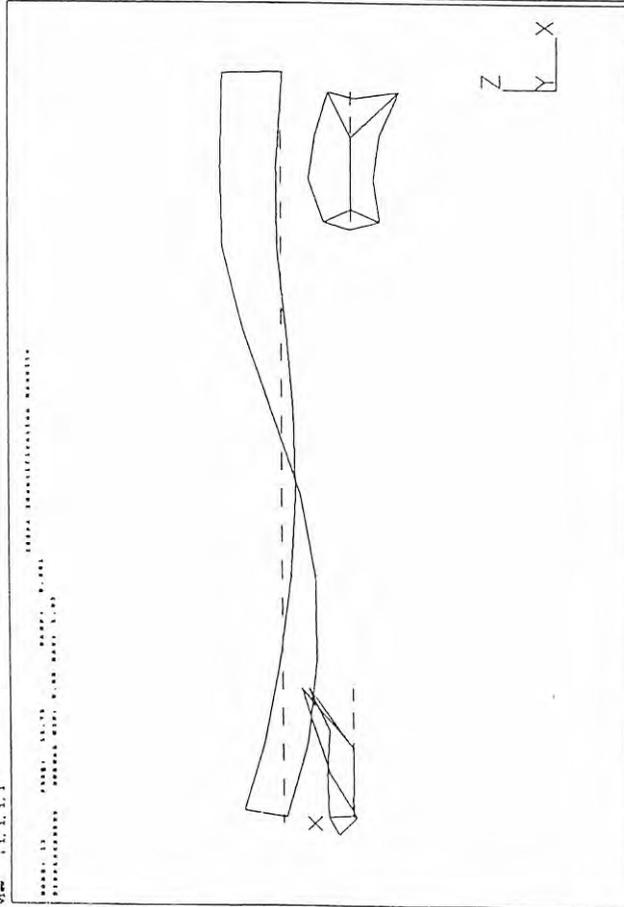
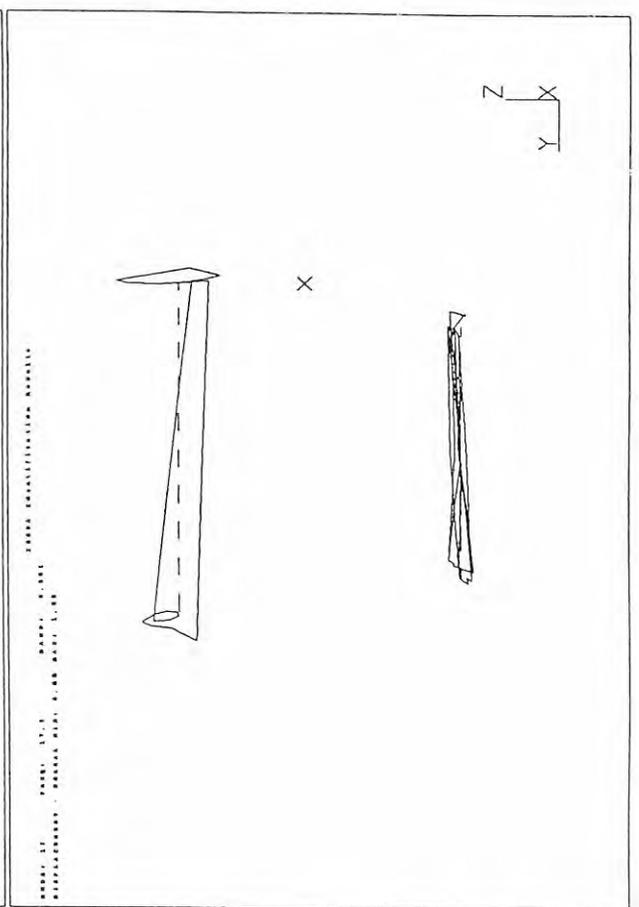
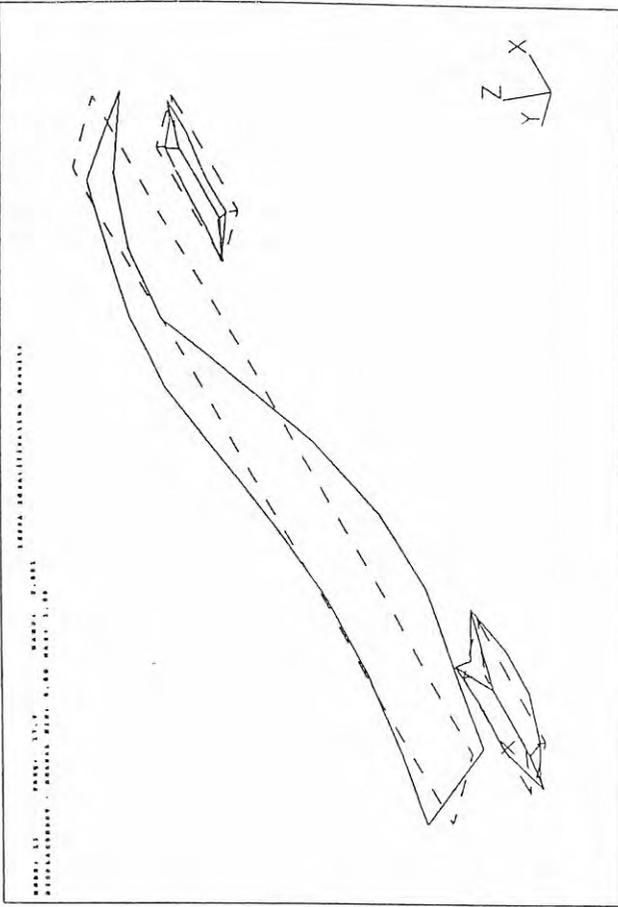


Bild m: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 12, 14.75 Hz

27-OCT-94 23:04:58

Display: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12  
Scale: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12



SDRC I-DEAS VI.1: Text

Decision: Part an Einzelzeichnung - Manufacturing Asgmt./Impf. 1374  
View: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

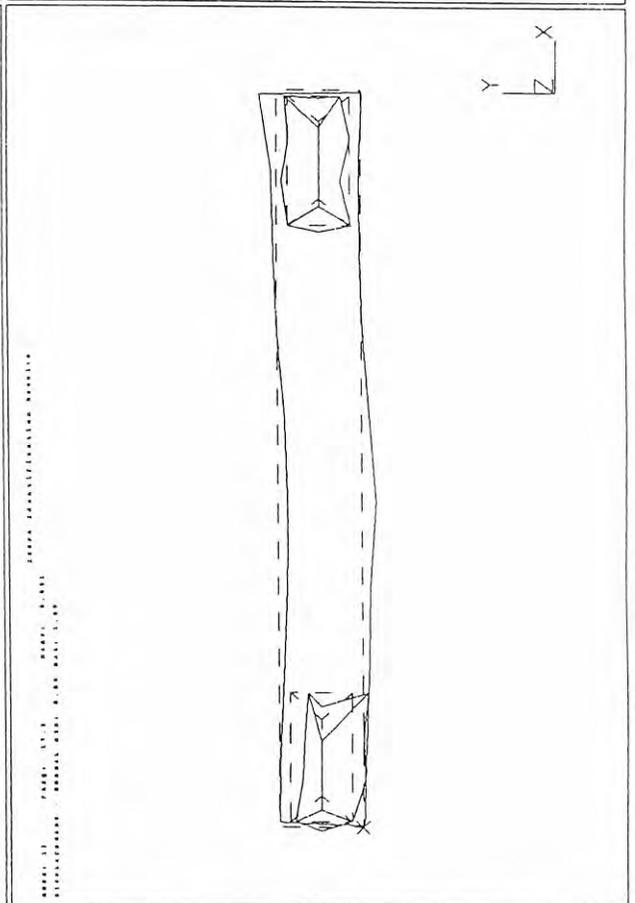
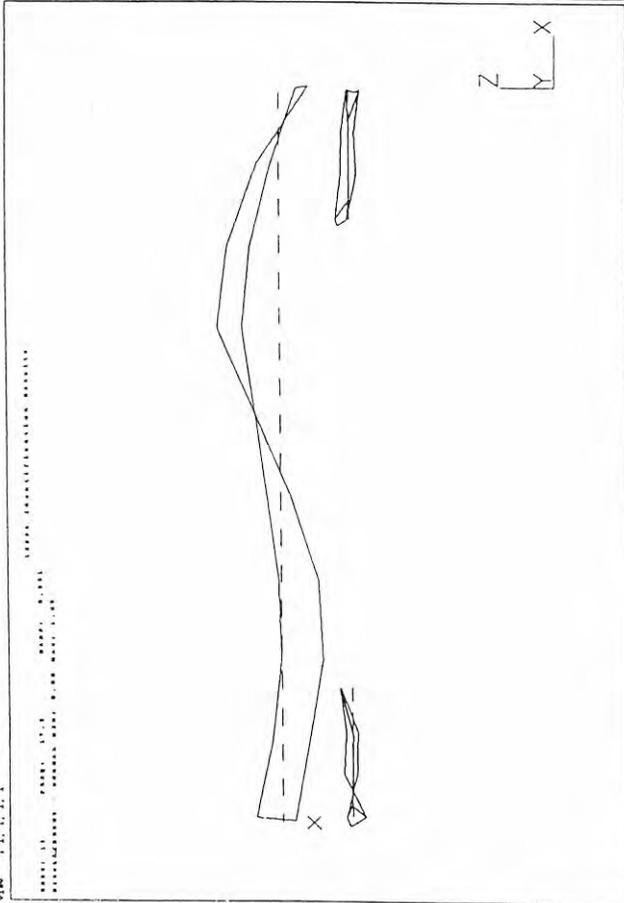
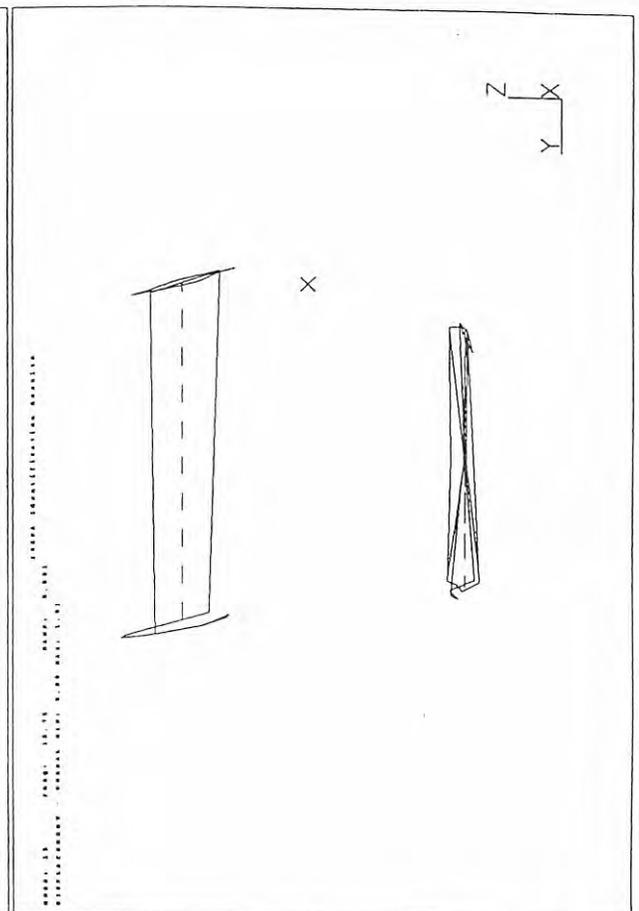
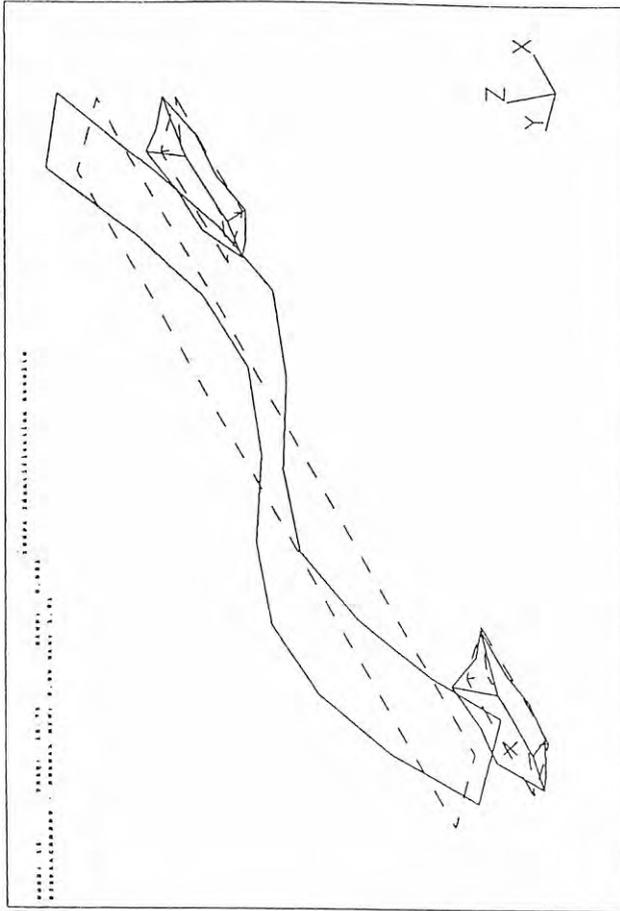


Bild n: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 13, 17.90 Hz



27-OCT-94 23:06:27

Display / Mode / Zoom / Rotate / BT



SDRC I-DEAS V1.1: Test

Database: Part 04 Elements/beam - Part04/beam/Elem. 174  
View: 1, 1, 1, 1

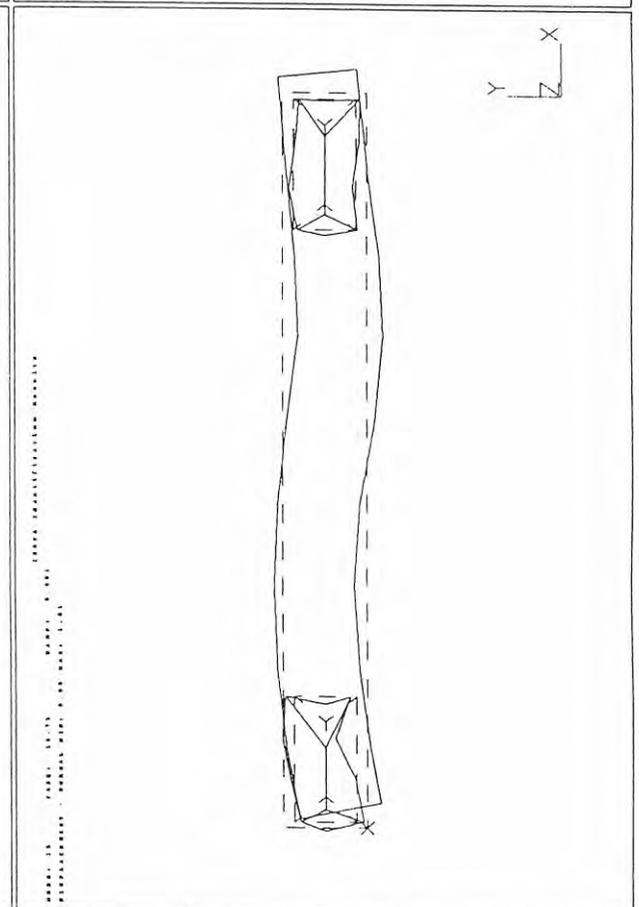
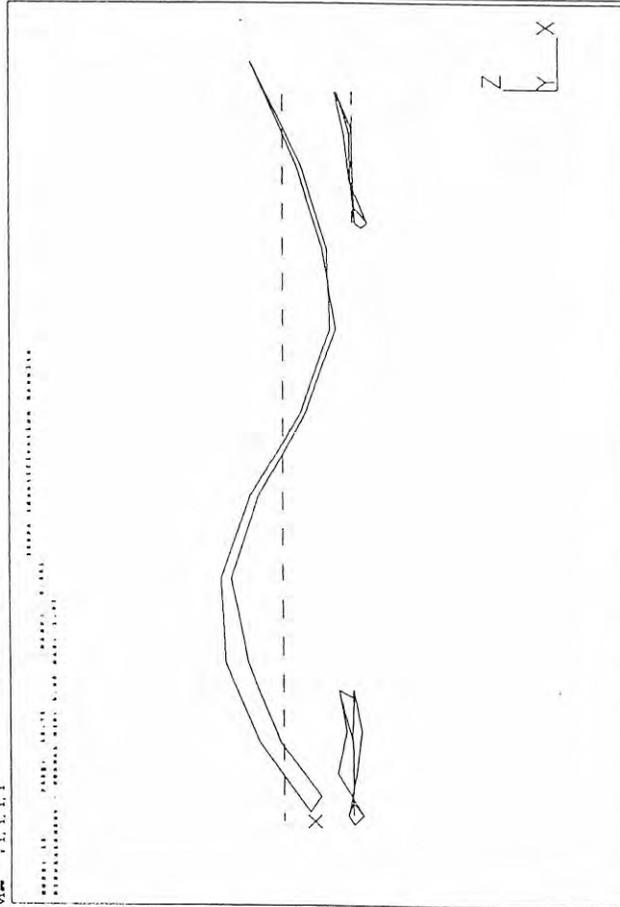


Bild p: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 15, 18.75 Hz

27-OCT-94 21:07:08  
Display: none, none, none, none  
Delta: 1 Hz

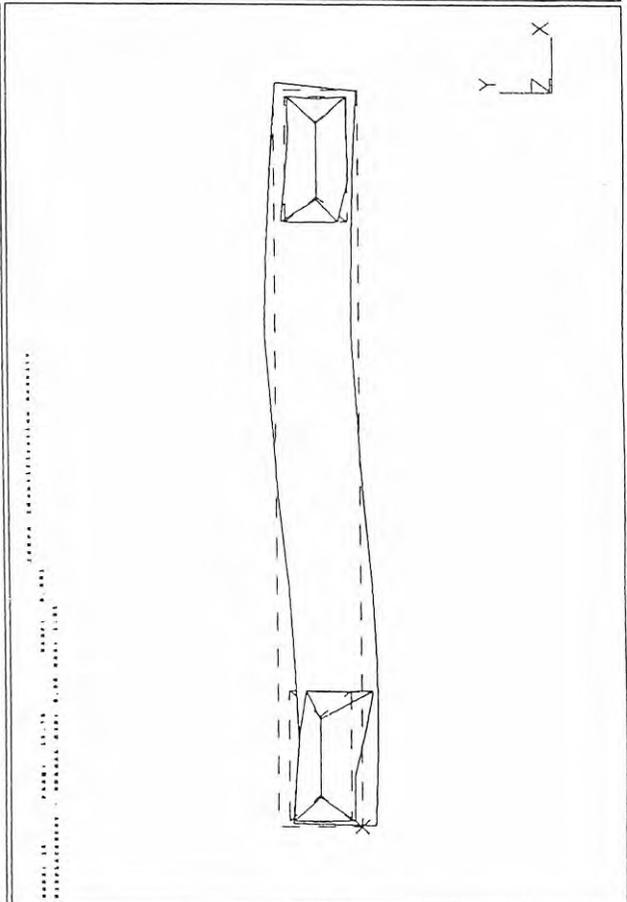
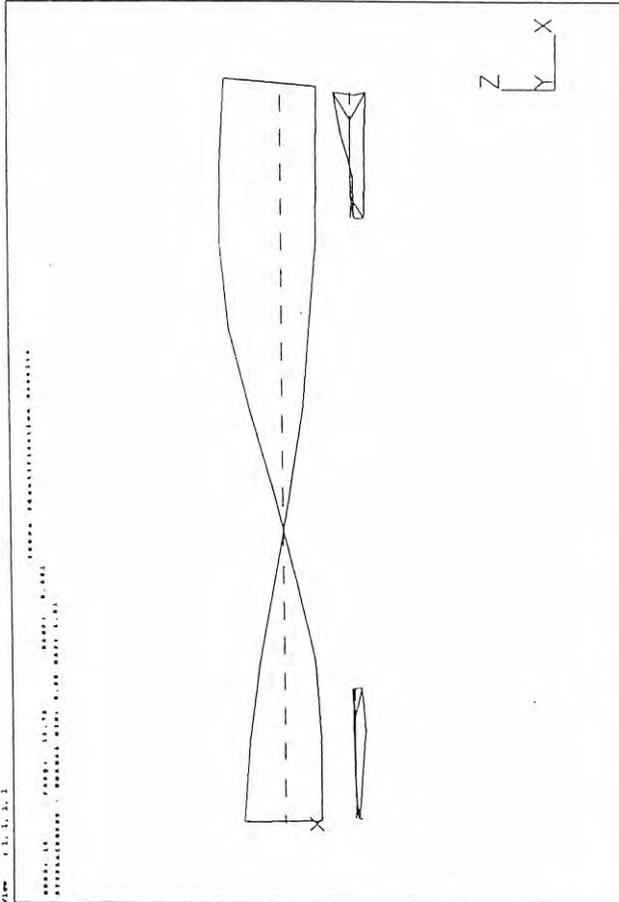
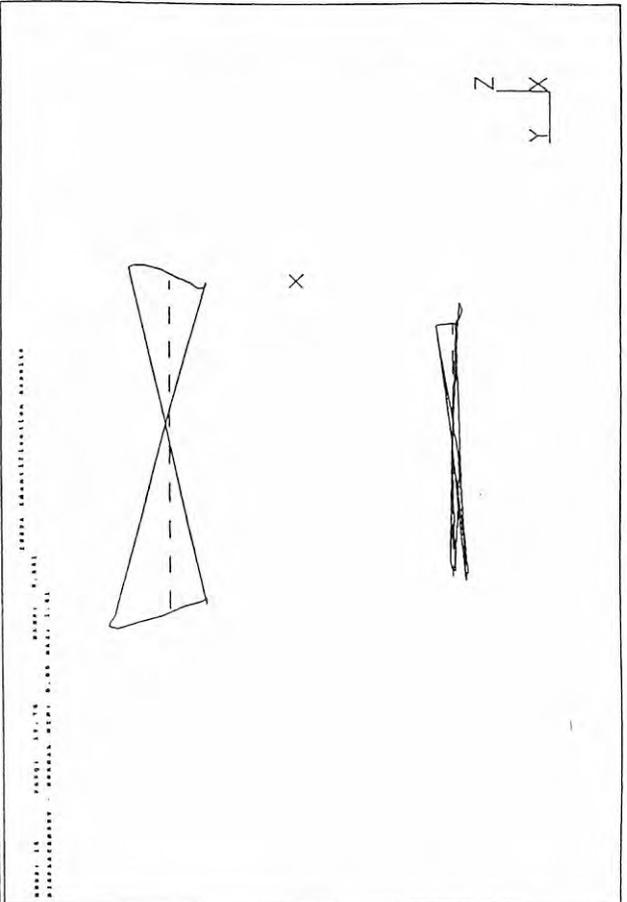
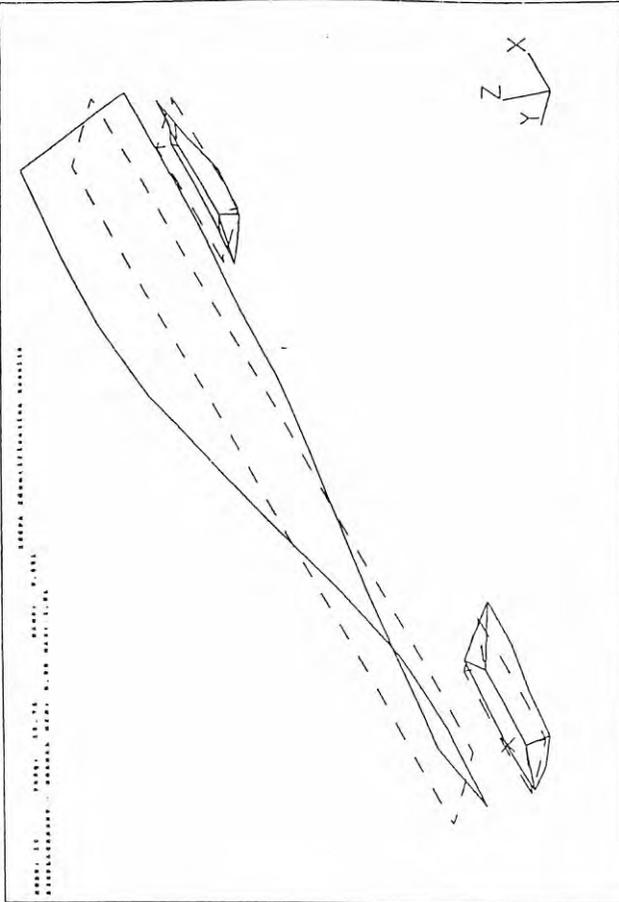
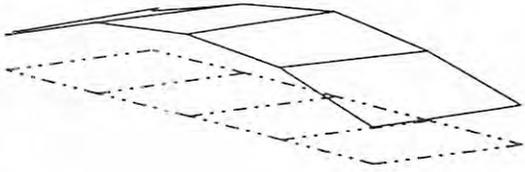


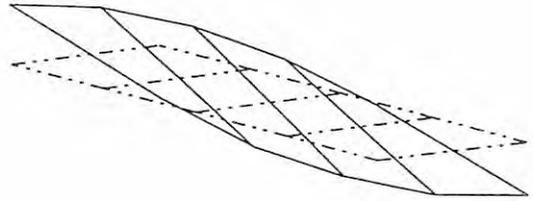
Bild q: Identifizierte Eigenformen, Eigenform 16, 19.75 Hz



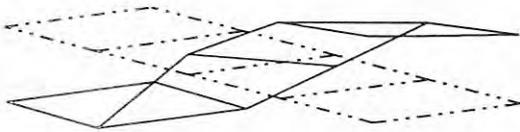
## B 2.1 - Eigenformen der Brücke



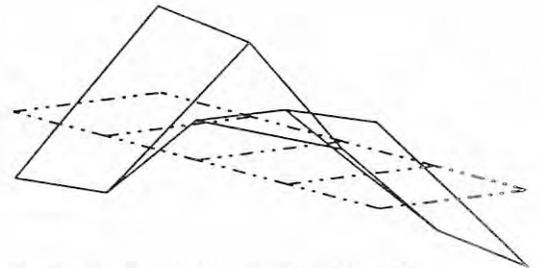
1. Biegeeigenform  $f=3,7$  Hz



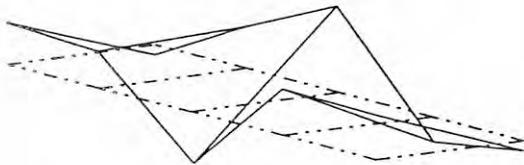
1. Torsionseigenform  $f=7$  Hz



2. Biegeeigenform  $f=11$  Hz

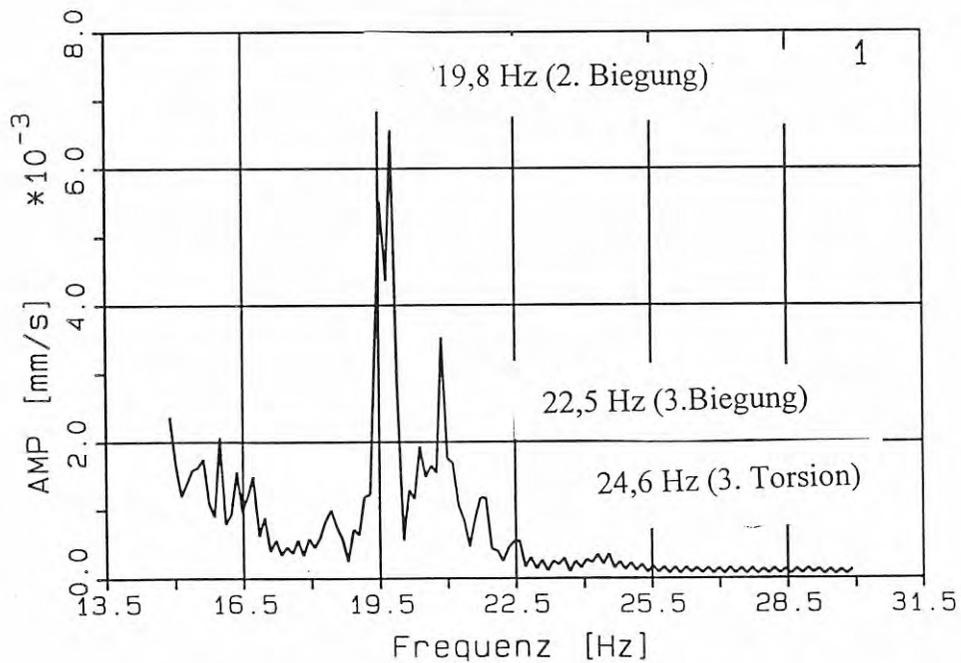
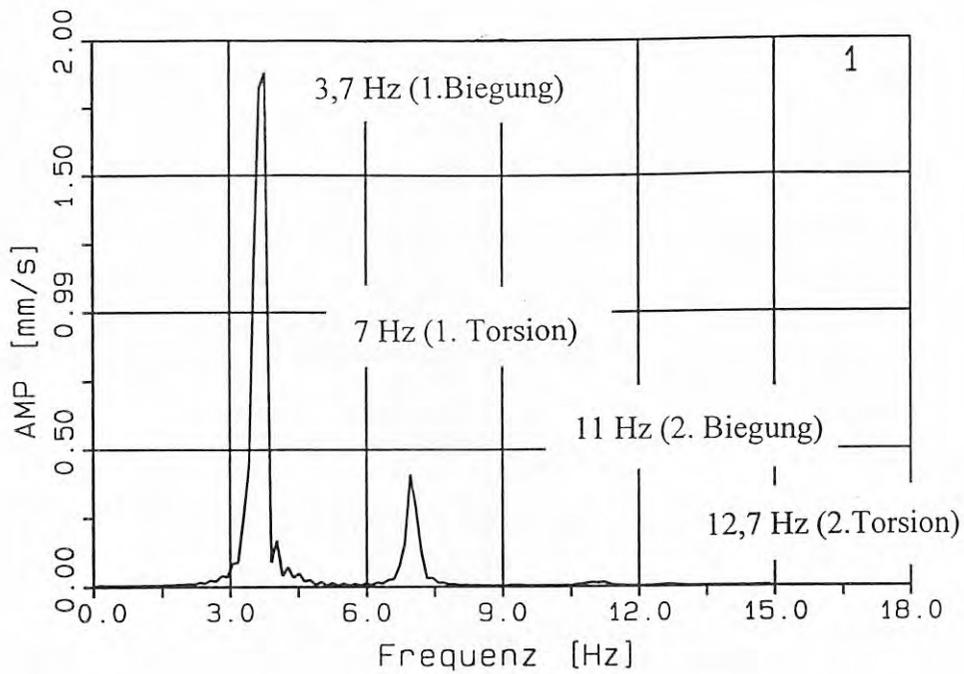


2. Torsionseigenform  $f=12,7$  Hz



3. Torsionseigenform  $f=24,6$  Hz

B 2.2 - Eigenfrequenzen der Brücke im gemittelten Spektrum verschiedener Ausschwingungsvorgänge



B A M B E R L I N

Laboratorium 2.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

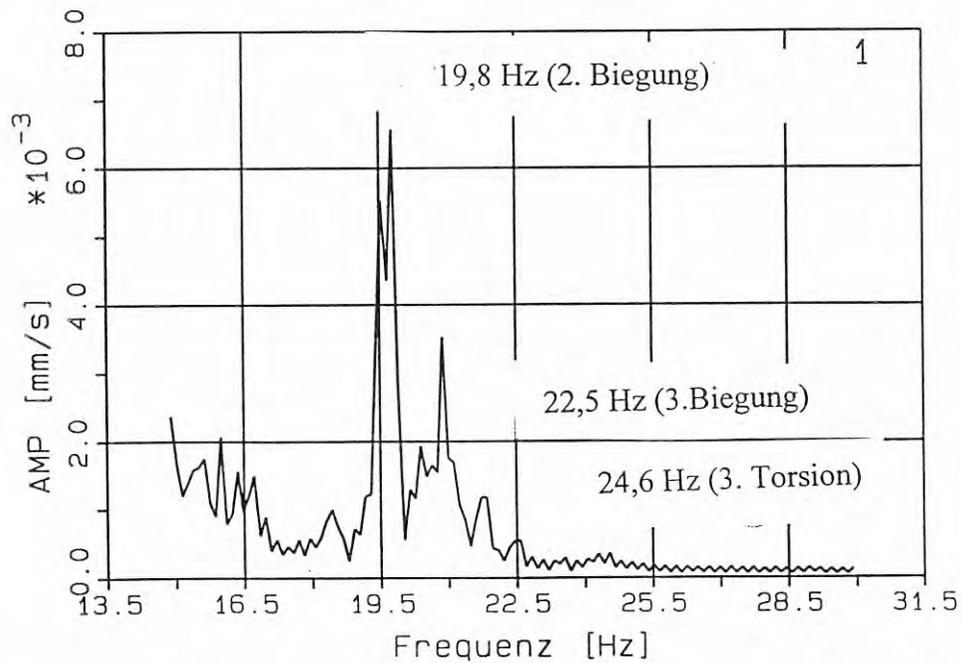
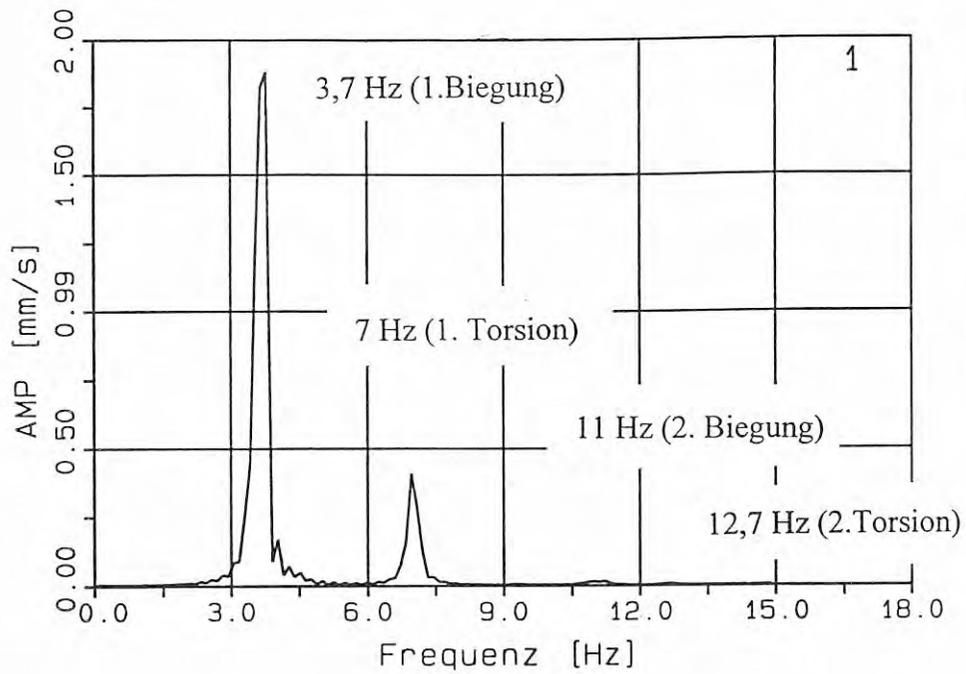
BLATT

## Anlage C

### Terzspektren bei den Versuchsfahrten

- C 1.1 - C 1.3 Verschiedene Fahrwegpunkte bei  $v = 160$  km/h an den Meßstationen Ebene, Brücke und Tunnel
- C 1.4 - C 1.6 Schienenschwingungen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten an den Meßstationen Ebene, Brücke, Tunnel
- C 2.1 - C 2.9 Bodenschwingungen in verschiedenen Entfernungen, jeweils ein Bild für jede Fahrgeschwindigkeit
- C 2.10 - C 2.11 Bodenschwingungen im Abstand von 17 m für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten, Meßstationen Ebene und Tunnel
- C 3.1 - C 3.12 Fahrzeugschwingungen in der Ebene bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, jeweils ein Bild für jeden Meßpunkt
- C 3.13 - C 3.18 Fahrzeugschwingungen auf der Brücke bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, für je zwei Radsatz-, Drehgestell- und Wagenkastenmeßpunkte
- C 3.19 - C 3.24 Fahrzeugschwingungen im Tunnel bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, für je zwei Radsatz-, Drehgestell- und Wagenkastenmeßpunkte

B 2.2 - Eigenfrequenzen der Brücke im gemittelten Spektrum verschiedener Ausschwingungsvorgänge



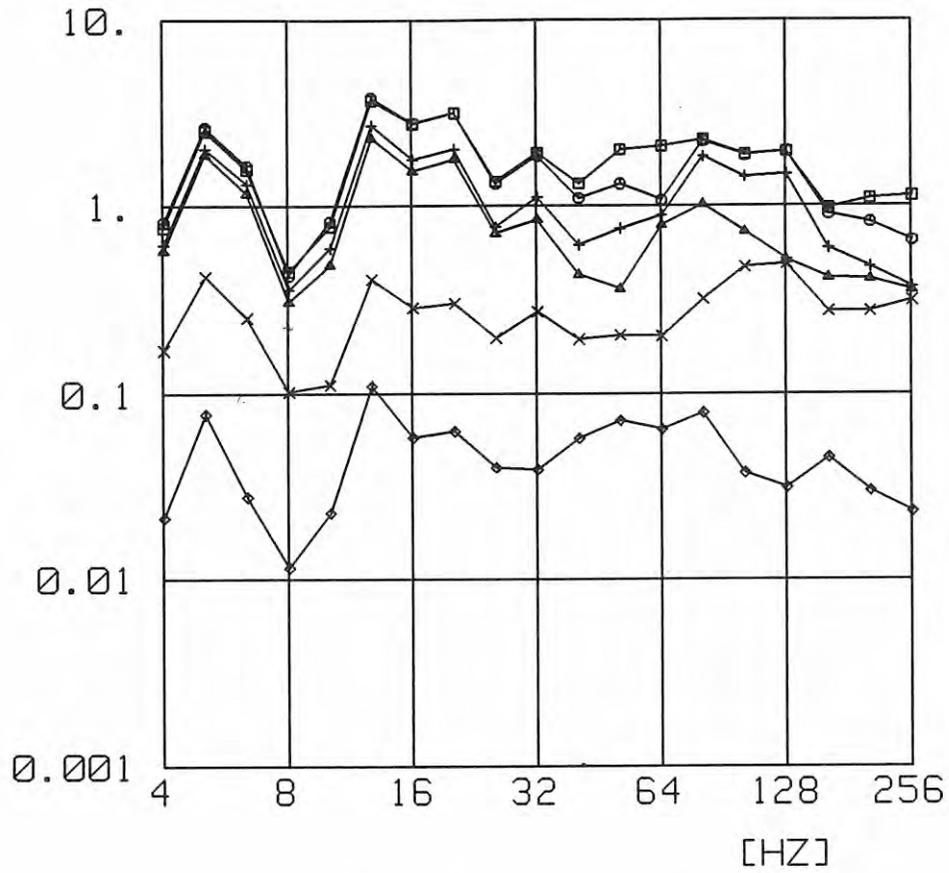
B A M B E R L I N

Laboratorium 2.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

BLATT

# C 1.1

[MM/S]



- Schiene Mitte
- Schiene Auflager
- △ Schwelle S1
- + Schwelle S3
- × Schwelle H
- ◇ Boden 2.5 m

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

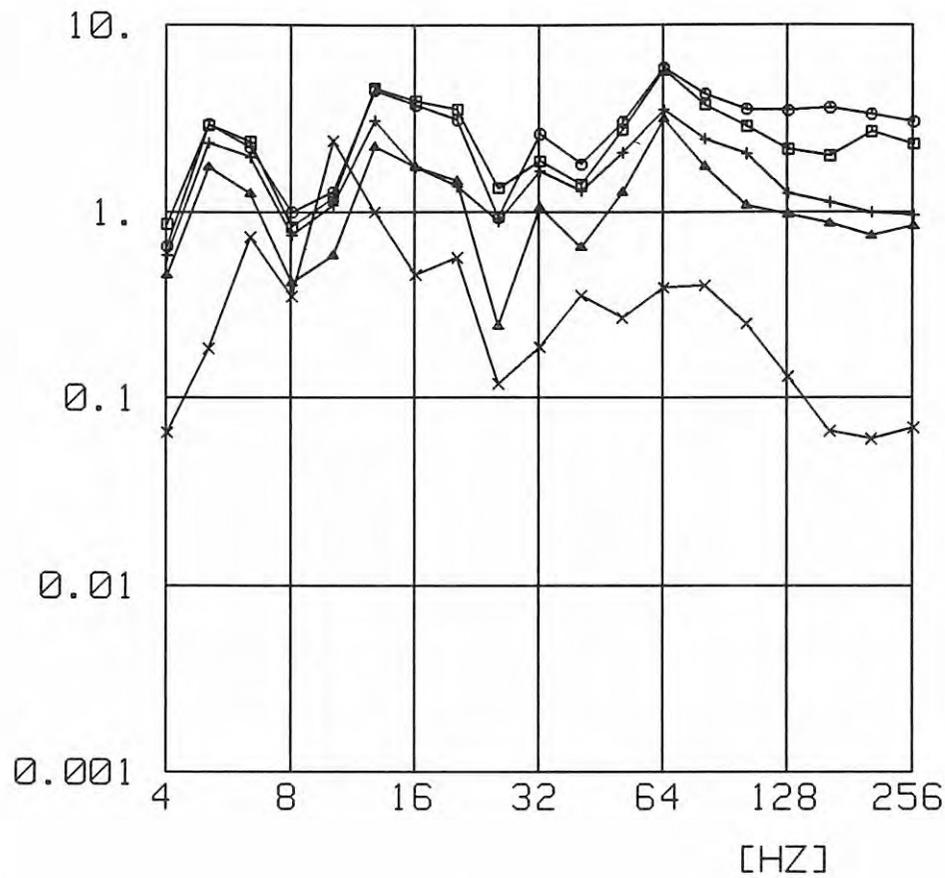
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Fahrweg Ebene, 160 km/h

BLATT NR.

C 1.2

[MM/S]



- Schiene Mitte
- Schiene Auflager
- △ Schwelle K11
- + Schwelle S3
- × Brueckendrittel S

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDSDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

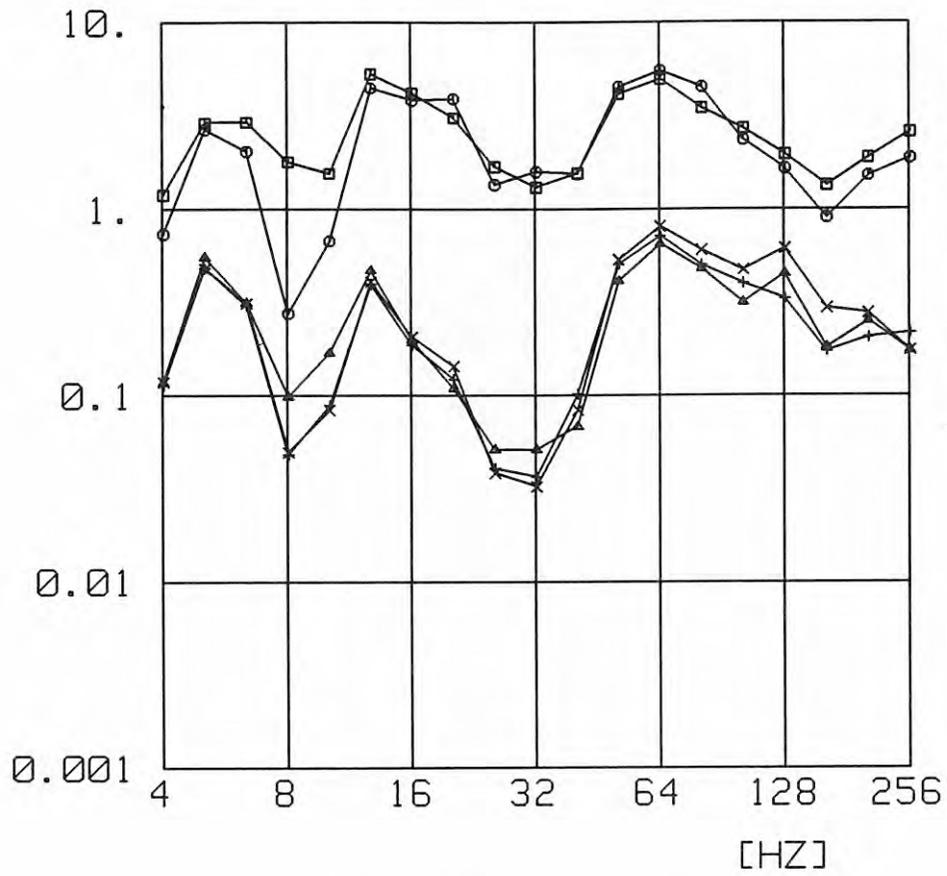
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Fahrweg Bruecke, 160 km/h

BLATT NR.

C 1.3

[MM/S]



- Schiene Mitte
- Schiene Auflager
- △ Schwelle S1
- + Schwelle S3
- × Tragplatte

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

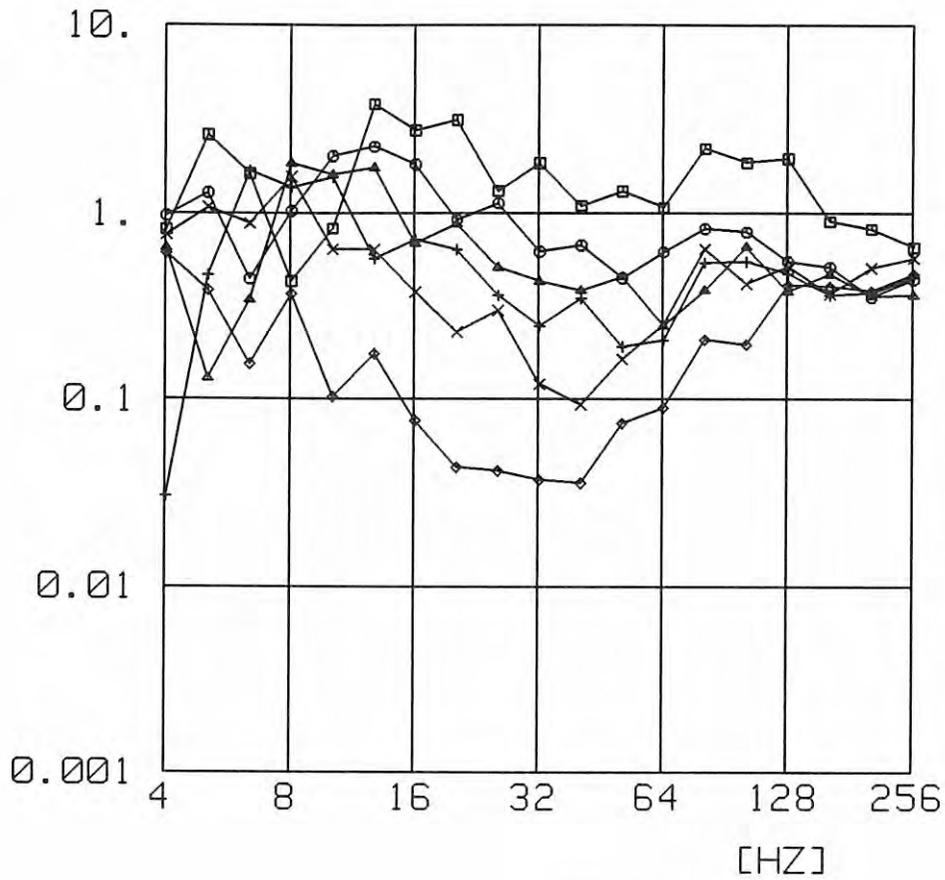
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Fahrweg Tunnel, 160 km/h

BLATT NR.

C1.4

[MM/S]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H
- ◇ 40 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

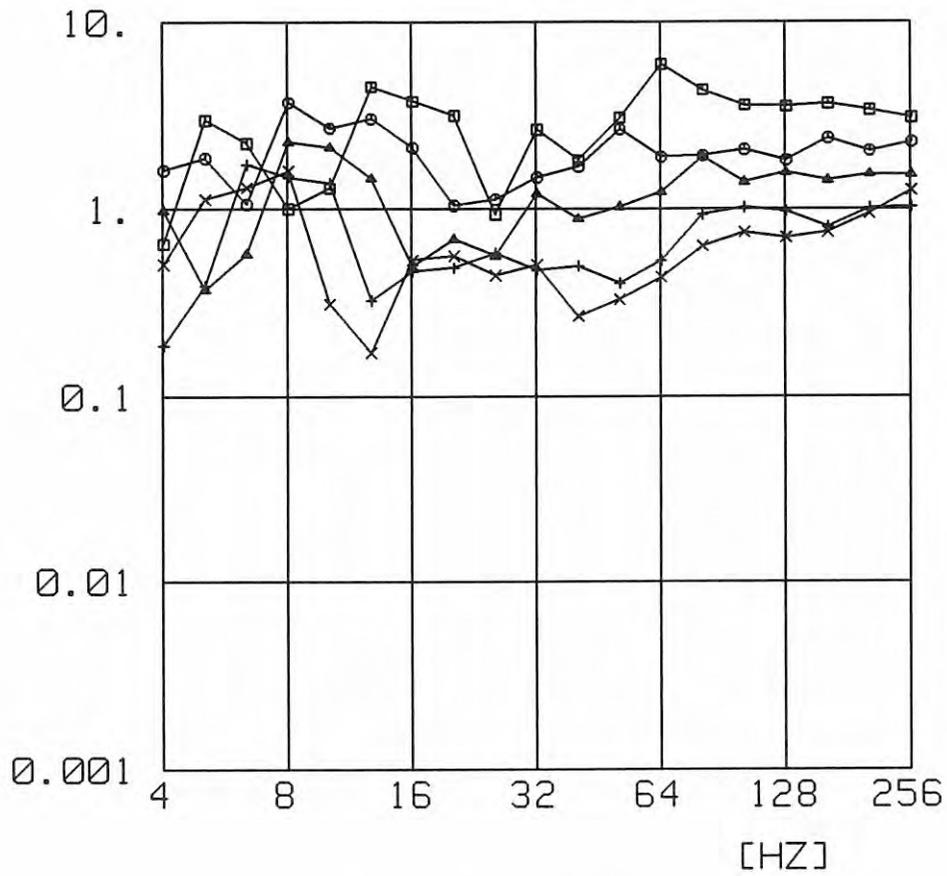
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Fahrweg Ebene, Schiene S5

BLATT NR.

