

VERMINDERUNG DES VERKEHRSLÄRMS IN STÄDTEN UND GEMEINDEN

TEILPROGRAMM SCHIENENNAHVERKEHR

BERICHT 19

ERSCHÜTTERUNGEN
INFOLGE SCHIENENNAH-
VERKEHR:
THEORETISCHE UND
MESSTECHNISCHE UNTER-
SUCHUNGEN ZUR
EMISSION, ZUR AUSBREI-
TUNG DURCH DEN BODEN
UND ZUR ÜBERTRAGUNG
IN GEBÄUDE

BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG
(BAM)

LABOR 2.32 BAUGRUNDDYNAMIK
BERLIN

BMFT gefördert vom
Bundesminister
für Forschung
und Technologie

Koordinator des Teilprogramms:
Studiengesellschaft für
unterirdische Verkehrsanlagen e. V.

STUVA

Dieser Band enthält den Bericht über ein im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie durchgeführtes Vorhaben.

Verantwortlich für den Inhalt dieses Berichtes sind die Autoren.

Der Bundesminister für Forschung und Technologie übernimmt keine Gewähr, insbesondere für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Bearbeitung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben auch bei nur auszugsweiser Verwertung dem BMFT vorbehalten.

VERMINDERUNG DES VERKEHRSLÄRMS

IN

STÄDTEN UND GEMEINDEN

TEILPROGRAMM SCHIENENNAHVERKEHR

Vorwort

Mit mehr als 80 % ist der Verkehrslärm die Hauptquelle der Lärmbelästigung der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland.

Die komplexen Zusammenhänge der Geräuscentwicklung und der Geräuschausbreitung sowie insbesondere die Wechselwirkung zwischen Rad und Fahrweg machen es erforderlich, bei Lärminderungsmaßnahmen Fahrzeuge und Fahrwege in ihrem Zusammenwirken und im Rahmen der Gesamtheit der städtischen Verkehrsmittel zu betrachten. Hinzu kommt der passive Lärmschutz, der durch bauliche und gestalterische Maßnahmen an Verkehrswegen und Gebäuden die Ausbreitung und Einwirkung des Lärms verringert.

Der Verordnung und schrittweisen Verschärfung von Immissions- und Emissionsgrenzwerten sollte der Nachweis vorausgehen, daß ihre Einhaltung sowohl möglich als auch wirtschaftlich vertretbar ist.

Der Bundesminister für Forschung und Technologie fördert das Forschungsprogramm "Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden" mit den Teilprogrammen "Straßenverkehr" und "Schienennahverkehr" in Abstimmung mit dem Bundesminister des Innern, dem Bundesminister für Wirtschaft und dem Bundesminister für Verkehr.

Ziele des Teilprogramms "Schienennahverkehr" sind die Vertiefung des Wissensstandes über die Entstehung und die Weiterleitung von Geräuschen und Erschütterungen bei Schienenbahnen des Stadtverkehrs sowie die Entwicklung und Erprobung aktiver Maßnahmen zur Schall- und Erschütterungsminderung am Entstehungsort.

In dieser Schriftenreihe sollen die Ergebnisse des Teilprogramms "Schienennahverkehr" den Verantwortlichen in den Nahverkehrsbetrieben, den Bauverwaltungen und der Industrie vorgelegt werden. Damit soll ihnen die Möglichkeit gegeben werden, neue Erkenntnisse frühzeitig zu erfahren und in ihre Arbeit einfließen zu lassen.

Sachverständigenkreis bzw. ad-hoc-Ausschuß des BMFT

"Lärminderung im Schienennahverkehr"

Mitglieder

Dir. Ing. grad. Werner Brand,
Waggonfabrik Uerdingen AG., Werk Düsseldorf (bis Anfang 1982)

Dr.-Ing. Florian Deischl,
Lehrstuhl für Bau von Landverkehrswegen der TU München

Prof. Dr.-Ing. Fritz Frederich,
Institut für Fördertechnik und Schienenfahrzeuge der TH Aachen
(seit Ende 1982)

Prof. Dr.-Ing. Günter Girnau,
Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe, Köln

BDir. Dipl.-Phys. Günther Hauck,
Bundesbahnzentralamt München, München

Prof. Dr. rer. nat. Manfred Heckl,
Institut für technische Akustik der Technischen Universität
Berlin

Dr.-Ing. Horst Hübner,
Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), Berlin

Dr.-Ing. Gert Kemper,
Umweltbundesamt, Berlin (bis Anfang 1982)

Dr.-Ing. Peter Lehmann,
Akustik-Labor, Berlin (bis Anfang 1982)

Obering. Diether Uderstädt,
Ingenieurbüro Uderstädt, Essen

Gäste

Bundesministerium für Forschung und Technologie
Bundesministerium des Innern
Bundesministerium für Wirtschaft
Bundesministerium für Verkehr
Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH., Ottobrunn
Forschungsgemeinschaft Rad-Schiene, München

Übersicht über Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Teilprogramm "Schienennahverkehr" im Programm "Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden"