C 1.5

[MM/S]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

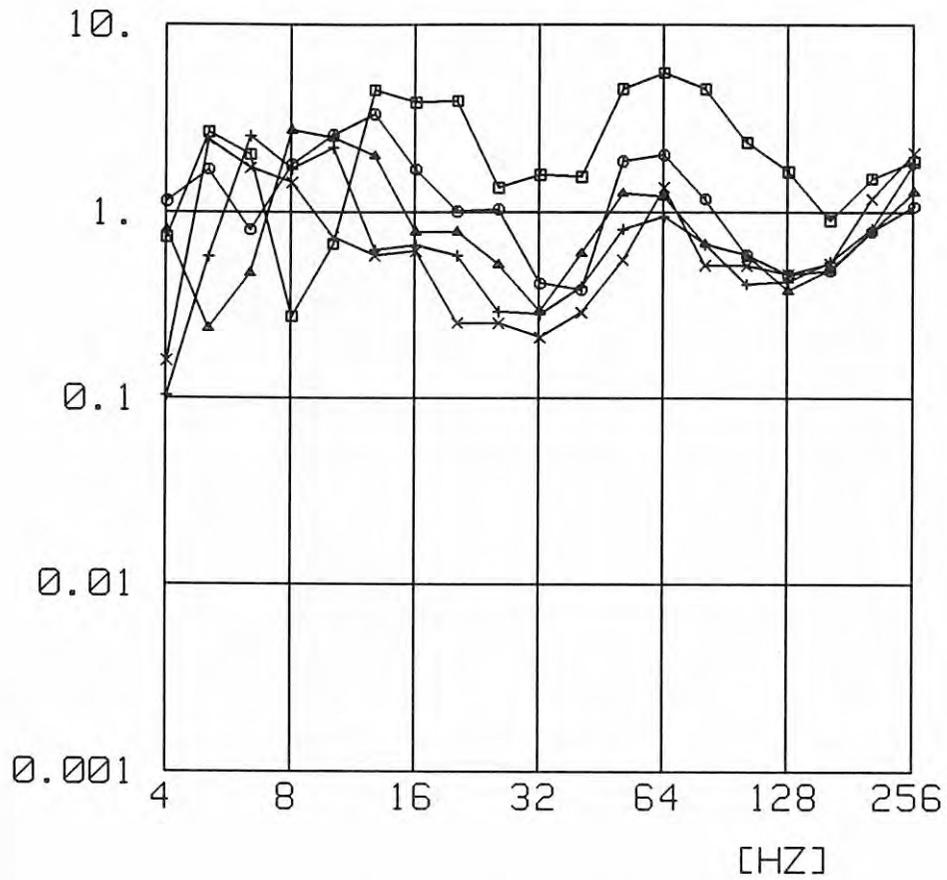
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Fahrweg Bruecke, Schiene S5

BLATT NR.

C 1.6

[MM/S]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

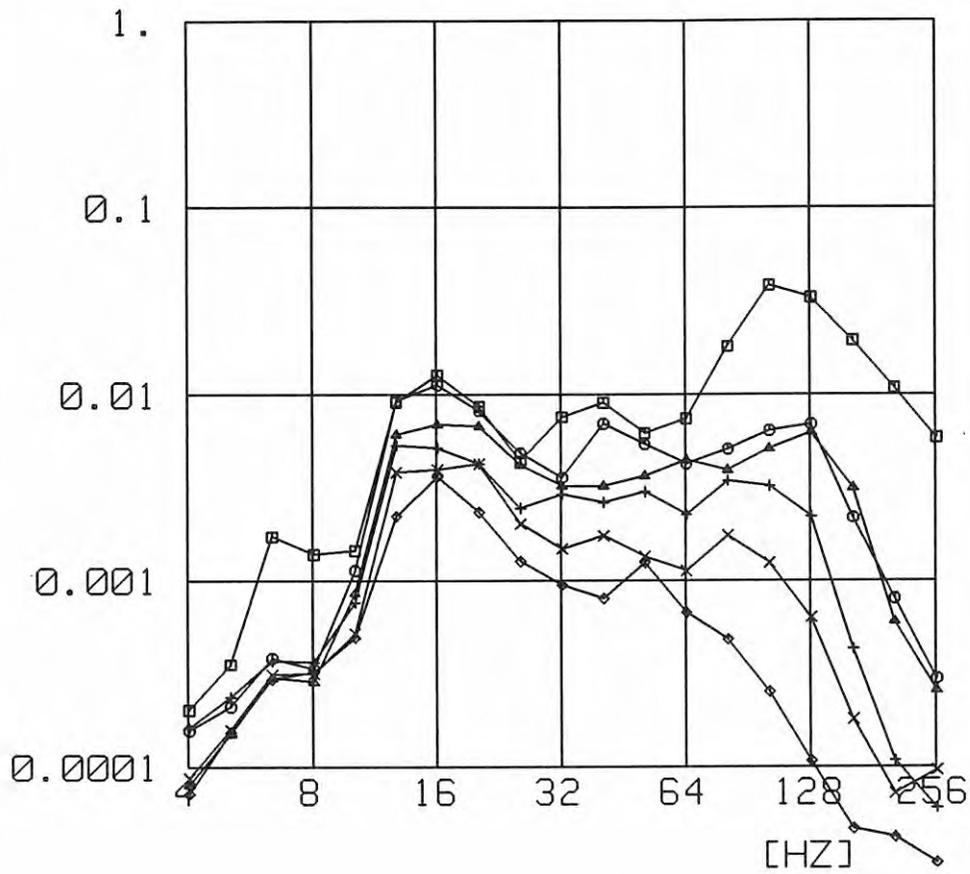
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Fahrweg Tunnel, Schiene S5

BLATT NR.

C 2.1

[MM/S]



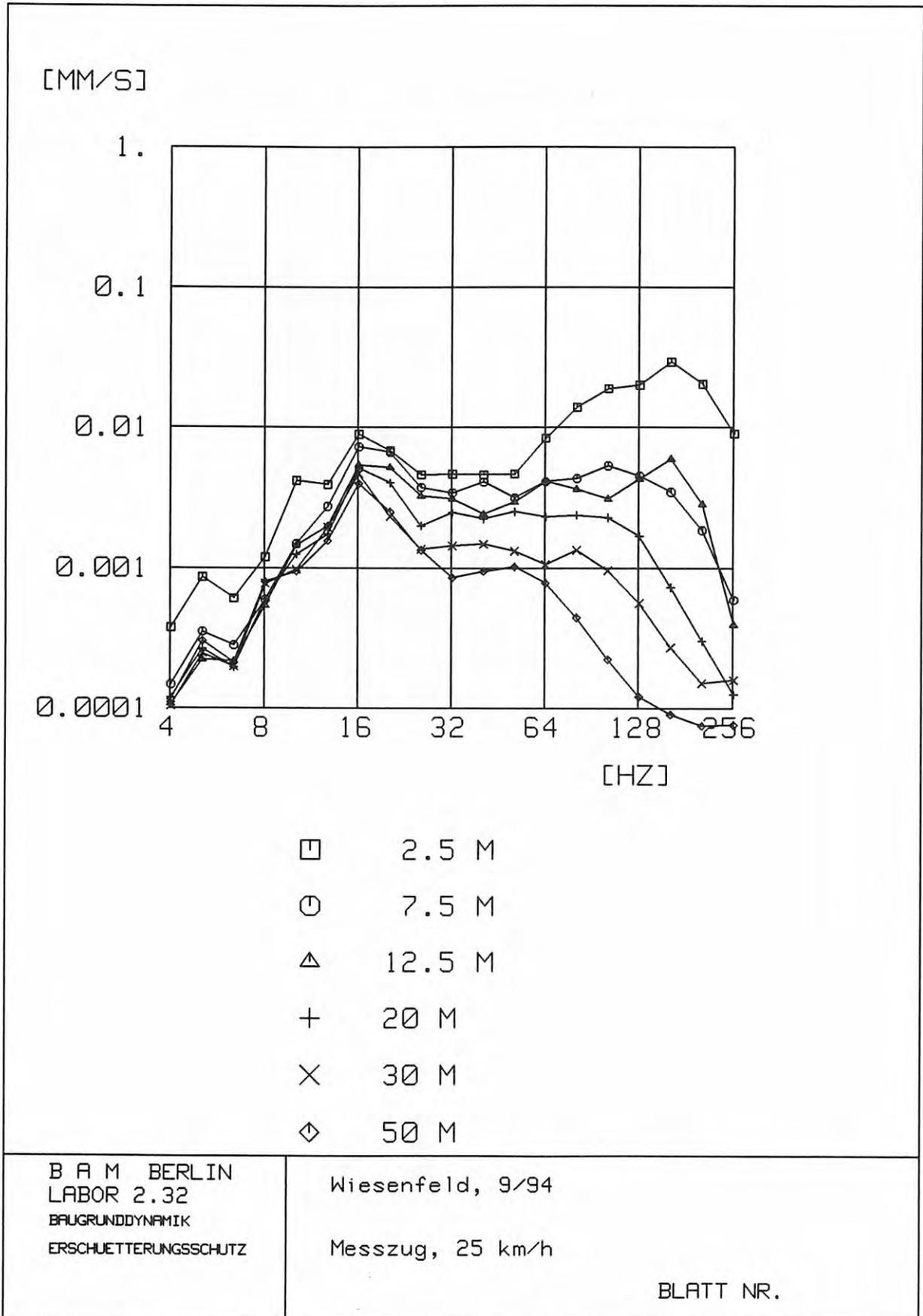
- 2.5 M
- 7.5 M
- △ 12.5 M
- + 20 M
- × 30 M
- ◇ 50 M

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94

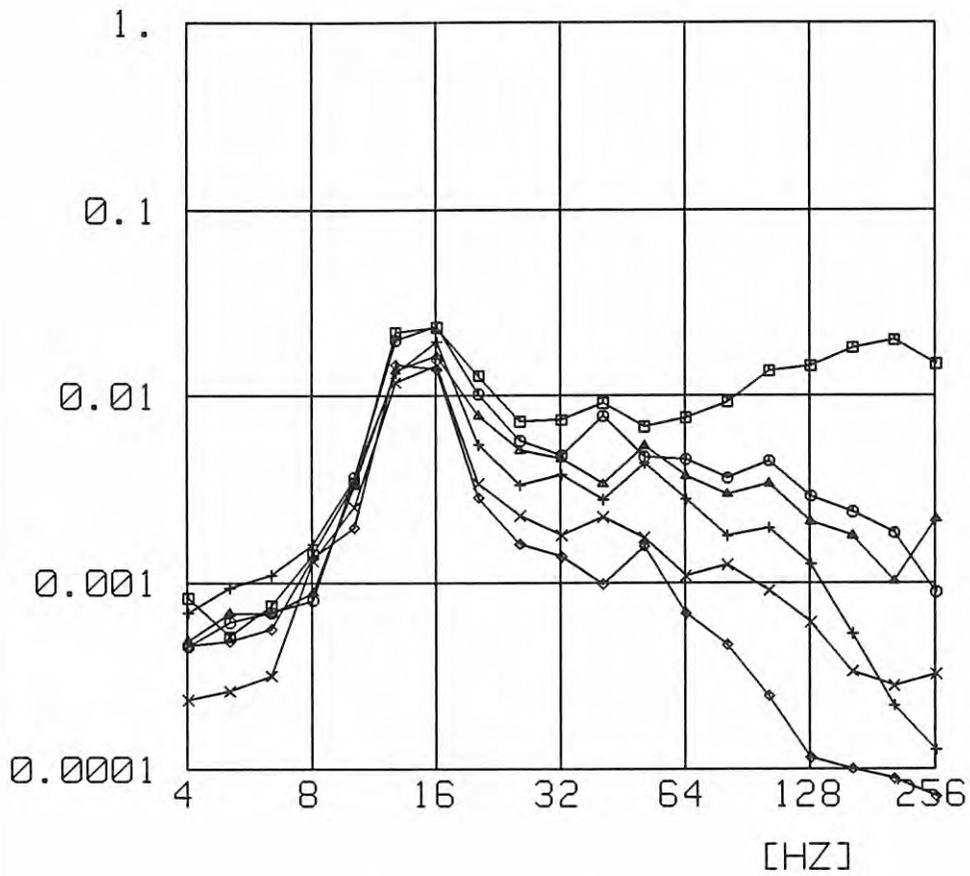
Messzug, 16 km/h

BLATT NR.



C 2.3

[MM/S]



- 2.5 M
- 7.5 M
- △ 12.5 M
- + 20 M
- × 30 M
- ◇ 50 M

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

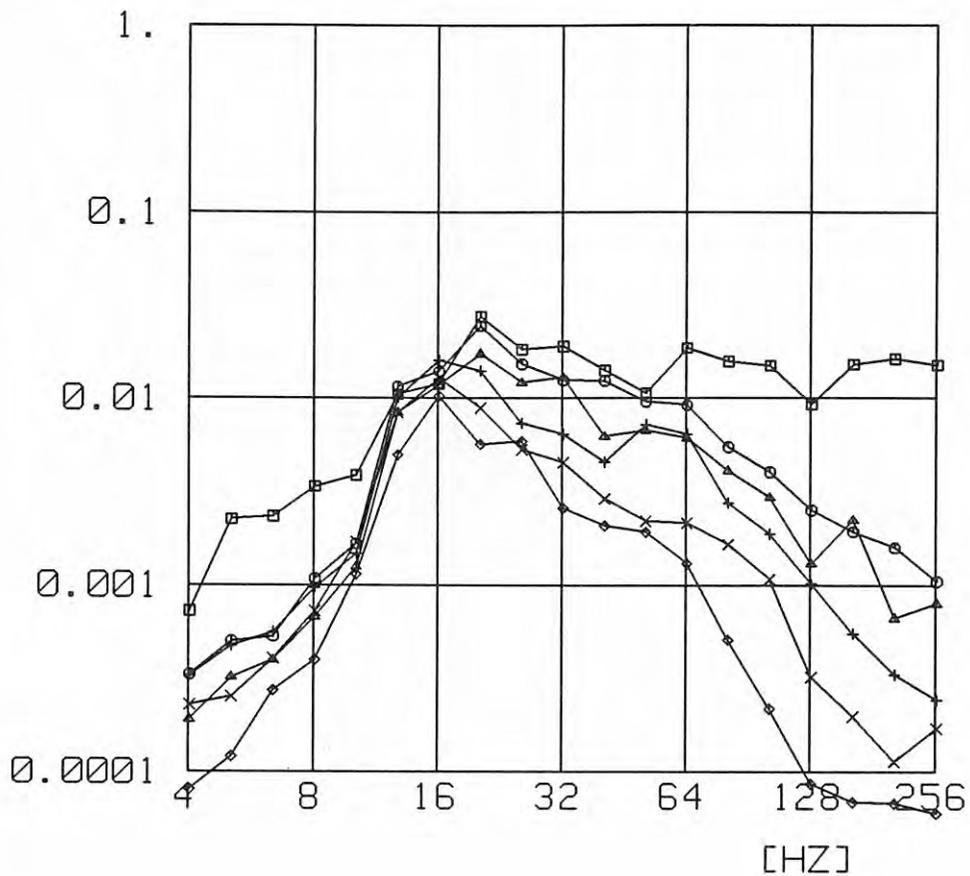
Wiesenfeld, 9/94

Messzug, 40 km/h

BLATT NR.

C 2.4

[MM/S]



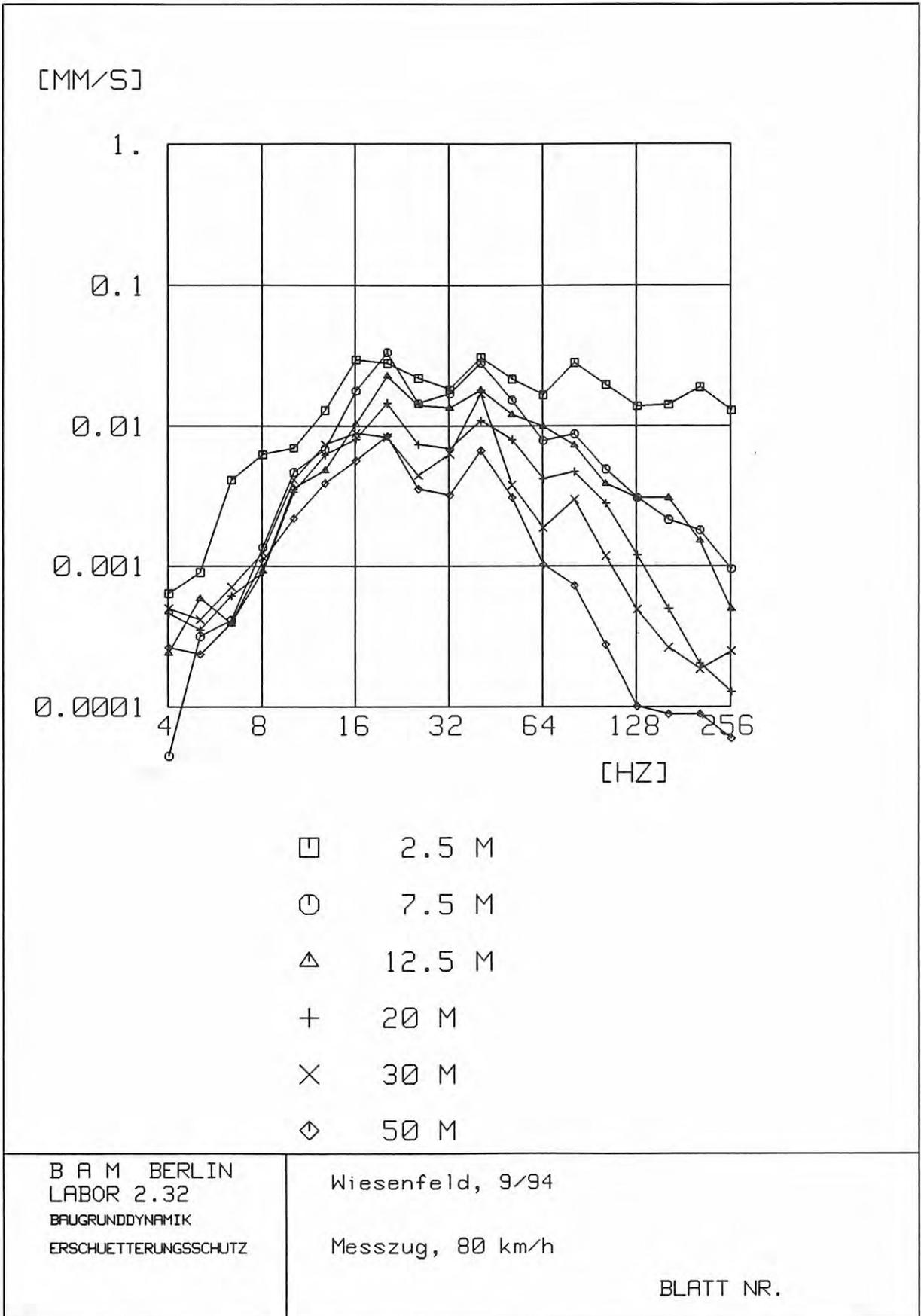
- 2.5 M
- 7.5 M
- △ 12.5 M
- + 20 M
- × 30 M
- ◇ 50 M

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94

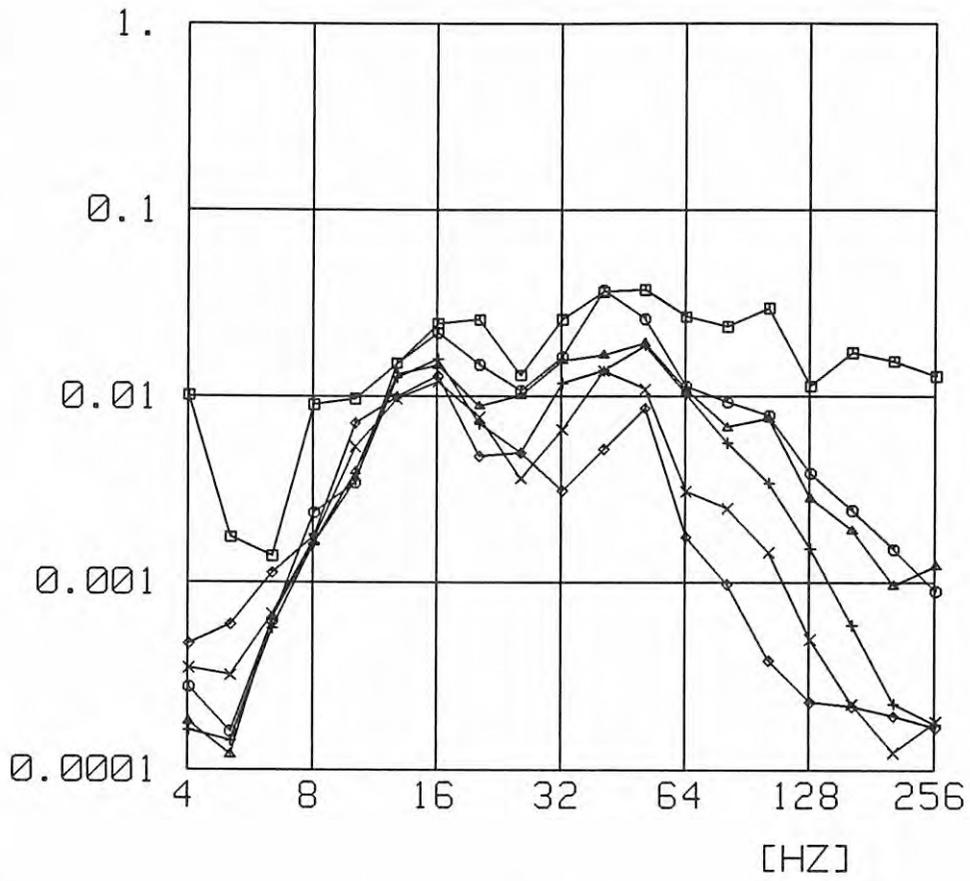
Messzug, 63 km/h

BLATT NR.



C 2.6

[MM/S]



- 2.5 M
- 7.5 M
- △ 12.5 M
- + 20 M
- × 30 M
- ◇ 50 M

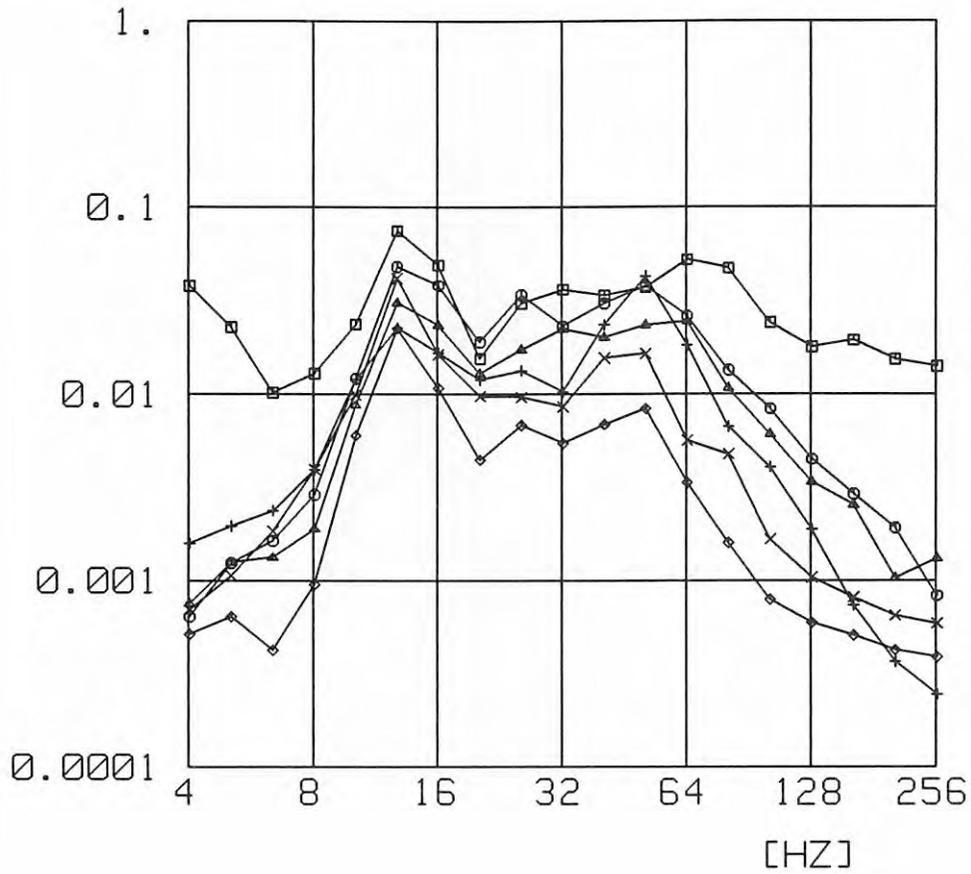
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94  
 Messzug, 100 km/h

BLATT NR.

C 2.7

[MM/S]



□ 2.5 M

○ 7.5 M

△ 12.5 M

+ 20 M

× 30 M

◇ 50 M

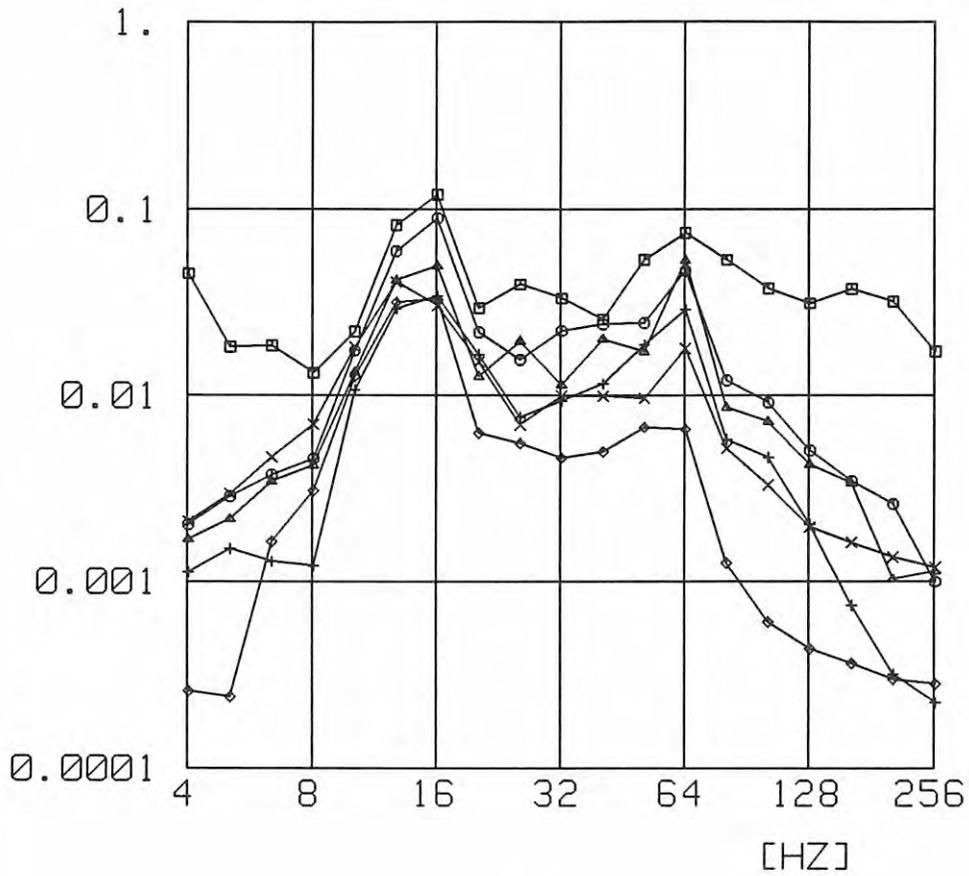
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94

Messzug, 125 km/h

BLATT NR.

[MM/S]



- 2.5 M
- 7.5 M
- △ 12.5 M
- + 20 M
- × 30 M
- ◇ 50 M

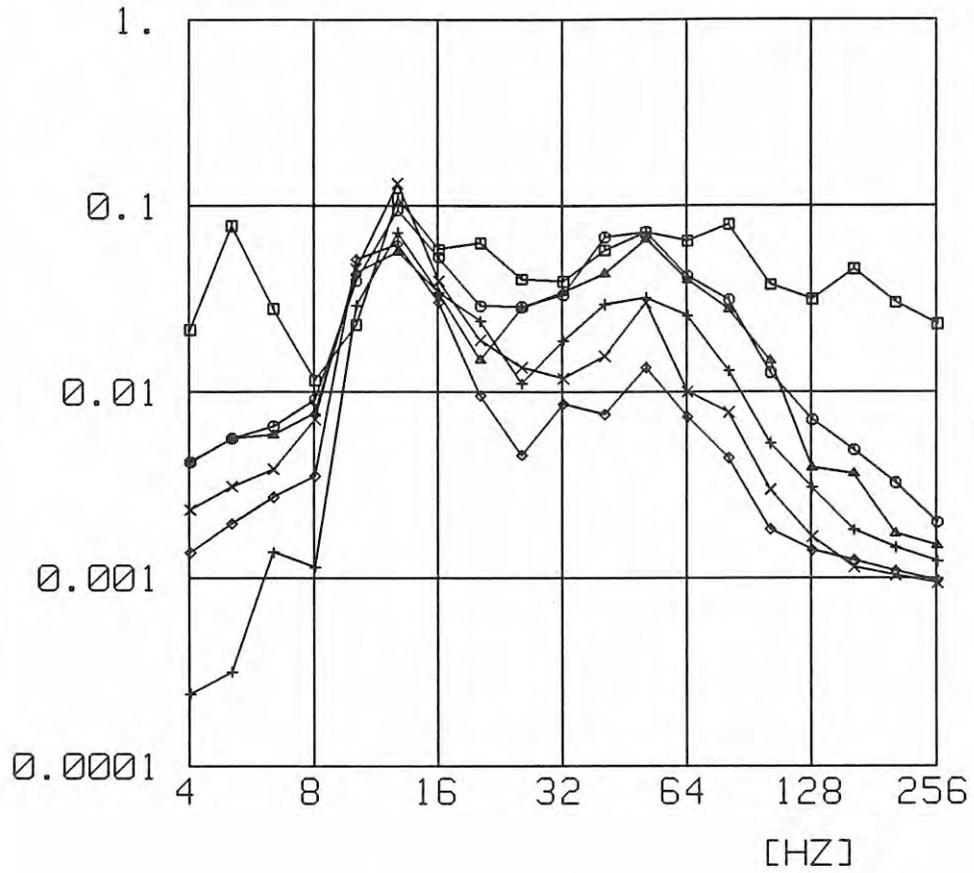
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94

Messzug, 140 km/h

BLATT NR.

[MM/S]



- 2.5 M
- 7.5 M
- △ 12.5 M
- + 20 M
- × 30 M
- ◇ 50 M

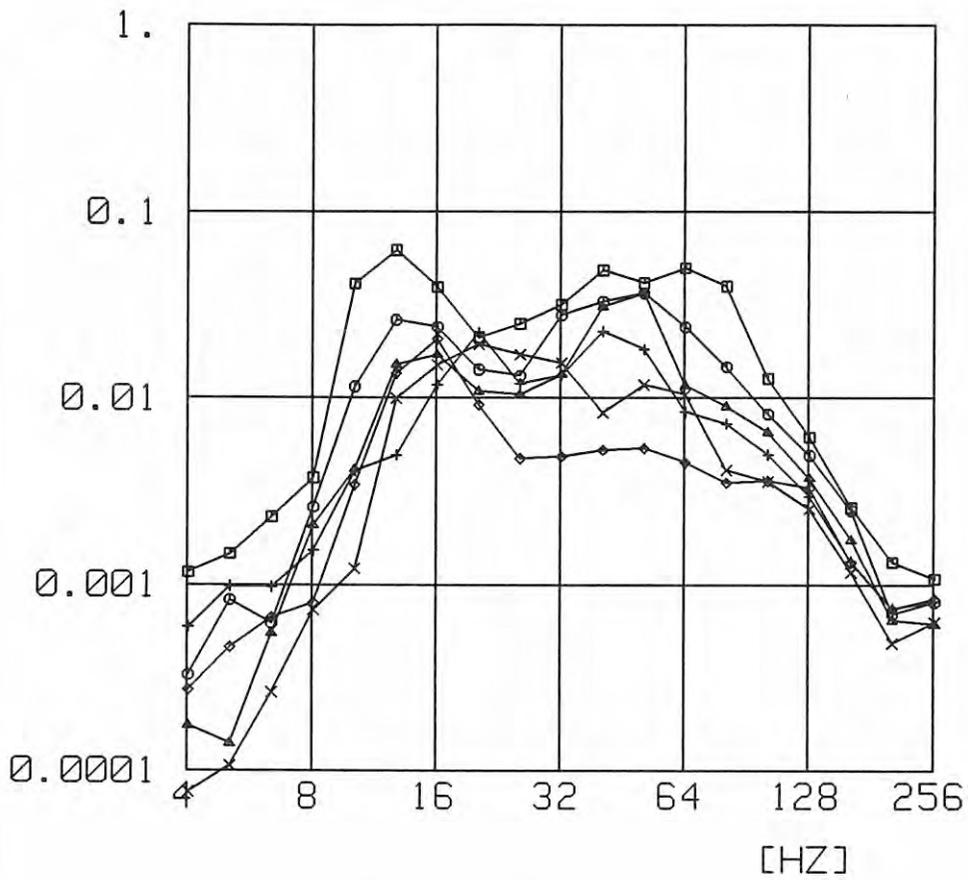
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesefeld, 9/94

Messzug, 160 km/h

BLATT NR.

[MM/S]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H
- ◇ 40 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

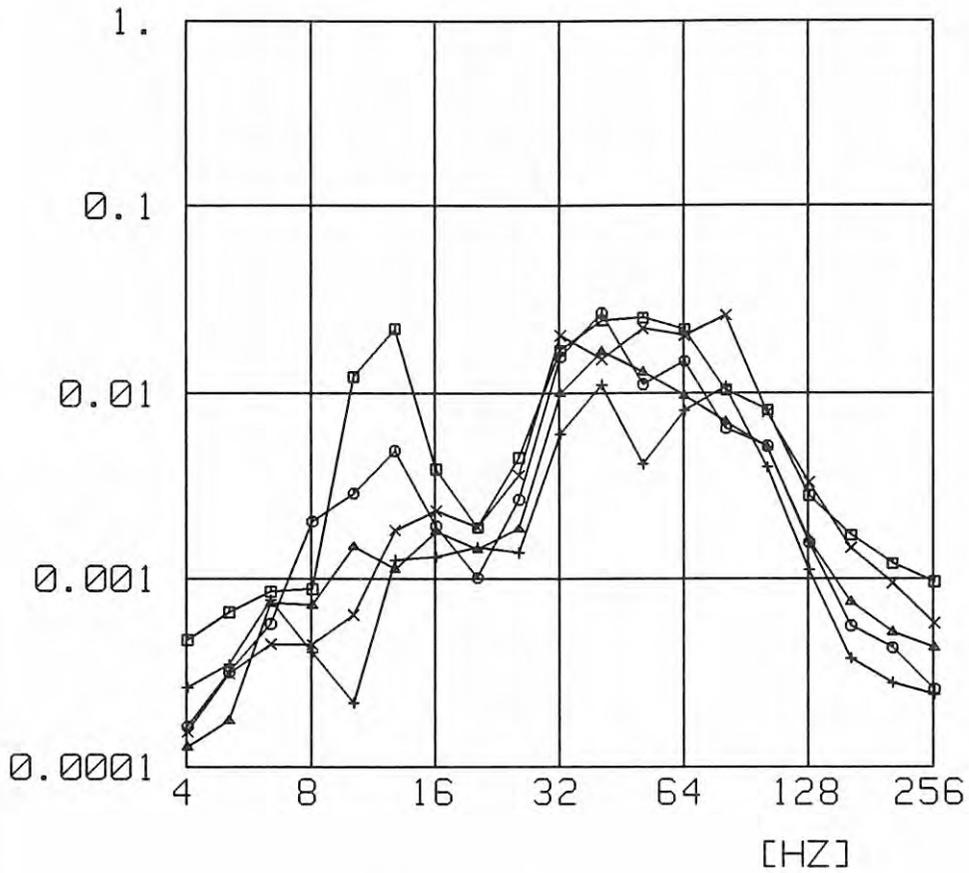
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, r=17.5m

BLATT NR.

C 2.11

[MM/S]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

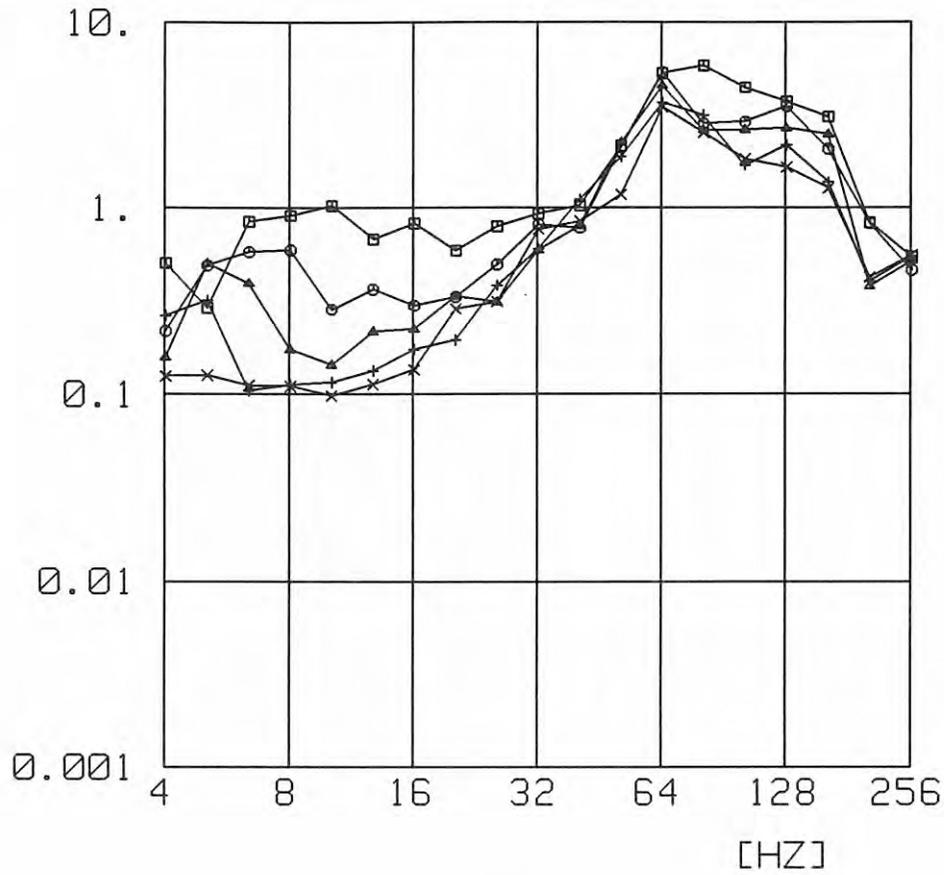
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, K13

BLATT NR.

### C 3.1

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

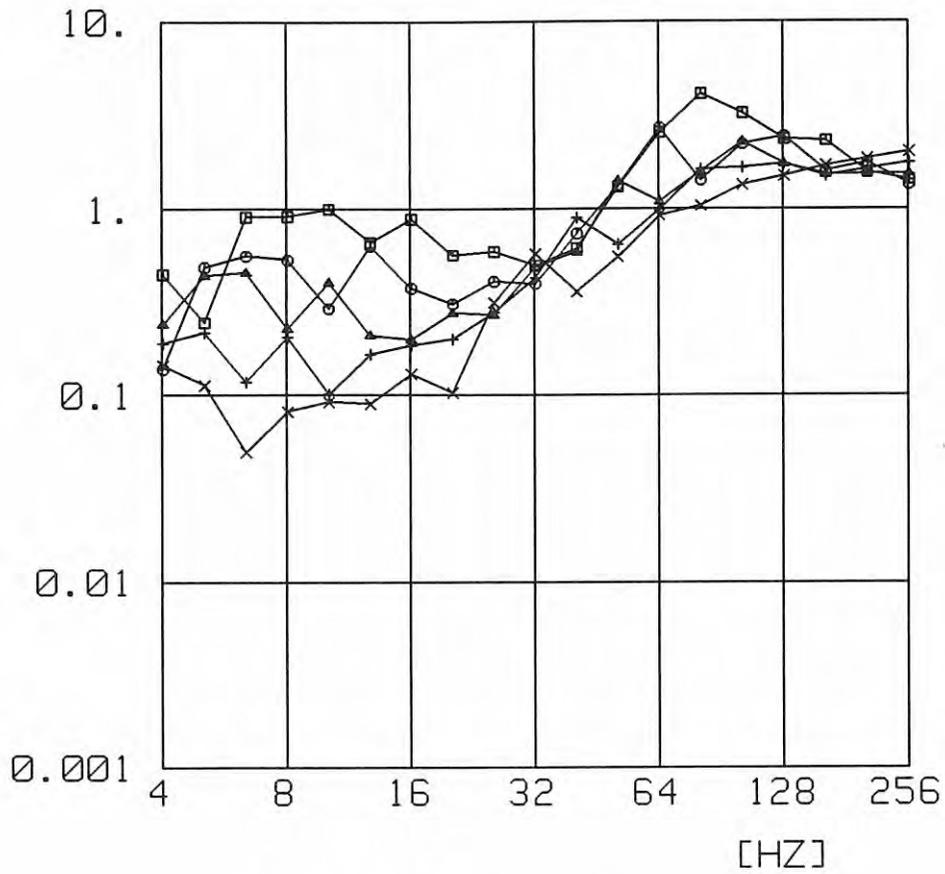
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Radsatz 1r

BLATT NR.

C 3.2

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

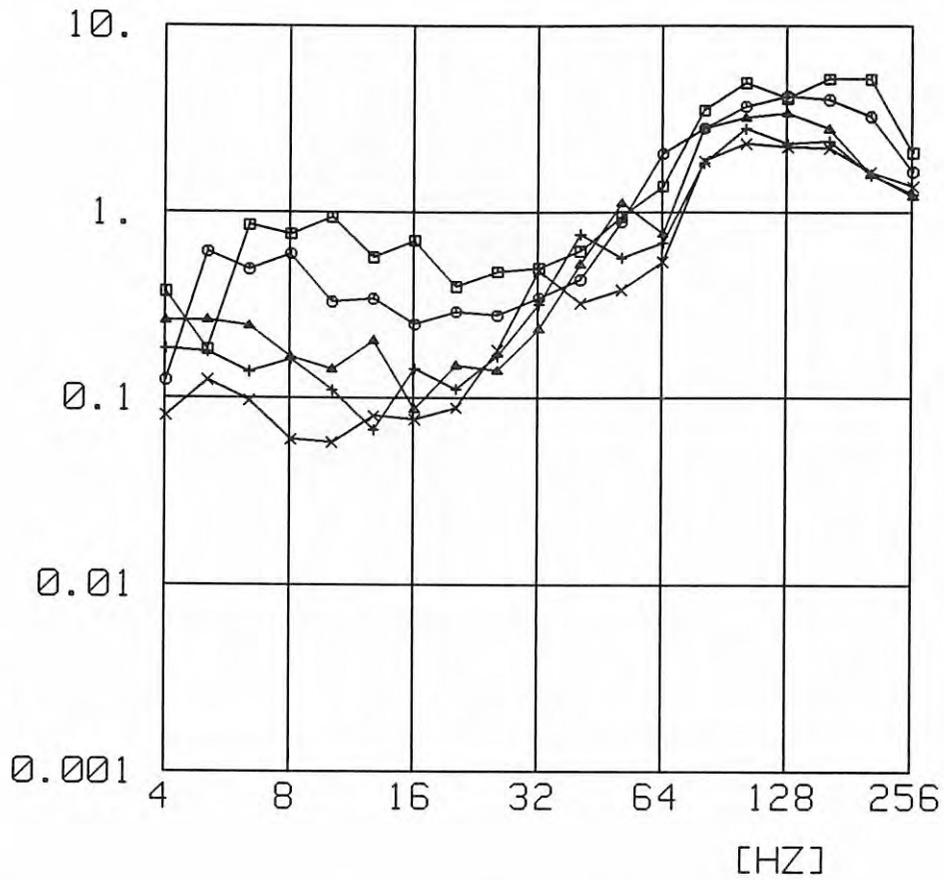
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Radsatz 2r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

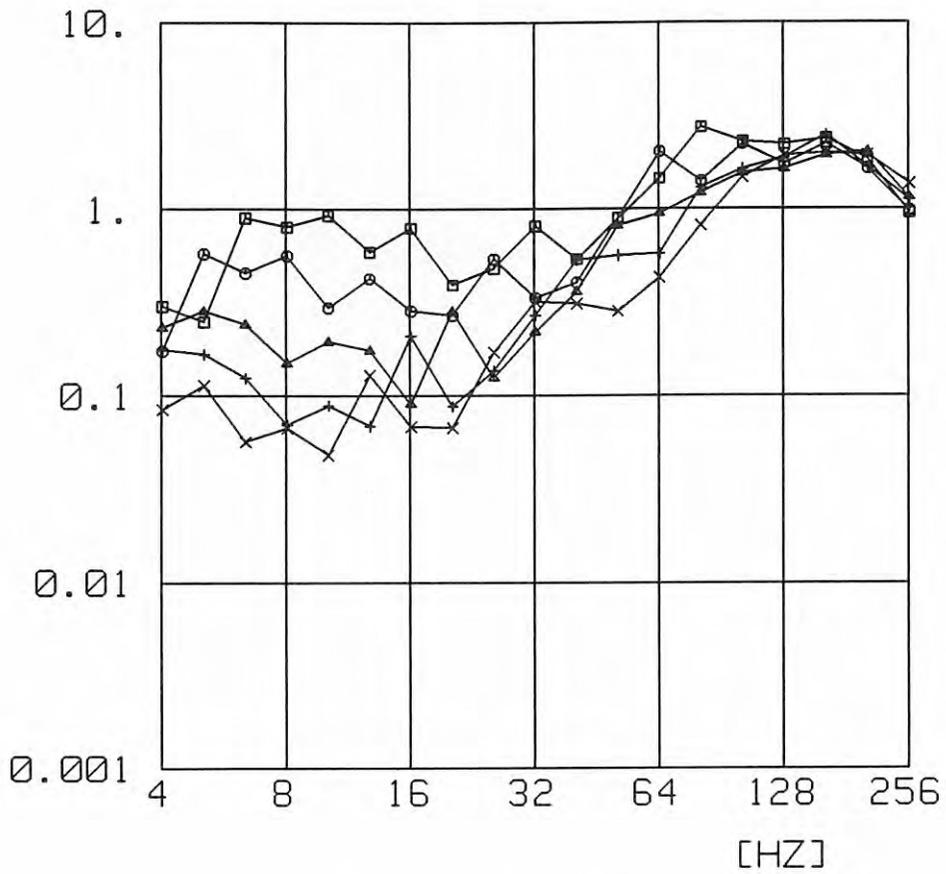
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Radsatz 11

BLATT NR.

C 3.4

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

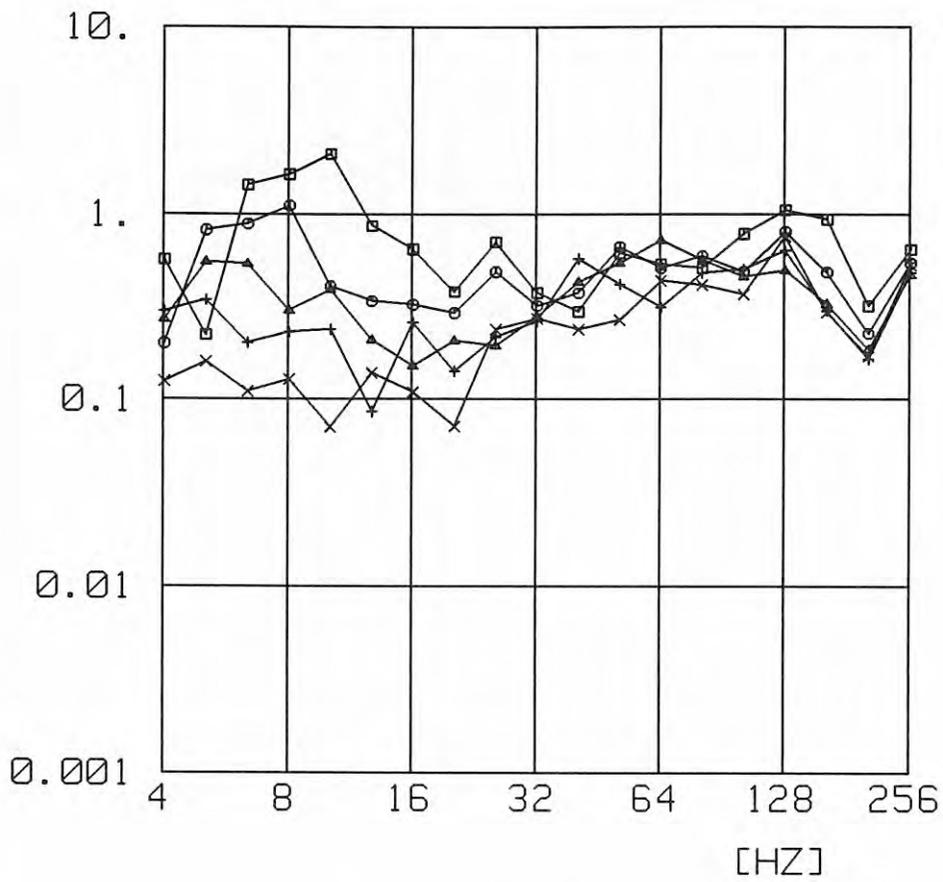
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Radsatz 21

BLATT NR.

C 3.5

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

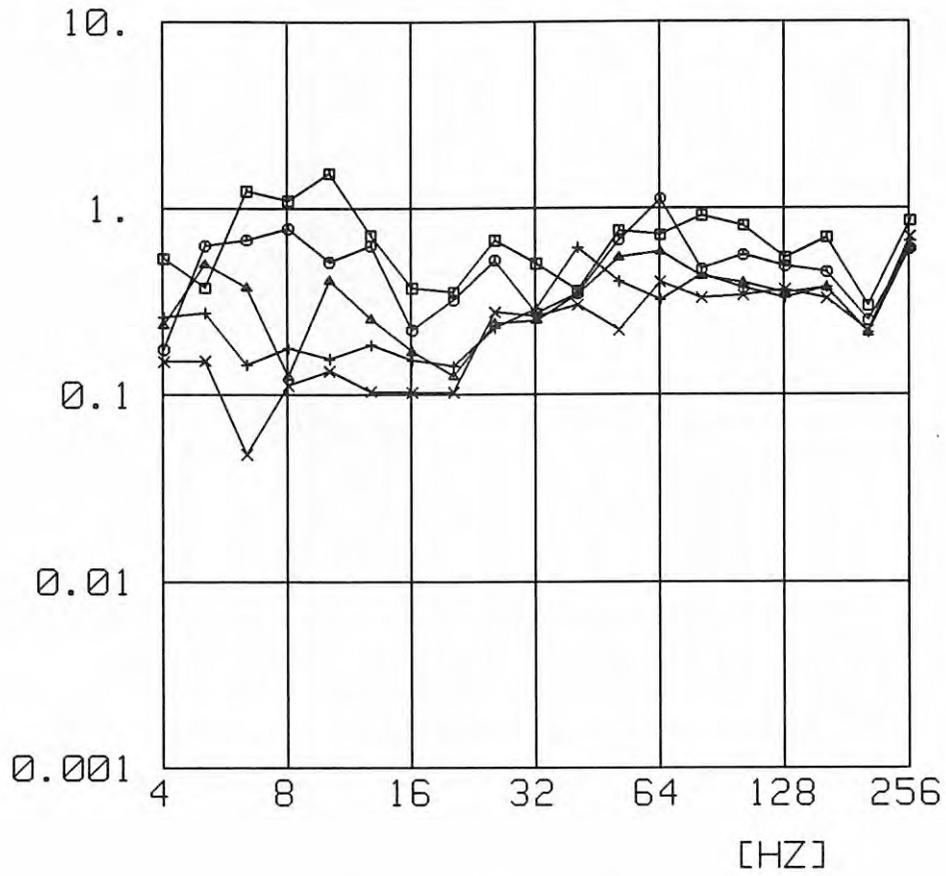
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Drehgestell 1r

BLATT NR.

C 3.6

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

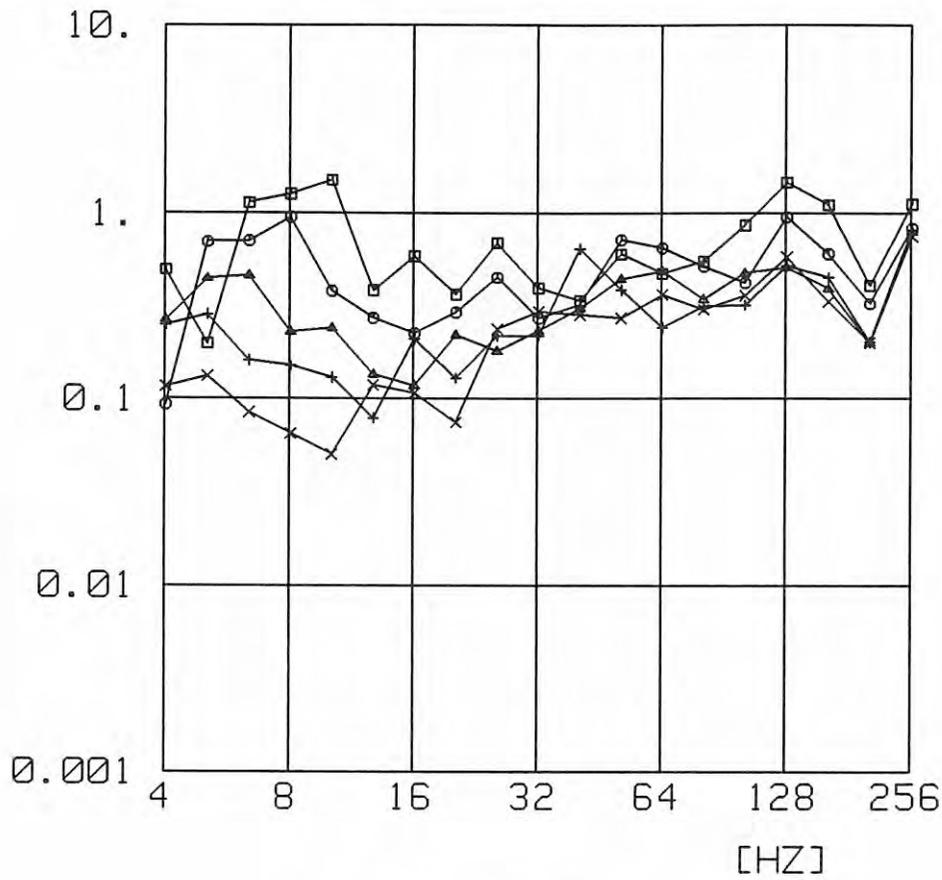
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Drehgestell 2r

BLATT NR.

C 3.7

[M/S<sup>2</sup>]



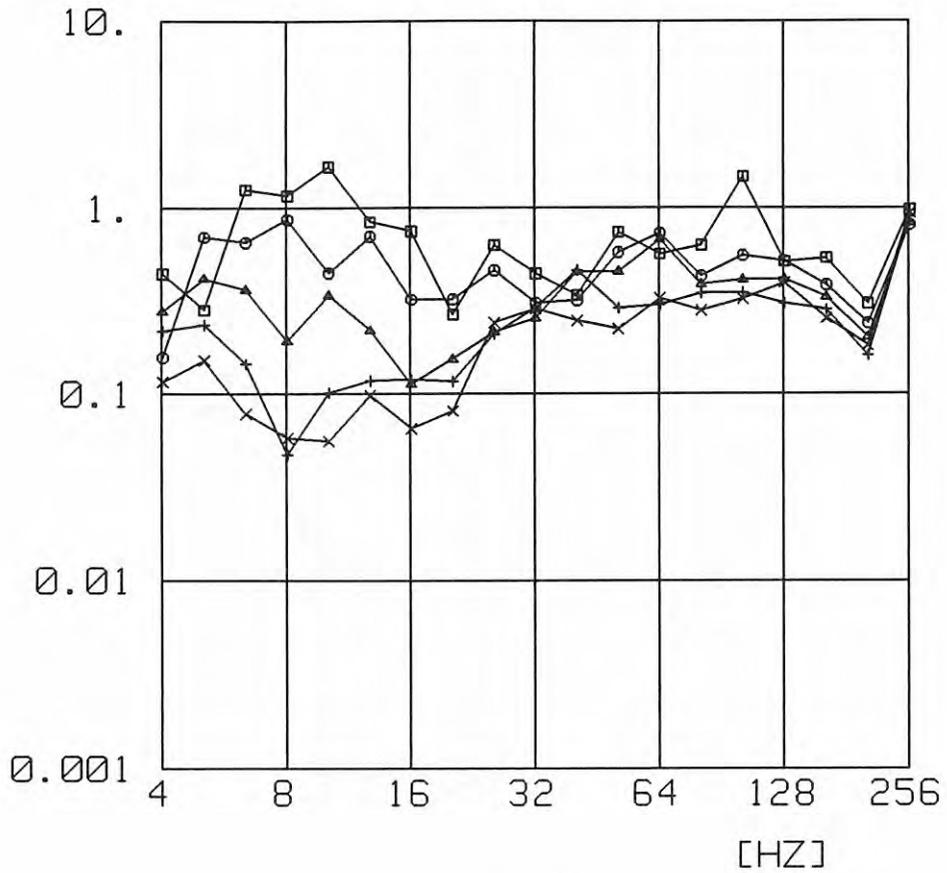
- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Drehgestell 11

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]

- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

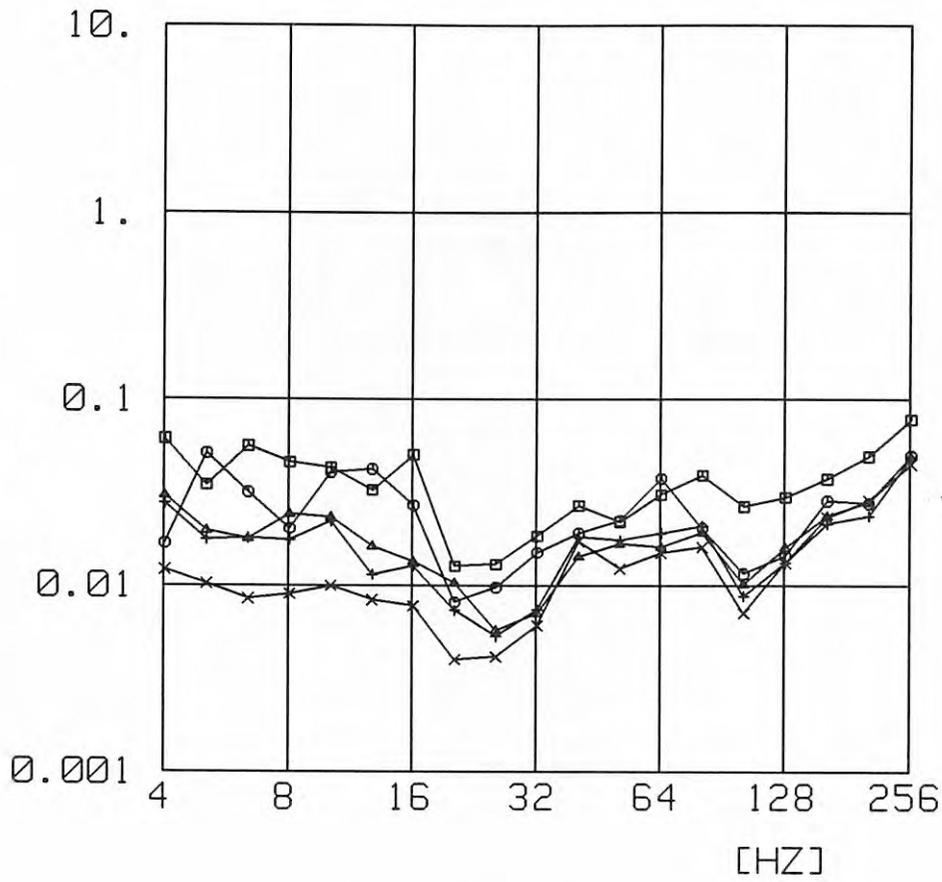
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Drehgestell 21

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

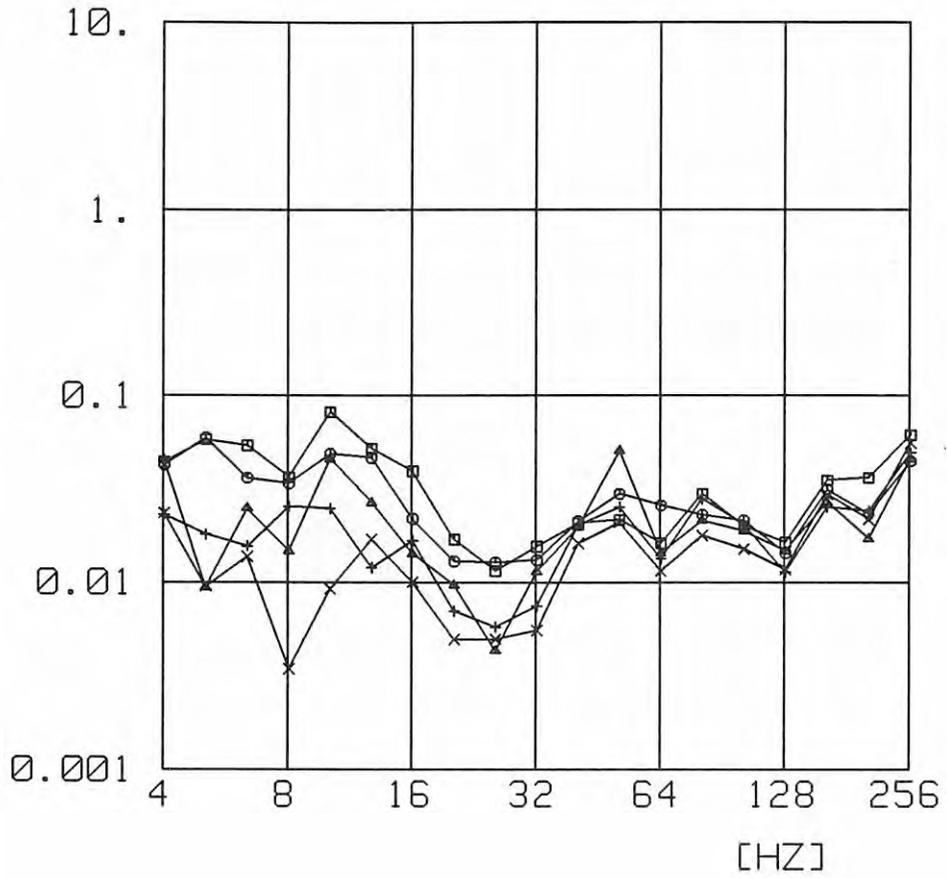
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Wagenkasten 1r

BLATT NR.

C 3.10

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

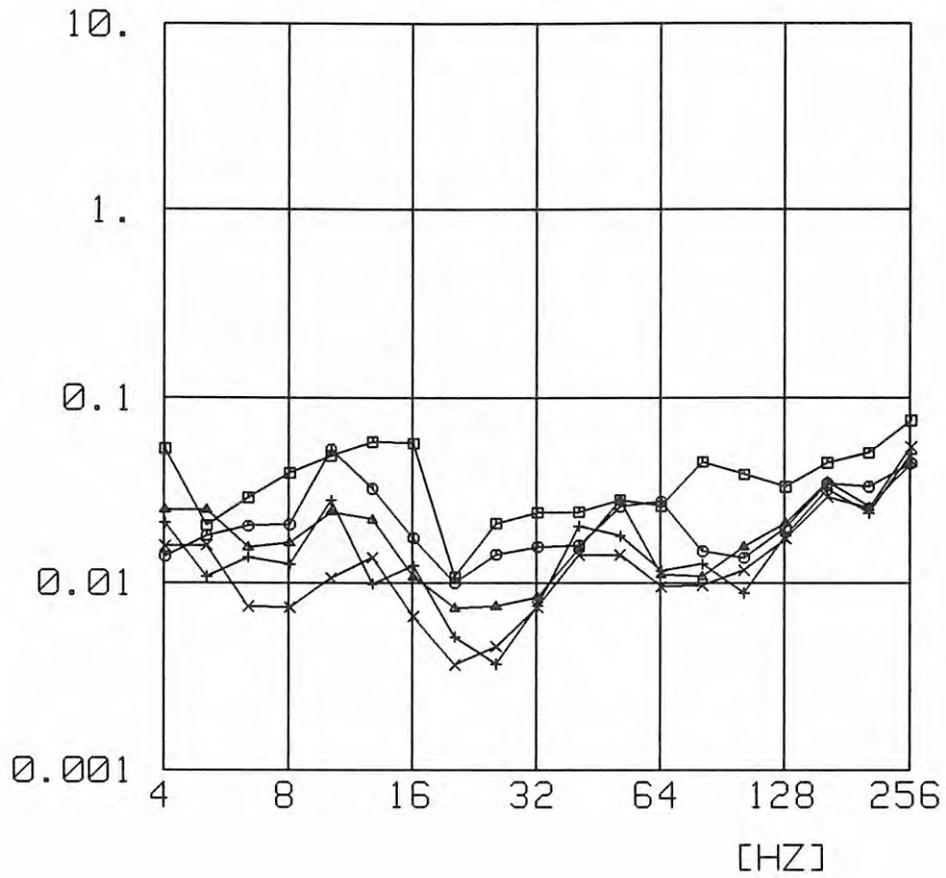
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Wagenkasten 2r

BLATT NR.

C 3.11

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

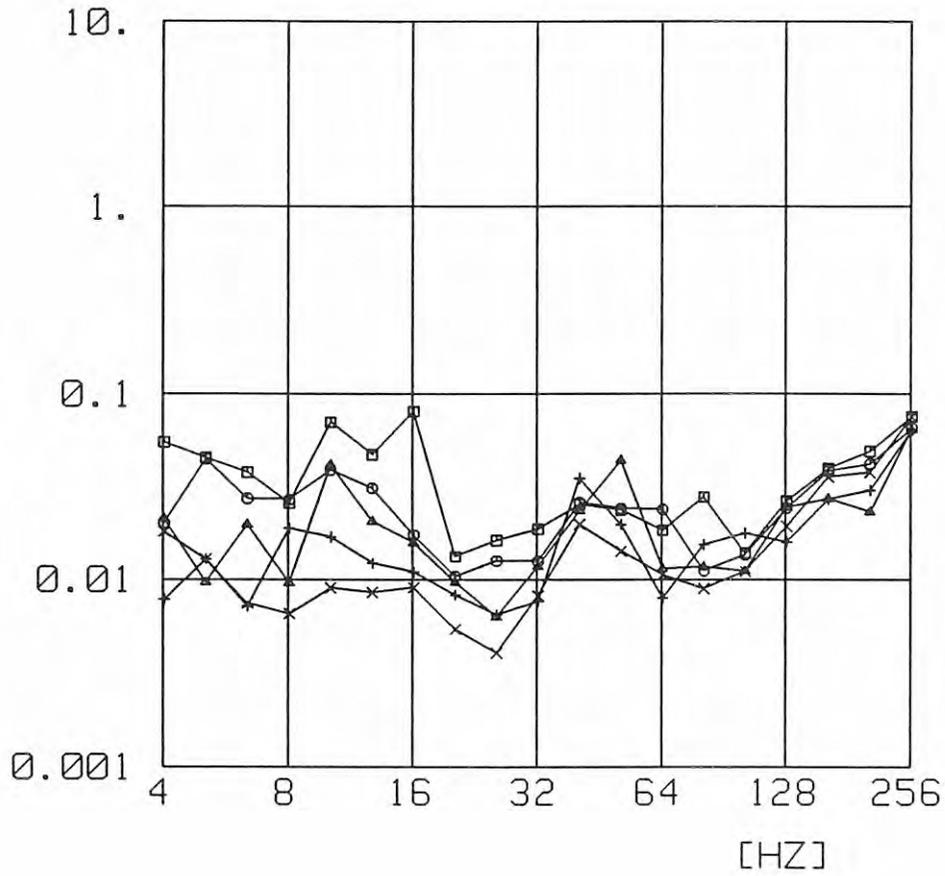
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Wagenkasten 11

BLATT NR.

C 3.12

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

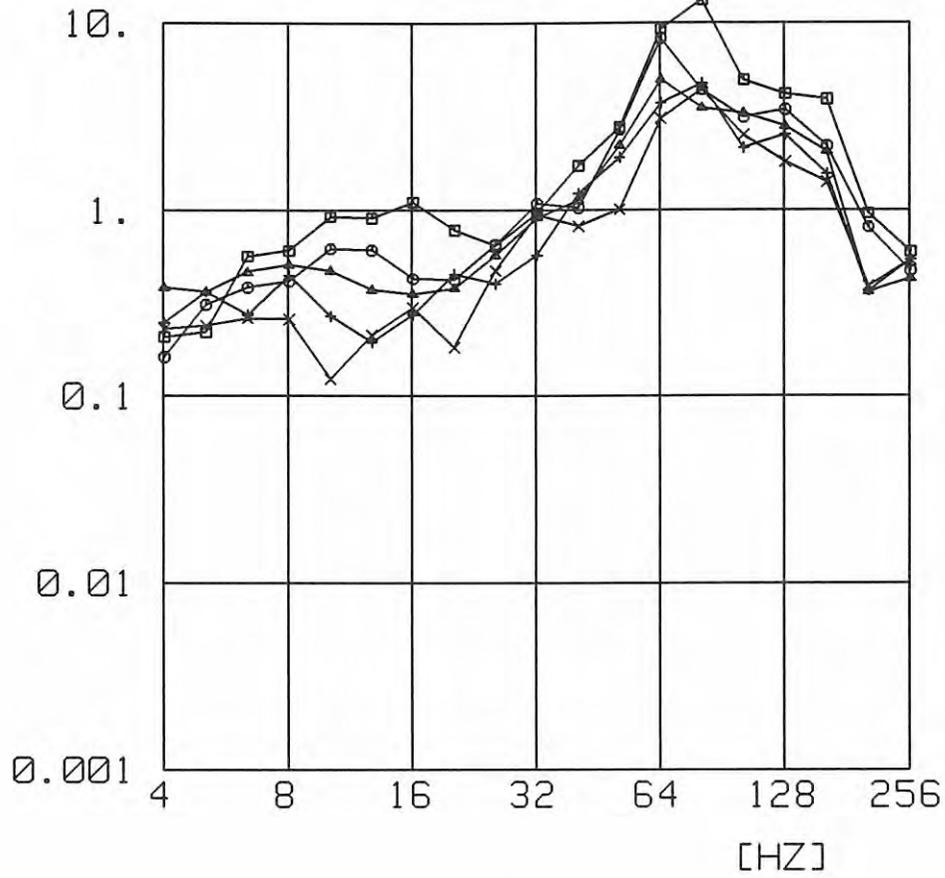
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, Wagenkasten 21

BLATT NR.

C 3.13

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

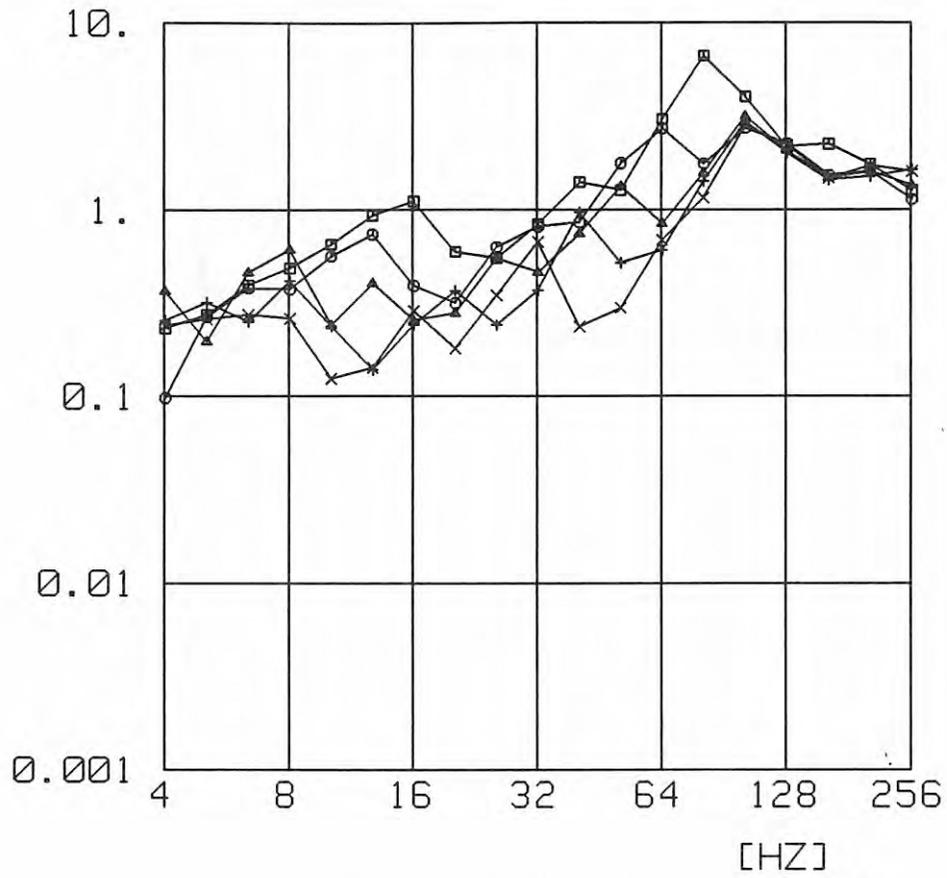
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, Radsatz 1r

BLATT NR.

C 3.14

[M/S<sup>2</sup>]



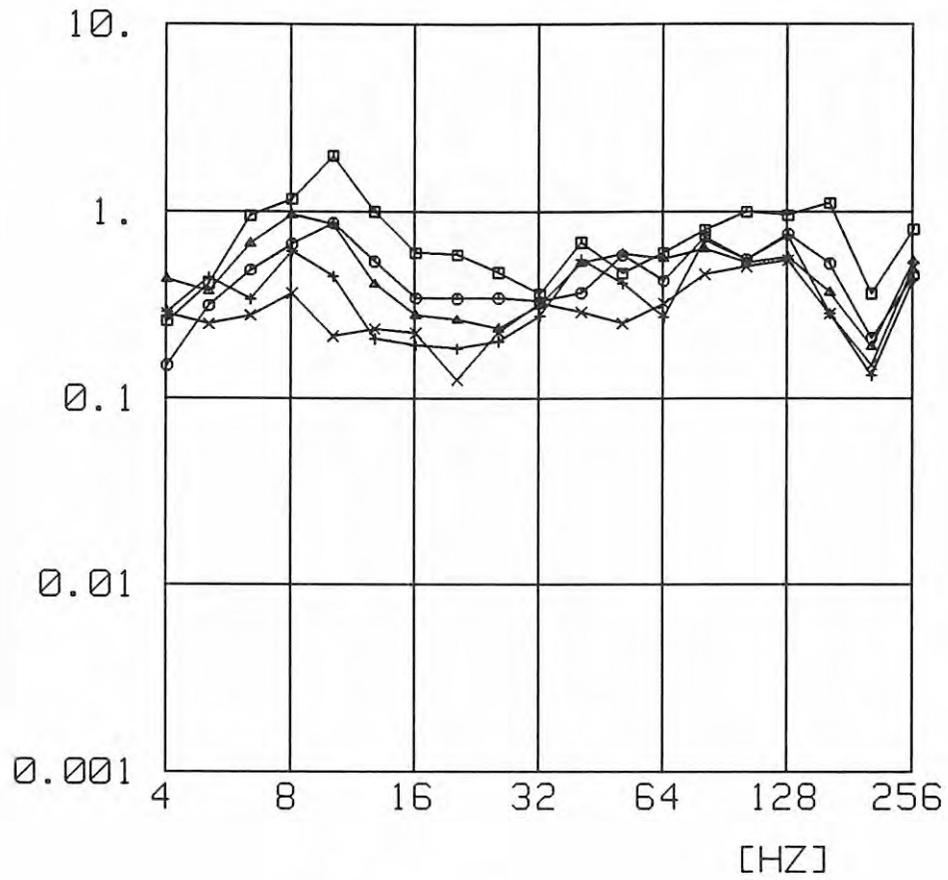
- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, Radsatz 2r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]

- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

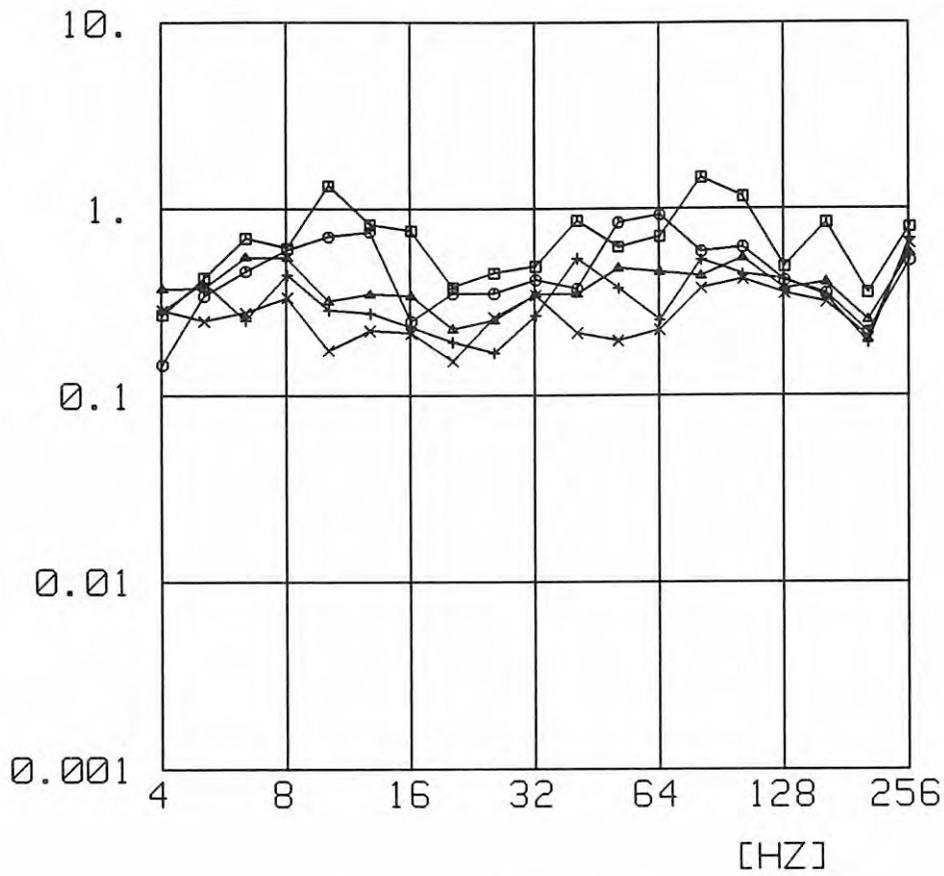
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDSDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, Drehgestell 1r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]



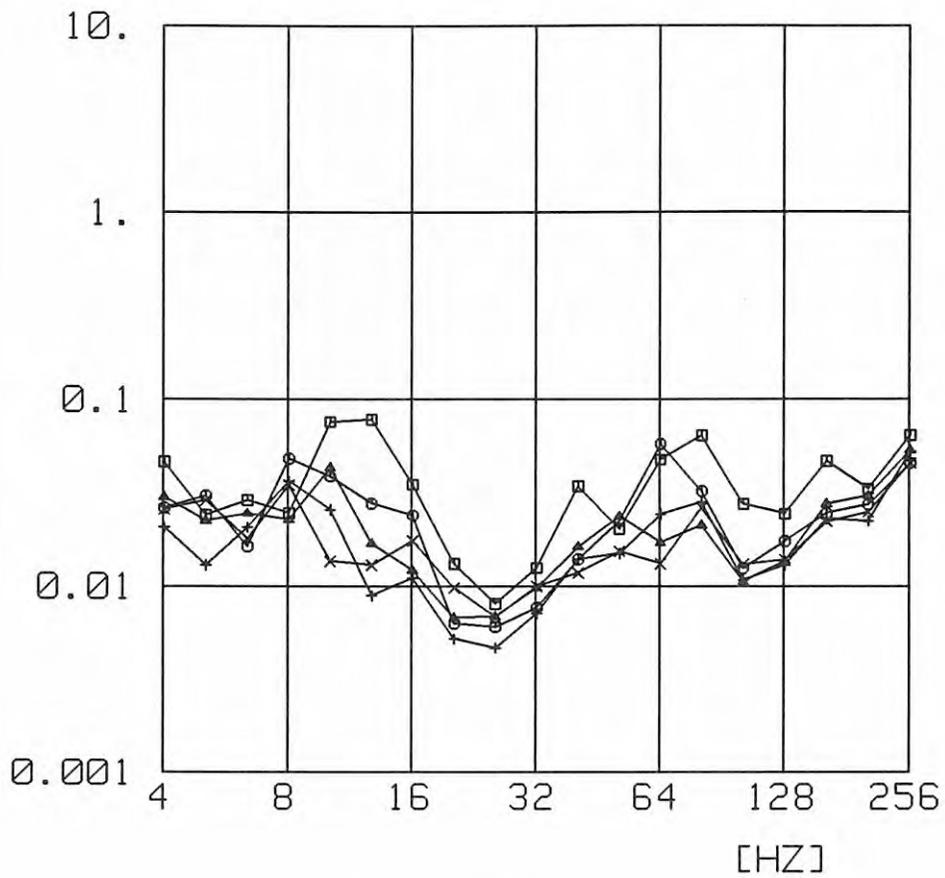
- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, Drehgestell 2r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]

- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

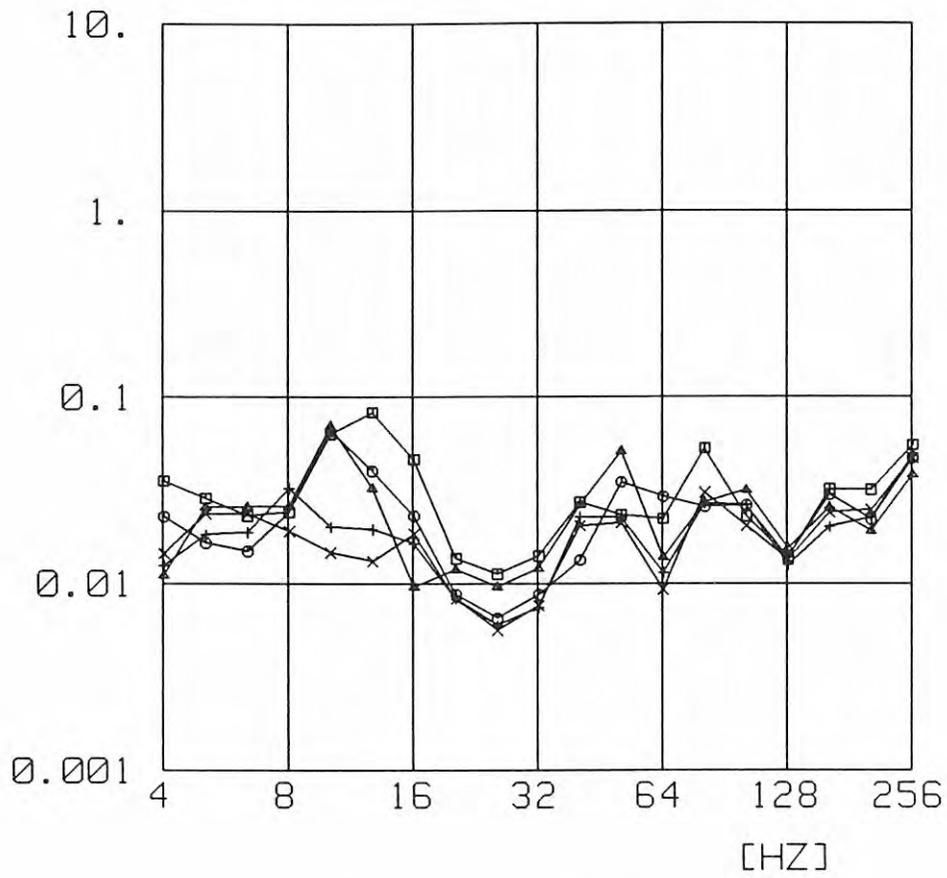
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, Wagenkasten 1r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 100 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

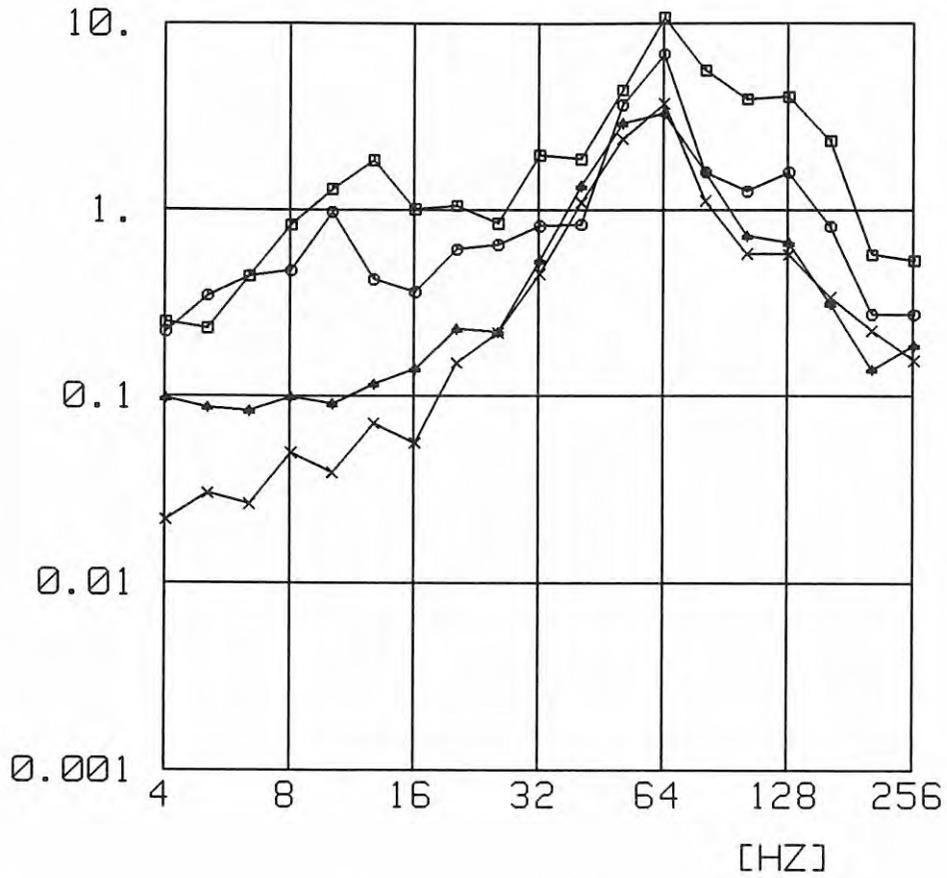
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, Wagenkasten 2r

BLATT NR.

C 3.19

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 80 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

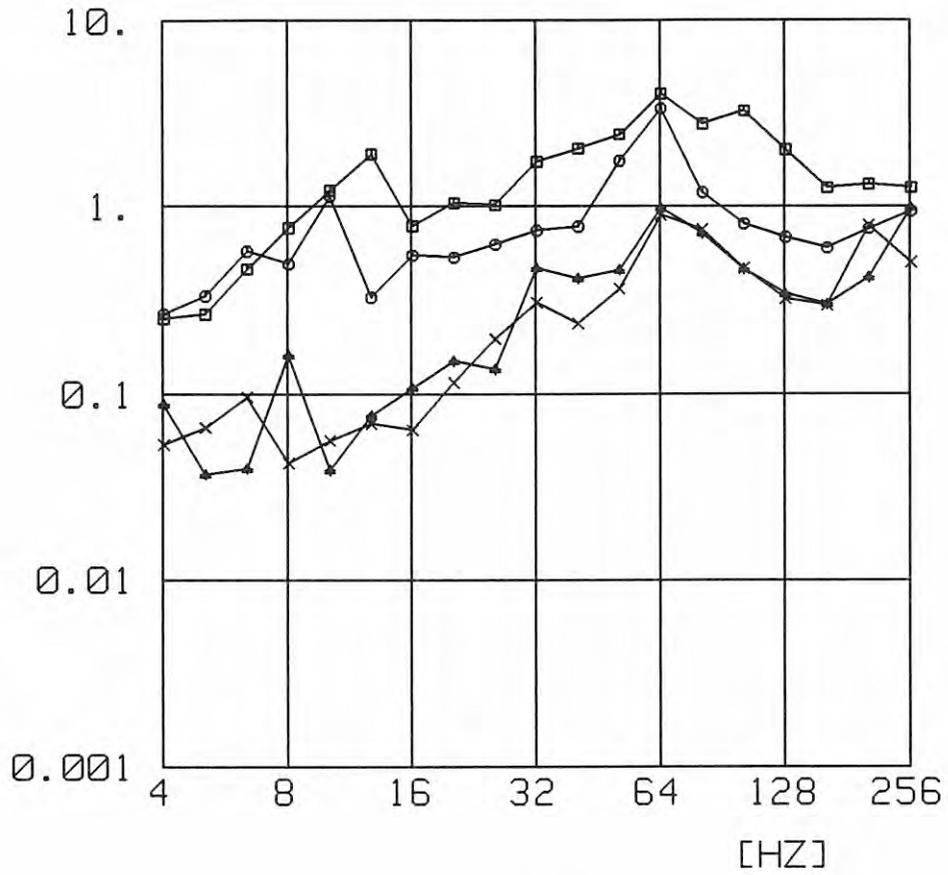
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, Radsatz 1r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 80 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

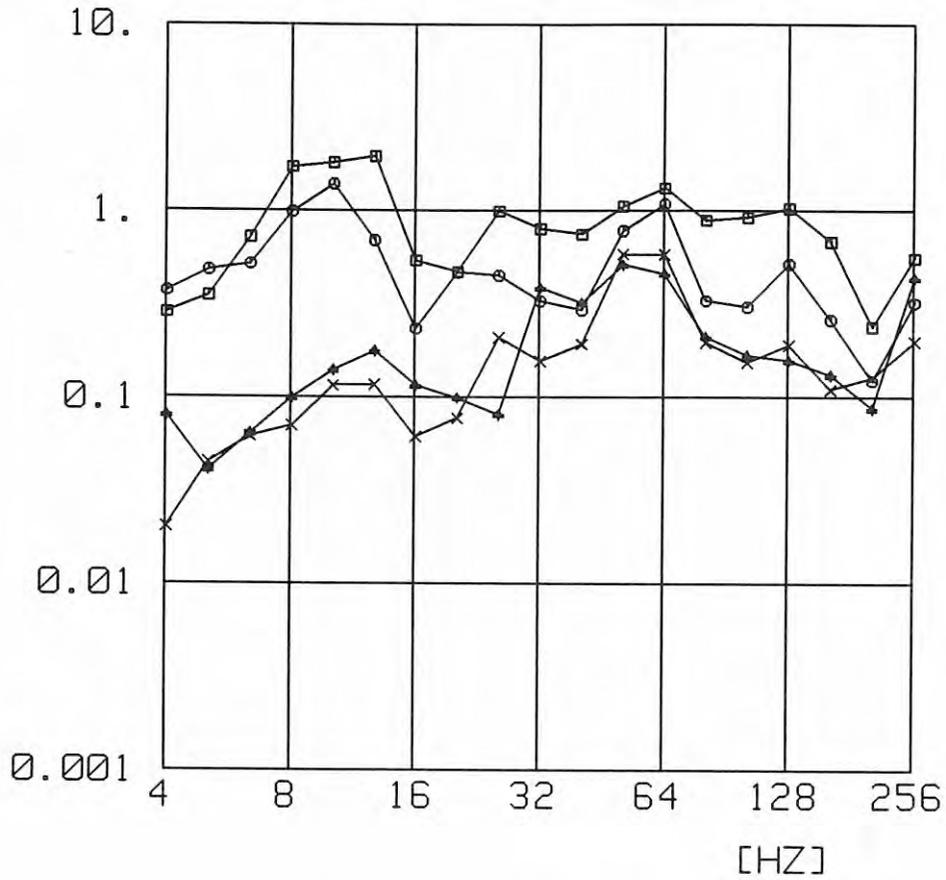
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, Radsatz 2r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 80 KM/H
- + 80 KM/H
- X 63 KM/H

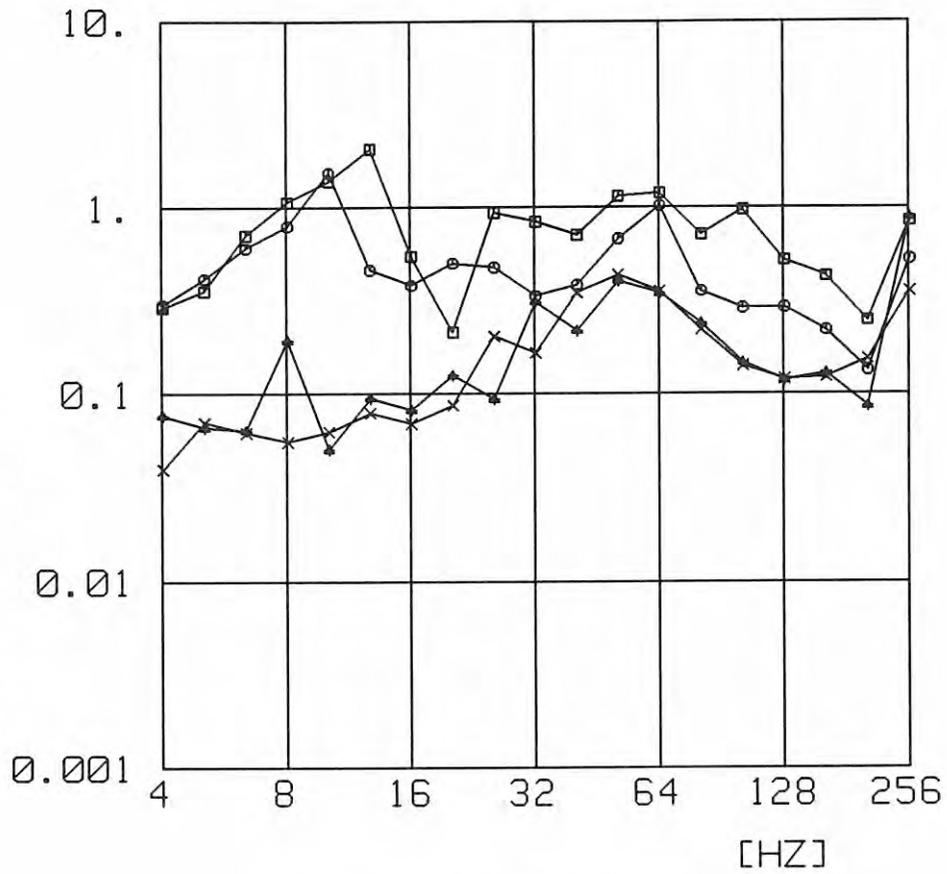
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, Drehgestell 1r

BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 80 KM/H
- + 80 KM/H
- × 63 KM/H

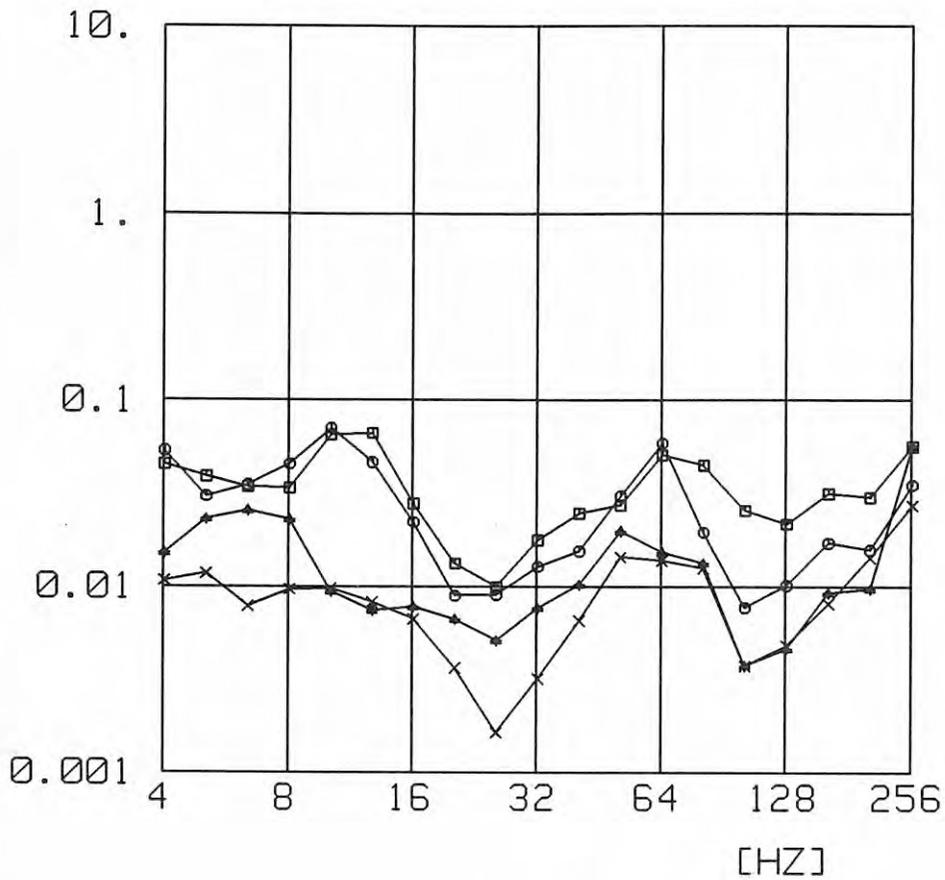
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDSDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, Drehgestell 2r

BLATT NR.