- Bericht 1 Entwicklung eines Körperschall-Meßverfahrens für rotierende Fahrzeugteile
- Technische Universität Berlin
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrswegebau
- Bericht 2 Untersuchung des Schallabstrahl- und weiterleitungsverhaltens von Drehgestellen für Nahverkehrsfahrzeuge
- Battelle-Institut e.V.,
Frankfurt/Main
- Bericht 3 Erarbeitung eines Rahmenlastenheftes für lärmarme Drehgestelle (in Bearbeitung)
- Studiengesellschaft für
unterirdische Verkehrsanlagen e.V.
(STUVA), Köln
Technische Universität Berlin
Institut für Fahrzeugtechnik
- Bericht 4 Laboruntersuchungen zur werkstoffseitigen Unterdrückung der geräuschbildenden stick-slip-Bewegungen zwischen Rad und Schiene
- Technische Universität Berlin
Institut für Fahrzeugtechnik
- Bericht 5 Erstellung eines Modells zur schalltechnischen Berechnung und Optimierung des Radsatzes für Fahrzeuge des ÖPNV
- Universität Hannover
Institut für Mechanik
- Bericht 6 Entwicklung von Reagenzien zur Reibungsbeeinflussung und Minderung des Verkehrslärms von Schienenfahrzeugen
- Bundesanstalt für Materialprüfung
(BAM); Labor 5.23, Berlin

- Bericht 7 Untersuchung schotterloser Oberbauformen im geraden und gebogenen U-Bahntunnel im Hinblick auf die Schall- und Erschütterungsemissionen
- TÜV Rheinland e.V., Köln
- Bericht 8 Untersuchung verschiedener Oberbauformen in einem U-Bahntunnel im Hinblick auf Schall- und Erschütterungsemissionen
- Studiengesellschaft für
unterirdische Verkehrsanlagen e.V.,
- STUVA -, Köln
- Bericht 9 Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Stadtverkehrs im Geländeniveau
- Studiengesellschaft für
unterirdische Verkehrsanlagen e.V.,
- STUVA -, Köln
Bundesanstalt für Materialprüfung
(BAM); Labor 2.32, Berlin
- Bericht 10 Untersuchung zum Einfluß der Betriebsbedingungen von schallgedämpften Rädern (absorbergedämpft)
- Krupp Stahl AG., Bochum
- Bericht 11 Untersuchungen zur Schallminderung durch absorbergedämpfte Räder
- Krupp Stahl AG., Bochum
- Bericht 12 Untersuchungen zur Geräuschkinderung bei Scheibenbremsen
- Knorr-Bremse GmbH., München
- Bericht 13 Untersuchungen zur Entwicklung geräuschkämpfender Schienenbefestigungen
- Estel Rothe Erde-Schmiedag AG.,
Dortmund

- Bericht 14 Erprobung verbesserter Komponenten an einem Stadtbahnwagen mit dem Ziel der Lärm-minderung
- Rhein-Consult GmbH., Düsseldorf
DUEWAG Aktiengesellschaft, Düsseldorf
- Bericht 15 Zusammenhänge zwischen den Geräuschpegeln von Schienenbahnen und Oberflächenrauigkeiten von Rad und Schiene
- Studiengesellschaft für unter-irdische Verkehrsanlagen e.V.,
- STUVA -, Köln
- Bericht 16 Schall- und Erschütterungsschutz im Schienen-nahverkehr - Übersicht über die Ergebnisse des Forschungsprogramms 1978 bis 1983
- Studiengesellschaft für unter-irdische Verkehrsanlagen e.V.,
- STUVA -, Köln
- Bericht 17 Minderung der Schwingungsabstrahlung von U-Bahntunneln durch hochelastische Gleis-isolationssysteme unter verschiedenen Tunnel-randbedingungen
- Studiengesellschaft für unter-irdische Verkehrsanlagen e.V.,
- STUVA -, Köln
IBU Ingenieurbüro Uderstädt, Essen
- Bericht 18 Rechenmodell zur Untersuchung des Fremd- und Selbsterregungsverhaltens von Rädern für Schienenfahrzeuge des ÖPNV
- Universität Hannover,
Institut für Mechanik
- Bericht 19 Erschütterungen infolge Schienennahverkehr: Theoretische und meßtechnische Untersuchungen zur Emission, zur Ausbreitung durch den Boden und zur Übertragung in Gebäude
- Bundesanstalt für Materialprüfung
(BAM), Labor 2.32, Berlin

- Bericht 20 Ermittlung von Kenngrößen aus Messungen an
Rohbautunneln zur Festlegung des aus
Immissionsschutzgründen notwendigen Oberbaus
- Studiengesellschaft für unter-
irdische Verkehrsanlagen e.V.,
- STUVA -, Köln
- Bericht 21 Primärunterdrückung der Bogenlaufgeräusche
durch alternative Radsatzstell- und -steuer-
ungsmechanismen
- Technische Universität Berlin,
Institut für Fahrzeugtechnik, Fach-
gebiet "Spurgebundene Fahrzeuge"
- Bericht 22 Modelluntersuchungen zur Ausbreitung von
Körperschall in der Umgebung von U-Bahntunneln
- Technische Universität Berlin,
Institut für Technische Akustik
- Bericht 23 Entwicklung, Bau und Erprobung verbesserter
Triebdrehgestelle an einem Stadtbahnwagen mit
dem Ziel der Lärminderung
- Rhein-Consult GmbH., Düsseldorf
DUEWAG AG., Düsseldorf

VERMINDERUNG DES VERKEHRSLÄRMS IN STÄDTEN UND GEMEINDEN
TEILPROGRAMM SCHIENENNAHVERKEHR

ERSCHÜTTERUNGEN INFOLGE SCHIENENNAHVERKEHR:
THEORETISCHE UND MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR EMISSION,
ZUR AUSBREITUNG DURCH DEN BODEN UND ZUR ÜBERTRAGUNG IN GEBÄUDE