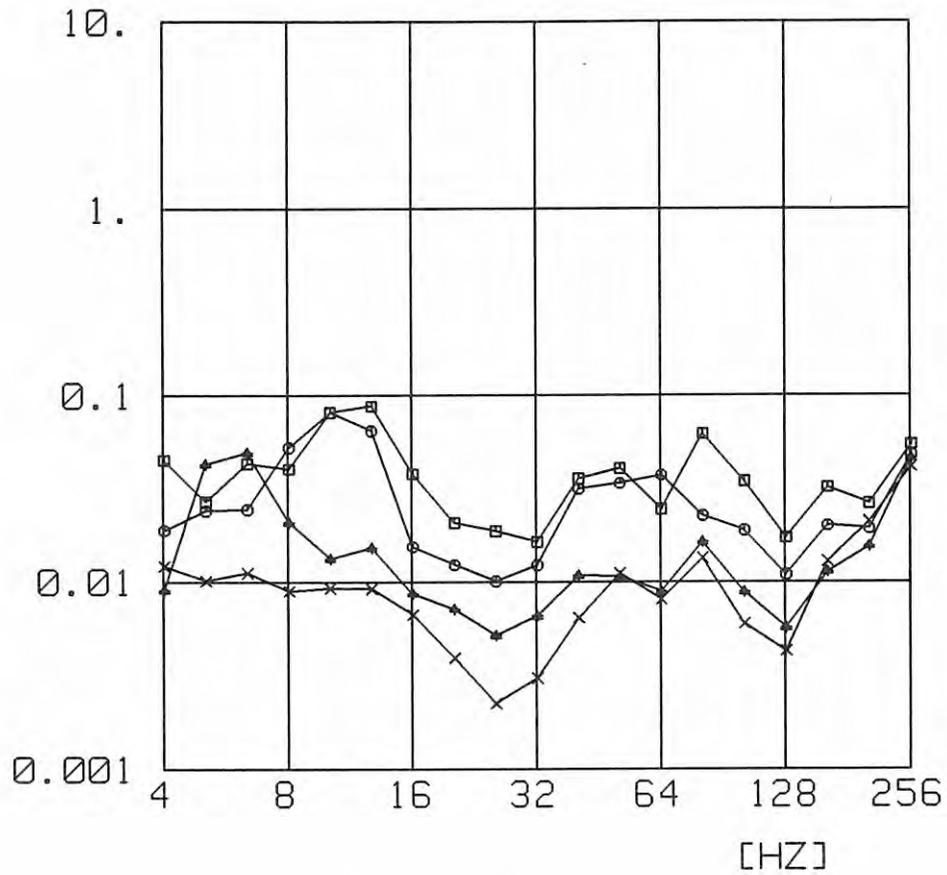
[M/S<sup>2</sup>]



- 160 KM/H
- 125 KM/H
- △ 80 KM/H
- + 80 KM/H
- X 63 KM/H

B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94  
 Tunnel, Wagenkasten 1r  
 BLATT NR.

[M/S<sup>2</sup>]

□ 160 KM/H

○ 125 KM/H

△ 80 KM/H

+ 80 KM/H

× 63 KM/H

B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

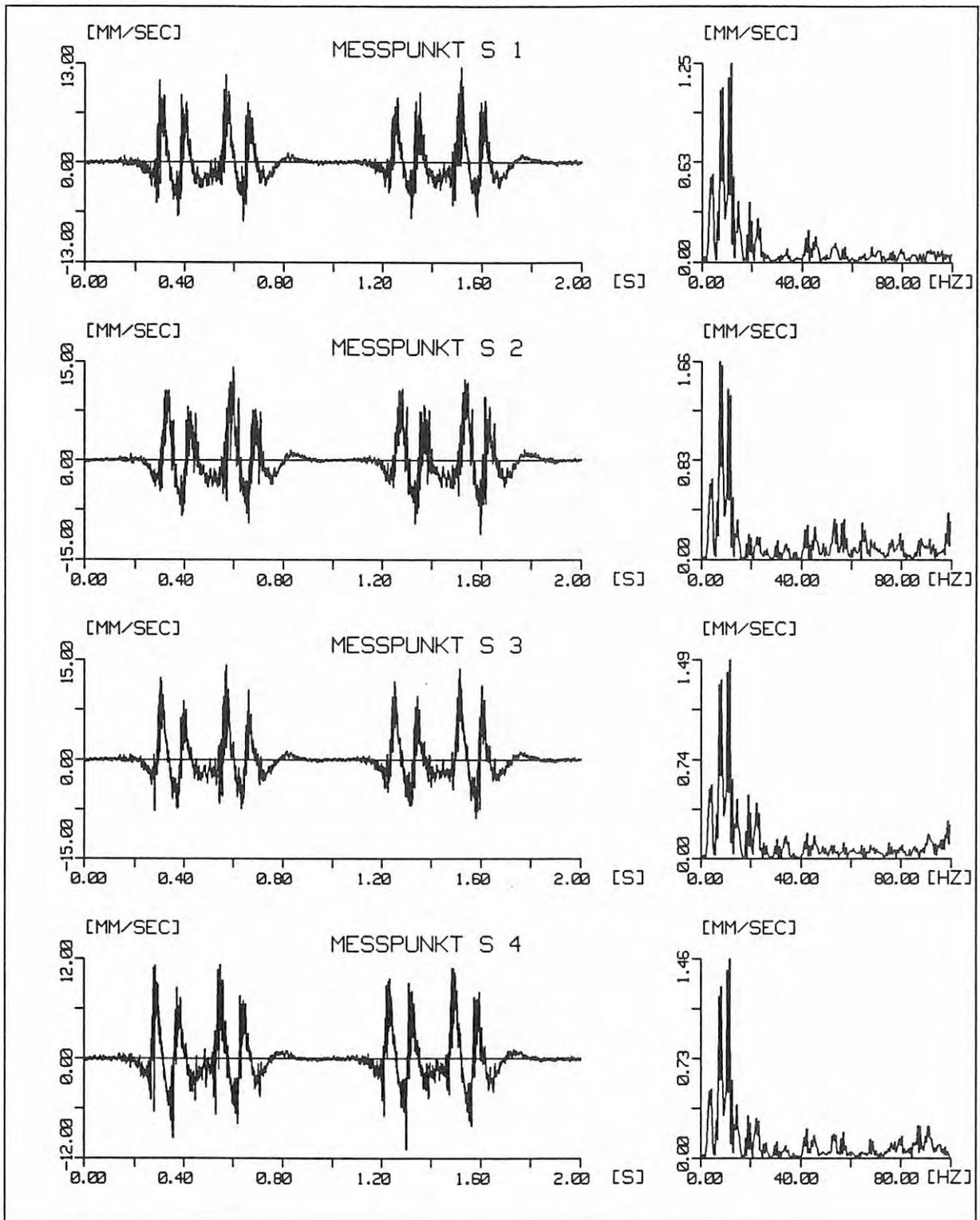
Tunnel, Wagenkasten 2r

BLATT NR.

## Anlage D

### Zeitverläufe und Spektren bei ausgewählten Versuchsfahrten

- D 1 Fahrweg- und Bodenschwingungen in der Ebene, für einige Fahrgeschwindigkeiten fortlaufend alle Meßpunkte
- D 2 Fahrweg- und Brückenschwingungen an der Meßstation Brücke, für einige Fahrgeschwindigkeiten fortlaufend alle Meßpunkte
- D 3 Fahrweg- und Bodenschwingungen an der Meßstation Tunnel, für einige Fahrgeschwindigkeiten fortlaufend alle Meßpunkte
- D 4 Fahrzeugschwingungen in der Ebene, für einige Fahrgeschwindigkeiten (und beide Wagenseiten) jeweils ein Blatt mit 2 Radsätzen, Drehgestell und Wagenkasten vorn und ein Blatt mit Triggerimpuls, Drehgestell horizontal sowie Drehgestell und Wagenkasten hinten
- D 5 Fahrzeugschwingungen auf der Brücke, für einige Fahrgeschwindigkeiten jeweils die Meßpunkte einer Wagenseite
- D 6 Fahrzeugschwingungen im Tunnel, für einige Fahrgeschwindigkeiten jeweils die Meßpunkte einer Wagenseite

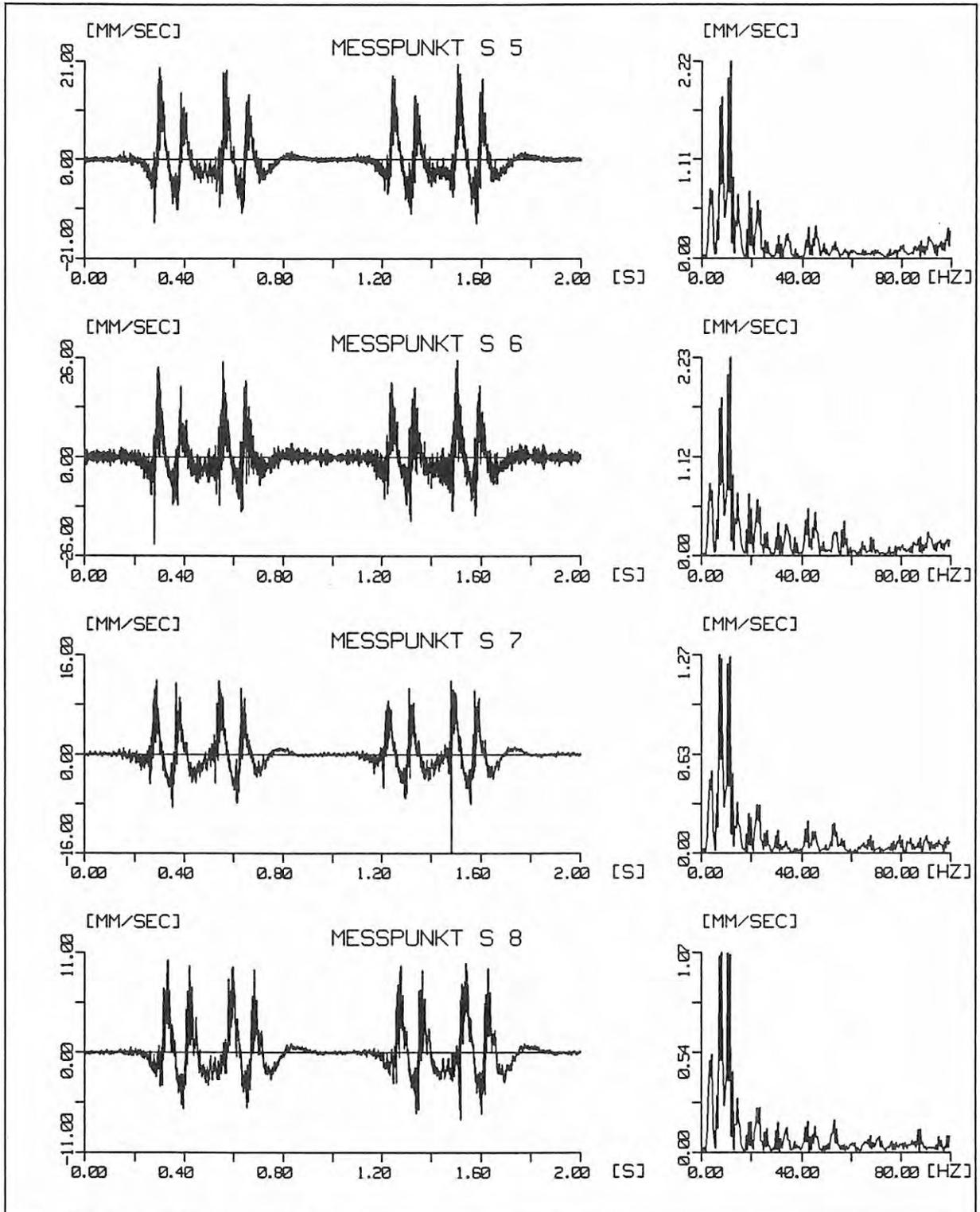


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesefeld, 9/94  
 Messzug, 100 km/h  
 dz09

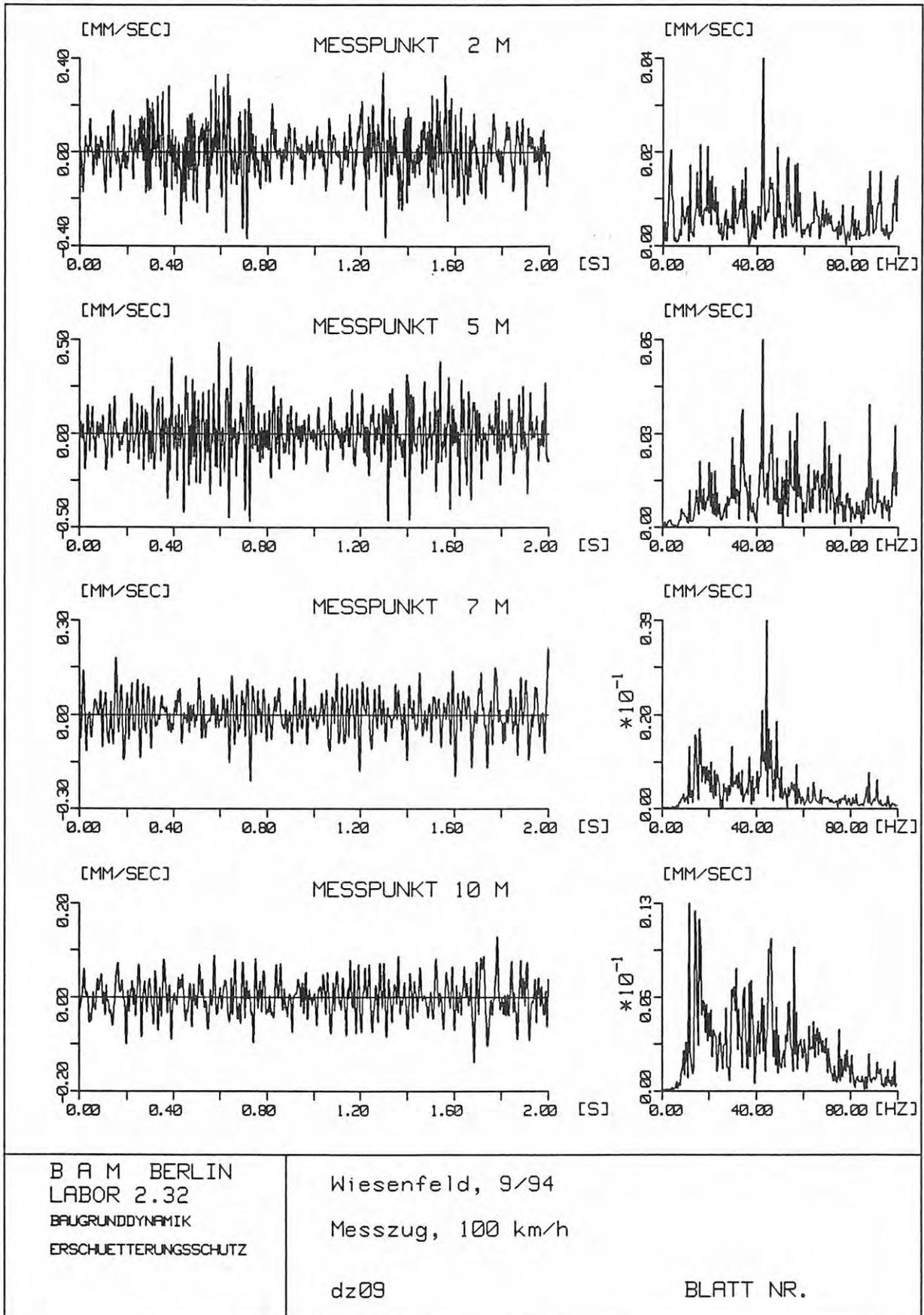
BLATT NR.

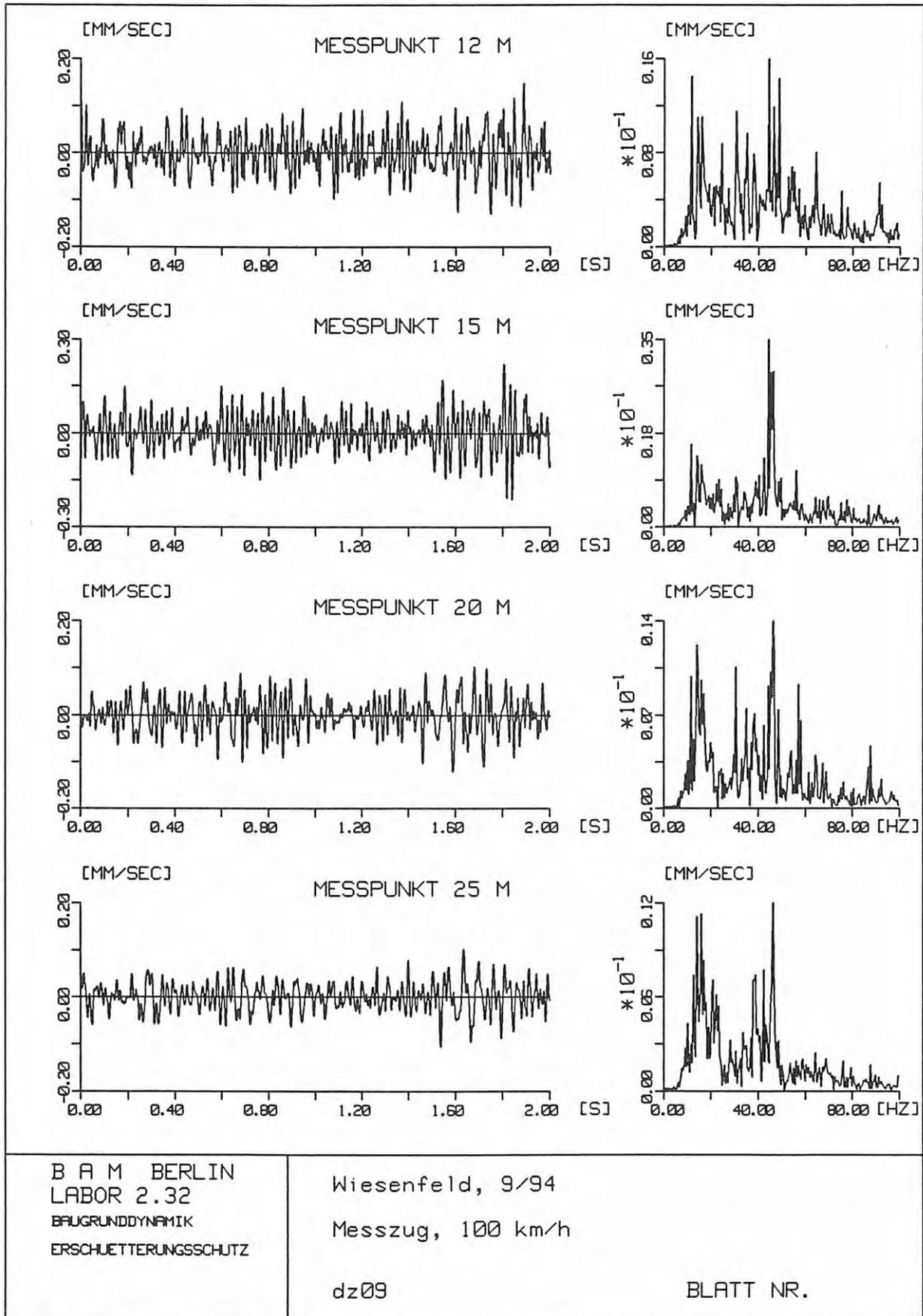
D 1.6



<p>B A M BERLIN LABOR 2.32 BAUGRUNDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Wiesenfeld, 9/94 Messzug, 100 km/h dz09</p>	<p>BLATT NR.</p>
---	--	------------------

D 1.6

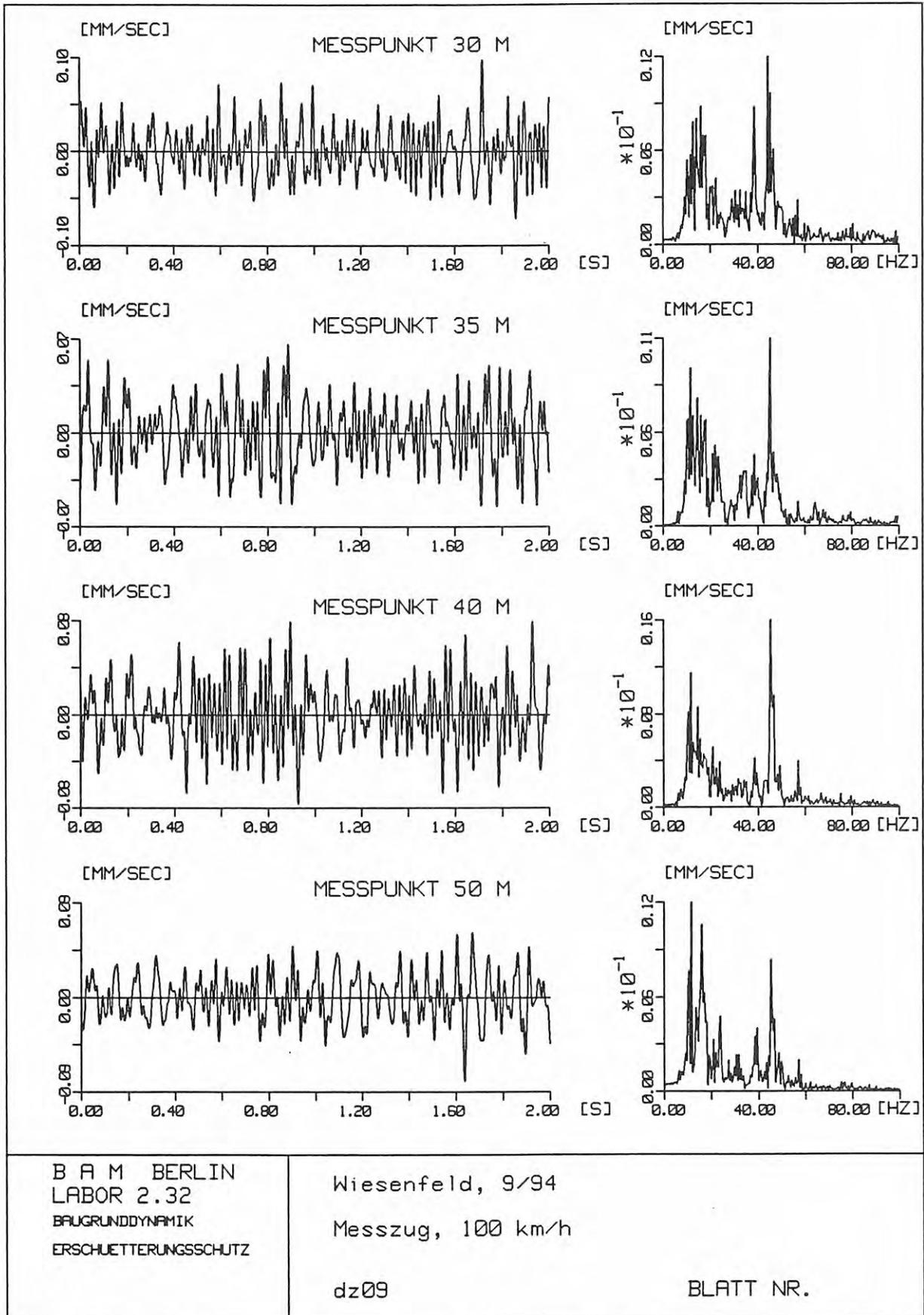


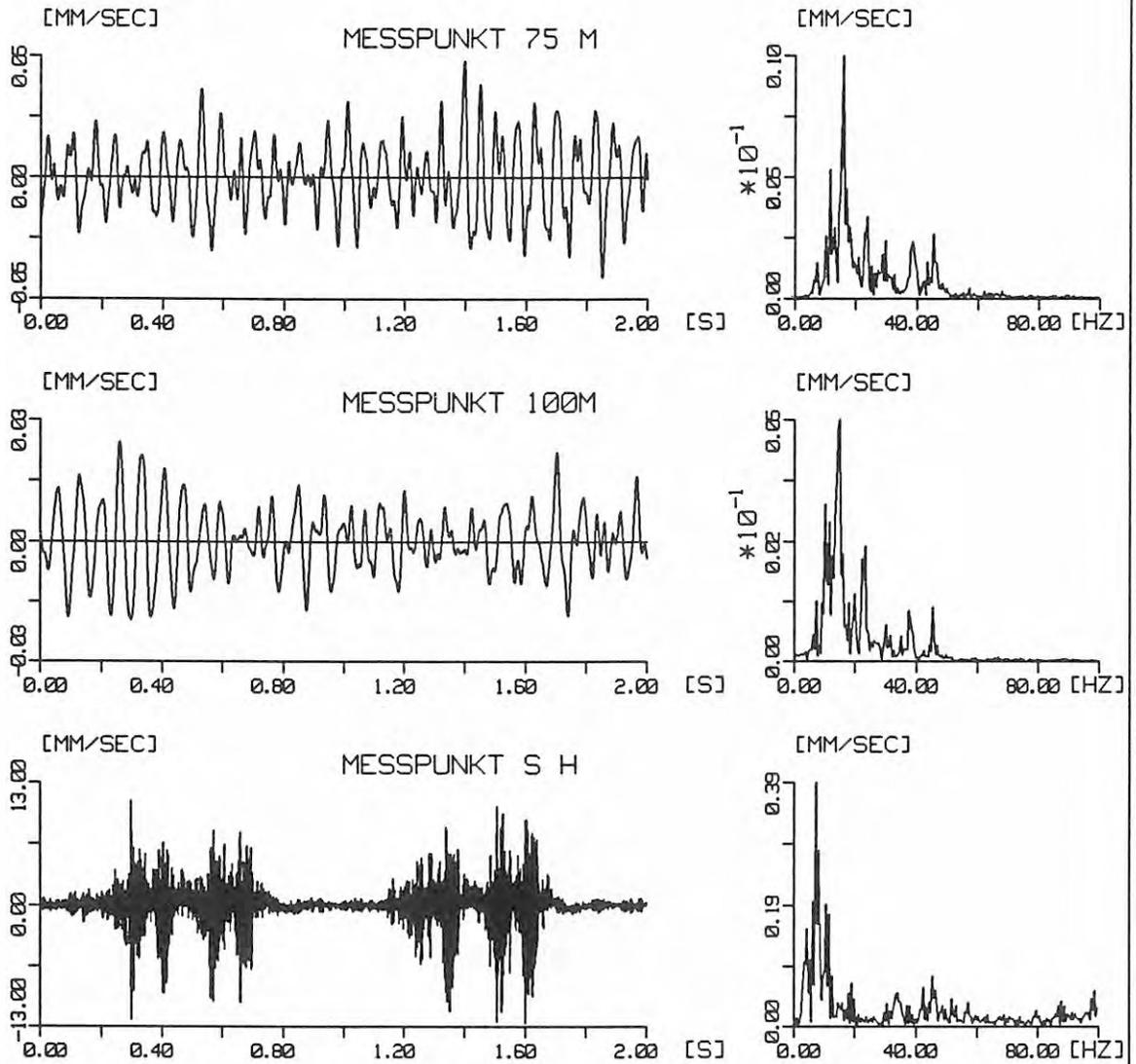


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94  
 Messzug, 100 km/h  
 dz09

BLATT NR.



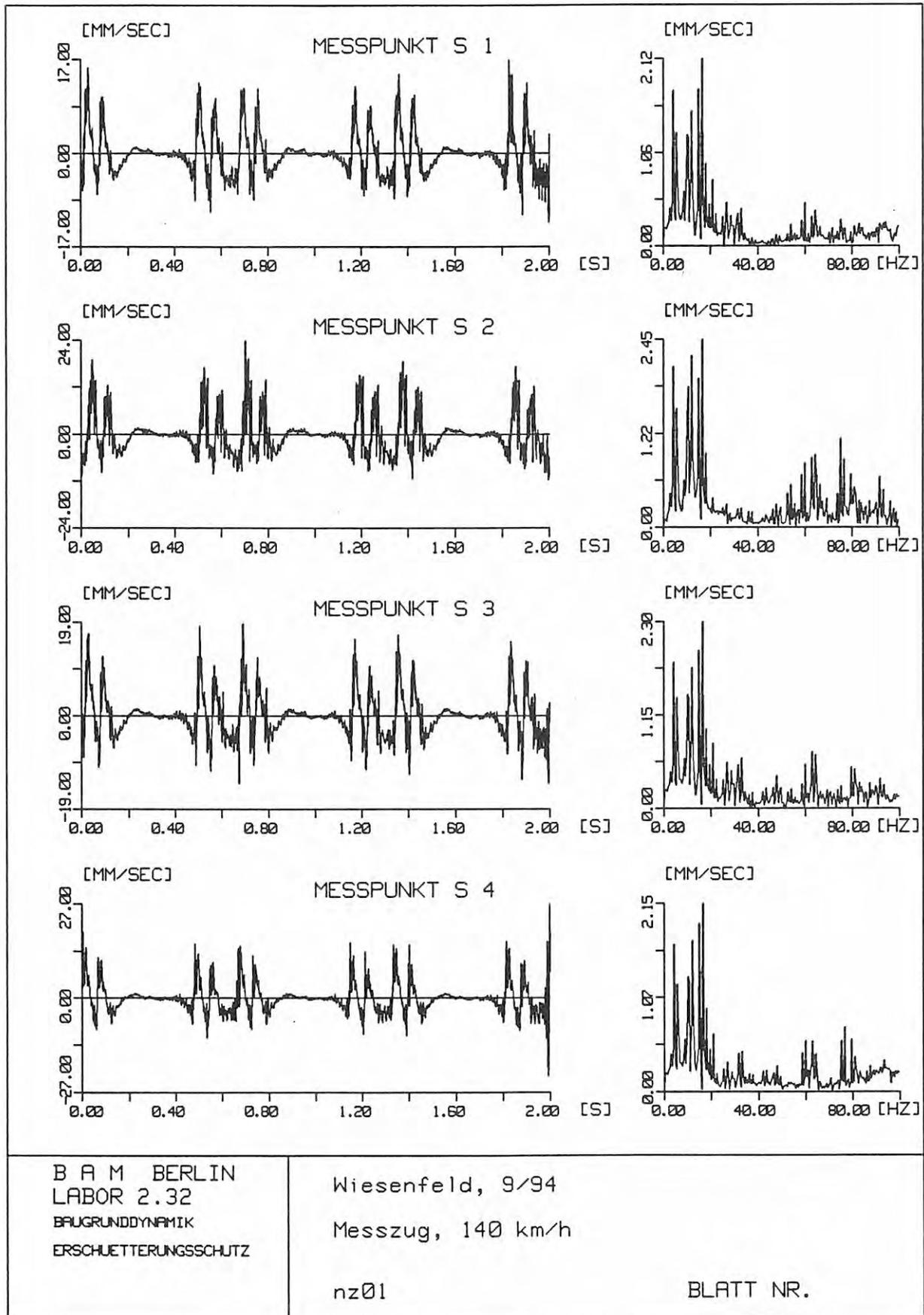


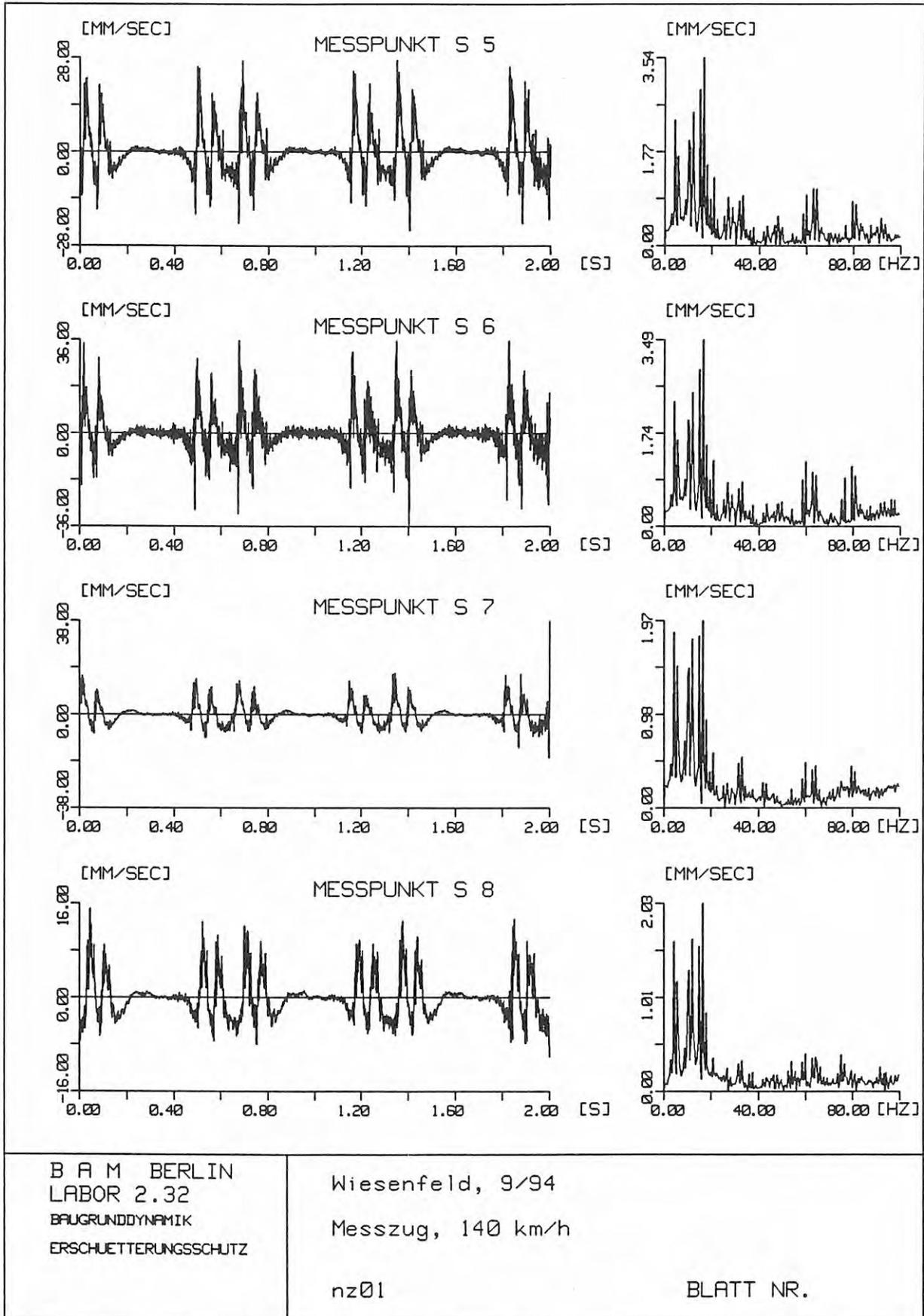
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

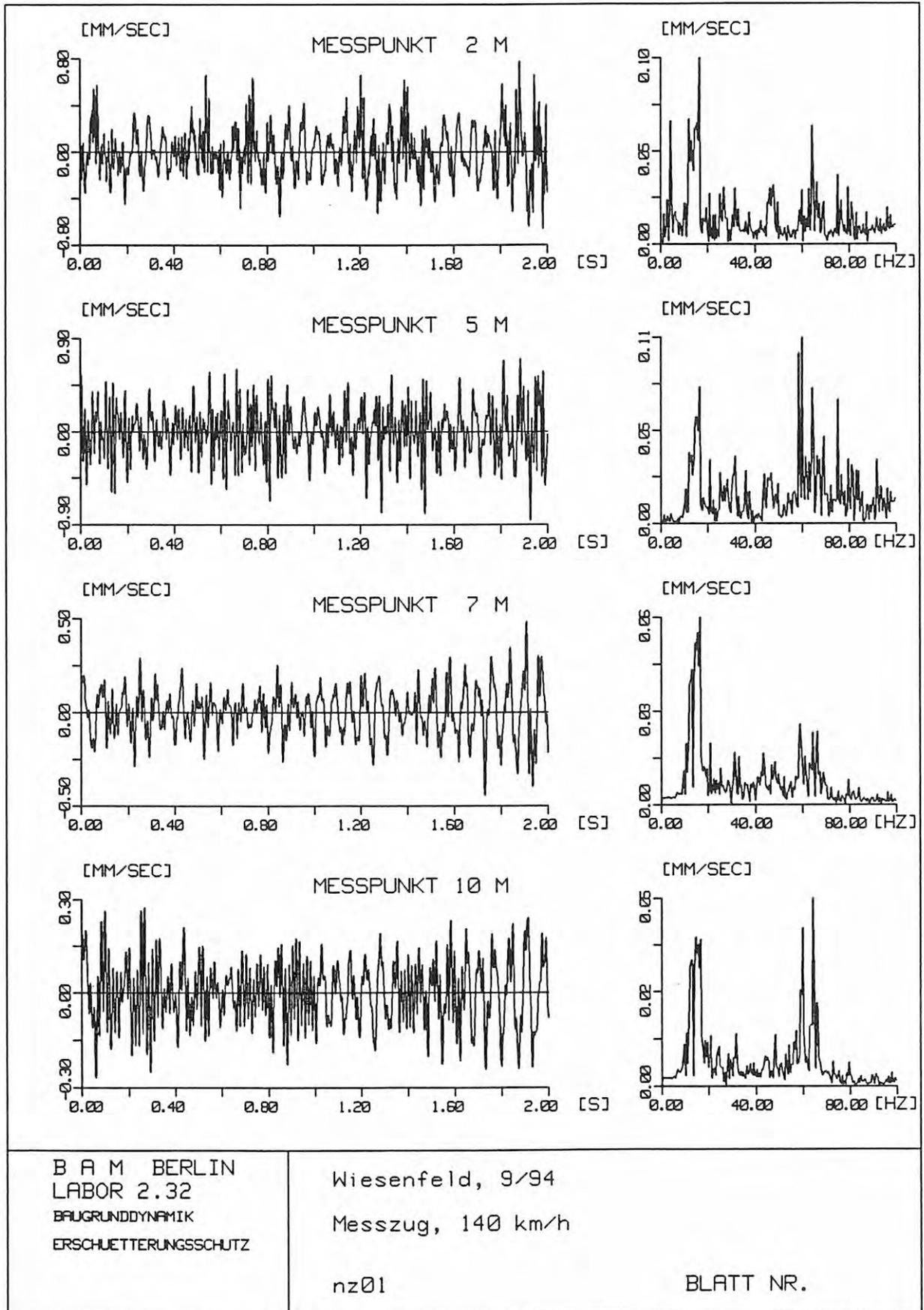
Wiesenfeld, 9/94  
Messzug, 100 km/h

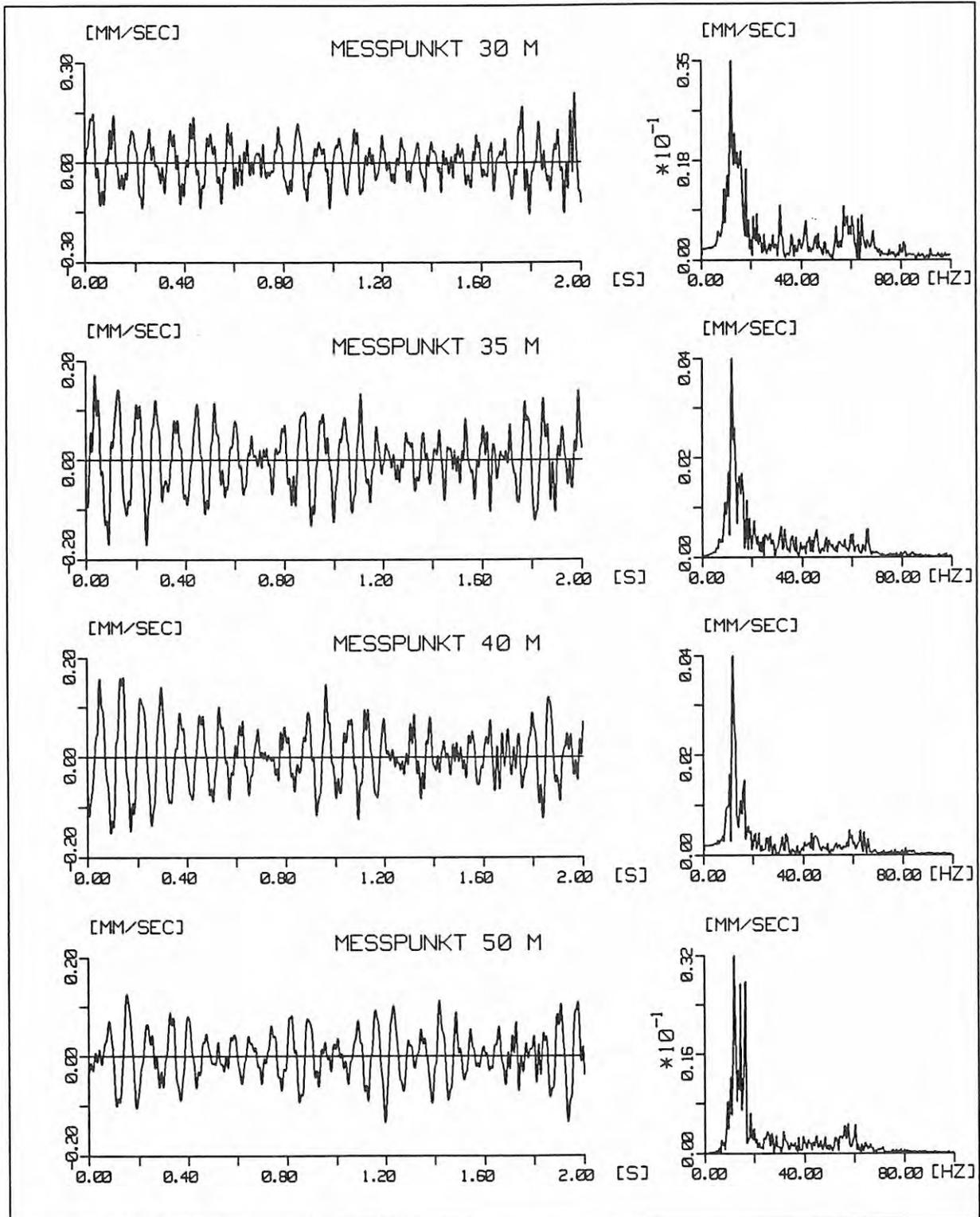
dz09

BLATT NR.







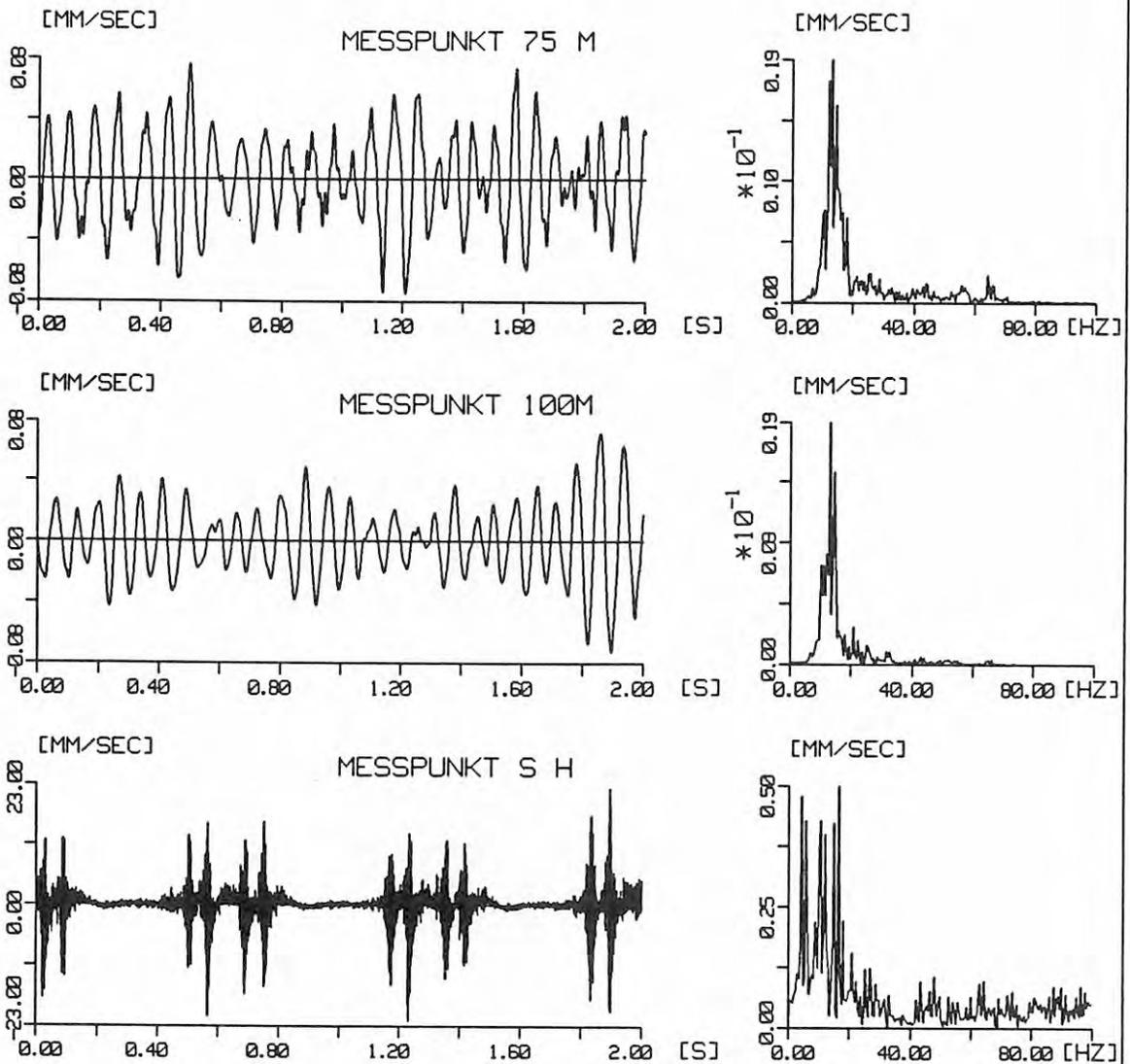


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94  
 Messzug, 140 km/h

nz01

BLATT NR.

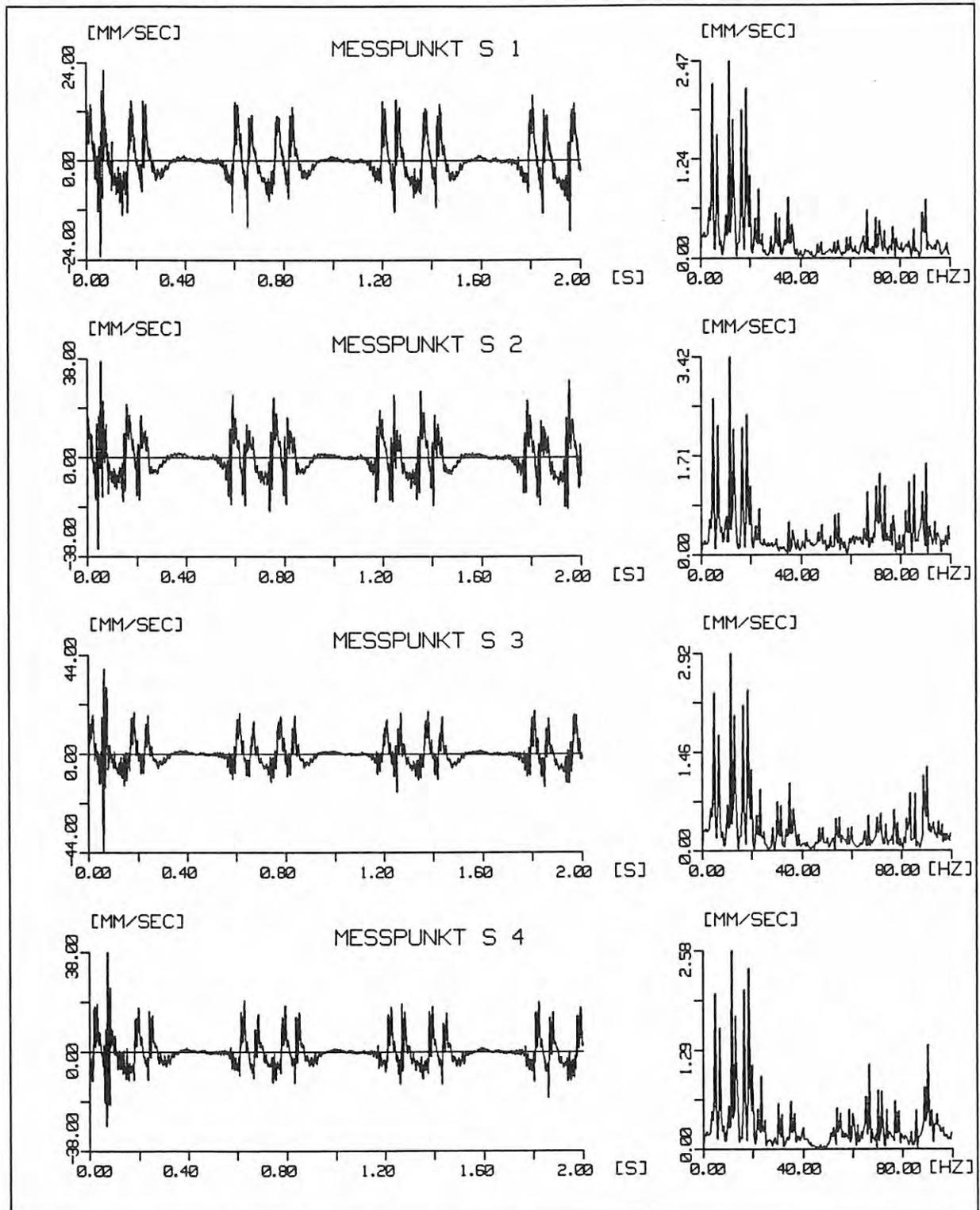


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesefeld, 9/94  
 Messzug, 140 km/h

nz01

BLATT NR.

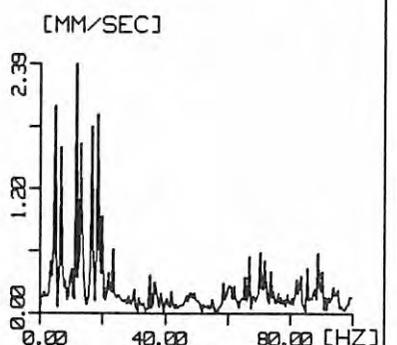
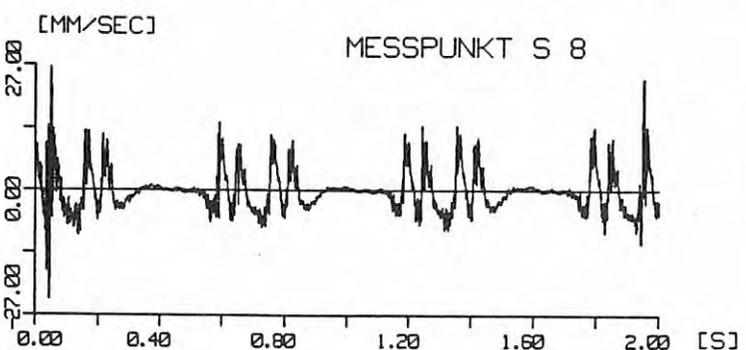
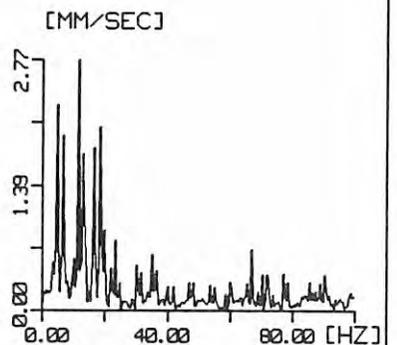
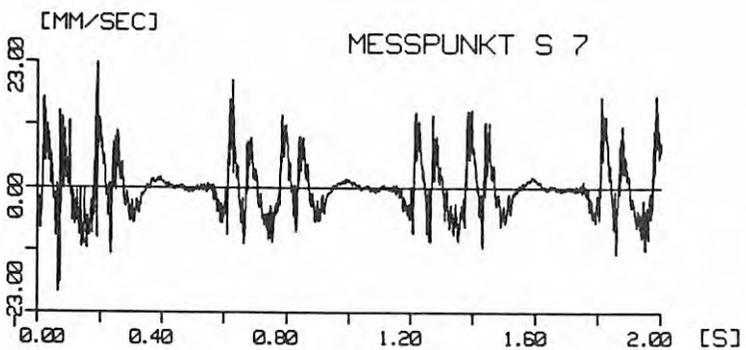
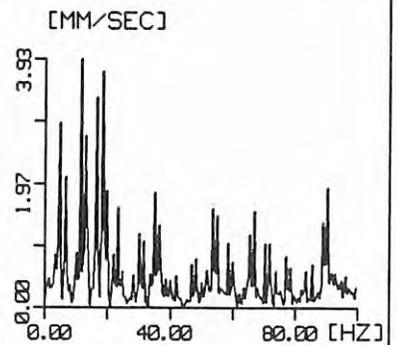
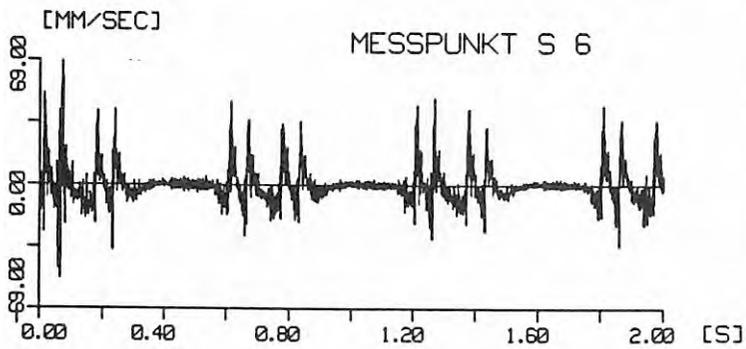
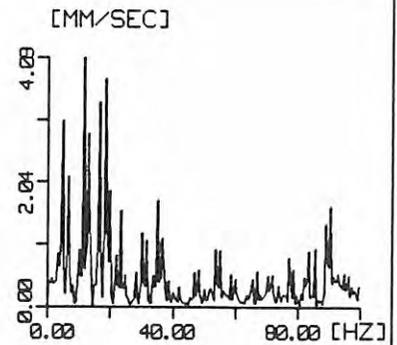
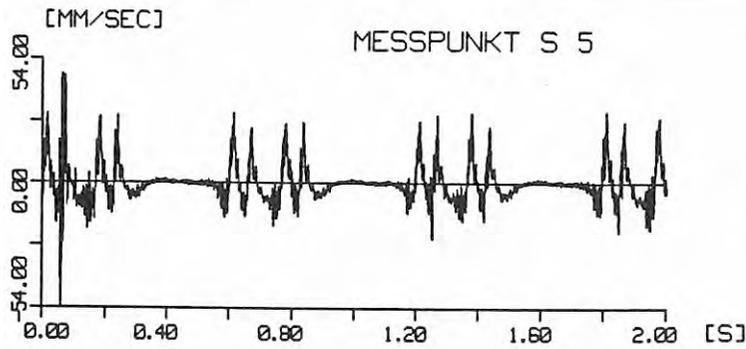


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94  
 Messzug, 160 km/h

nz02

BLATT NR.

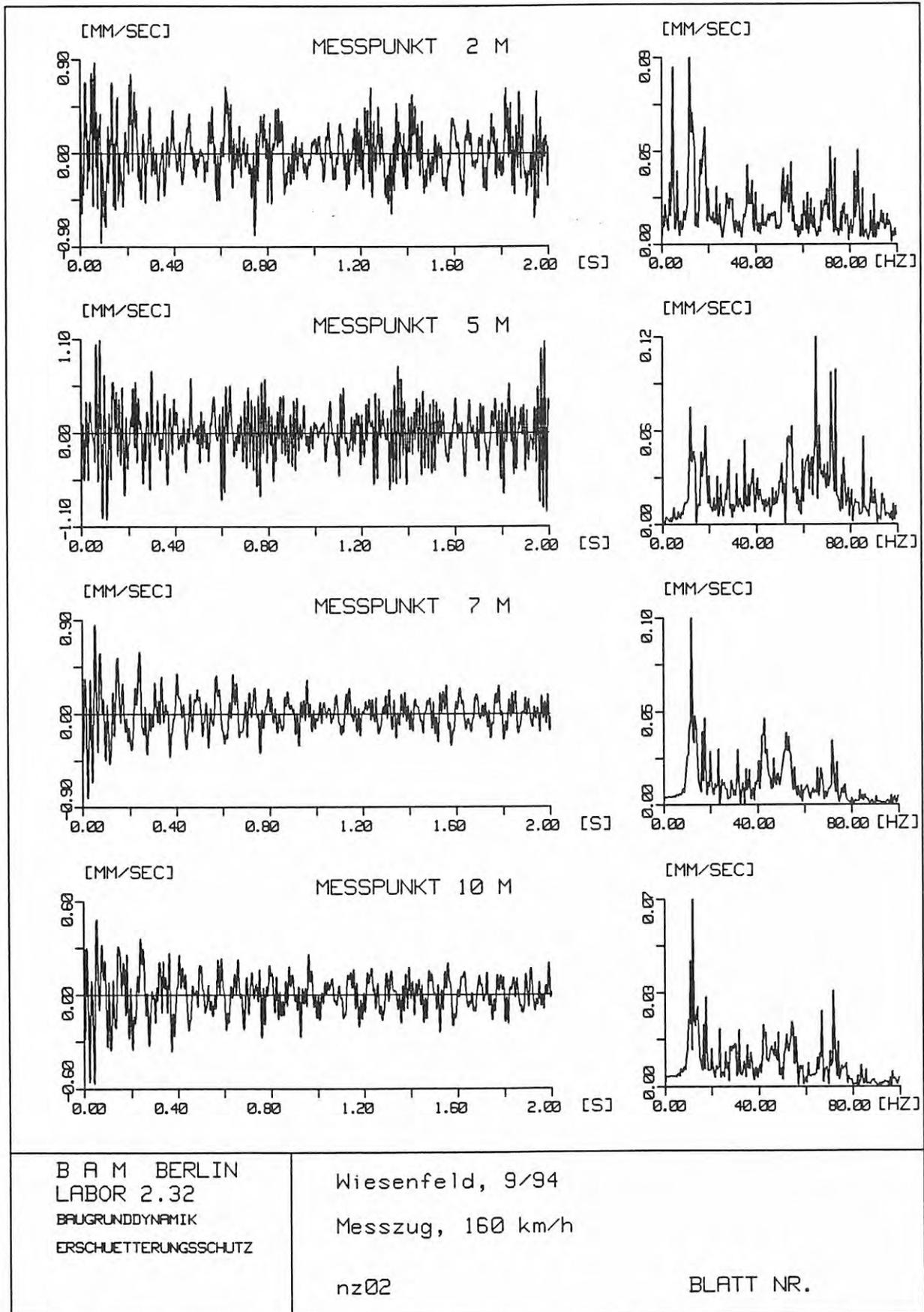


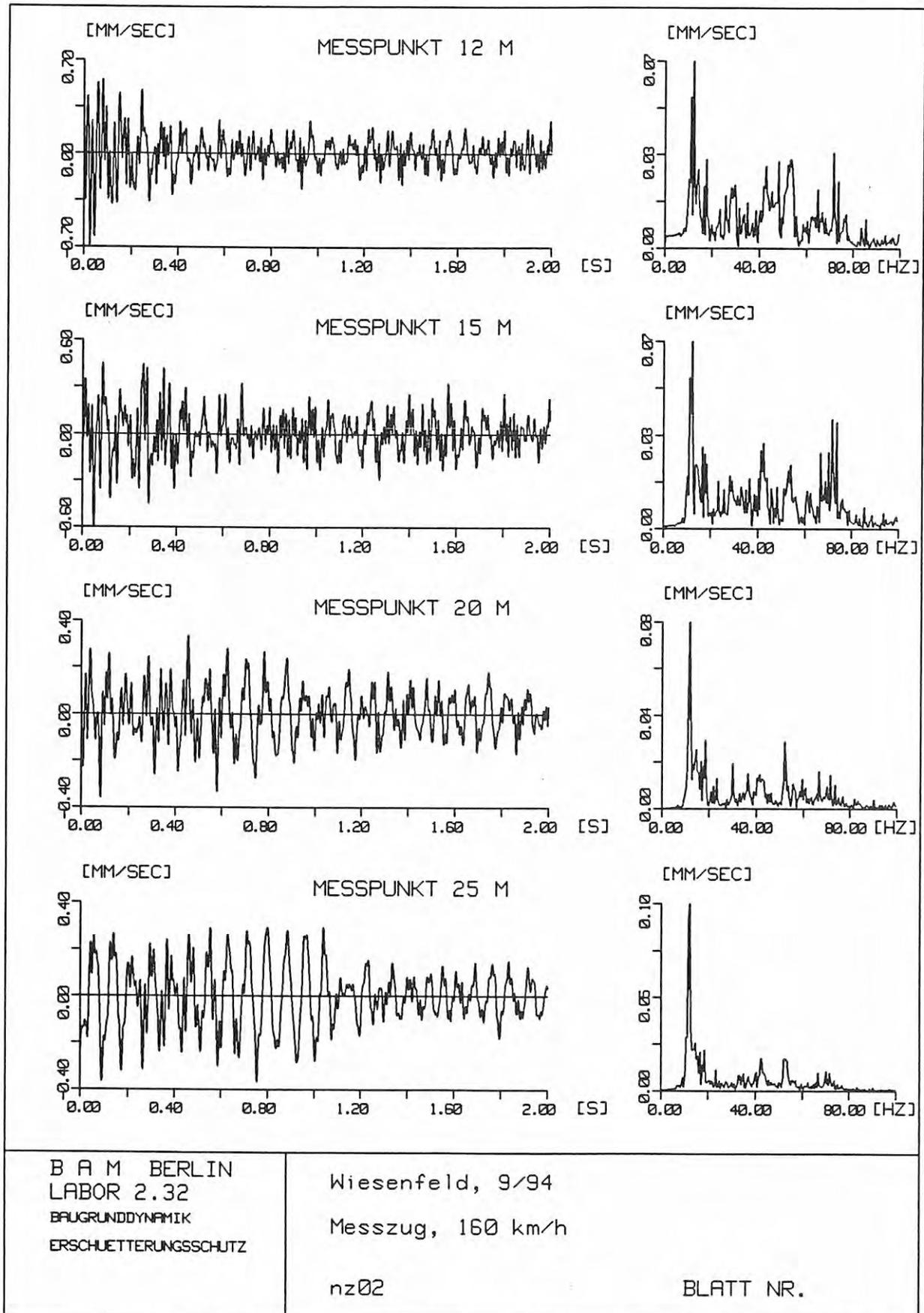
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUND DYNAMIK  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

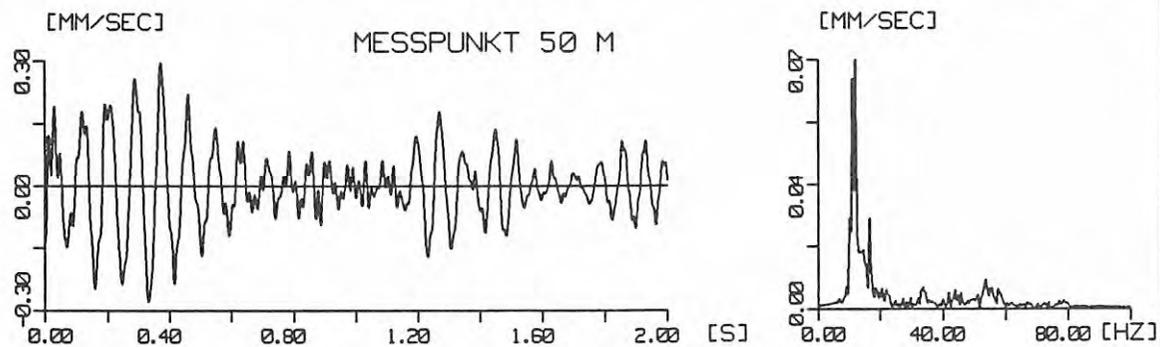
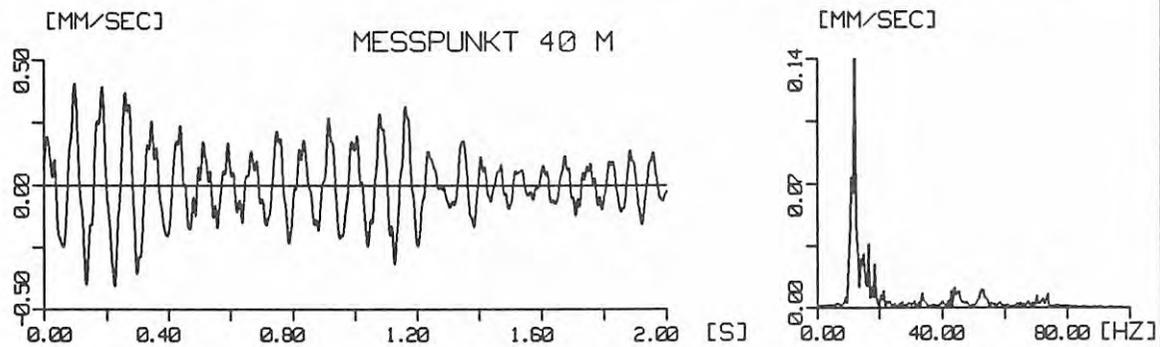
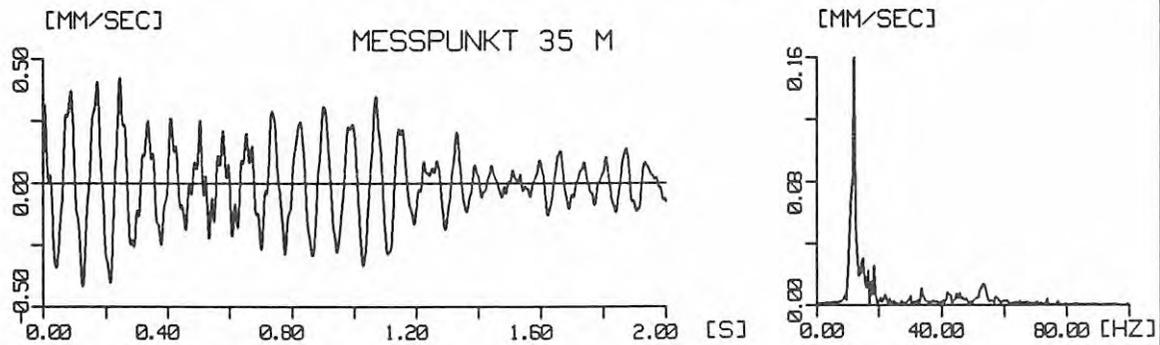
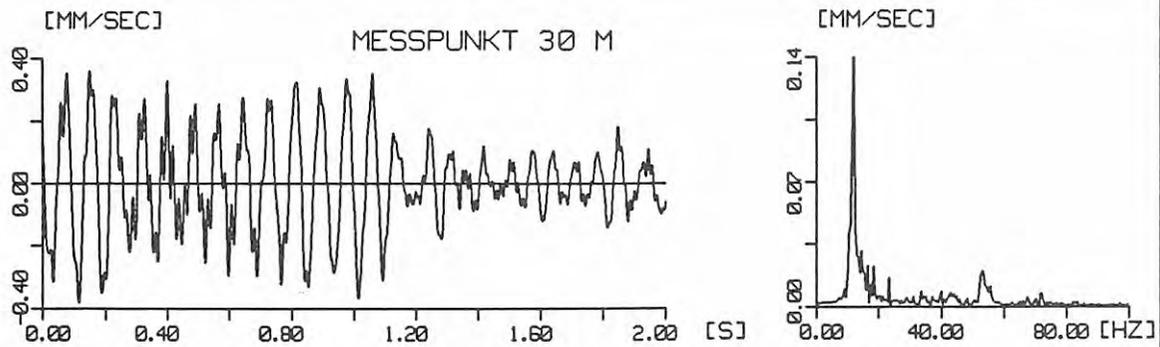
Wiesenfeld, 9/94  
Messzug, 160 km/h

nz02

BLATT NR. 20



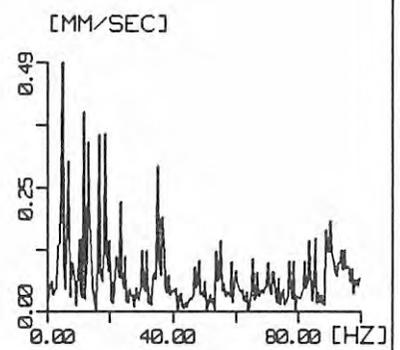
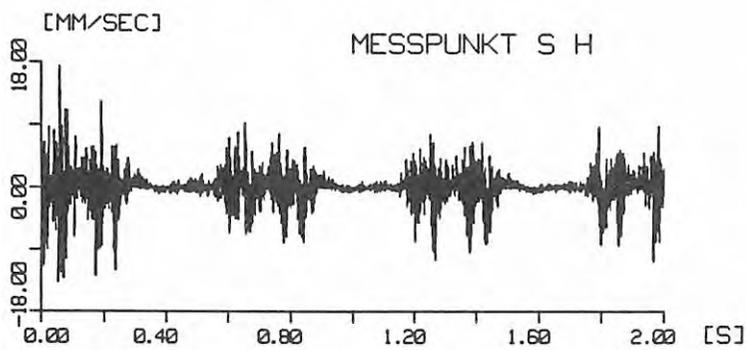
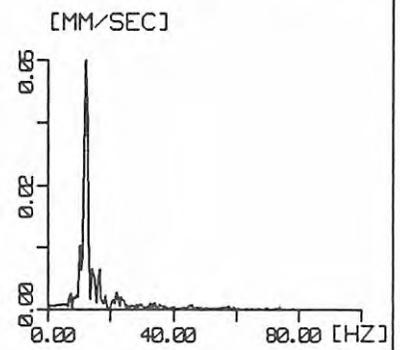
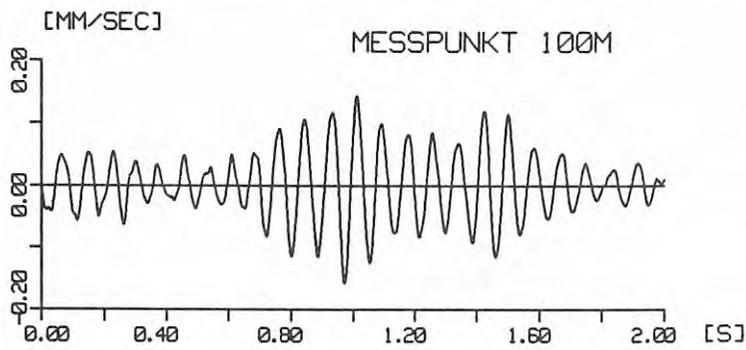
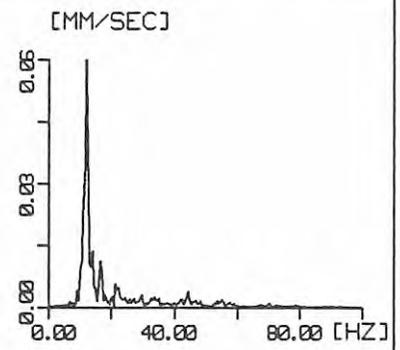
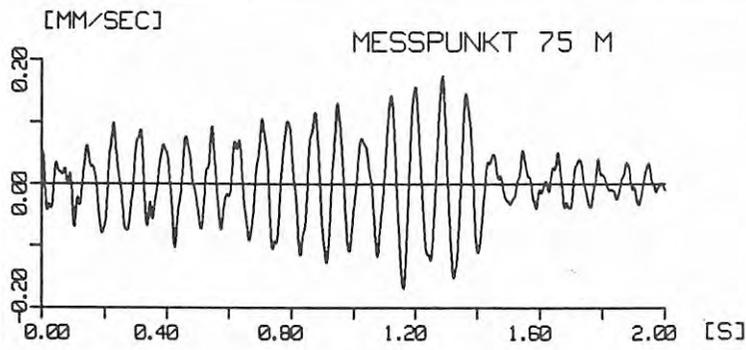




B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94  
Messzug, 160 km/h  
nz02

BLATT NR.



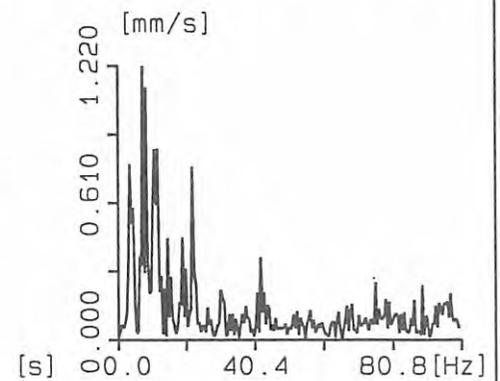
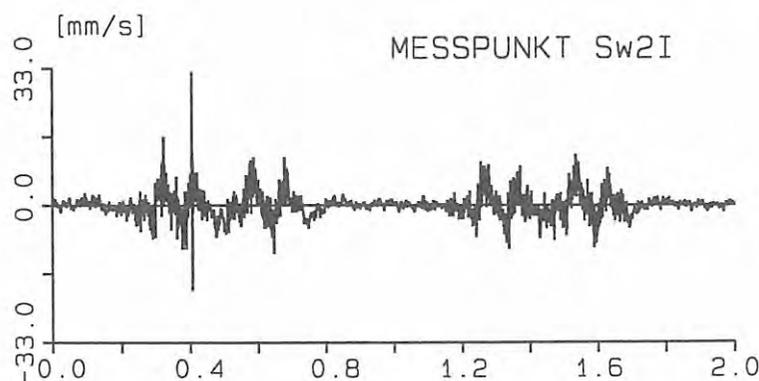
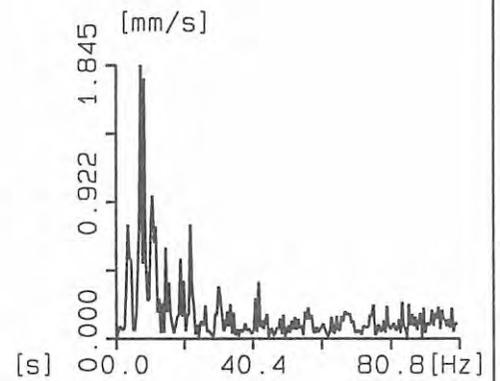
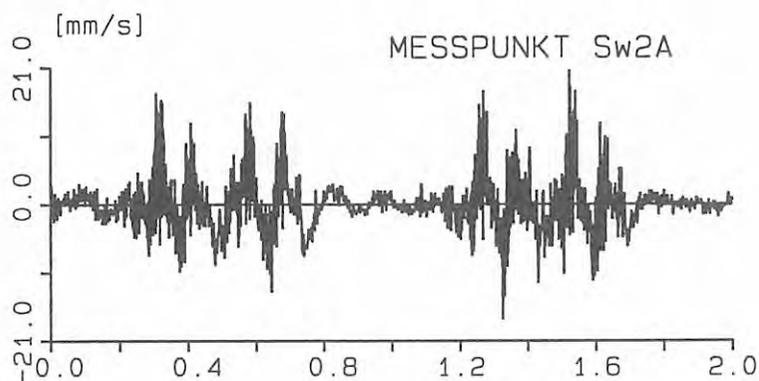
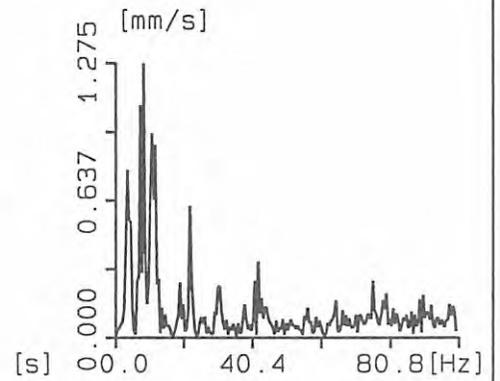
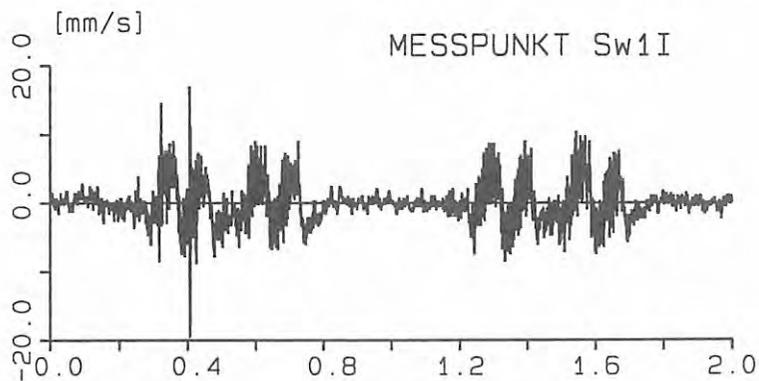
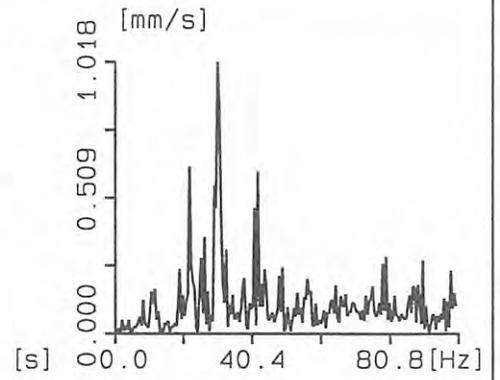
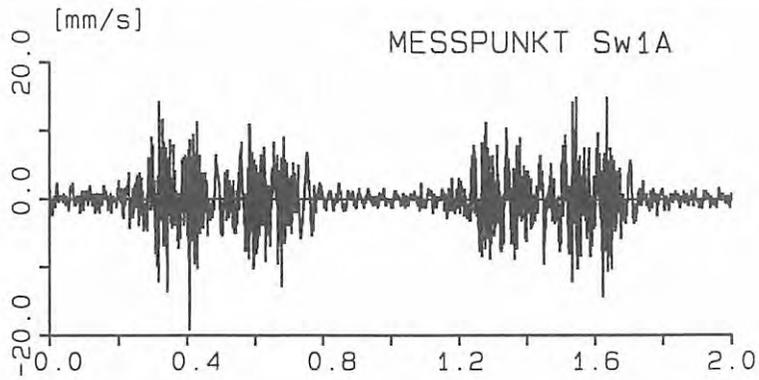
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Wiesenfeld, 9/94  
Messzug, 160 km/h

nz02

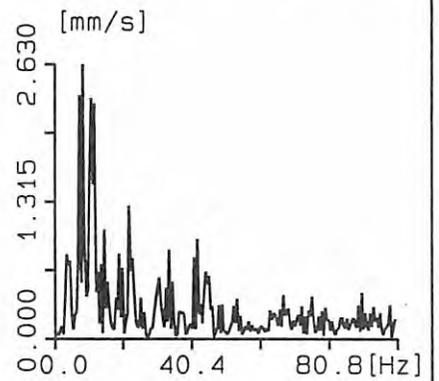
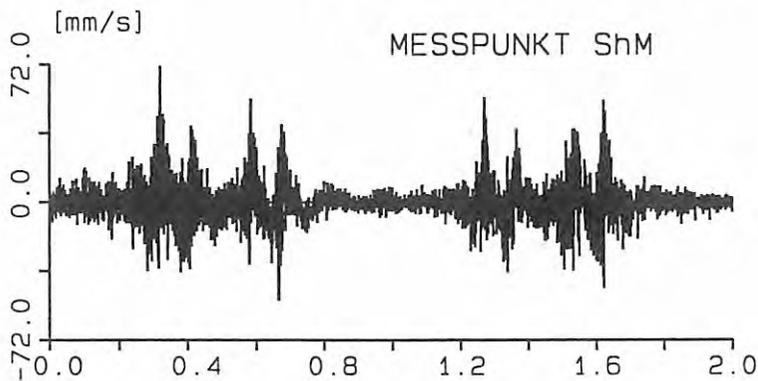
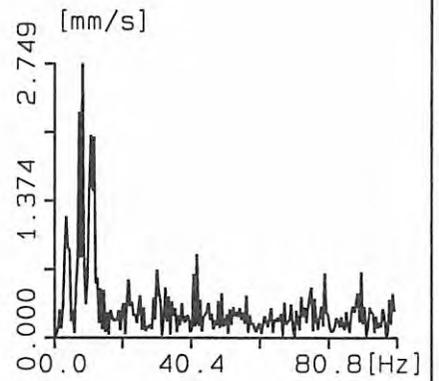
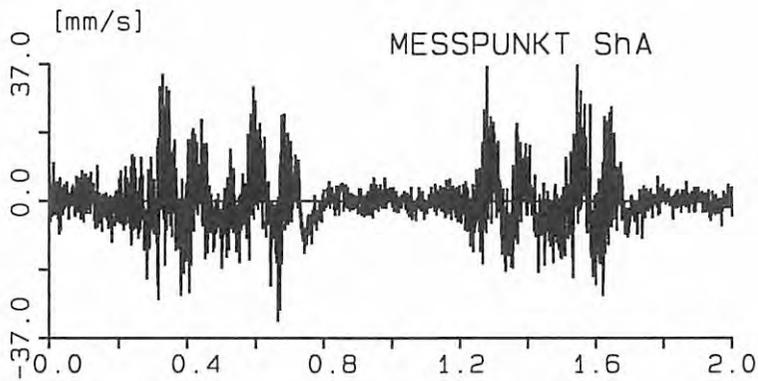
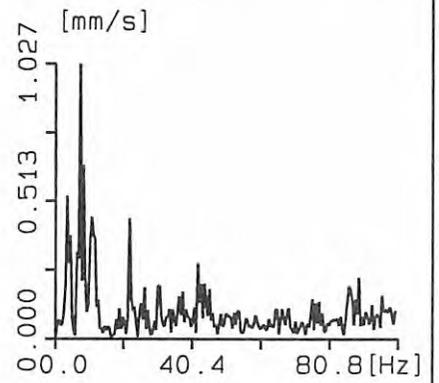
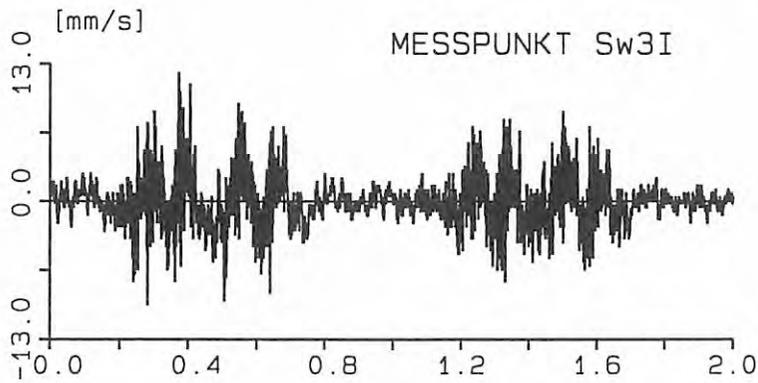
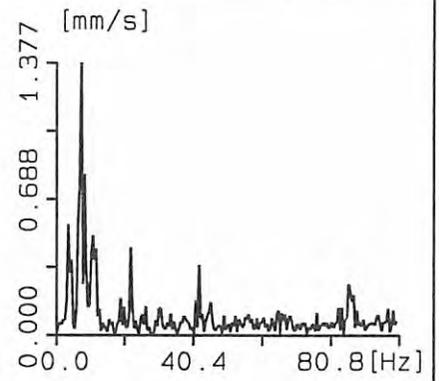
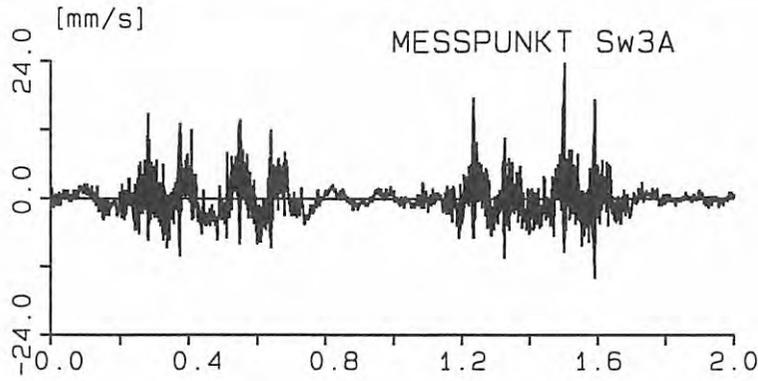
BLATT NR.

D 2.6



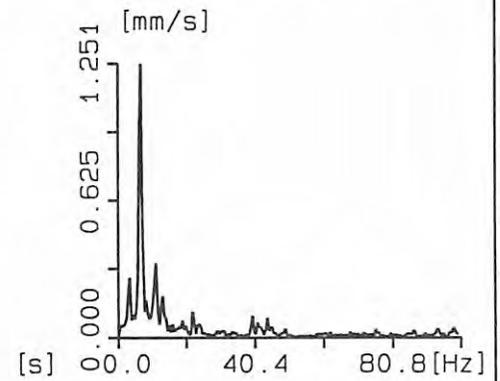
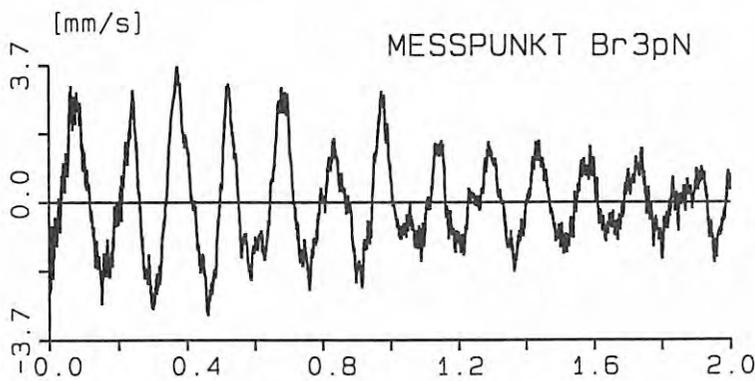
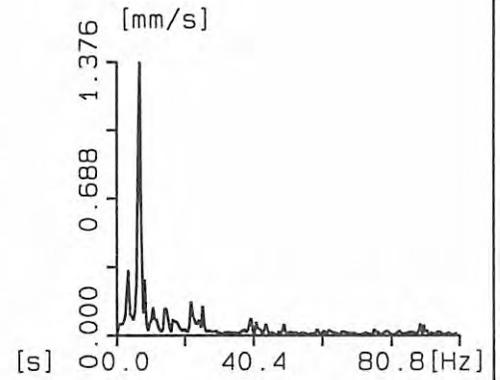
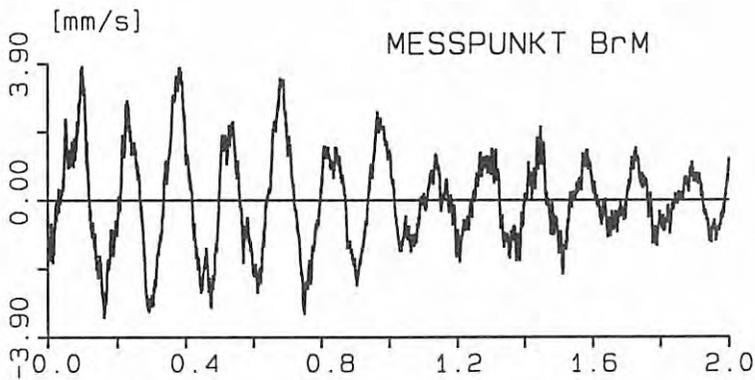
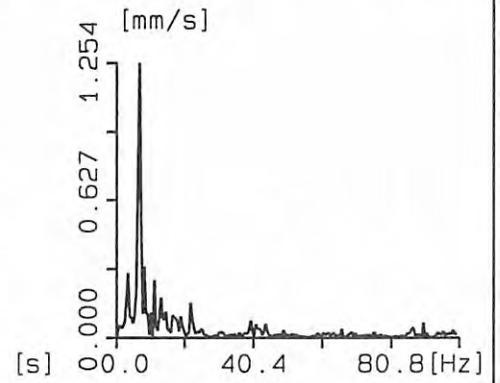
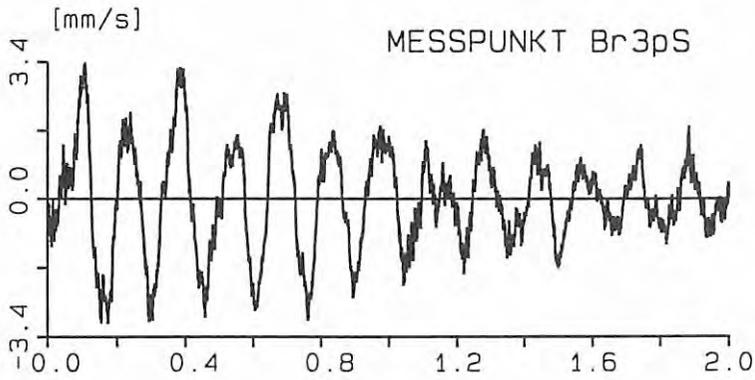
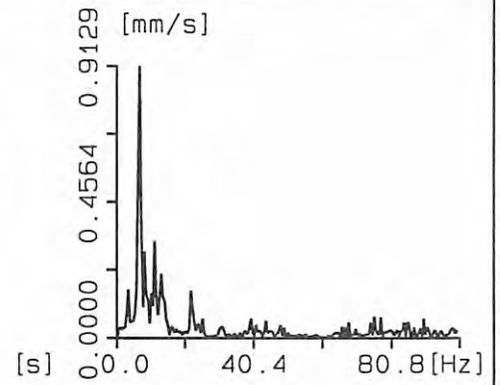
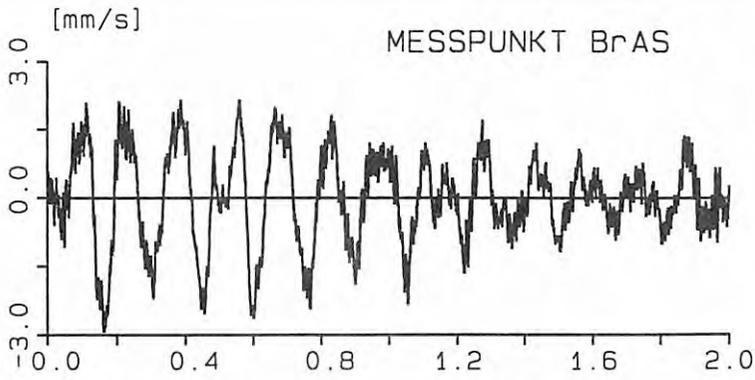
B A M B E R L I N	Fahrzeug-Fahrweg-ww	
Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK	Bruecke	
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ	Messw. 100 km/h	BLATT 21

D 2.6



<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK</p>	<p>Bruecke</p>	
<p>ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Messw. 100 km/h</p>	<p>BLATT 22</p>

D 2.6



B A M B E R L I N

Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

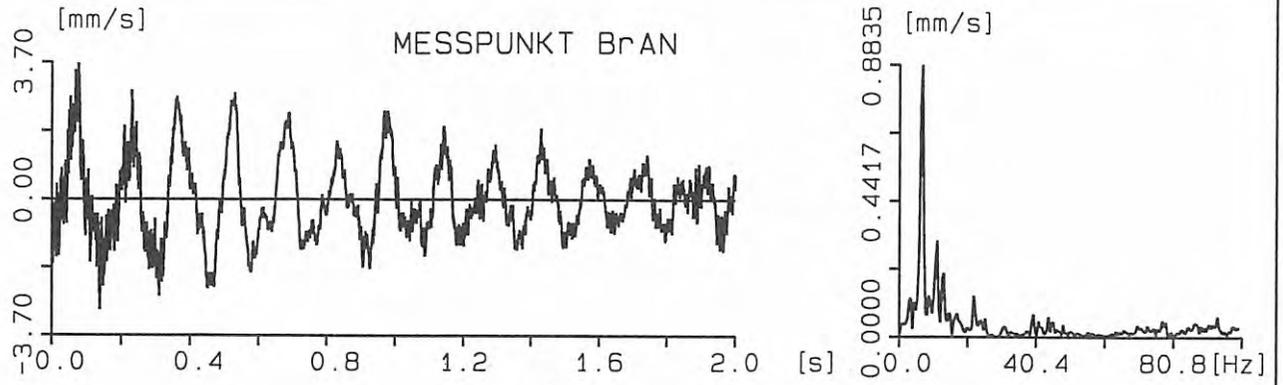
Fahrzeug-Fahrweg-ww

Bruecke

Messw. 100 km/h

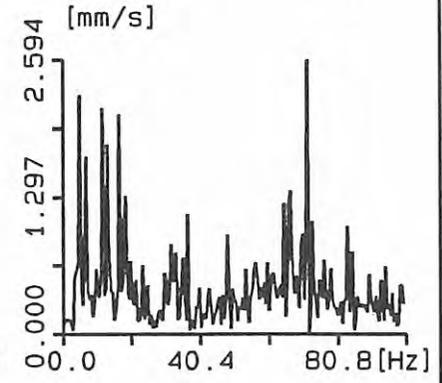
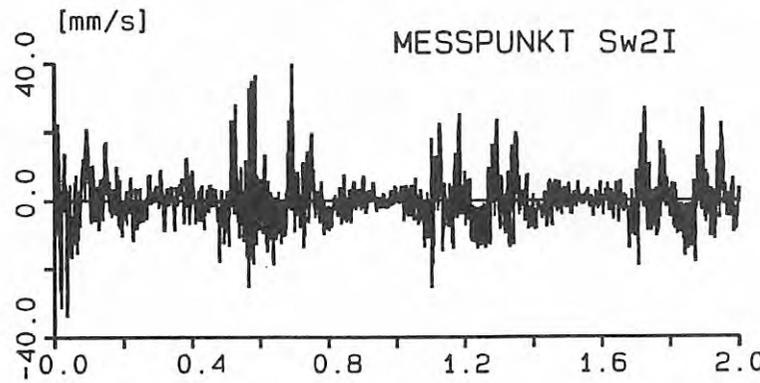
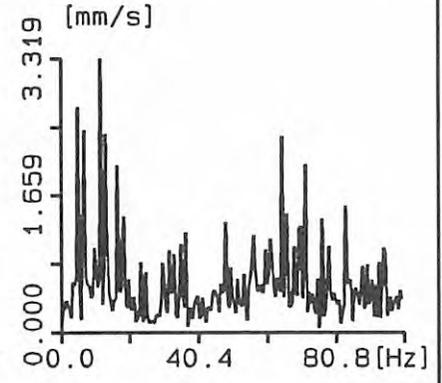
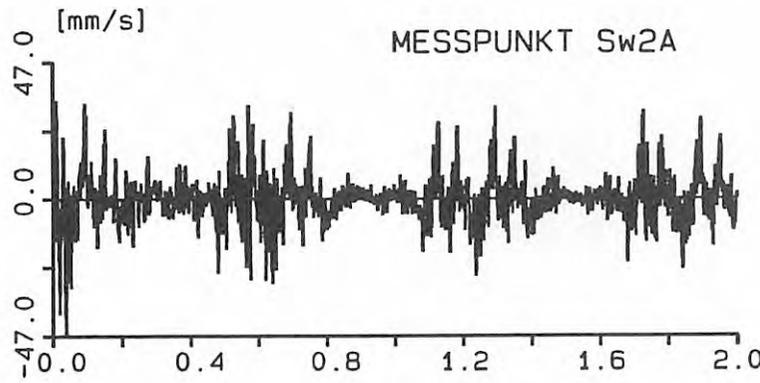
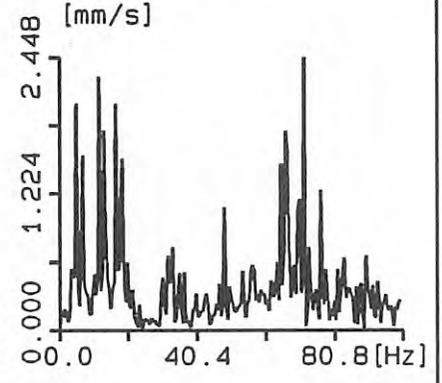
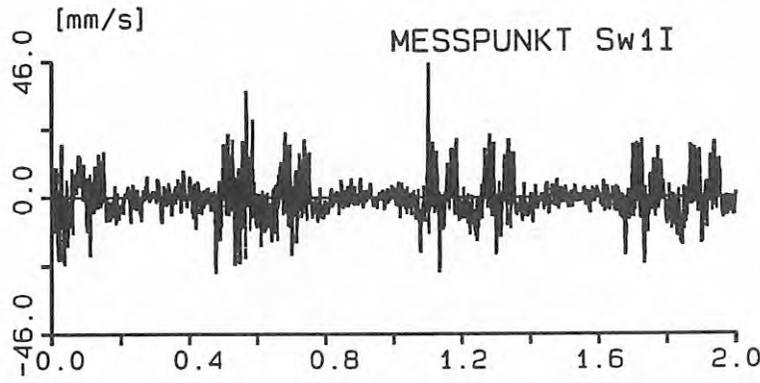
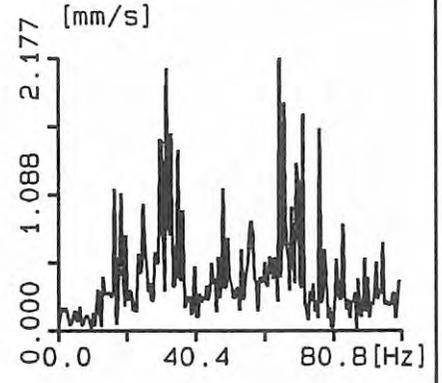
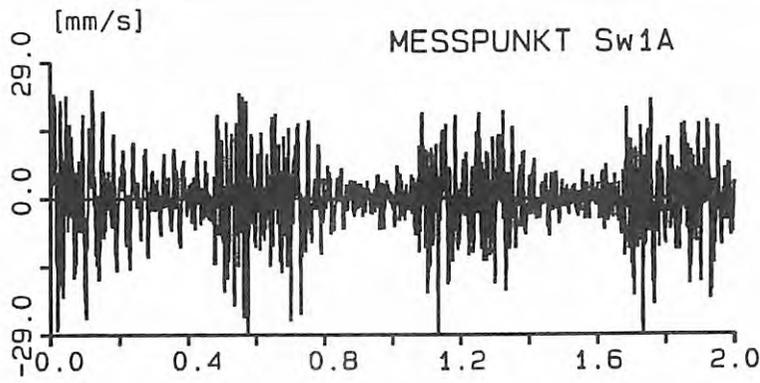
BLATT 23