BMFT-Vorhaben TV 8329

Auftragnehmer

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM),
Berlin,

Labor 2.32 Baugrunddynamik

Projektleiter: Dr.-Ing. W. Rücker

März 1986

Verfasser

Dipl.-Ing. Lutz Auersch	(Teil I, II, IV, V und VI)
Dipl.-Ing. Hans.-L. Hebener	(Teil III)
Dr.-Ing. Werner Rücker	(Teil III)

Mitarbeiter

Ing. Norbert Semrau	(Teil III und V)
Ing. grad. Wolfgang Schmid	(Teil III und V)
Ing. grad. Ulrich Schmidt	(Teil III und V)
Dipl.-Ing. Samir Said	(Teil IV)
Ing. grad. Michael Manjock	(Teil III und V)
cand. ing. Brigitte Ebner	(Teil IV)

Wir bedanken uns für die gute Unterstützung bei den Messungen
bei der

Erprobungsstelle 91, Meppen (Herr Heine und Herr Glaser)
und den
Berliner Verkehrs-Betrieben BVG (Herr Hübner)

1. Berichtsnummer	2. Berichtsart Schlußbericht	3.
4. Titel des Berichts Erschütterungen infolge von Schienennahverkehr: Theoretische und meßtechnische Untersuchungen zur Emission, zur Ausbreitung durch den Boden und zur Übertragung in Gebäude		
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) Auersch, Lutz Hebener, Hans Rücker, Werner		6. Abschlußdatum März 1986
		7. Veröffentlichungsdatum
8. Durchführende Institution (Name, Adresse) Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Labor 2.32 Unter den Eichen 87 1000 Berlin 45		9. Ber.nr./Auftragnehmer
		10. Förderungskennzeichen TV 8329
		11. Seitenzahl 221 + 73
		13. Literaturangaben 21
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) Postfach 120370 5300 Bonn 12		14. Tabellen
		15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung (Gliederung s. Hinweise) Das Ziel der Untersuchungen ist ein Prognosemodell für Erschütterungen infolge Schienennahverkehr. Ergänzend zu Bericht 9 wird insbesondere der dreidimensionale, instationäre und zufällige Charakter der Erschütterungsquelle und dessen Auswirkungen auf die Ausbreitung durch den Boden und auf die Schwingungen benachbarter Gebäude untersucht. Es werden jeweils theoretisch/numerisch und experimentell/meßtechnisch - Amplituden-Abstands-Gesetze, - Freifeld-Bauwerks-Übertragungsverhältnisse und - Deckenresonanzüberhöhungen ermittelt, die zusammen mit den Ergebnissen des Berichts 9 eine realistische Prognose von Erschütterungen ermöglichen. Die Ergebnisse sind in einem einfachen Prognoseprogramm zusammengefaßt, mit dem im konkreten Anwendungsfall der Einfluß einer Reihe von Quell-, Boden- und Bauwerkseigenschaften erfaßt wird.		
19. Schlagwörter Erschütterungen, Körperschall, Immissionprognose, Schienenverkehr, Bauwerks-schwingungen, Deckenresonanz, Wellenausbreitung, Bodendynamik		
20.	21.	27. Preis

1. Report No.	2. Type of Report Final Report	3.
4. Report Title Vibrations induced by urban railways: Theoretical and experimental investigations regarding the emission, the propagation through the soil and the excitation of buildings		
5. Author(s) (Family Name, First Name(s)) Auersch, Lutz Hebener, Hans Rücker, Werner	6. Report Date März 1986	7. Publication Date
8. Performing Organization (Name, Address) Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Labor 2.32 Unter den Eichen 87 1000 Berlin 45	9. Originator's Report No.	10. BAM-Reference No. TV 8329
	11. No. of Pages 221 + 73	13. No. of References 21
	14. No. of Tables	15. No. of Figures
	12. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) 5300 Bonn 12 Postfach 120370	
	16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract <p>The aim of the study is a simple calculation model to forecast vibrations induced by urban railways. In addition to Report No. 9 three-dimensional, instationary and stochastic characteristics of the source of vibrations and their consequences to the propagation through the soil and the vibrations of nearby buildings are investigated. Theoretical und experimental work results in</p> <ul style="list-style-type: none"> - amplitude-distance-laws, - freefield-building-transferfunctions, and - amplification factors due to floor-resonance, <p>which allow together with the results of Report No. 9 a realistic forecast of vibrations. A simple forecast program takes into account the relevant properties of the source, soil and building of a special situation.</p>		
19. Keywords Urban railway, vibration, structure borne sound, annoyance forecast, structural dynamics, resonance amplification, soil-structure interaction, soil dynamics, wave propagation		

Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit ist eine möglichst realistische Prognose von Erschütterungen infolge von Schienennahverkehr. Sie baut auf den Ergebnissen des Vorhabens "Untersuchungen zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Nahverkehrs in Geländeniveau" (Bericht 9) auf, in dem der Einfluß einer Vielzahl von Boden- und Bauwerkseigenschaften auf die Erschütterungsstärke untersucht und Erregerspektren (Quellstärken) für verschiedene Verkehrsmittel und Fahrzustände ermittelt wurden. Mit diesen Ergebnissen wurde schließlich ein einfaches Prognoseprogramm entwickelt.