D 2.6



<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Bruecke  Messw. 100 km/h</p>	<p>BLATT 24</p>

D 2.9



B A M B E R L I N

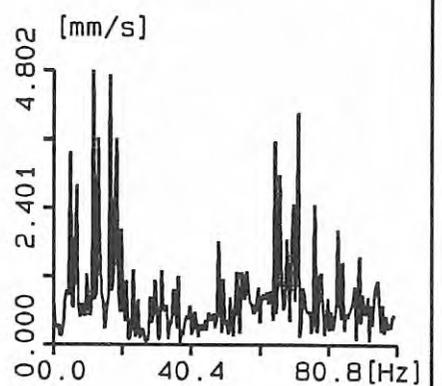
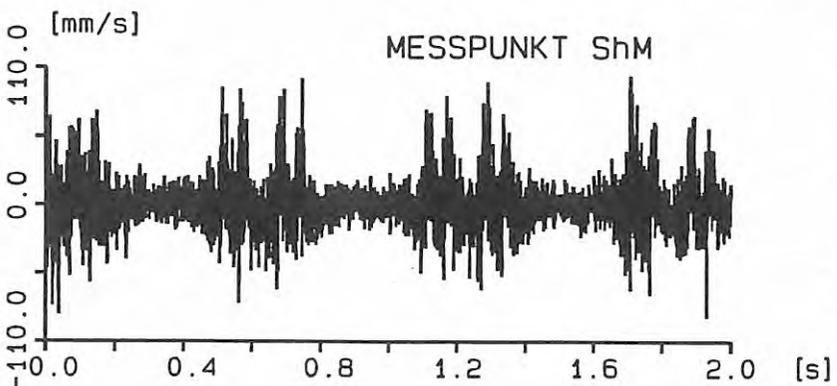
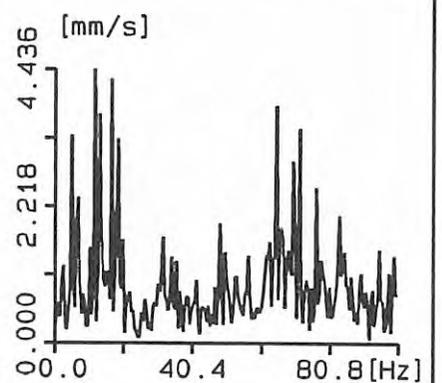
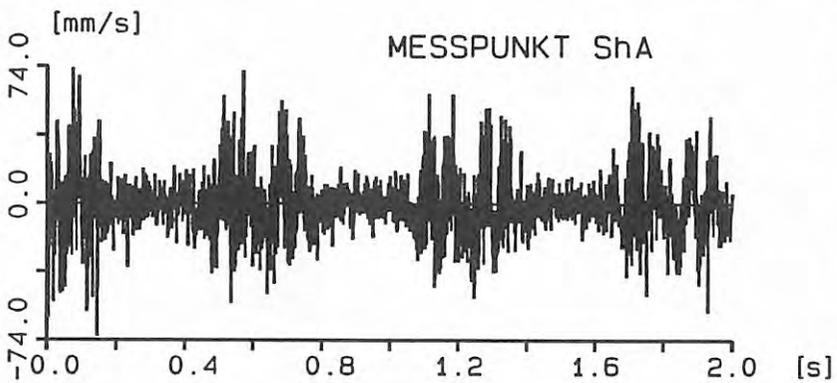
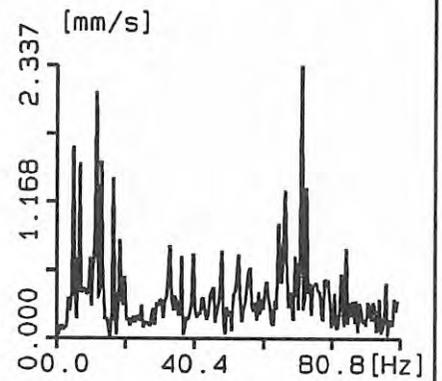
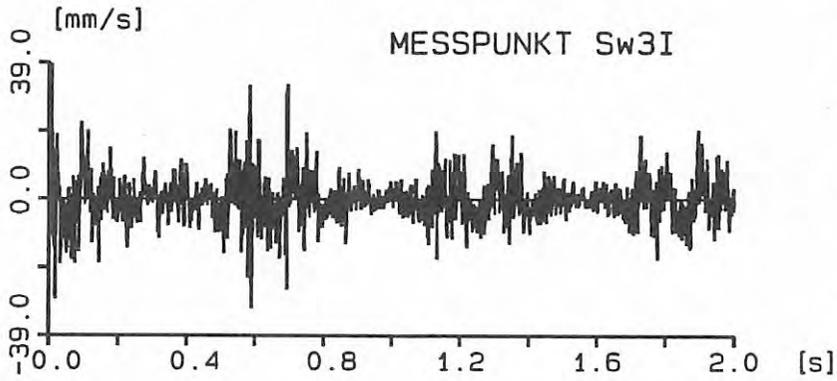
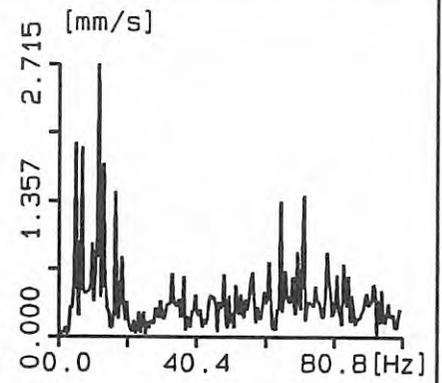
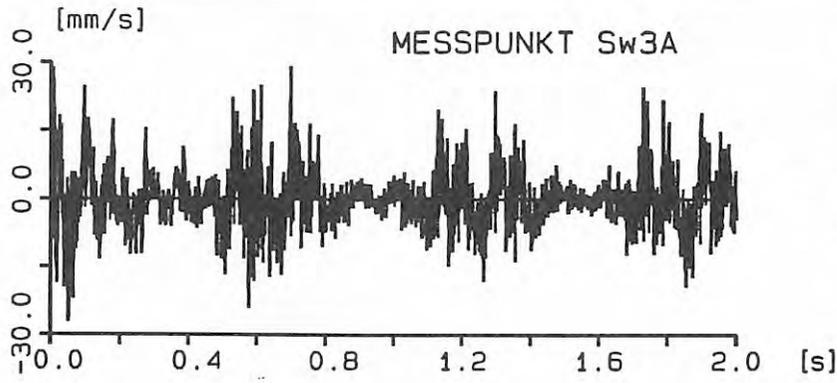
Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fahrzeug-Fahrweg-w

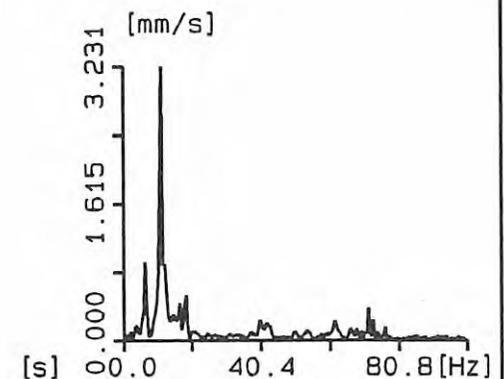
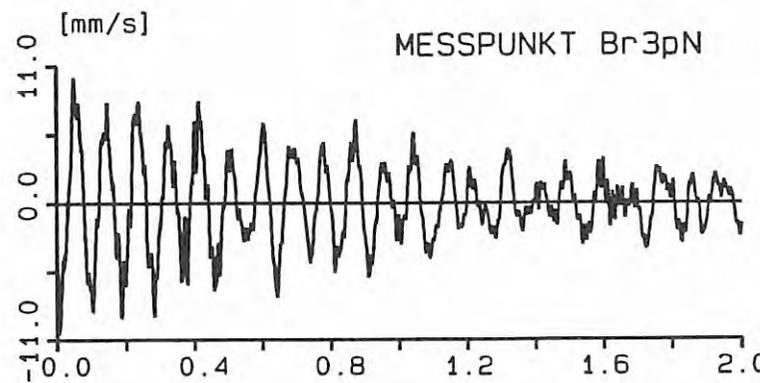
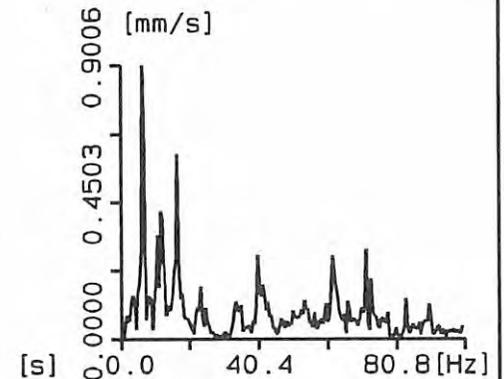
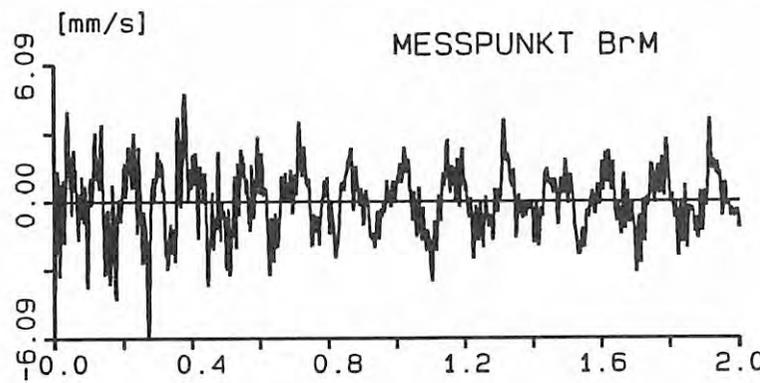
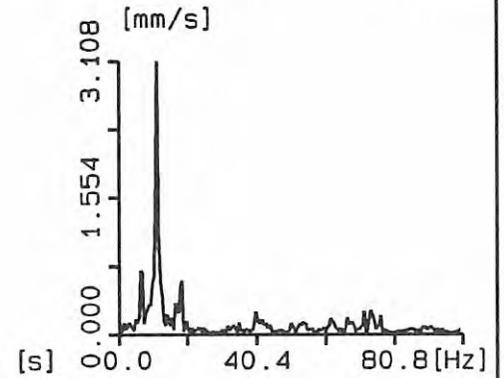
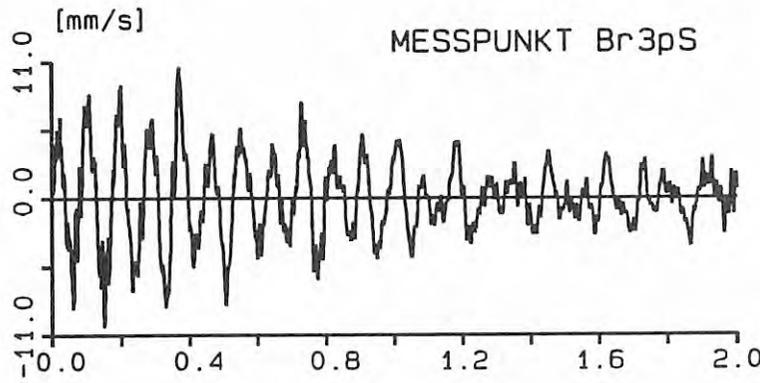
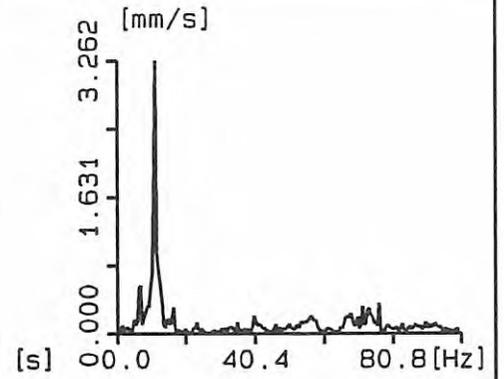
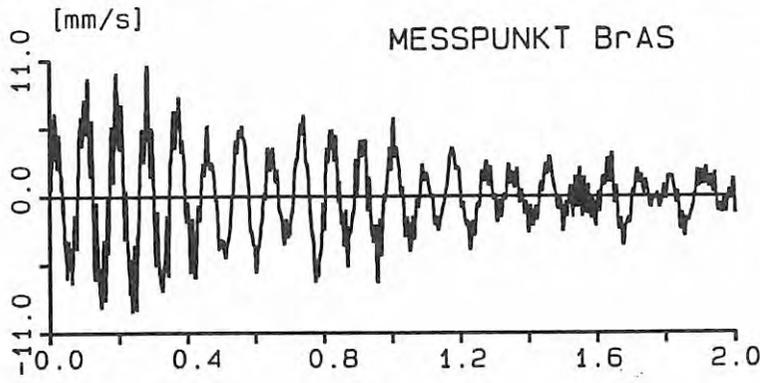
Bruecke

Messw. 160 km/h

BLATT 33



<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Bruecke</p> <p>Messw. 160 km/h</p>	<p>BLATT 34</p>



B A M B E R L I N

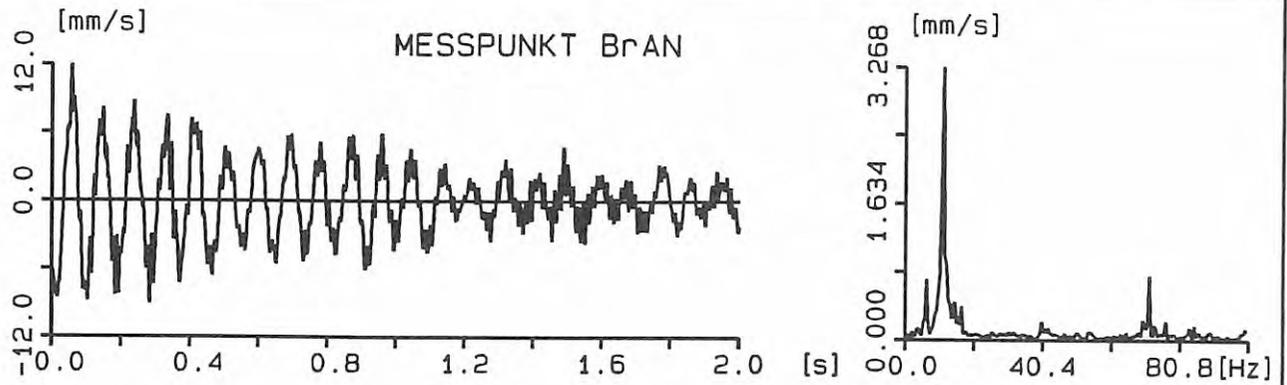
Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fahrzeug-Fahrweg-w

Bruecke

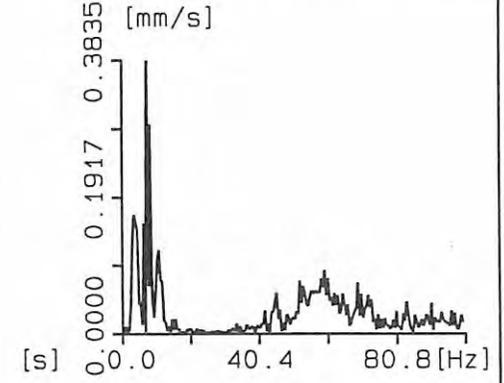
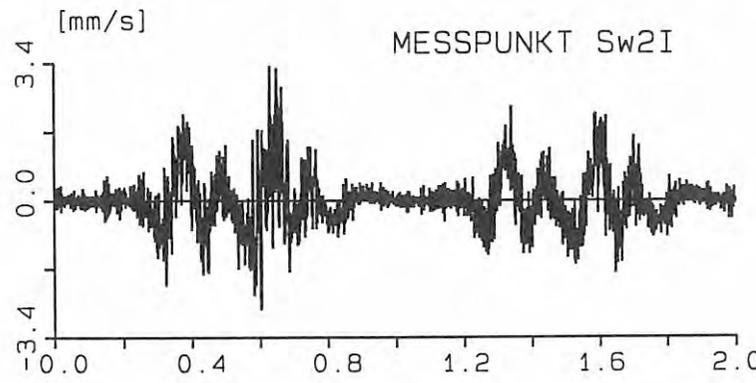
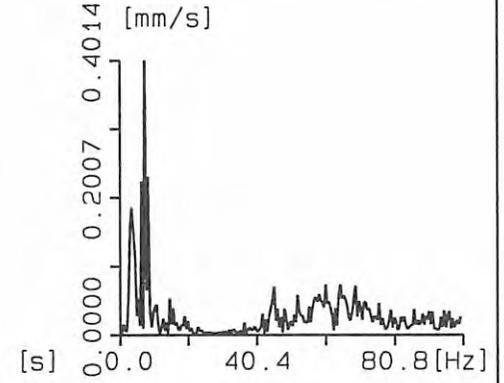
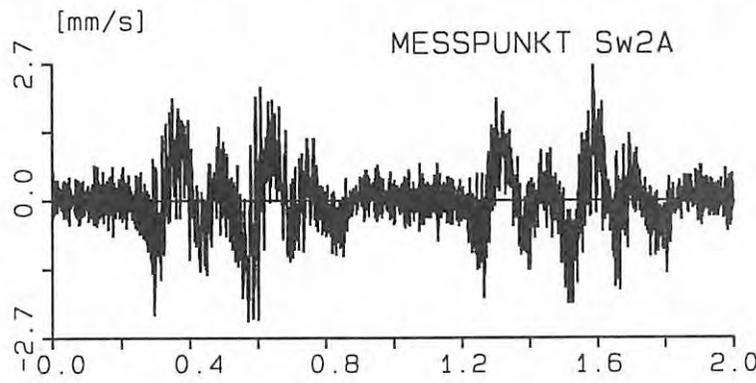
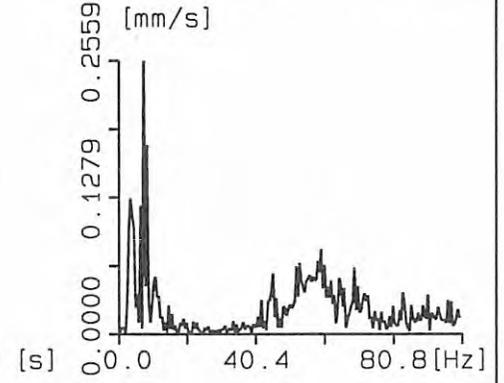
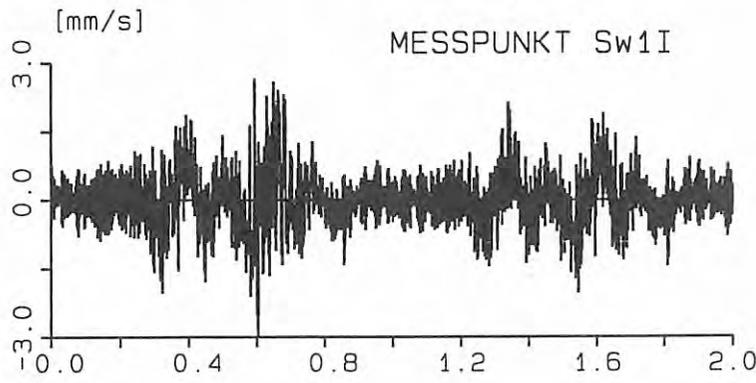
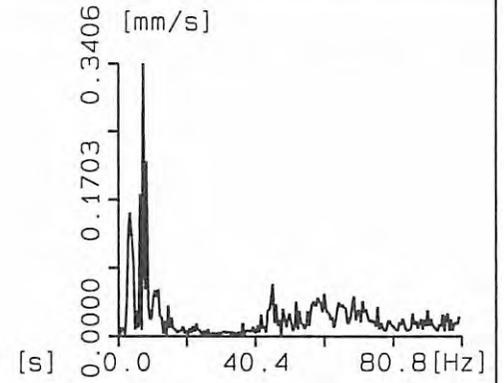
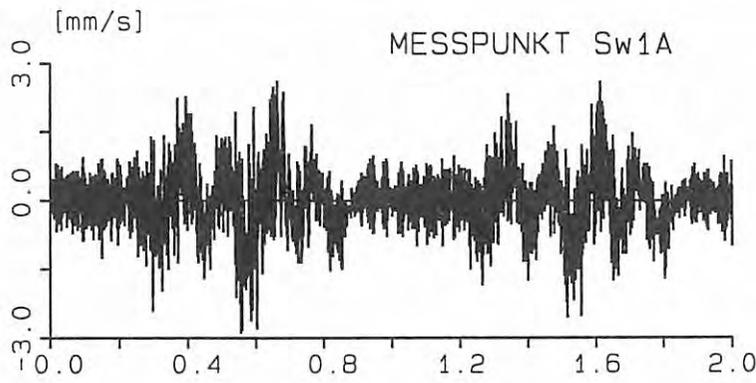
Messw. 160 km/h

BLATT 35



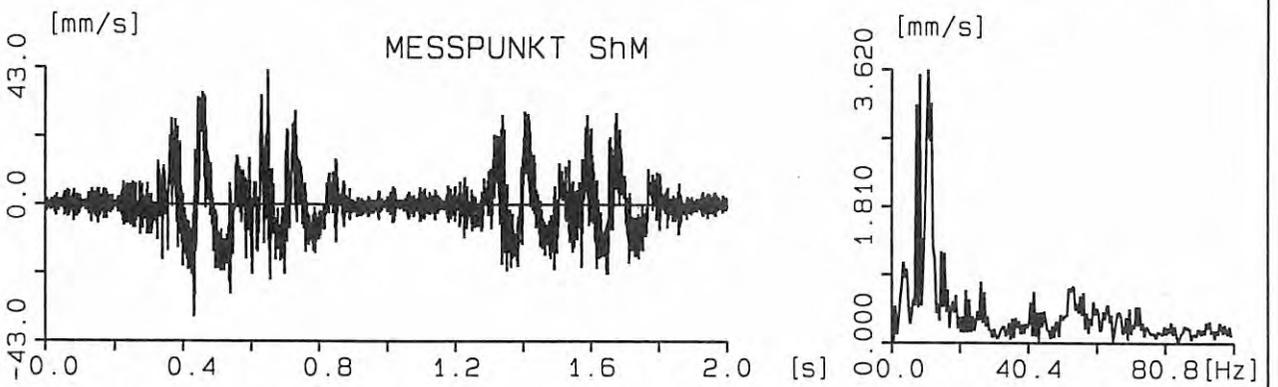
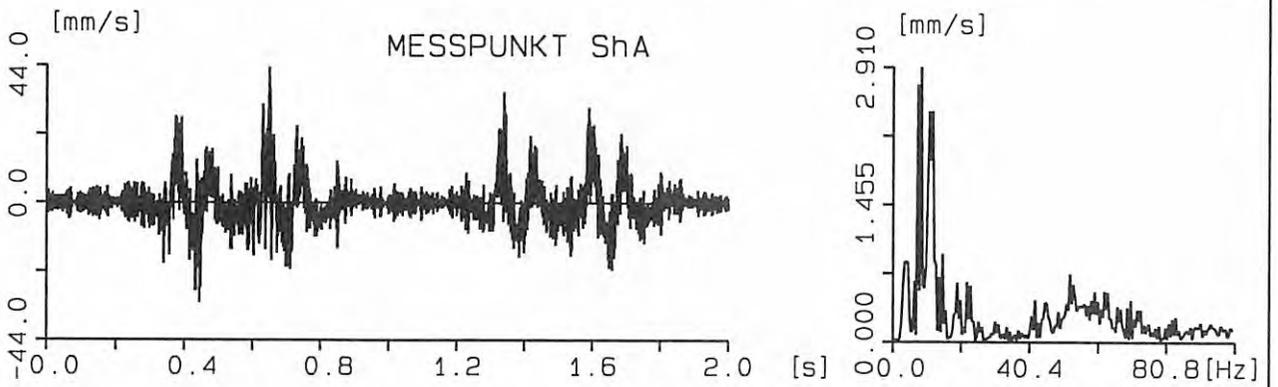
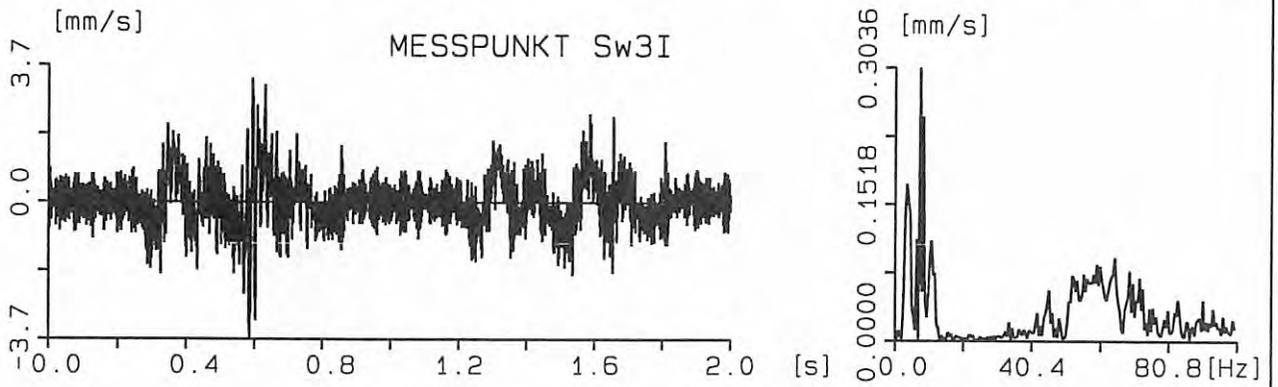
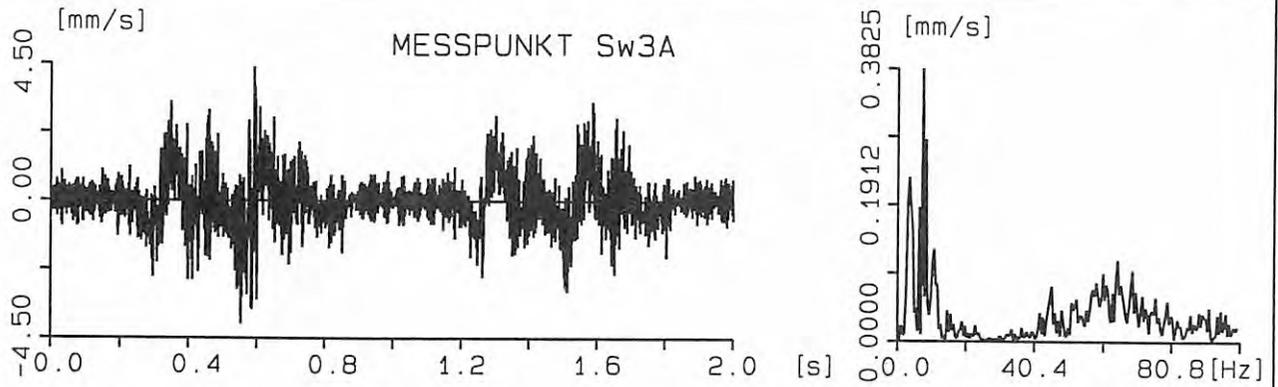
<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Bruecke</p> <p>Messw. 160 km/h</p>	<p>BLATT 36</p>

D 3.6



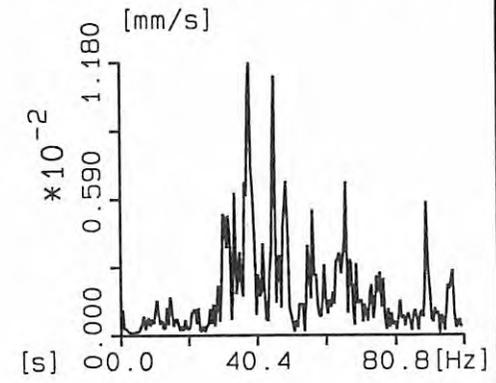
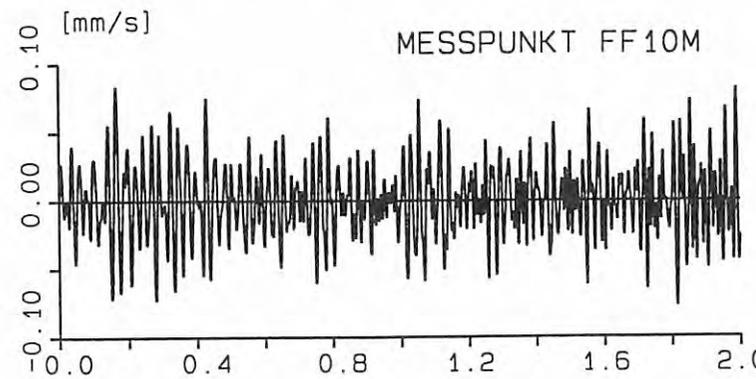
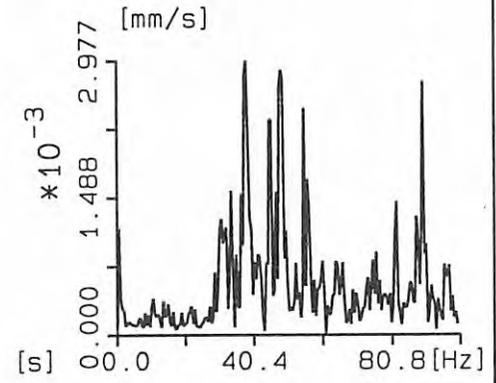
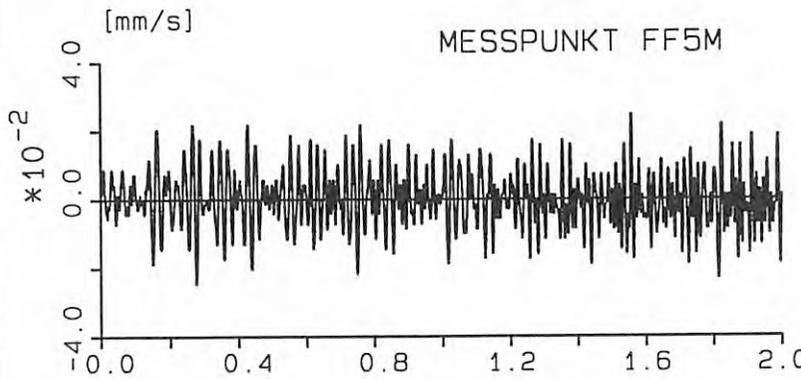
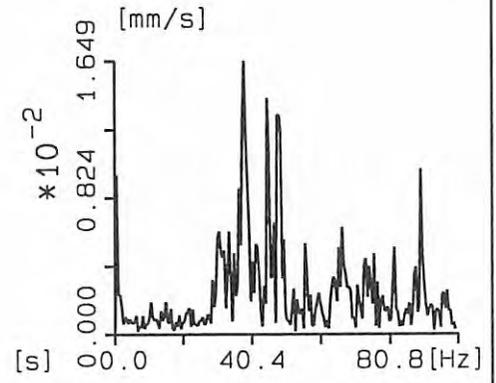
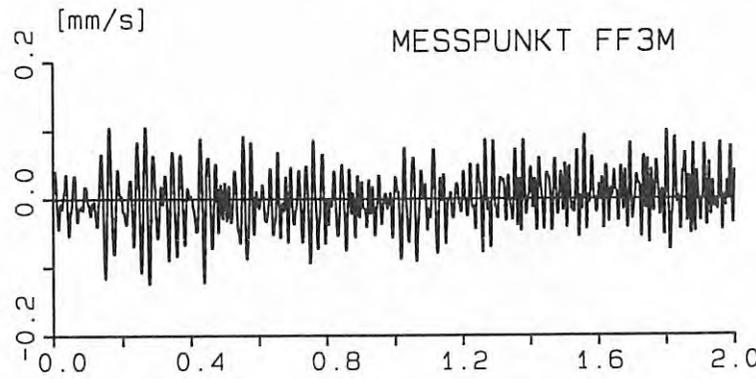
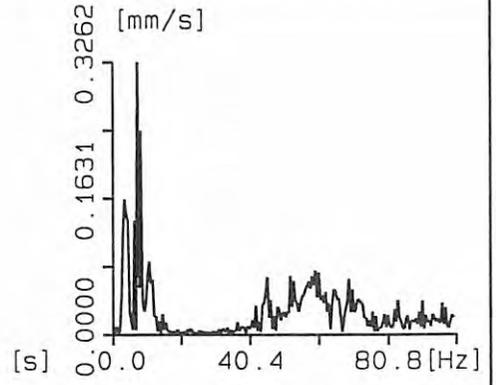
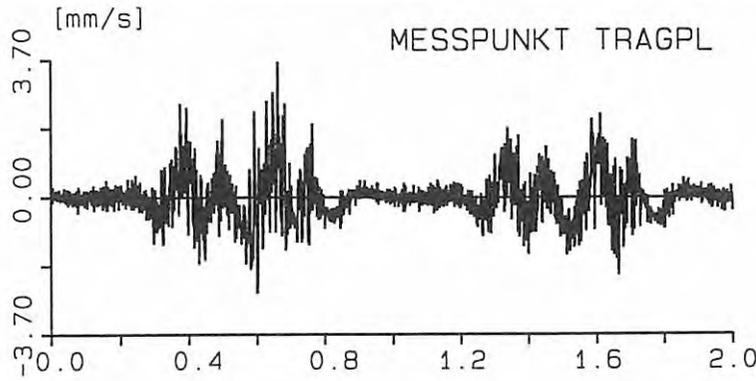
<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-w</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Muehlbergtunnel  Messw. 100 km/h</p>	<p>BLATT 1</p>

D 3.6



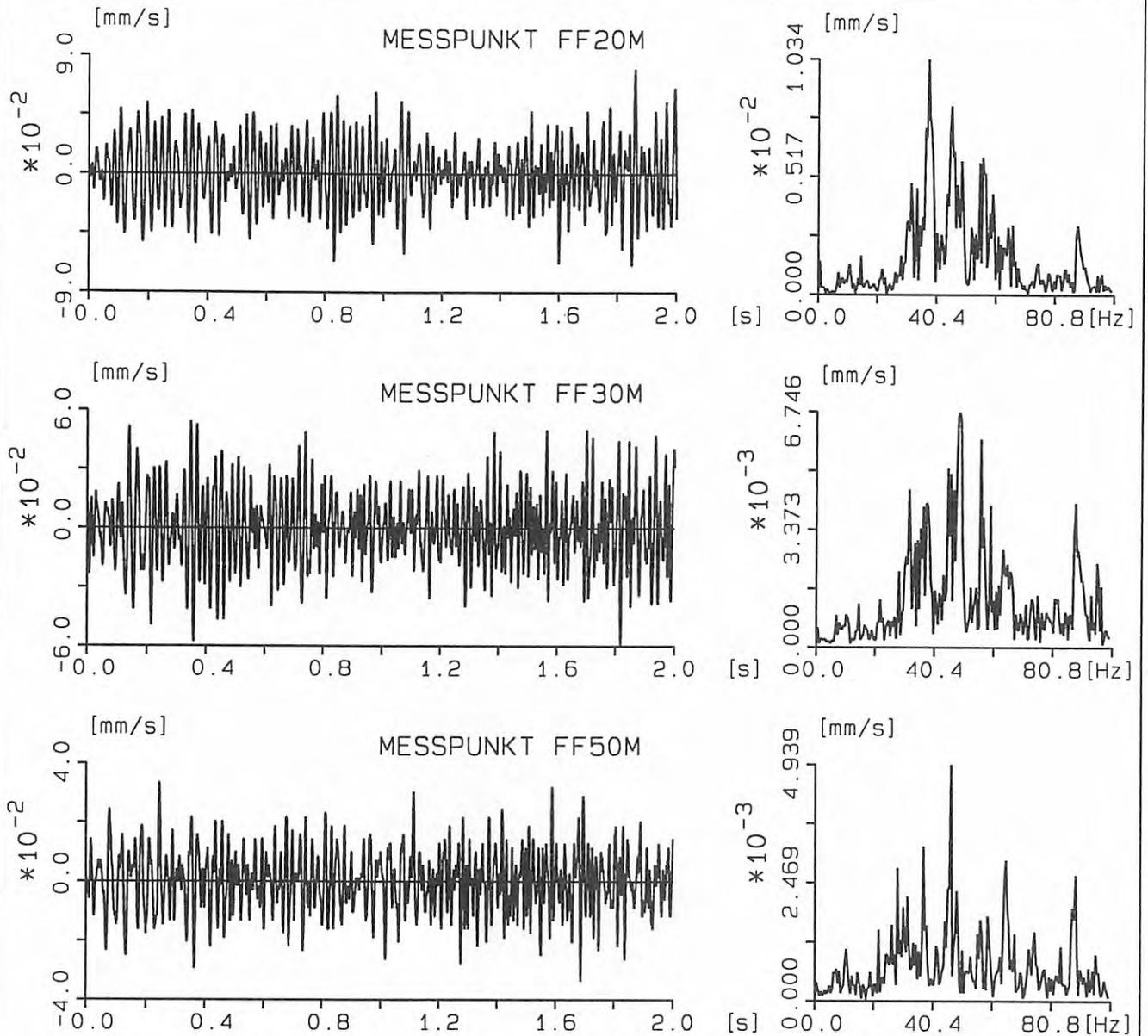
<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Muehlbergtunnel  Messw. 100 km/h</p>	<p>BLATT 2</p>

D 3.6



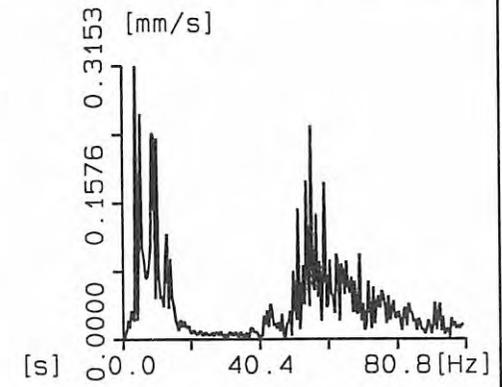
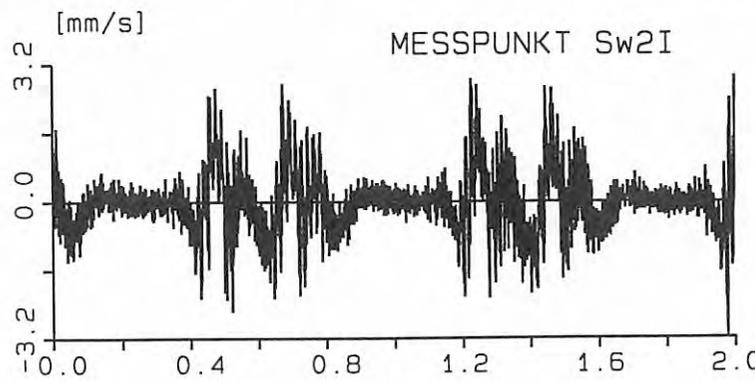
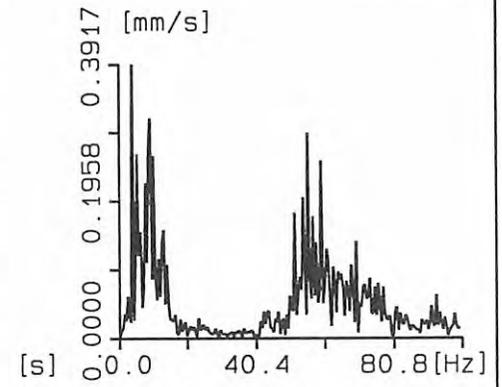
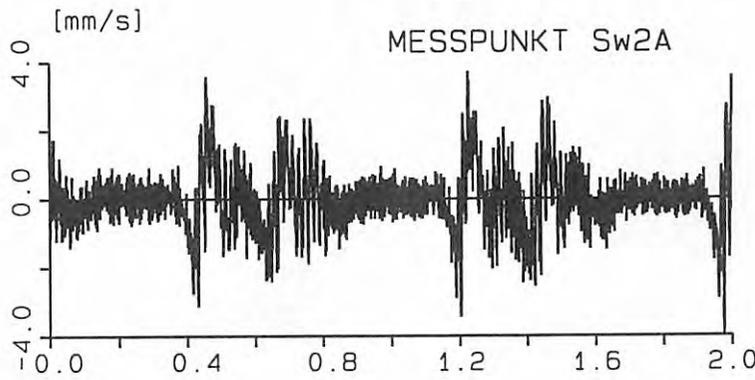
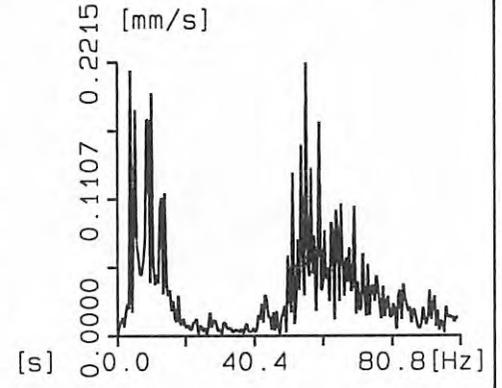
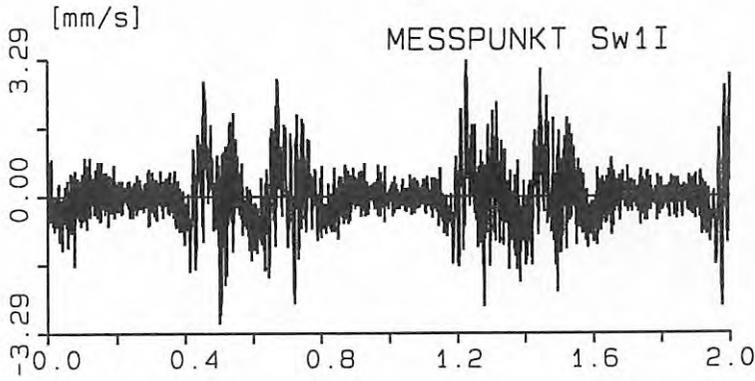
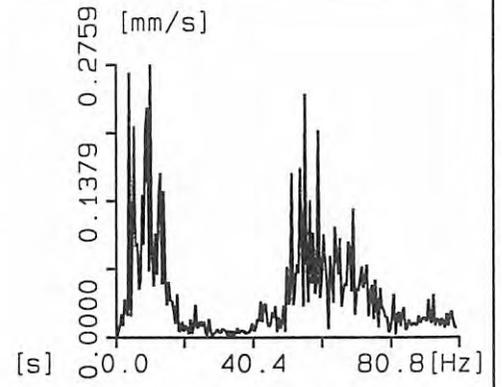
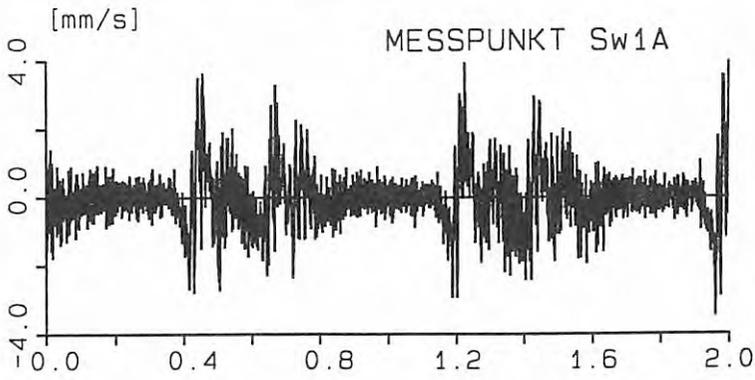
<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK</p>	<p>Muehlbergtunnel</p>	
<p>ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Messw. 100 km/h</p>	<p>BLATT 3</p>

D 3.6



<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Muehlbergtunnel  Messw. 100 km/h</p>	<p>BLATT 4</p>

D 3.7



B A M B E R L I N

Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

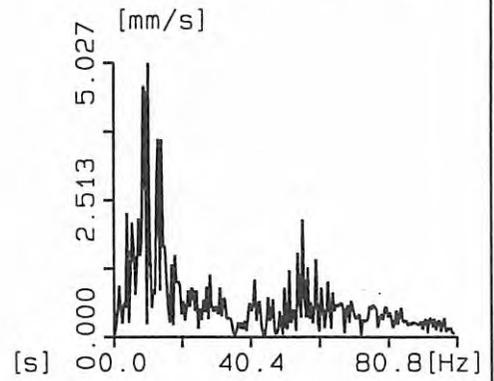
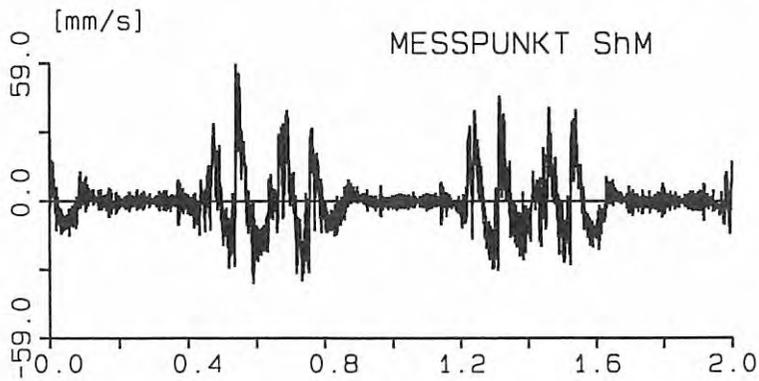
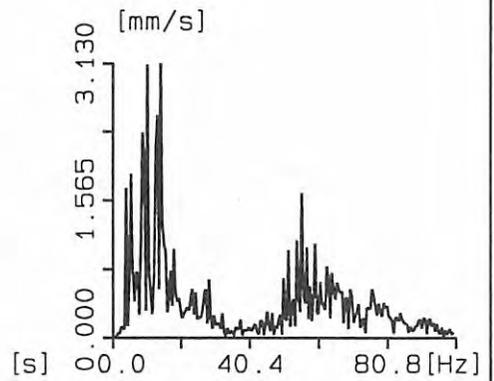
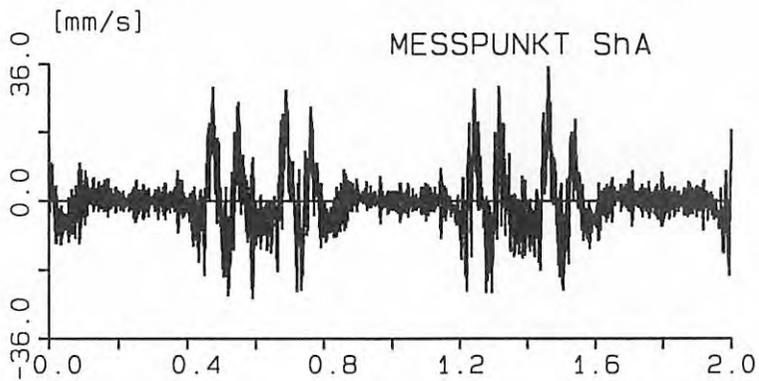
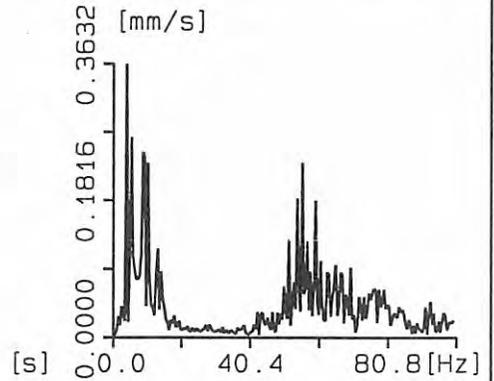
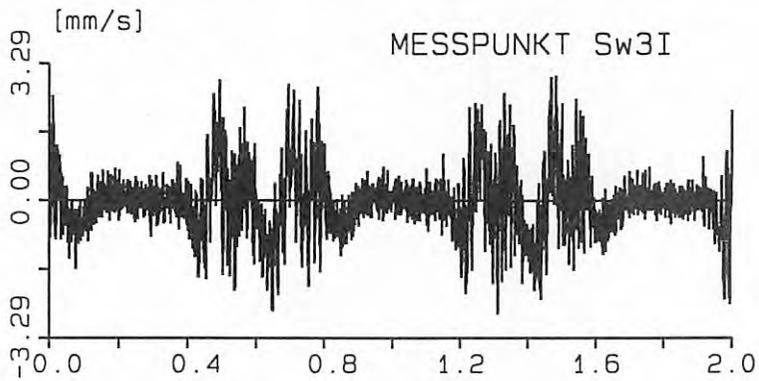
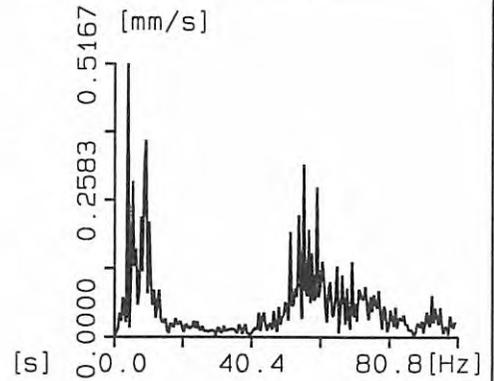
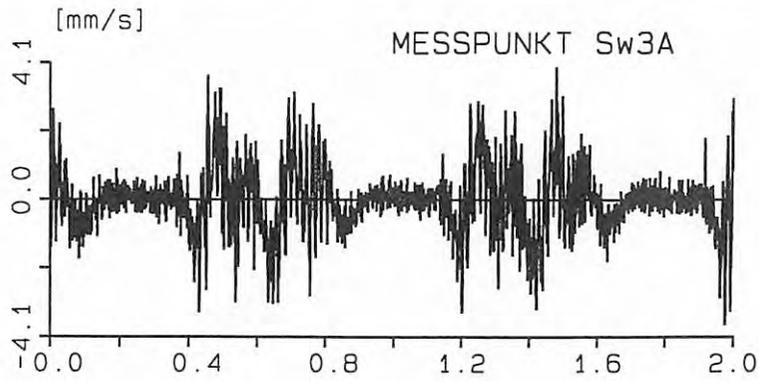
Fahrzeug-Fahrweg-ww

Muehlbergtunnel

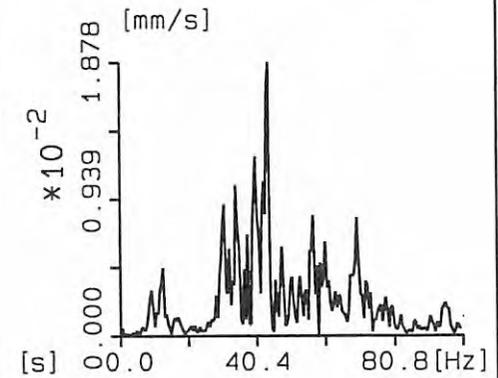
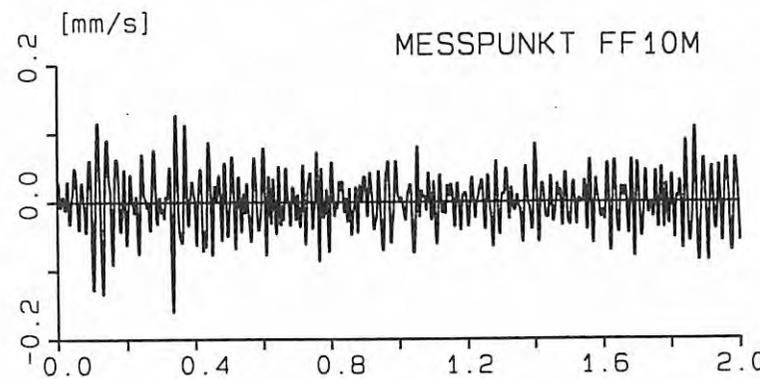
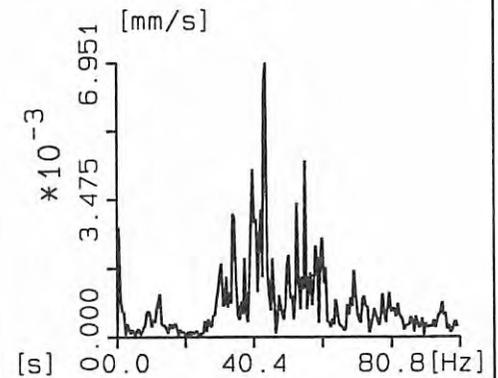
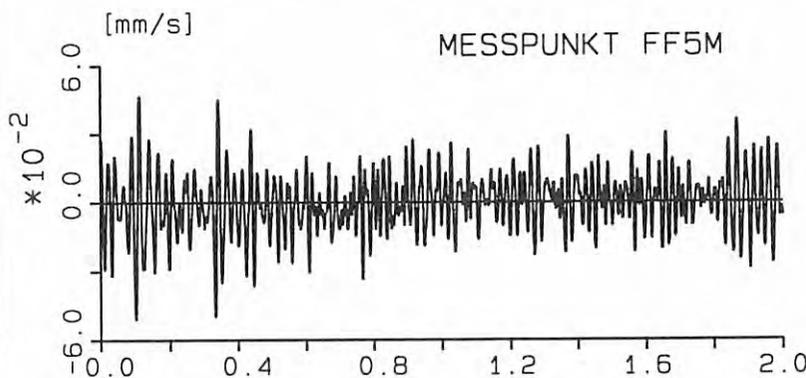
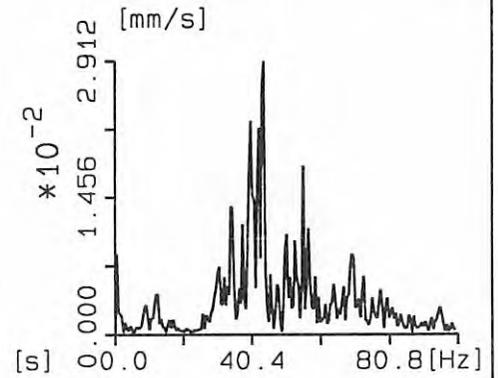
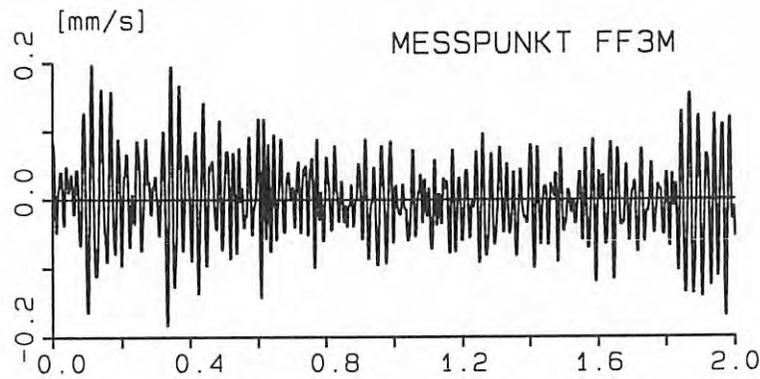
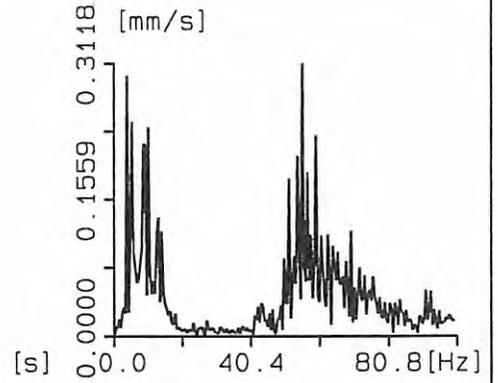
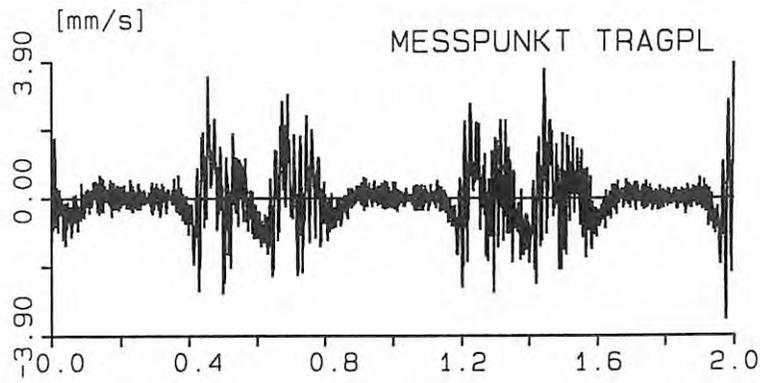
Messw. 125 km/h

BLATT 25

D 3.7



<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK</p>	<p>Muehlbergtunnel</p>	
<p>ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Messw. 125 km/h</p>	<p>BLATT 26</p>



B A M B E R L I N

Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

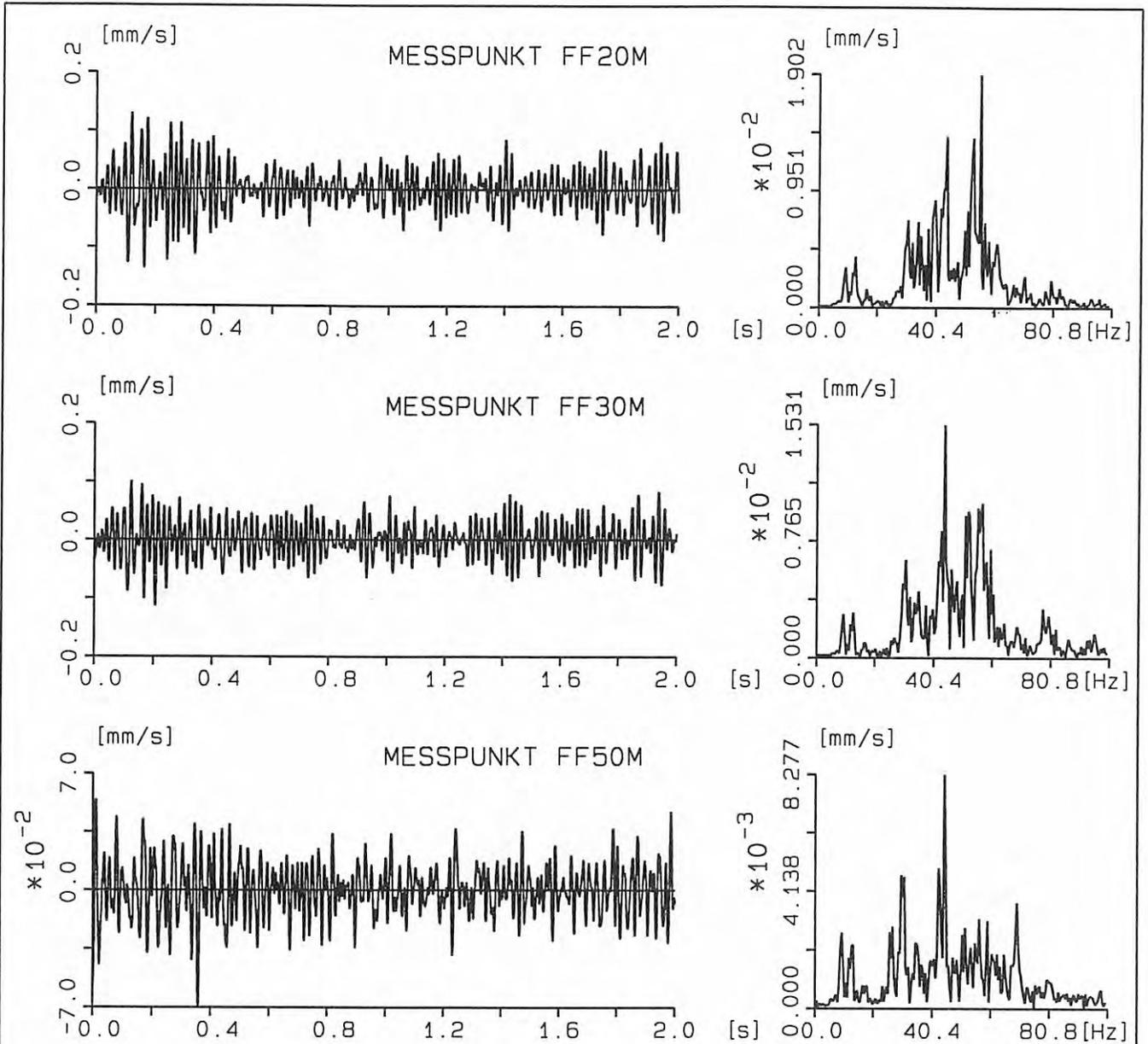
Fahrzeug-Fahrweg-w

Muehlbergtunnel

Messw. 125 km/h

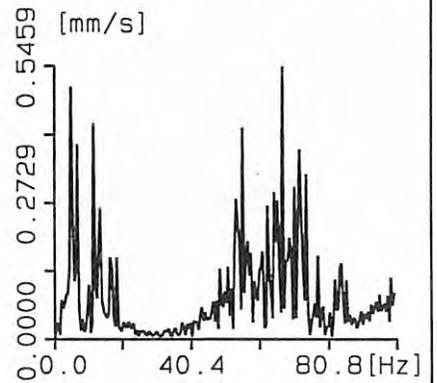
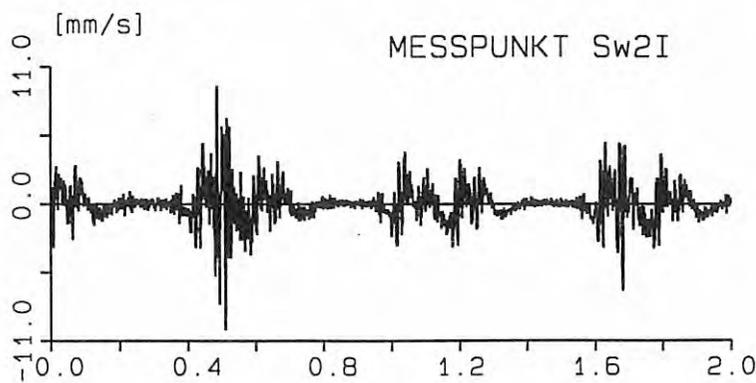
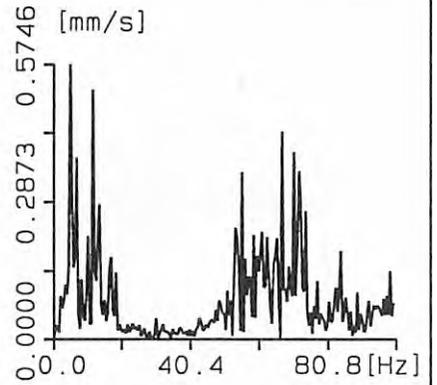
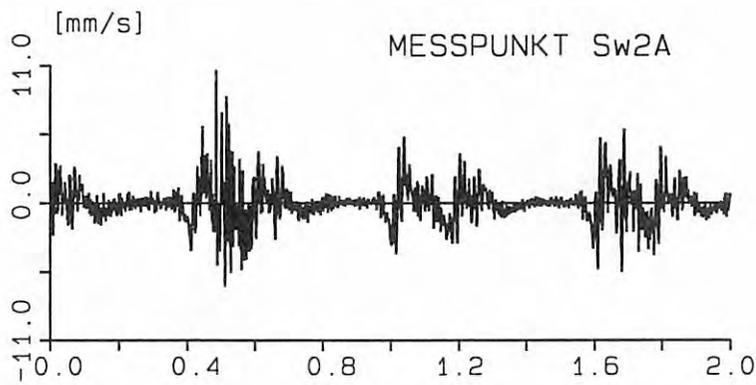
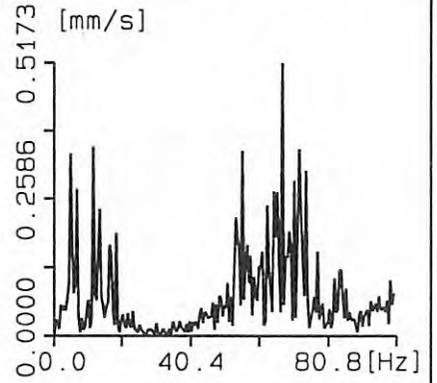
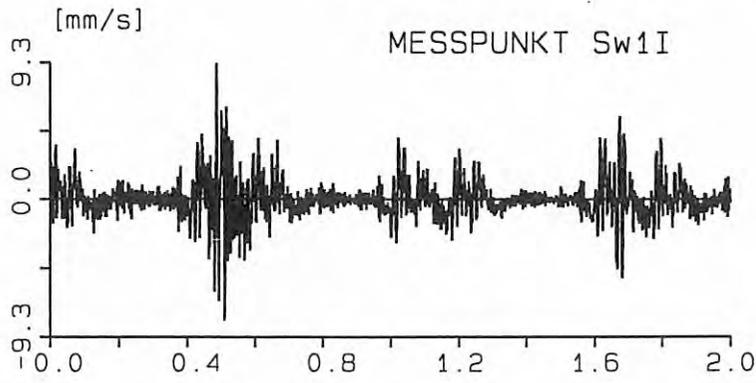
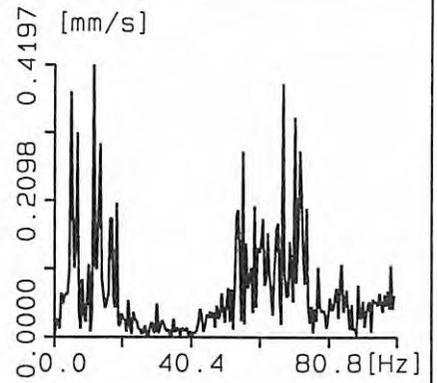
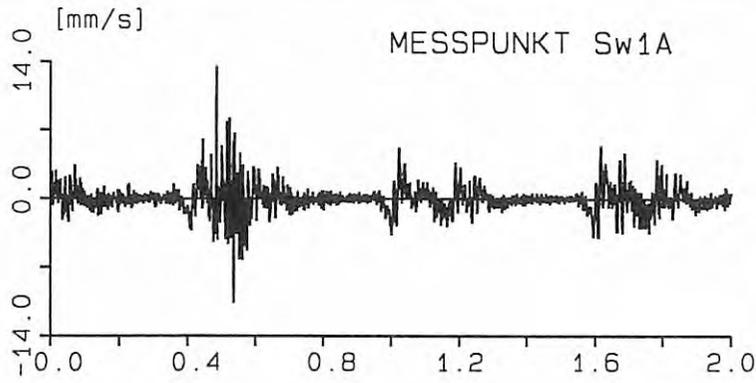
BLATT 27

D 3.7



<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-w</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Muehlbergtunnel Messw. 125 km/h</p>	<p>BLATT 28</p>

D 3.9



B A M B E R L I N

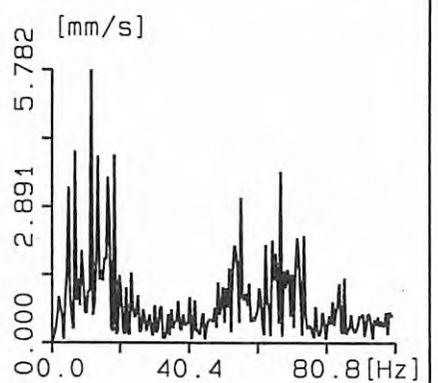
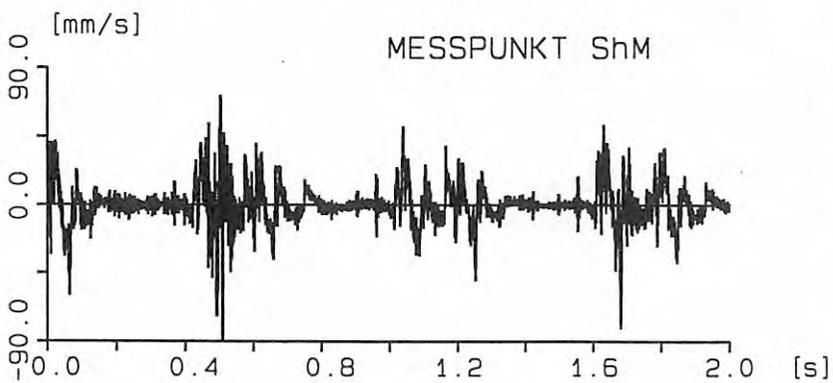
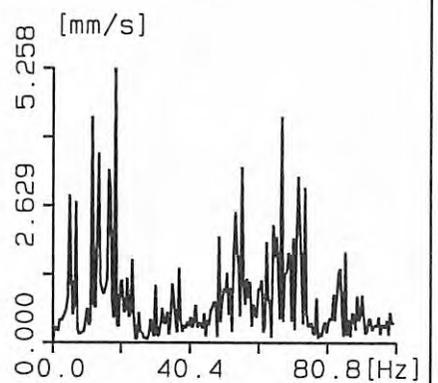
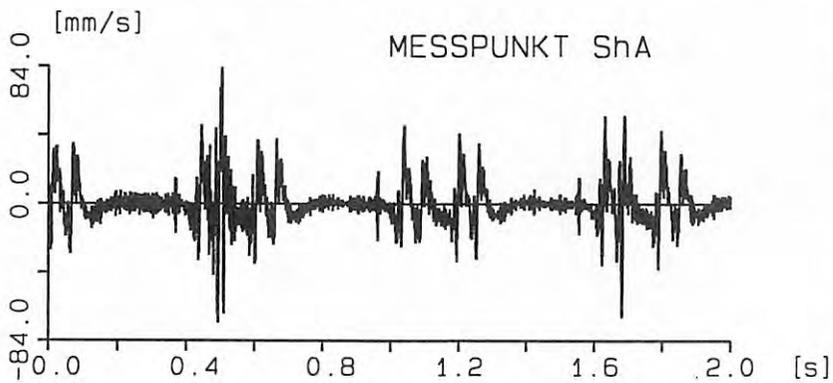
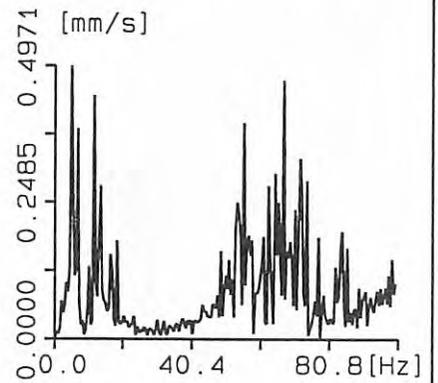
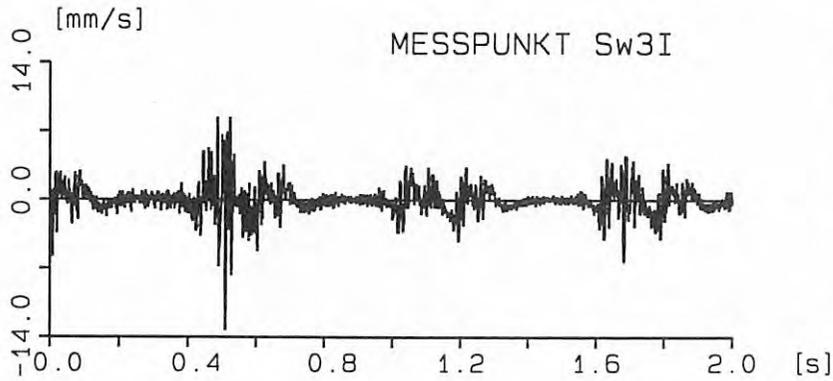
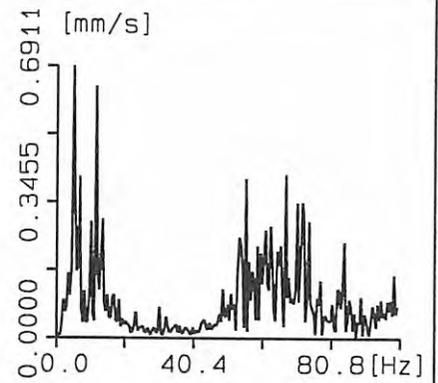
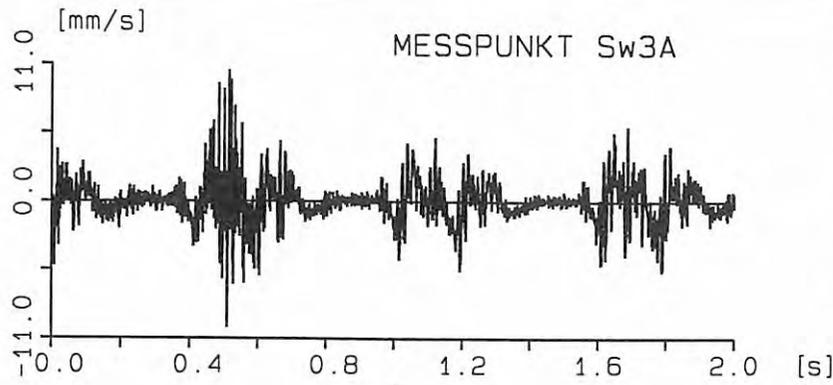
Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fahrzeug-Fahrweg-ww

Muehlbergtunnel

Messw. 160 km/h

BLATT 33



B A M B E R L I N

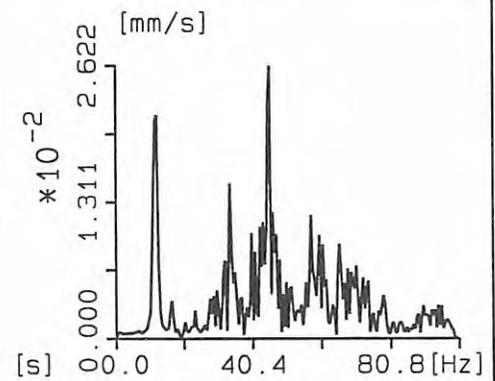
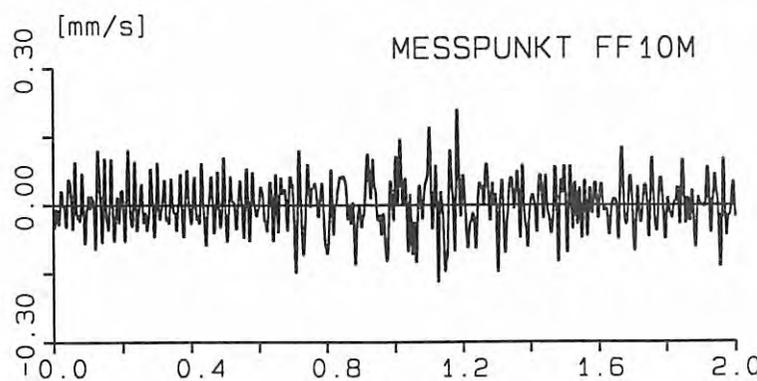
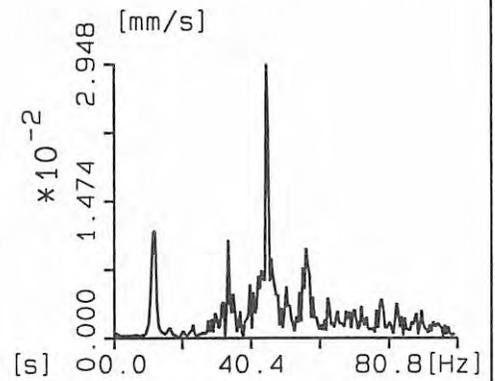
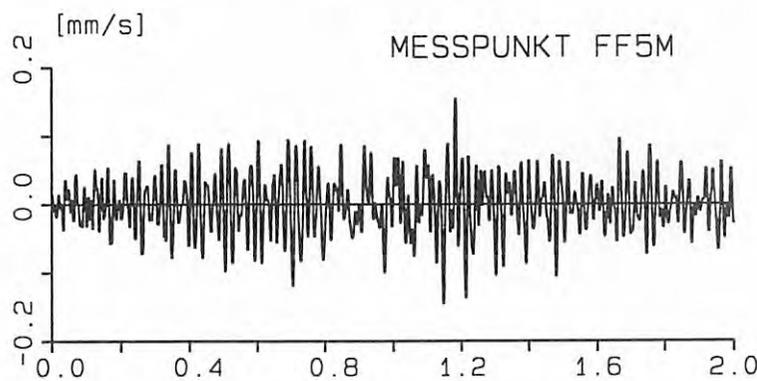
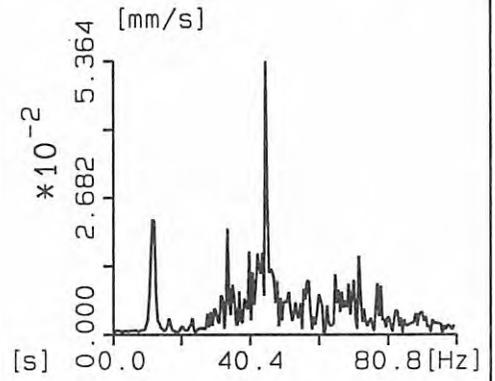
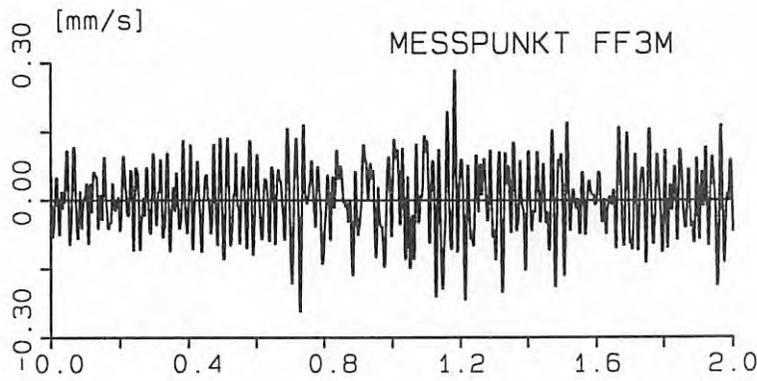
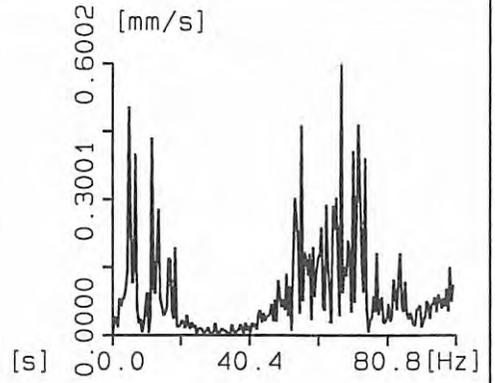
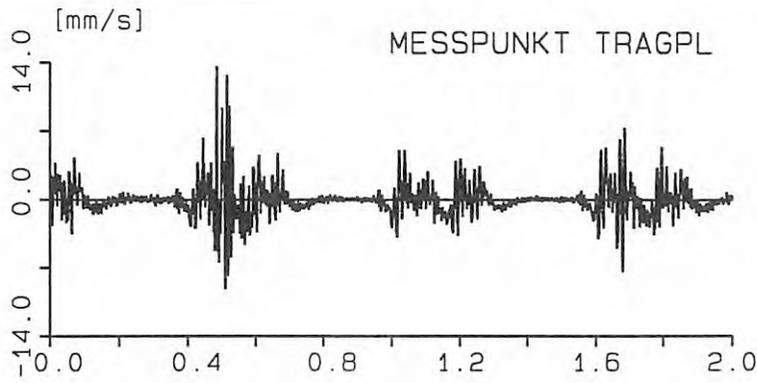
Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fahrzeug-Fahrweg-ww

Muehlbergtunnel

Messw. 160 km/h

BLATT 34



B A M B E R L I N

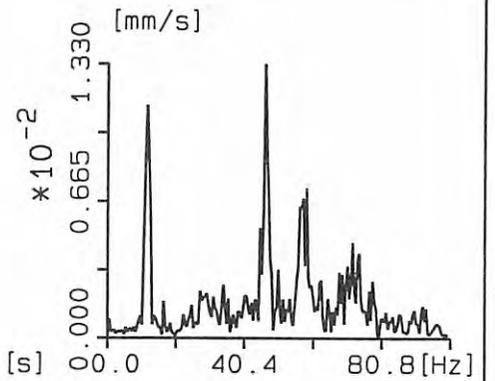
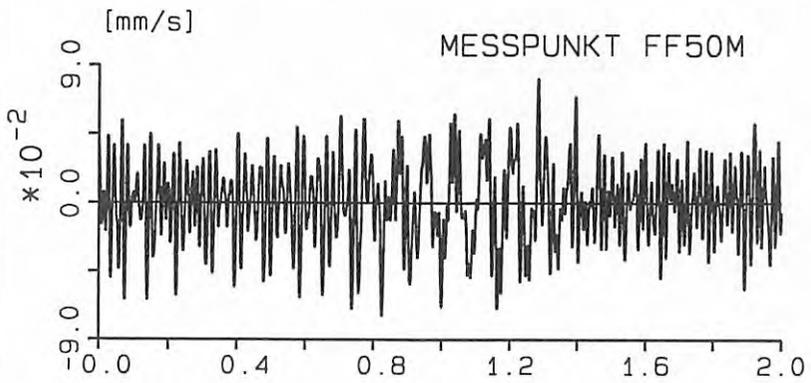
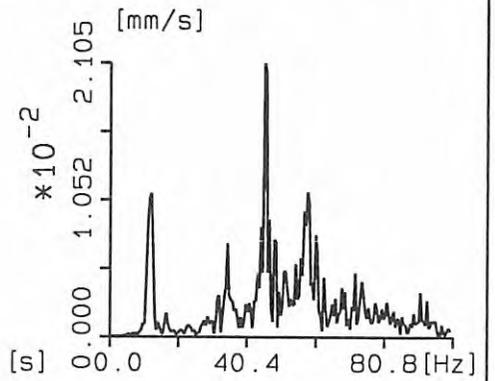
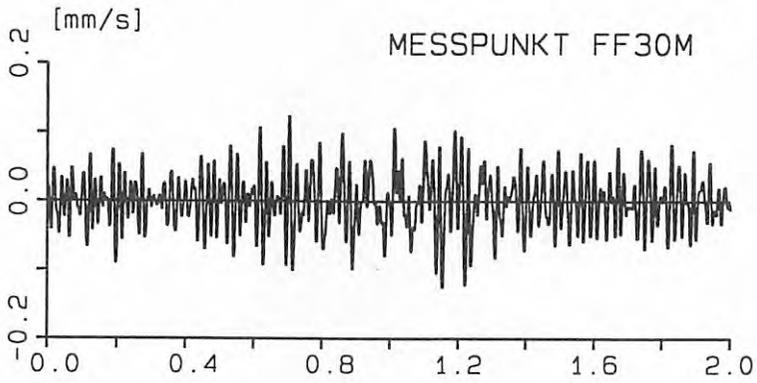
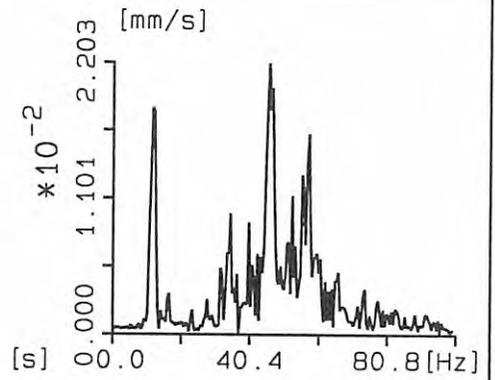
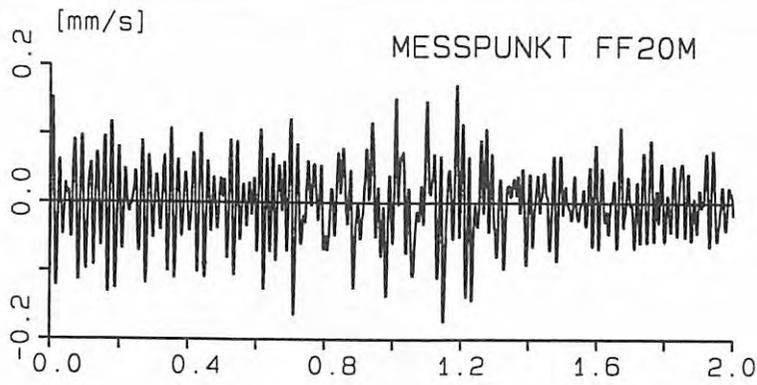
Laboratorium VII.32  
BAUDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fahrzeug-Fahrweg-ww

Muehlbergtunnel

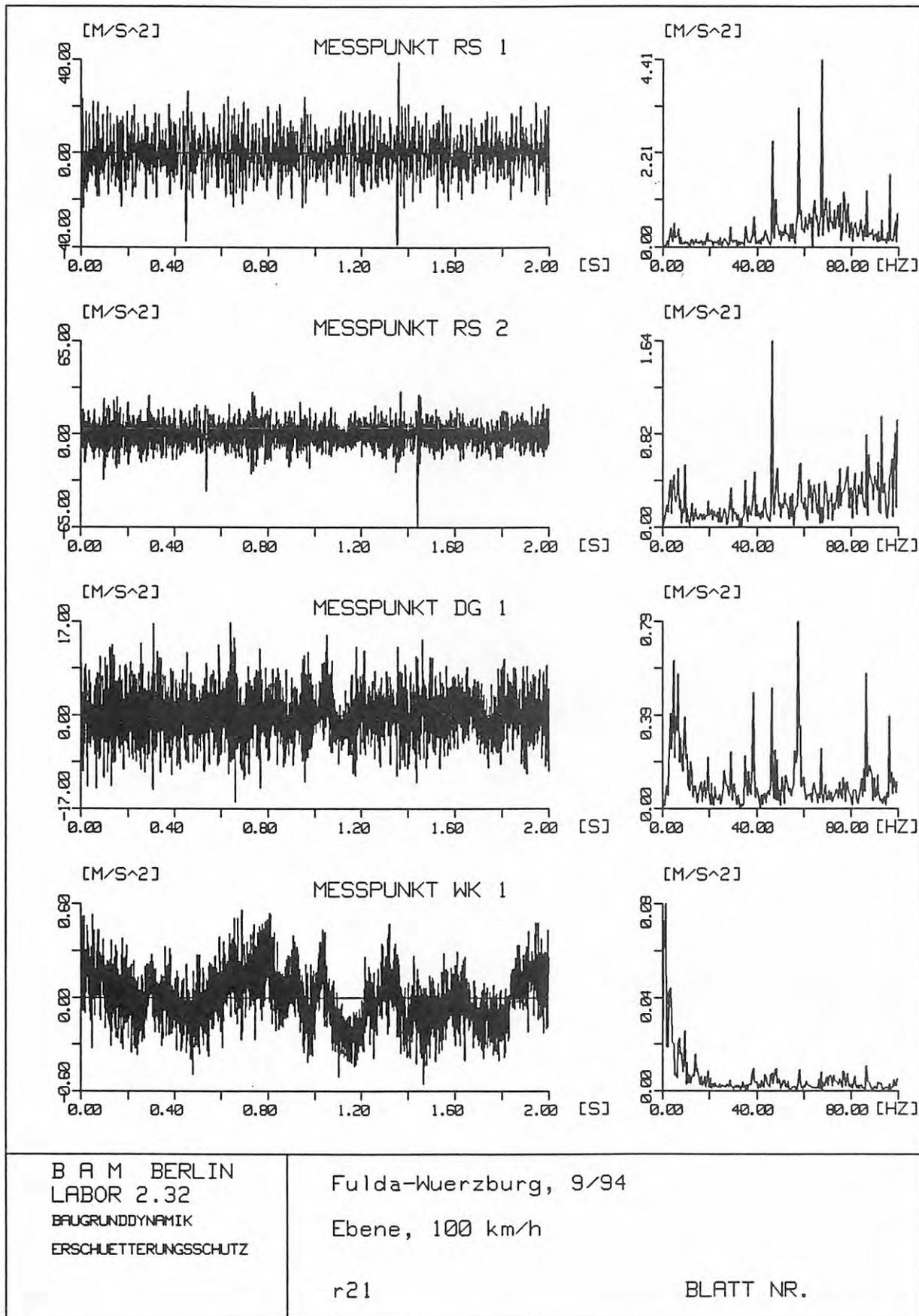
Messw. 160 km/h

BLATT 35



<p>B A M B E R L I N</p>	<p>Fahrzeug-Fahrweg-ww</p>	
<p>Laboratorium VII.32 BAUDYNAMIK ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ</p>	<p>Muehlbergtunnel Messw. 160 km/h</p>	<p>BLATT 36</p>

D 4.6



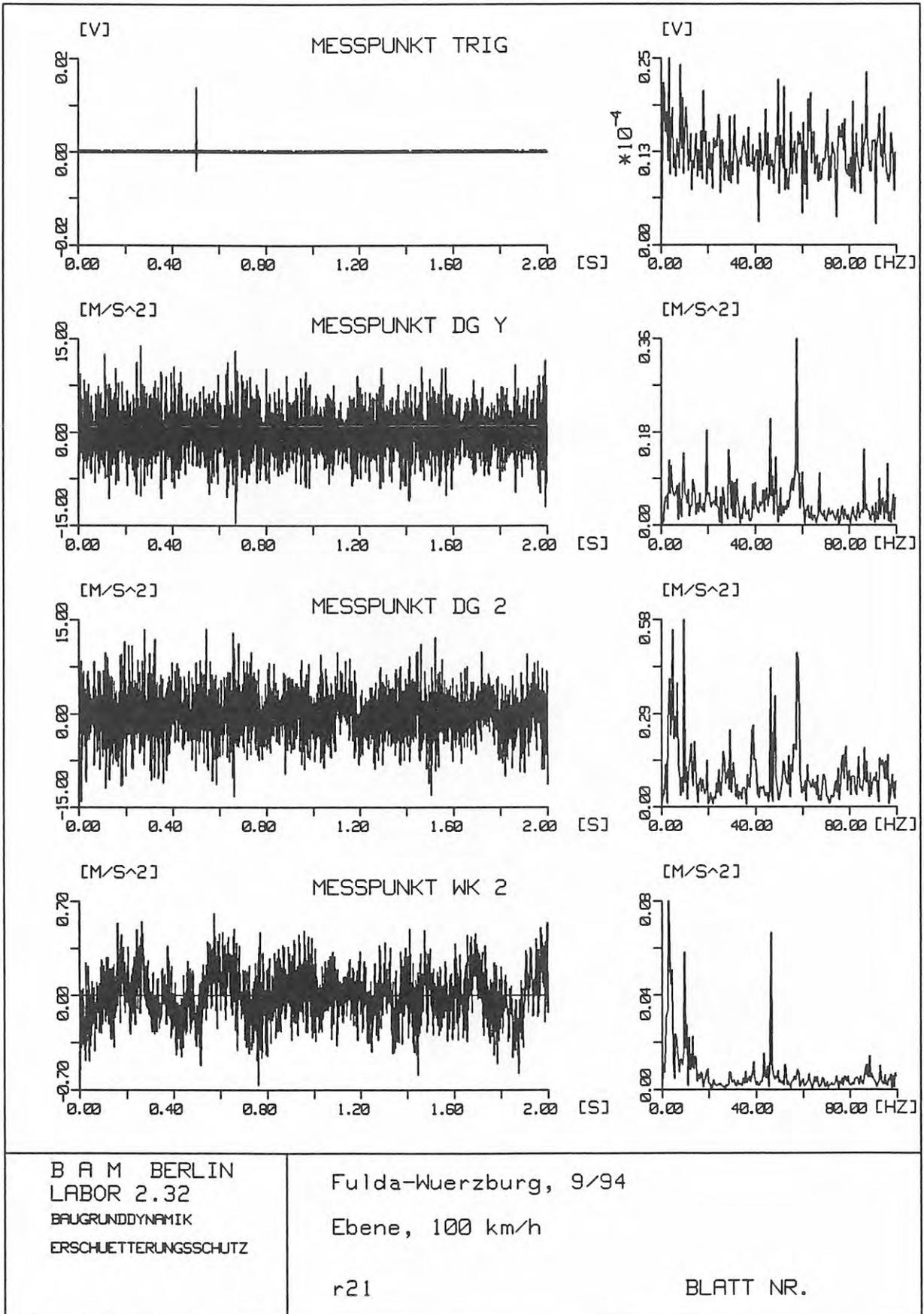
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUND DYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

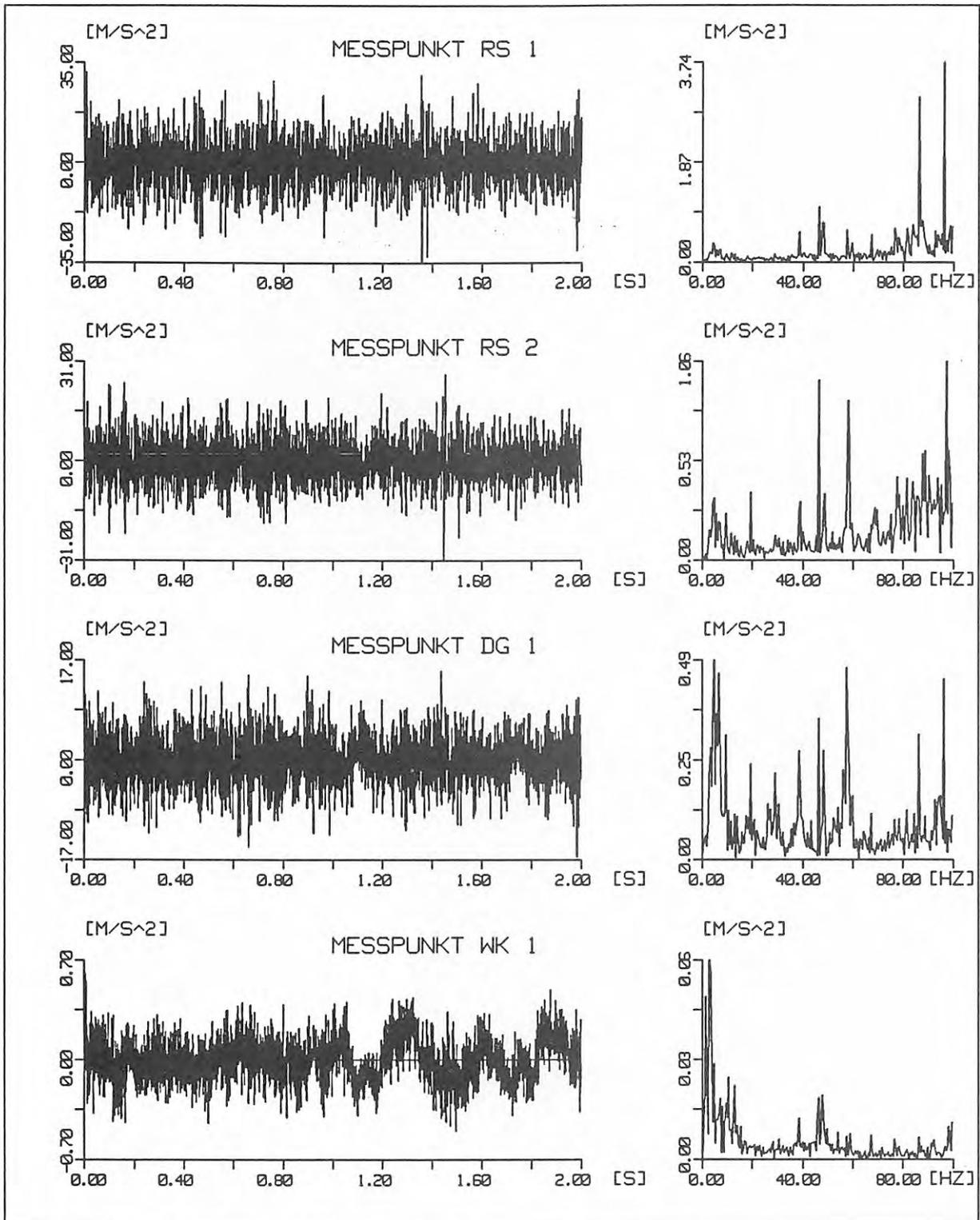
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Ebene, 100 km/h

r21

BLATT NR.