In dieser Arbeit werden nun diese Ergebnisse in größerem Umfang durch Messungen überprüft und auch durch weitere theoretische Untersuchungen abgesichert. Es wird insbesondere der dreidimensionale, instationäre und zufällige Charakter der Anregung durch Schienenverkehr und dessen Auswirkungen auf die Ausbreitung durch den Boden und die Schwingungen benachbarter Gebäude untersucht. Wesentliche Ergebnisse wurden dabei für

- das Amplituden-Abstands-Gesetz,
- das Übertragungsverhältnis vom Freifeld zum Bauwerk und
- die Resonanzüberhöhung der Decken

erzielt, die eine realistischere, das heißt vor allem eine weniger konservative Erschütterungsprognose ermöglichen.

Der Bericht gliedert sich in die sechs Teile

- I Theorie der Emission,
- II Theorie der Transmission,
- III Messungen zur Emission und Transmission,
- IV Theorie der Immission,
- V Messungen zur Immission,
- VI Vergleich von Theorie und Messung, Prognosemodell.

Dabei sind unter den Schlagworten Emission, Transmission und Immission jeweils alle Untersuchungen und Ergebnisse hinsichtlich des Fahrzeugs und Fahrwegs (Emission), der Ausbreitung durch den Boden (Transmission) und des Bauwerks einschließlich der Übertragung Boden-Bauwerk (Immission) zusammengefaßt worden. Einen Überblick über die einzelnen Ergebnisse geben jeweils die Zusammenfassungen der Teile I bis V. Darüber hinaus werden im Teil VI jeweils theoretische und experimentelle Ergebnisse gegenübergestellt und daraus schließlich Konsequenzen für die Erschütterungsprognose gezogen. Die Abschnitte 4.1 bis 4.3 (Teil VI) bieten insofern einen schnellen Überblick über das Endergebnis des Vorhabens.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Teil I: Theorie der Emission

1.	Einführung in die Fragestellung	I/1
2.	Darstellungsmöglichkeiten für die Erregung	I/4
3.	Anregungsmechanismen bei Schienenverkehr	I/6
4.	Charakterisierung der Erregung	I/9
5.	Relevanz einzelner Anregungsanteile, Quantifizierung	I/16
6.	Zusammenfassung	I/29

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil II: Theorie der Transmission</u>	
1. Einleitung und Zielsetzung	II/1
2. Besonderheiten der Erregung durch Zugverkehr	II/4
3. Die elementaren Lastfälle und die zur Ableitung der Abnahmegesetze verwendeten Methoden	II/7
3.1 Punkt- und Linienlast	II/7
3.2 Berücksichtigung der hysteretischen Materialdämpfung des Bodens	II/7
3.3 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei deterministischen und stochastischen Streckenlasten ("Superpositionsverfahren")	II/10
3.4 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei harmonischen Lasten, die über ein starres Fundament in den Boden eingeleitet werden	II/11
4. Einflüsse auf das Amplituden-Abstands-Gesetz	II/12
4.1 Zerstreung durch regellose Schwankungen der Bodeneigenschaften	II/12
4.2 Nichtlineare Dämpfung des Bodens	II/13
4.3 Impulsartige Anregung	II/14
4.4 Abhängigkeit von der betrachteten Amplitudengröße	II/15
4.5 Dämpfungseinwirkung breitbandiger Anregung	II/18
4.6 Übersicht über die in Abschnitt 4 abgeleiteten Amplituden-Abstands-Gesetze	II/21
5. Die Schwingungsausbreitung bei einer gleichphasigen Streckenlast	II/22
5.1 Berechnung mit dem Superpositionsverfahren	II/22
5.2 Berechnung mit dem Wechselwirkungsverfahren	II/28
6. Gesetzmäßigkeiten bei stochastischer Lastverteilung über die Zuglänge	II/32
6.1 Simulationsrechnungen mit zufällig erzeugten Phasen	II/32
6.2 Eine theoretische Grundlage zur Ableitung der "stochastischen Abnahmegesetze"	II/38
6.3 Berechnung der gemittelten Abnahmegesetze	II/39
6.4 Ein explizites Amplituden-Abstands-Gesetz für stochastische Anregung	II/43
6.5 Einfluß bestimmter Korrelationen zwischen den Quellen der veränderlichen Anregungsorte während der Vorbeifahrt und der Materialdämpfung	II/45
7. Zusammenfassung	II/53
Anhang A Ein Verfahren zur Berechnung des Schwingungsverhaltens starrer Fundamente auf dem Boden	
Anhang B Das Amplituden-Abstands-Gesetz für eine stochastische Streckenlast	
Literatur zu den Teilen I und II	

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil III: Messungen zur Emission und Transmission</u>	
1.	Einleitung III/1
2.	Beschreibung der Meßeinrichtung III/2
3.	Auswertephilosophie und Auswerteverfahren III/5
3.1	Ausbreitungsverhalten im Zeit- und Frequenzraum III/6
3.1.1	Theoretischer Hintergrund III/6
3.1.2	Ausbreitungsgesetzmäßigkeit für zeitliche Maximalwerte III/8
3.1.3	Ausbreitungsgesetzmäßigkeit für frequenzabhängige Maximalwerte III/10
3.2	Zeit- und Frequenzcharakteristik III/11
3.3	Bestimmung der bodendynamischen Kennwerte III/12
3.4	Statistische Auswertung III/15
4.	Meßorte und Meßprogramm III/18
4.1	Meßort 1 BVG, Berlin-Britz III/18
4.2	Meßort 2 DB Strecke Dachau-Karlsfeld III/19
5.	Meßergebnisse III/21
5.1	Bodendynamische Kennwerte III/22
5.2	Darstellung und Diskussion relevanter Meßergebnisse III/24
5.2.1	Meßort 1 III/24
5.2.2	Meßort 2 III/28
6.	Zusammenfassung III/32
Anhang A1 - Gleichungssystem für Ausgleichsrechnung	
Anhang A2 - Berechnung von Histogrammen	
Anhang A3 - Autokorrelation und Kreuzkorrelation	
Anhang B1 - Lageplan und Materialkennwerte des Meßortes 1	
Anhang B2 - Lageplan und Materialkennwerte des Meßortes 2	
Anhang C1 - Meßergebnisse des Meßortes 1	
Anhang C2 - Meßergebnisse des Meßortes 2	
Literatur	

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil IV: Theorie der Immission</u>	
1. Ausgangslage und Zielsetzung	IV/1
2. Modellrechnungen zur Resonanzüberhöhung der Decken	IV/3
2.1 Der Einfluß von Deckenform und Auflagerbedingungen auf die Resonanzüberhöhung	IV/3
2.1.1 Vorgehensweise	IV/3
2.1.2 Ergebnisse	IV/3
2.2 Das Zusammenwirken von Deckenresonanz und Baugrund anhand einfacher Gebäudemodelle	IV/7
2.2.1 Eine Parameterstudie zur Deckenresonanz: Variation von Bauwerks- und Baugrundeigenschaften	IV/7
2.2.1.1 Das Schwingungsverhalten der Standardstruktur	IV/11
2.2.1.2 Überblick über die Deckenresonanzen	IV/11
2.2.2 Die Dämpfung der Deckenresonanz durch den Boden	IV/13
2.2.3 Interpretation der weiteren Parametereinflüsse	IV/16
2.3 Die Deckenresonanz bei breitbandiger, unkorrelierter und instationärer Anregung	IV/18
2.3.1 Rauschanregung	IV/19
2.3.2 Instationäre und Impulsanregung	IV/24
2.3.3 Unkorrelierte Anregung der Fundamente	IV/25
3. Die 3-dimensionale Bauwerk-Boden Wechselwirkung	IV/27
3.1 Das Rechenverfahren	IV/27
3.2 Steifigkeit und Dämpfung von Fundamentgruppen	IV/28
3.3 Ein Bauwerksbeispiel	IV/33
3.3.1 Schwingungsformen ausgewählter Frequenzen	IV/33
3.3.2 Das Übertragungsverhältnis Freifeld-Bauwerk	IV/37
4. Zusammenfassung	IV/40

Anhang A1-A16 - Modellrechnungen zur Resonanzüberhöhung der Decken

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil V: Messungen zur Immission</u>	
1. Einleitung	V/1
2. Beschreibung der Gebäude, der Meßpunkte und des Meß-/Versuchsprogramms	V/2
2.1 Hochhaus TOP-Tegel, Berlin	V/3
2.2 TETRAPAK Berlin-Heiligensee	V/4
2.3 Schaltwarte der GASAG, Berlin-Mariendorf	V/5
2.4 BAM Berlin, Haus 88	V/5
2.5 Modellschutzbau Meppen	V/6
3. Darstellung der einzelnen Meßergebnisse	V/13
3.1 Hochhaus TOP-Tegel, Berlin	V/13
3.1.1 Messungen in der Baugrube: Freifeld und Wellengeschwindigkeit	V/13
3.1.2 Messungen im Rohbau: Anregung der Fundamente, Verteilung über die Gebäudehöhe und Deckenresonanz	V/13
3.1.3 Verhältnis Freifeld - Bauwerk	V/20
3.2 TETRAPAK Berlin-Heiligensee	V/25
3.2.1 Deckeneigenfrequenz und Dämpfung	V/25
3.2.2 Erschütterungsübertragung ins Gebäude	V/29
3.3 Schaltwarte der GASAG, Berlin-Mariendorf	V/29
3.3.1 Verteilung über die Gebäudehöhe	V/29
3.3.2 Verhältnis Freifeld - Bauwerk	V/30
3.4 BAM Berlin, Haus 88	V/30
3.4.1 Deckeneigenfrequenz, Dämpfung und Deckenresonanz	V/30
3.4.2 Verhältnis Freifeld - Bauwerk	V/34
3.4.3 Vergleich der Ergebnisse bei Impuls- und Schwingeranregung	V/34
3.5 Modellschutzbau Meppen	V/36
3.5.1 Verhältnis Freifeld - Bauwerk und Wellengeschwindigkeit	V/36
3.5.2 Deckeneigenfrequenz und -resonanz	V/38
4. Zusammenfassung der Meßergebnisse	V/41
Anhang A	
Impulsanregung BAM Berlin, Haus 88	

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil VI: Vergleich von Theorie und Messung, Prognosemodell</u>	
1. Einleitung	VI/1
2. Theorie und Messung im Gesamtüberblick	VI/2
2.1 Amplituden-Abstands-Gesetz	VI/2
2.1.1 Ein Nachtrag zu den Messungen der Erschütterungsausbreitung	VI/2
2.1.2 Vergleich zwischen Theorie und Messung	VI/3
2.2 Verhältnis Freifeld-Bauwerk	VI/4
2.3 Deckenresonanz	VI/6
3. Der Vergleich von Theorie und Messung im Einzelfall	VI/8
3.1 Zugverkehr in Berlin-Britz: Erschütterungsausbreitung bei verschiedenen Zuglängen	VI/8
3.2 Modellschutzbau Meppen: Verhältnis Freifeld-Bauwerk	VI/8
3.3 BAM Berlin, Haus 88: Deckenresonanz bei harmonischer Anregung	VI/13
3.4 Zusammenstellung übereinstimmender Einzelheiten	VI/13
3.4.1 Emission und Transmission	VI/13
3.4.2 Immission	VI/15
4. Schlußfolgerungen für die Erschütterungsprognose	VI/17
4.1 Erschütterungsquelle (Emission)	VI/17
4.2 Erschütterungsausbreitung durch den Boden (Transmission)	VI/17
4.3 Erschütterungsübertragung in Gebäude (Immission)	VI/17
4.4 Konsequenzen für das Prognoseprogramm	VI/19
4.5 Ein Prognosebeispiel zur Übertragungskette Gleis-Boden-Bauwerk	VI/20