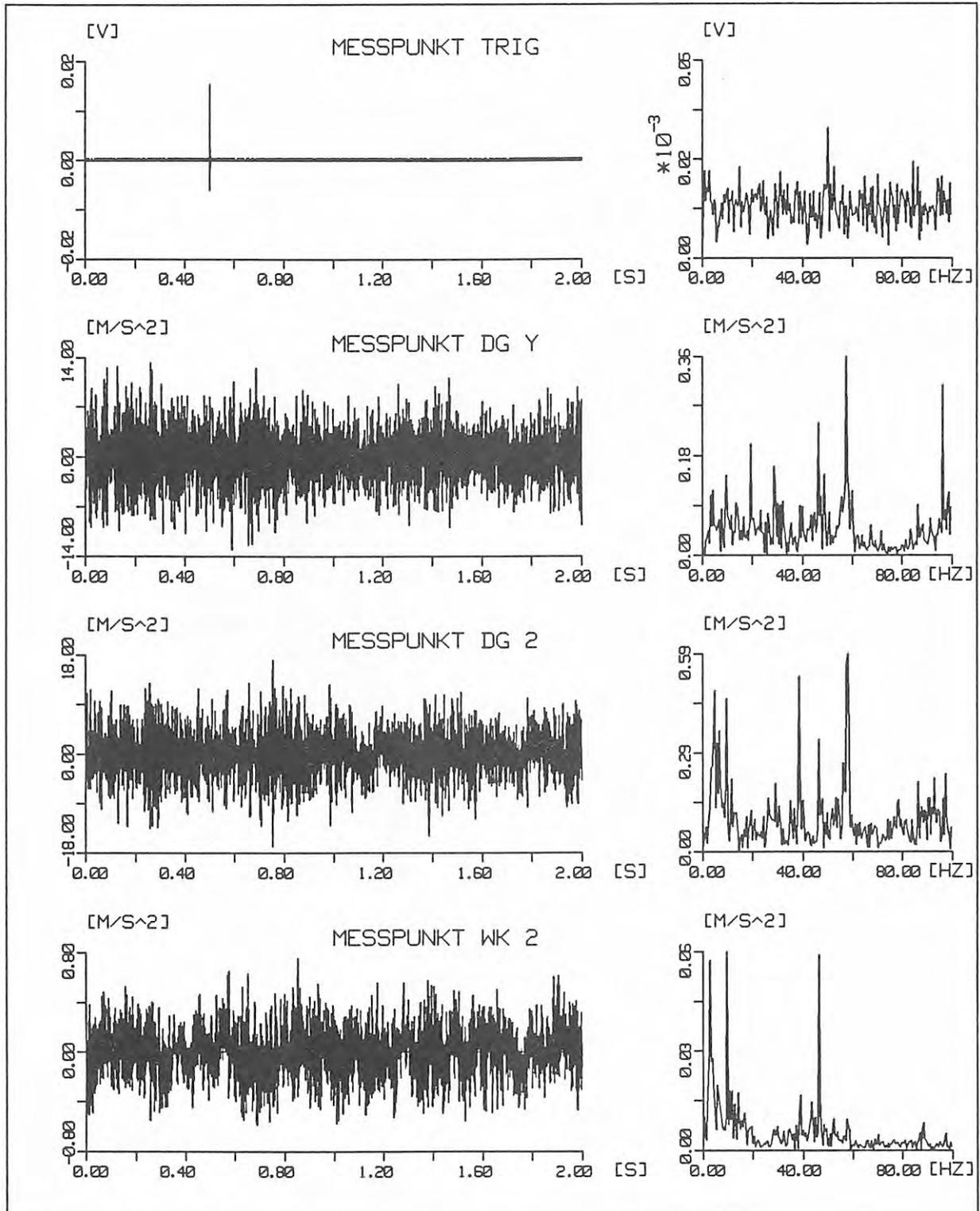




B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94  
 Ebene, 100 km/h

D 4.6

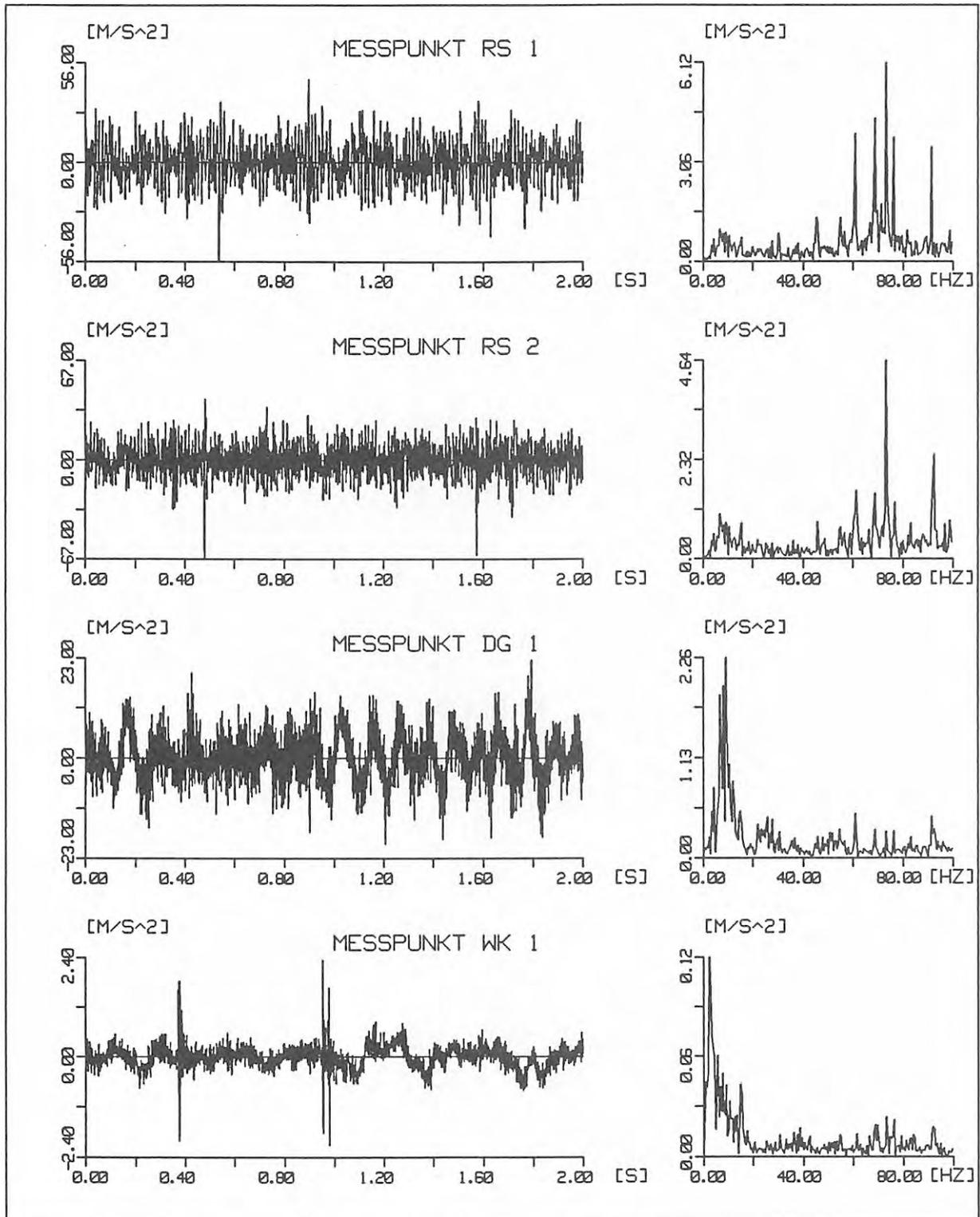


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94  
 Ebene, 100 km/h

121

BLATT NR.

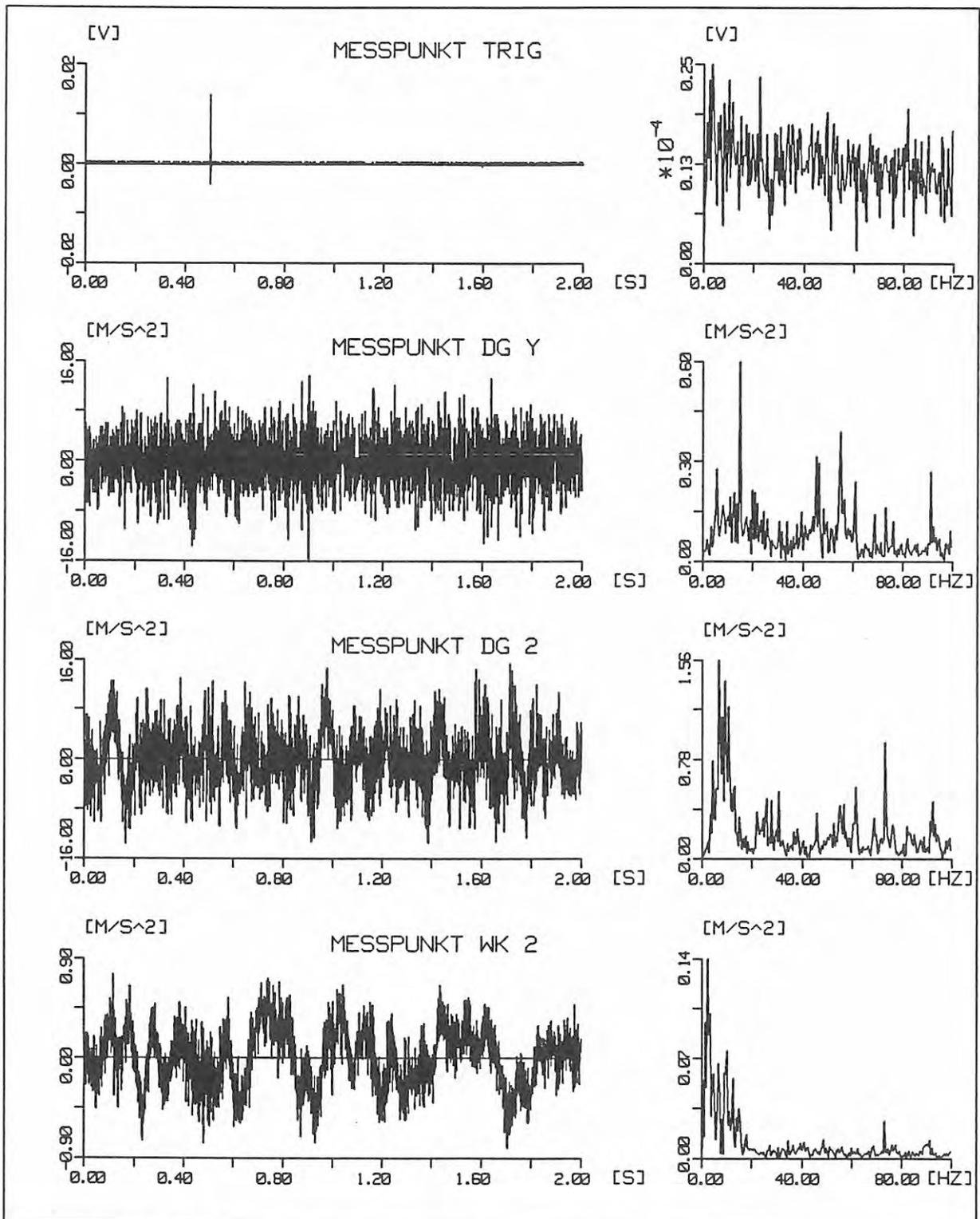


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94  
 Ebene, 160 km/h

r24

BLATT NR.

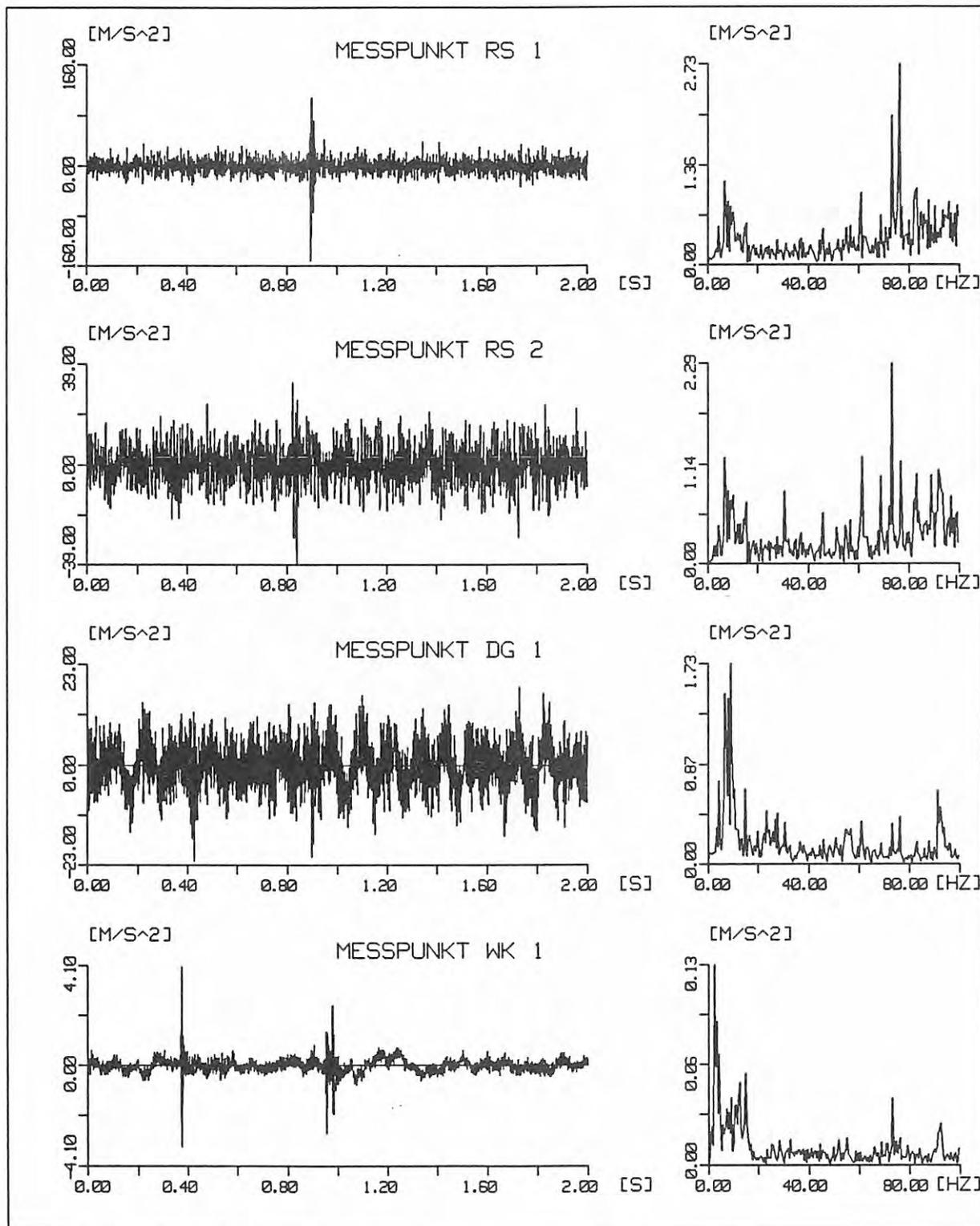


B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94  
 Ebene, 160 km/h

r24

BLATT NR.

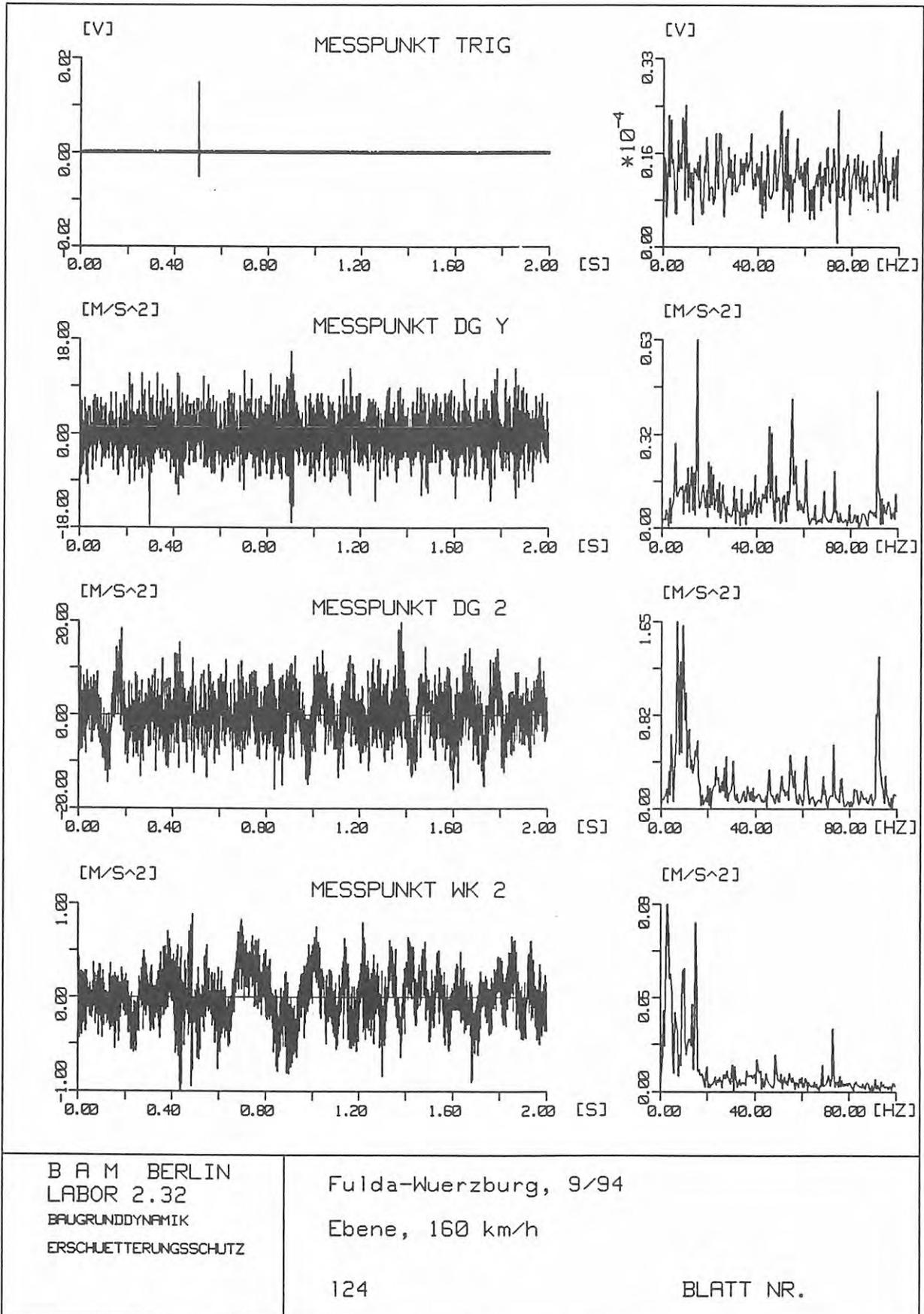


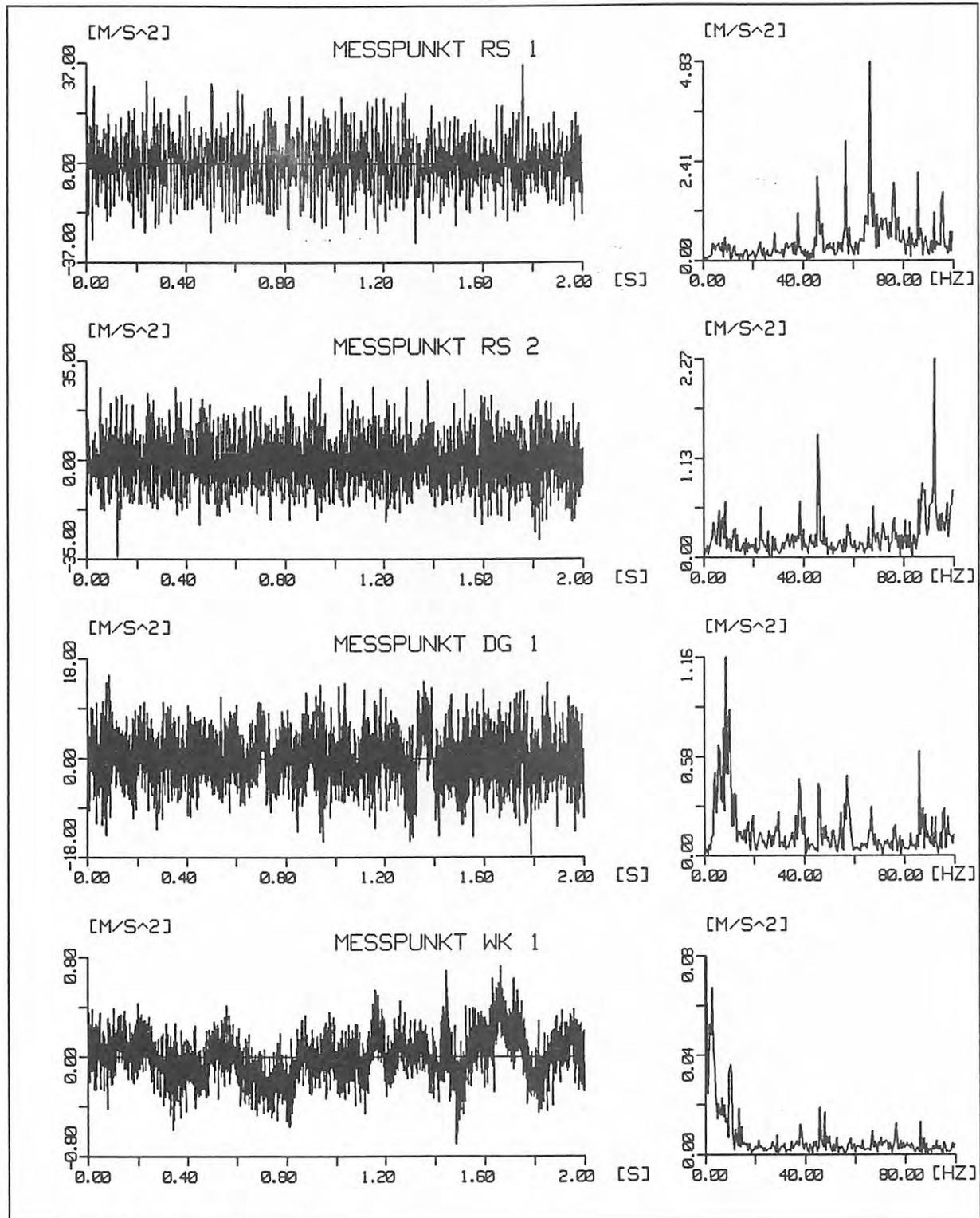
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94  
 Ebene, 160 km/h

124

BLATT NR.





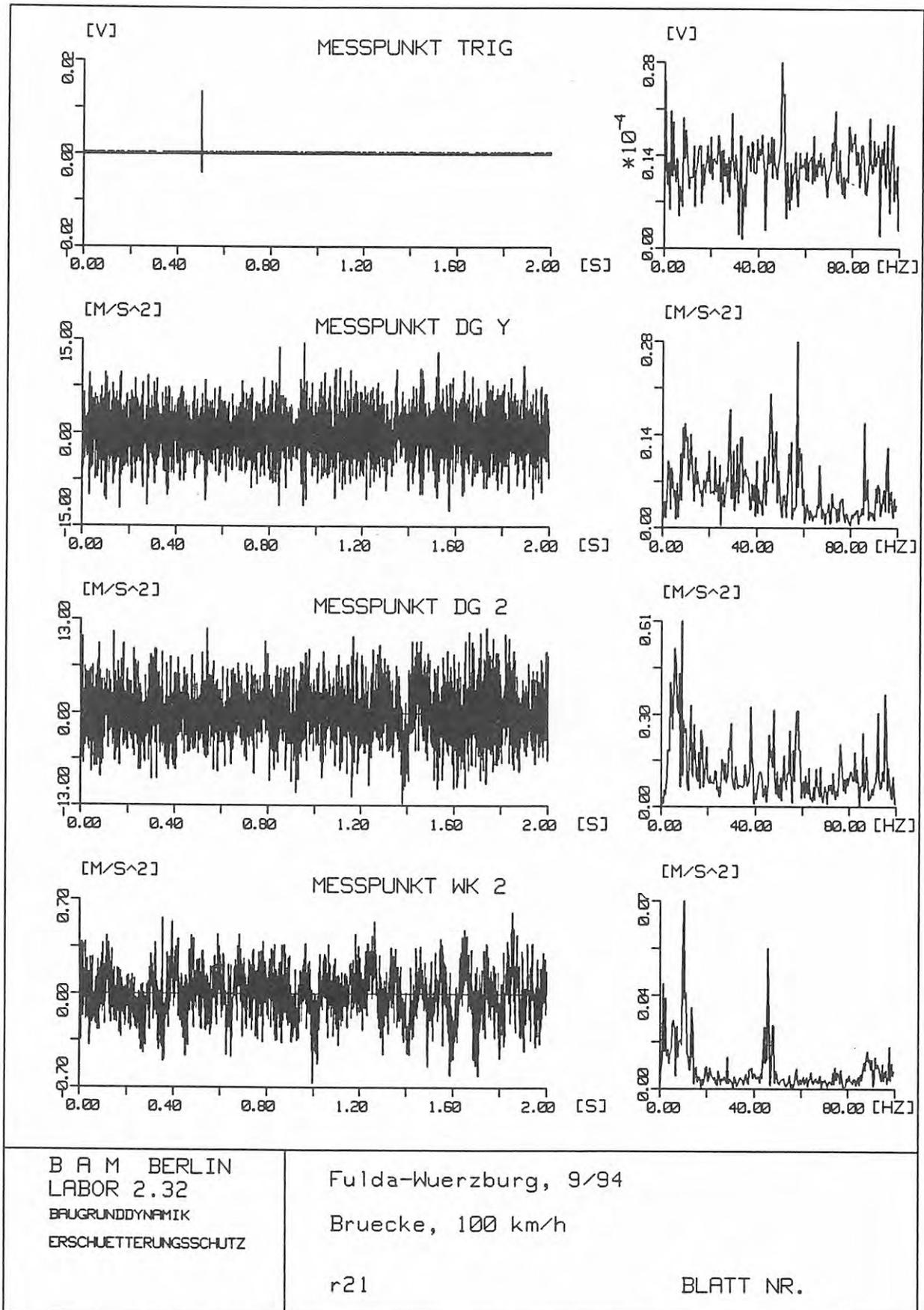
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, 100 km/h

r21

BLATT NR.



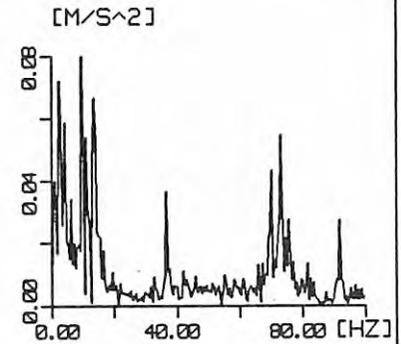
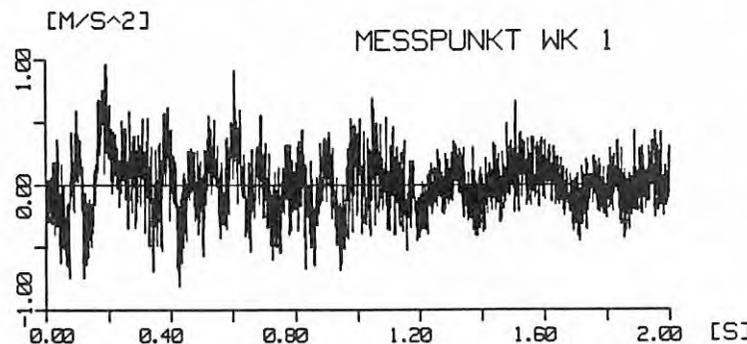
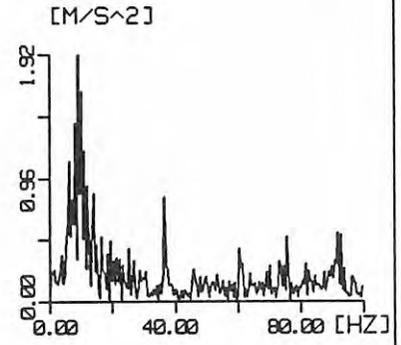
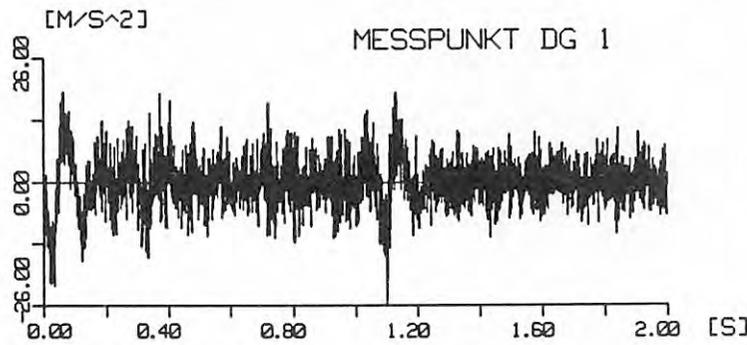
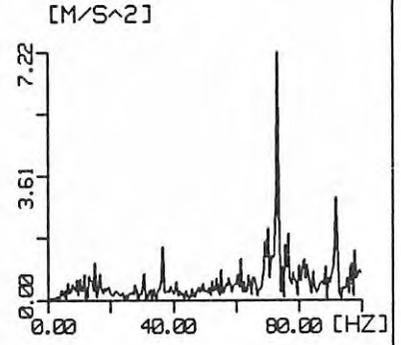
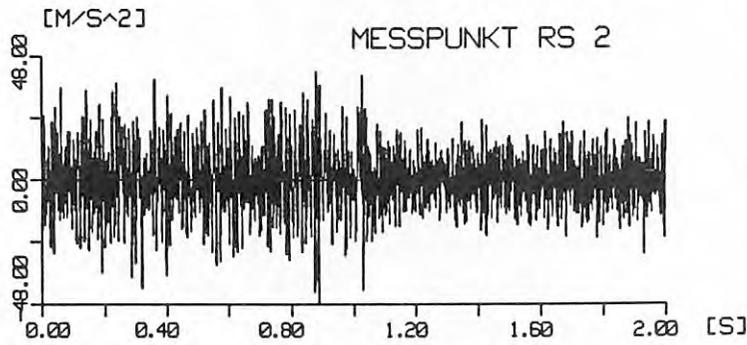
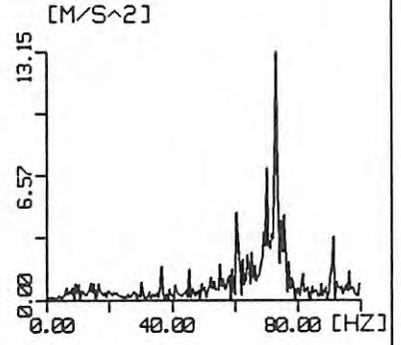
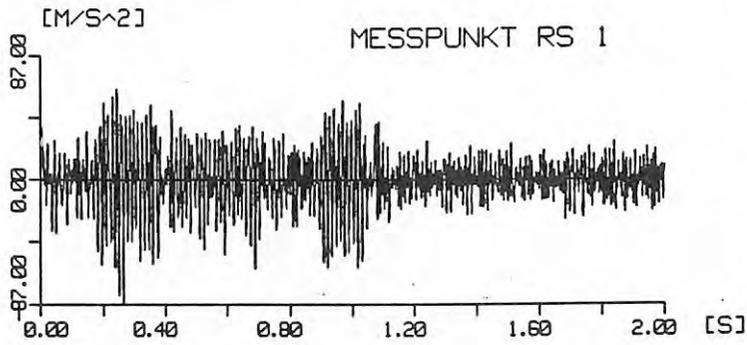
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, 100 km/h

r21

BLATT NR.

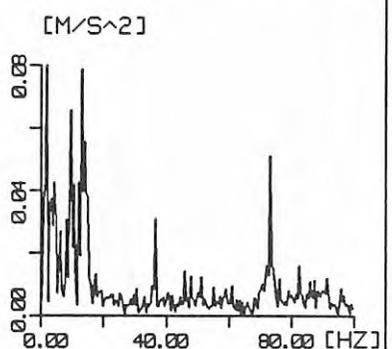
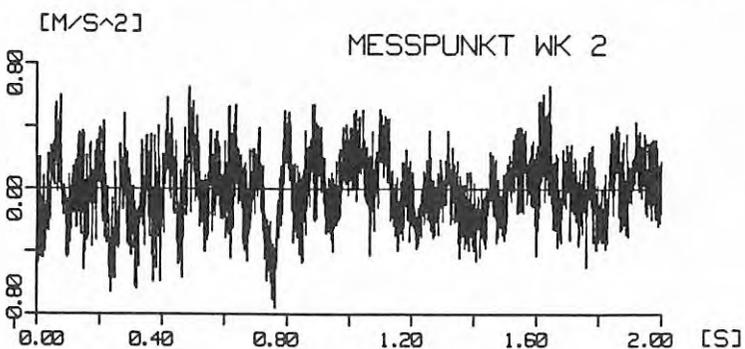
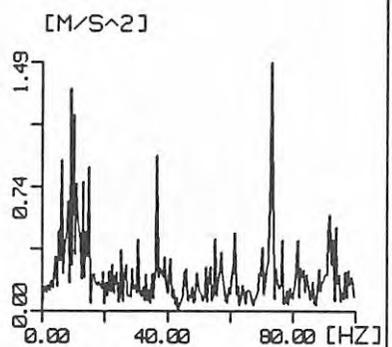
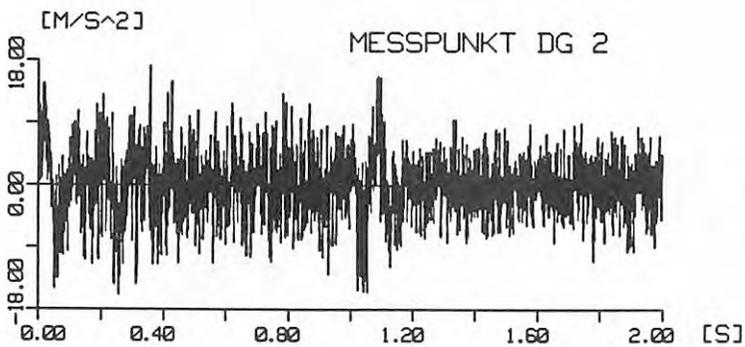
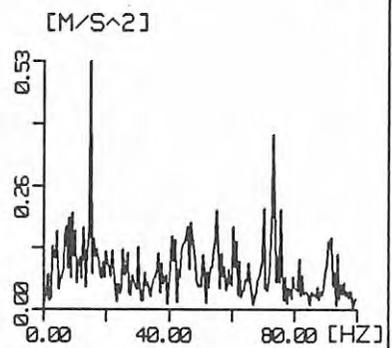
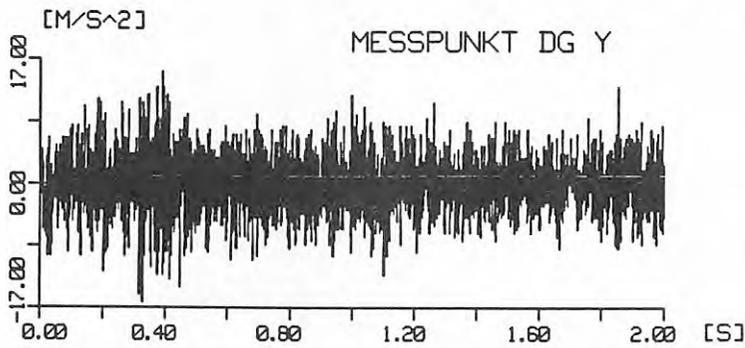
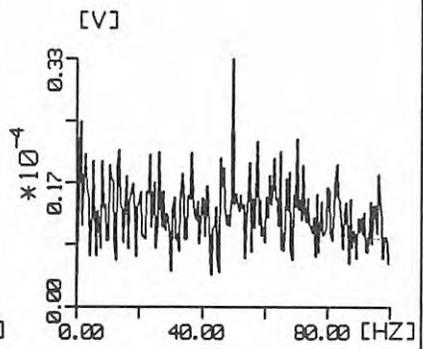
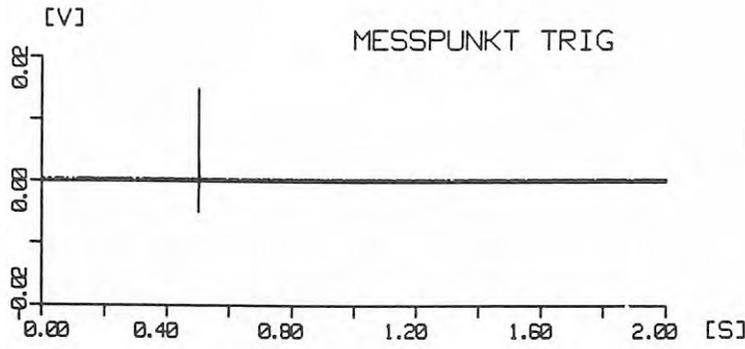


B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUND DYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94  
Bruecke, 160 km/h

r24

BLATT NR.



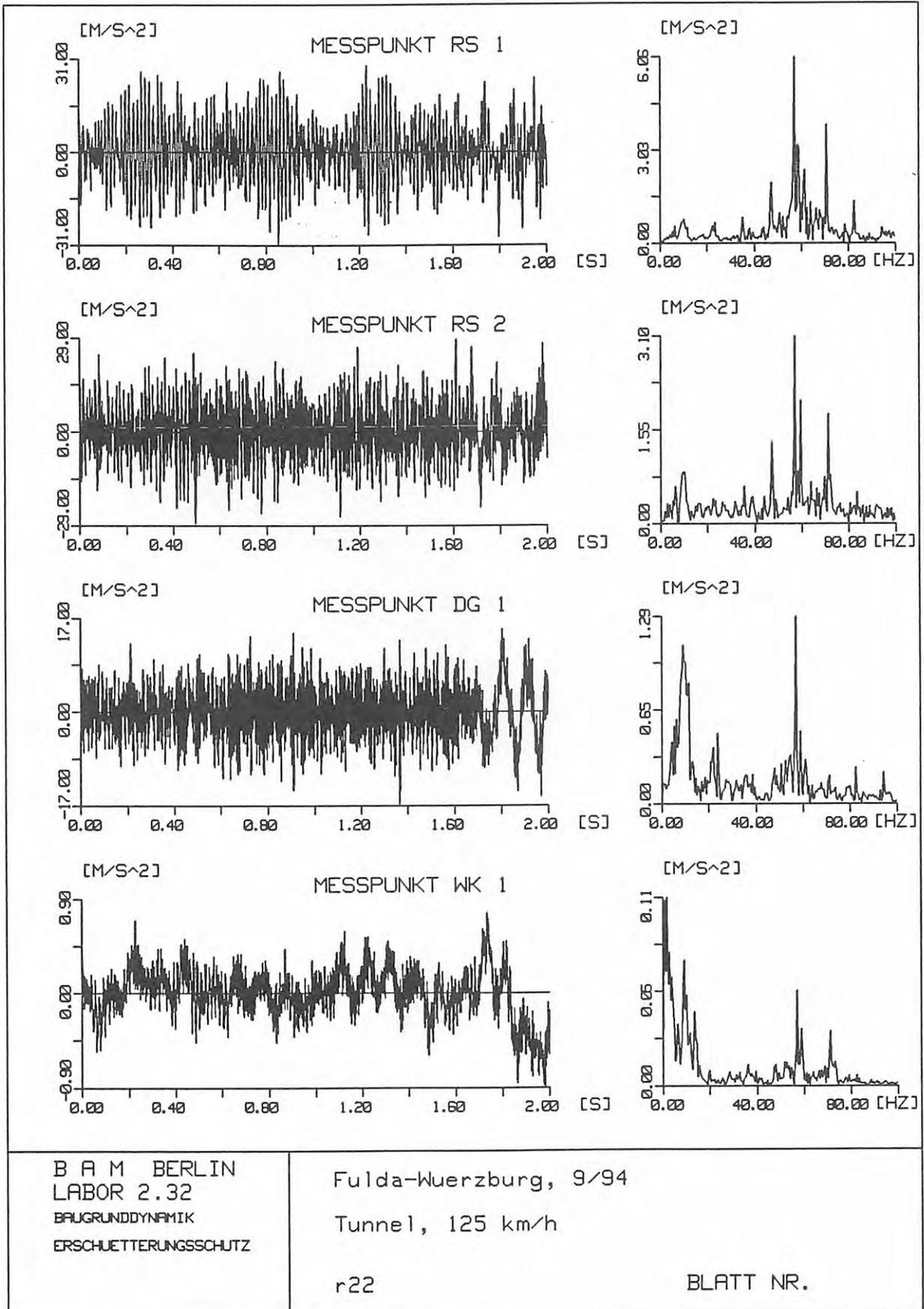
B A M BERLIN  
LABOR 2.32  
BAUGRUNDYNAMIK  
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

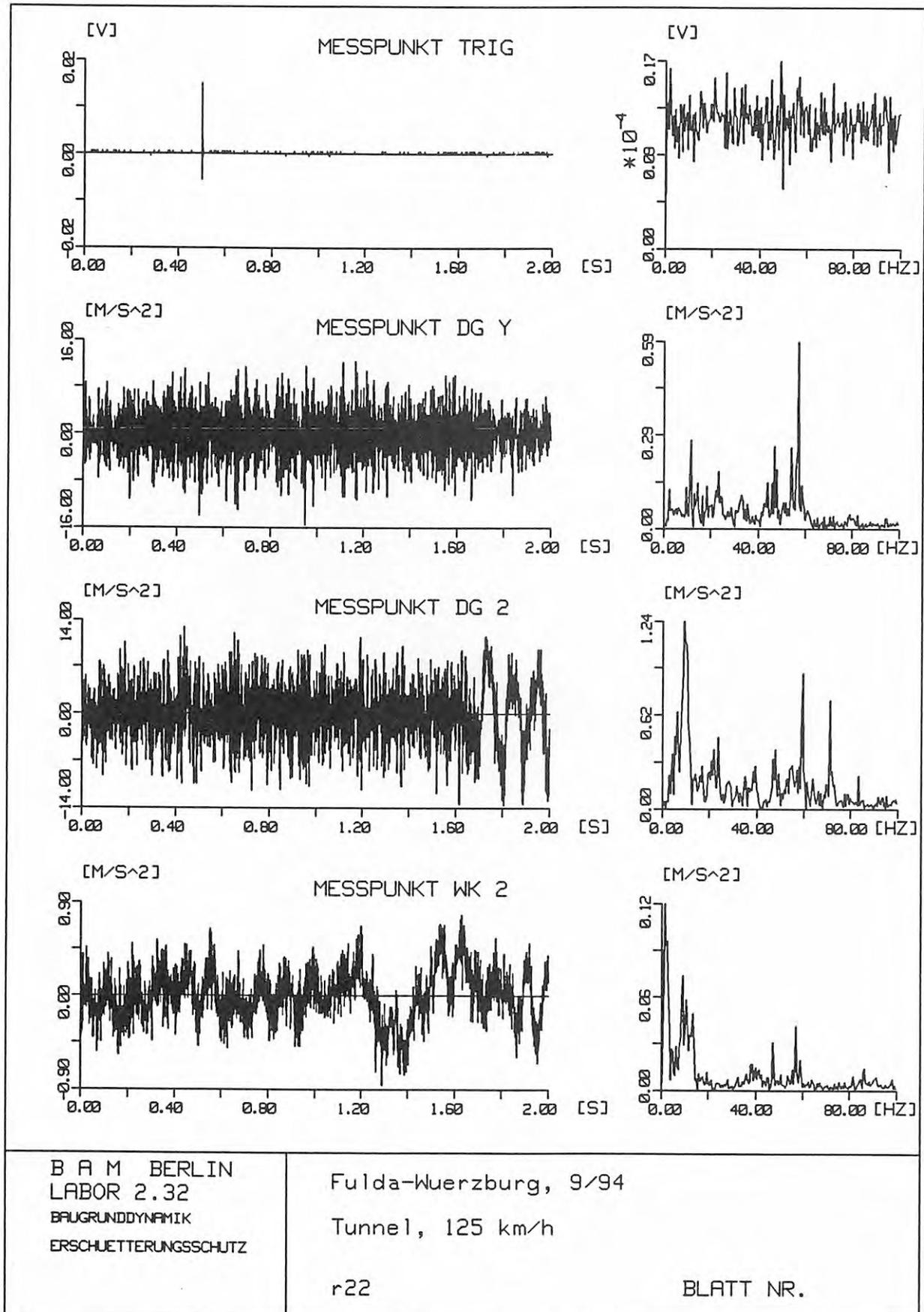
Fulda-Wuerzburg, 9/94

Bruecke, 160 km/h

r24

BLATT NR.





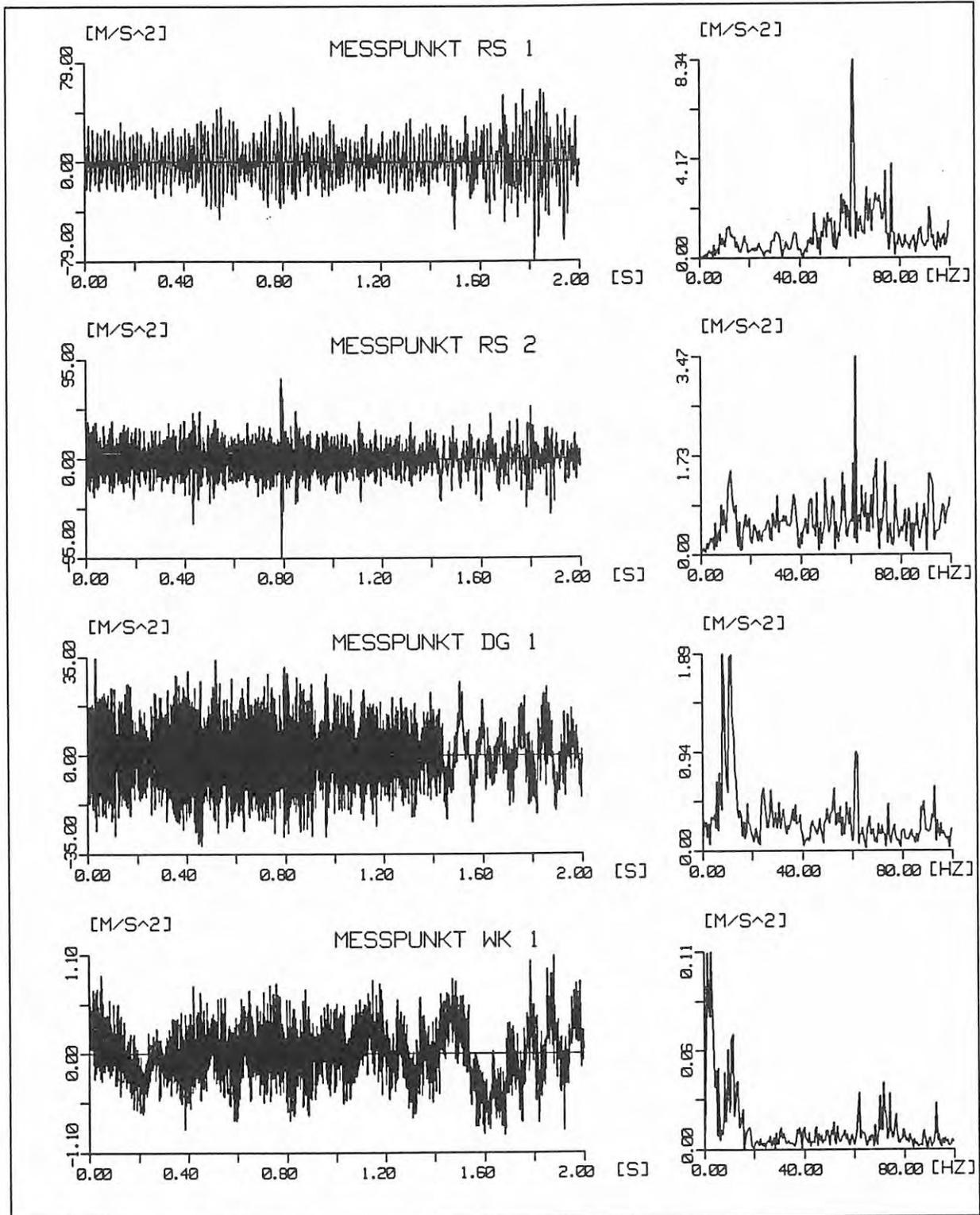
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, 125 km/h

r22

BLATT NR.



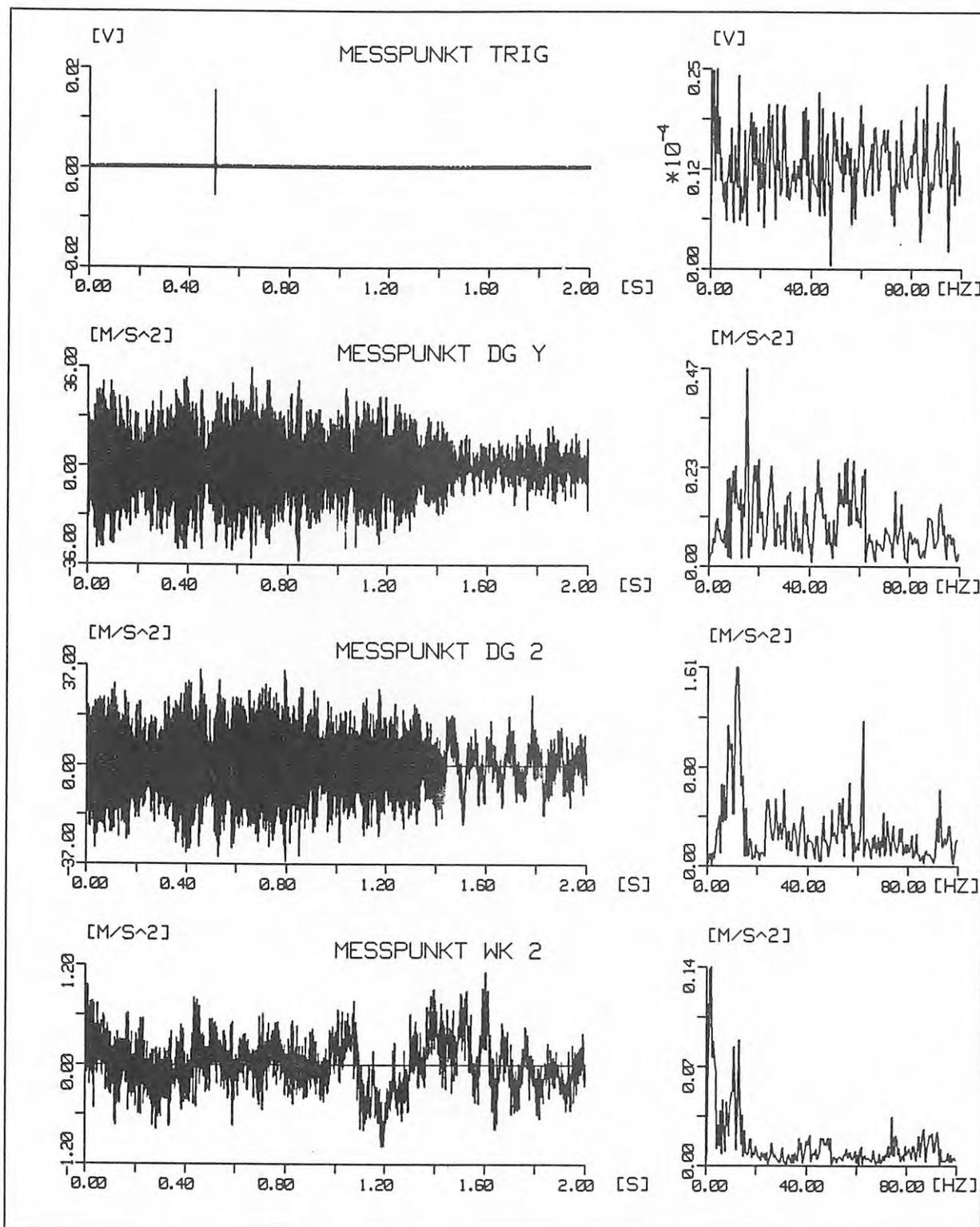
B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, 160 km/h

r24

BLATT NR.



B A M BERLIN  
 LABOR 2.32  
 BAUGRUNDYNAMIK  
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Fulda-Wuerzburg, 9/94

Tunnel, 160 km/h

r24

BLATT NR.