Literatur zu den Teilen IV, V und VI

TEIL I

THEORIE DER EMISSION

Inhaltsverzeichnis

Seite

Teil I: Theorie der Emission

1.	Einführung in die Fragestellung	I/1
2.	Darstellungsmöglichkeiten für die Erregung	I/4
3.	Anregungsmechanismen bei Schienenverkehr	I/6
4.	Charakterisierung der Erregung	I/9
5.	Relevanz einzelner Anregungsanteile, Quantifizierung	I/16
6.	Zusammenfassung	I/29

1. Einführung in die Fragestellung

Das Problem der Erschütterungen durch Schienennahverkehr ist in die Teile Emission, Transmission und Immission zerlegt worden (Bild 1). Die Problem-bereiche der Transmission und der Immission lassen sich dabei einfach trennen. Die Immission behandelt die Weiterleitung der Bodenerschütterungen in ein Gebäude einschließlich der Bauwerk-Boden-Wechselwirkung. Die Schnittstelle zwischen Transmission und Immission ist dabei klar: Es sind dies die Freifeldbodenerschütterungen an den Fundamentorten. Die Trennung zwischen Emission und Transmission dagegen ist nicht so klar. Man kann den Oberbau vom Boden trennen und die auf den Boden wirkenden Schnittspannungen als die Emissionsgrößen betrachten. Einfacher - zumindest von der Anzahl der Unbekannten - ist es, die Trennung zwischen Fahrzeug und Fahrweg zu wählen und die Kontaktkräfte zwischen Rad und Schiene als die Emissionsgrößen anzusehen.

Das hauptsächliche Ziel des Forschungsvorhabens ist ein verbessertes, beziehungsweise besser abgesichertes Prognosemodell für die in der Umgebung von Bahnlinien auftretenden Erschütterungen. Im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] war die Erregung durch eine stationäre Linienlast längs des unendlich langen Gleises beschrieben worden. Diese Linienlast (genauer: Linienlastspektrum) war für einige Nahverkehrszugtypen aus Erschütterungsmessungen zurückgerechnet worden. Diese Linienlastspektren eignen sich für eine Erschütterungsprognose, die die Ausbreitungsgesetze zweier extremaler Lastfälle benutzt: den Fall einer Linienlast und den Fall einer auf einen Punkt konzentrierten Last.

Um nun zu einer eindeutigen Prognose zu kommen, wird die Erregung in ihrer tatsächlichen Beschaffenheit betrachtet. Das bedeutet, daß die räumliche Verteilung, der zeitliche Ablauf und die Bewegung der Last längs des Gleises berücksichtigt werden muß. In diesem Berichtsteil werden zunächst die verschiedenen Beschreibungsmöglichkeiten der Erregung dargestellt (Abschnitt 2) und damit die Emissionsanteile der einzelnen Anregungsmechanismen, wie zum Beispiel Flachstellen des Rades oder Fahrbahnunebenheiten, charakterisiert (Abschnitt 3). Im vierten Abschnitt wird der transiente Charakter der Erregung infolge der Bewegung der Last längs des Gleises und dessen Auswirkung auf die Schwingantworten in der Umgebung untersucht. Außerdem werden für einzelne Anregungsanteile Korrelationen zwischen den Kräften von verschie-

denen Rädern festgestellt. Diese Eigenschaften bestimmen die Ausbreitungscharakteristik der Erschütterungen. Schließlich wird im fünften Abschnitt die Relevanz einzelner Anregungsanteile untersucht. Dazu werden zunächst an einfachen Fahrzeug-Fahrweg-Modellen einige grundsätzliche Tendenzen bei der Umsetzung von Schienen- oder Radflächenstörungen in dynamische Radkräfte behandelt. Auf dieser Basis können näherungsweise Angaben über die Größe der dynamischen Kräfte, die durch bestimmte Störungen entstehen, gemacht werden.

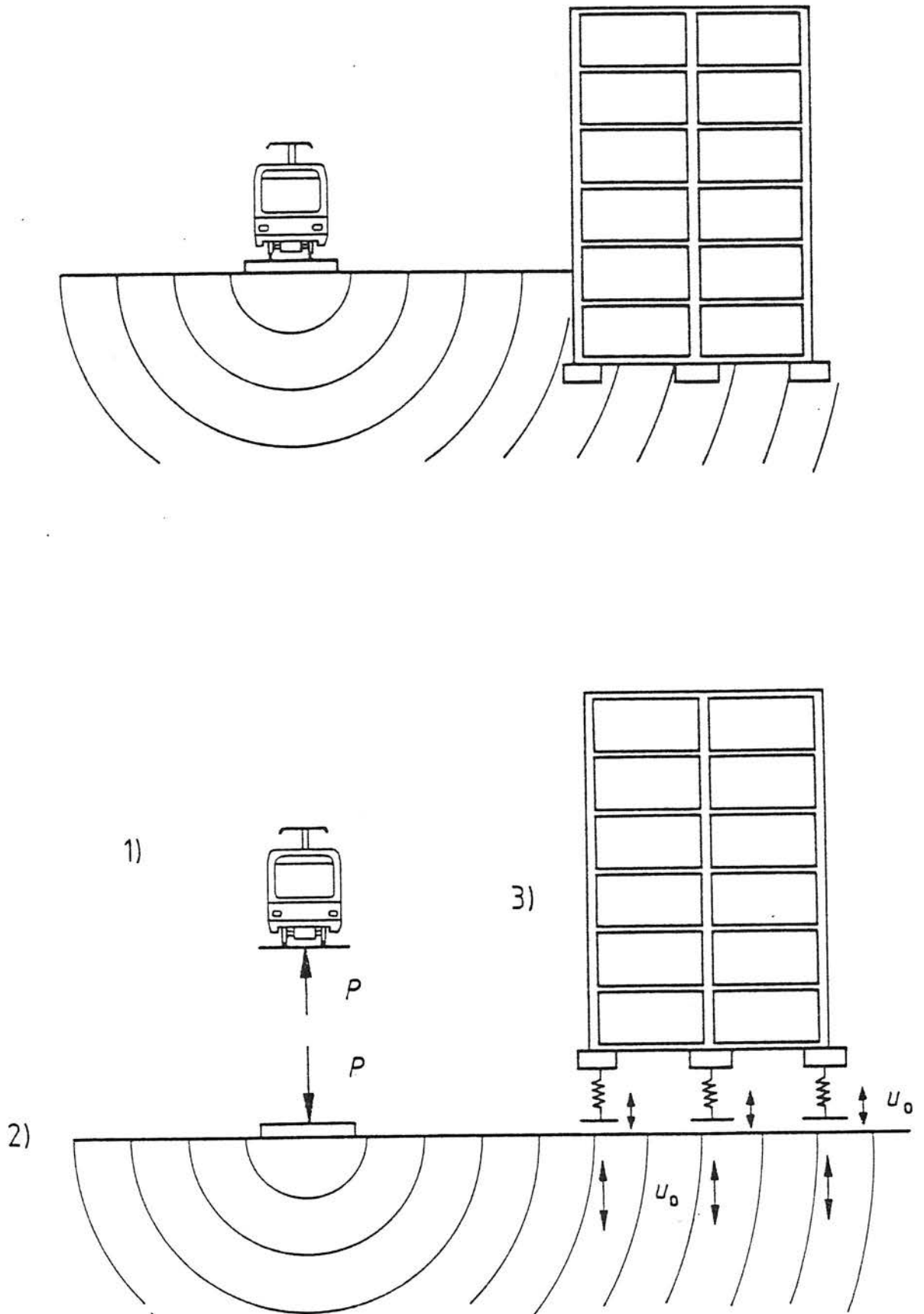


Bild 1 - Erschütterungen infolge Schienennahverkehr
Gliederung in die Teilprobleme
1) Emission durch das Fahrzeug,
2) Transmission durch den Boden und
3) Immission in Gebäuden

2. Darstellungsmöglichkeiten für die Erregung

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

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

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

oder als Kontaktkraft eines Rades mit der Schiene

$$P_j = P_j(t).$$

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

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

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

$$\eta = y$$

(v ist die Fahrgeschwindigkeit des Zuges)

zwischen den Koordinaten besteht. Die Zeitcharakteristik kann im Zeitbereich oder im Frequenzbereich, das heißt durch Spektren beschrieben werden. Es soll hier bereits darauf hingewiesen werden, daß die Zeitcharakteristik je nach Wahl der Ortskoordinaten sehr unterschiedlich aussehen kann. So ist der Zugverkehr im ortsfesten Bezugssystem ein transienter Prozeß, im mitbewegten

Bezugssystem dagegen ein stationärer Prozeß. Als Extrembeispiel stelle man sich eine bewegte konstante Punktkraft vor: im mitbewegten System ist der Kraftzeitverlauf konstant, für einen ortsfesten Punkt, der überfahren wird, ist der Kraftzeitverlauf ein (unendlich) kurzer Impuls. Schließlich sei an den Doppler-Effekt erinnert: Bewegt sich eine harmonische Quelle auf einen Beobachter zu, so ist für diesen die Frequenz höher, wenn die Quelle sich wegbewegt tiefer, als die Frequenz der Quelle.

Zum Abschluß sollen einige wichtige Beschreibungsmöglichkeiten aufgelistet werden:

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

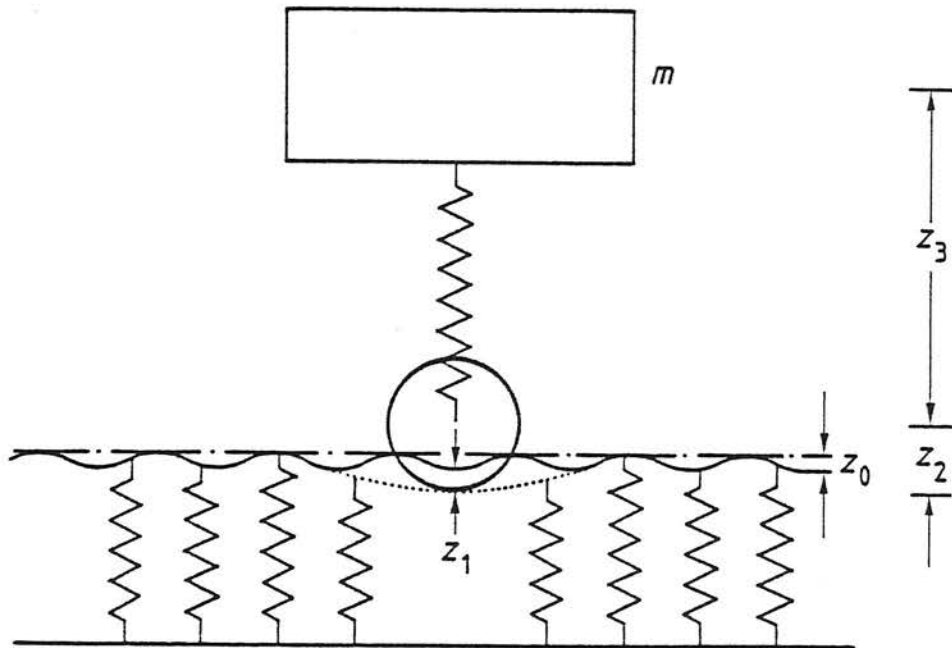


Bild 2 - Ein einfaches Fahrzeug-Fahrweg-Modell, Kinematik

3. Anregungsmechanismen bei Schienenverkehr

Folgende Anregungsursachen müssen in Betracht gezogen werden:

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

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

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

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

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

setzt sich zusammen aus

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

Es ergibt sich eine gewisse Systematik der Anregung:

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

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

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

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

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

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

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

Das Zusammenwirken der primären und sekundären Anregung kann man sich an einem einfachen Beispiel klarmachen, die Überfahrt eines Rades über eine Schienenunebenheit (Bild 3). Im Moment der Überfahrt wird die Unebenheit durch die Federung aufgefangen, dafür ergeben sich aber Eigenschwingungen des Fahrzeuges im Anschluß an die Überfahrt. Verallgemeinert bedeutet dies: Wenn die Primärstörungen örtlich oder zeitlich singular sind, werden sie zunächst durch die Verformbarkeit des Systems teilweise kompensiert, die Sekundärstörungen sind dann jedoch langanhaltendere Vorgänge, in denen die Eigenfrequenzen des Systems hervortreten. Für beliebige (anhaltende) Primärstörungen läßt sich immerhin noch sagen, daß durch sie Sekundärstörungen hervorgerufen werden, die die Primärstörungen entschärfen (glätten) und in Richtung der Eigenfrequenzen des Systems transformieren.

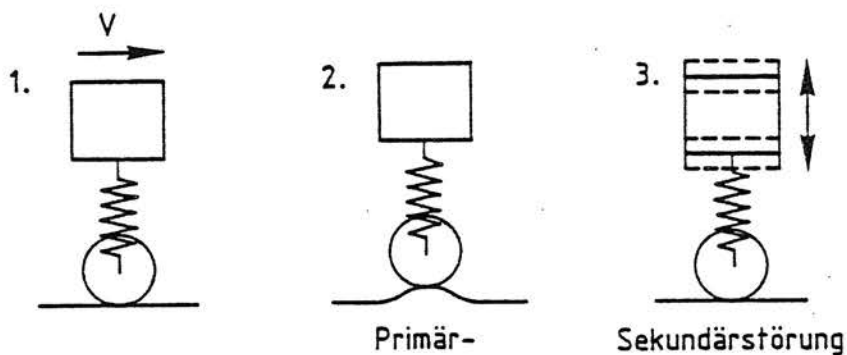


Bild 3 - Primär- und Sekundärstörung am Beispiel der Überfahrt über eine Schienenunebenheit

4. Charakterisierung der Erregung

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

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

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

Für die Berechnung der Erschütterungsausbreitung ist von Bedeutung, wie sich die Eigenschaften der Anregung auf die Umgebung auswirken. Die Umgebung beobachtet eine Zugvorbeifahrt, also einen transienten Vorgang, während die

Anregung vom Zug aus betrachtet im Normalfall als stationär angesehen werden kann. Diese Veränderung der zeitlichen Charakteristik beruht auf der Tatsache, daß die Erschütterungen mit der Entfernung von der Quelle abnehmen. Der Zusammenhang soll hier abgeleitet und an einem einfachen Beispiel veranschaulicht werden.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Für Simulationsrechnungen kann man die Tatsache ausnutzen, daß man zu jedem Anregungszeitpunkt \tilde{t} einen Empfangszeitpunkt $t = \tilde{t} + r(\tilde{t})/v_R$ hat. Nach der Berechnung von $r(\tilde{t})$ und $t(\tilde{t})$ wird der Zeitverlauf lediglich mit $1/\sqrt{r(\tilde{t})}$ be-

wertet und im neuen Zeitmaßstab zusammengesetzt. Als Beispiel sind auf diese Weise die Schwingantworten in 5 bis 50 m Entfernung von der Trasse für eine mit $v = 60 \text{ km/h}$ vorbeifahrende harmonische Einzelkraft

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

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

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

Für den Schienennahverkehr mit deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten wird allerdings aus den Ergebnissen in Bild 4 abgeleitet, daß die Erschütterungen in der Umgebung im wesentlichen die stationäre Anregung widerspiegeln, die sich auch für den mitbewegten Beobachter vom Zug aus ergeben. Der transien-

te Charakter einzelner Radvorbeifahrten und des Eigengewichts ist praktisch nur am Gleis bemerkbar. Diese Tatsache ergibt auch die Legitimation, bei den Berechnungen zur Ausbreitung der Erschütterungen die Bewegtheit der Last zu vernachlässigen und z.B. die über die Zuglänge verteilte stationäre Last als ortsfeste Erregung zu betrachten.

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

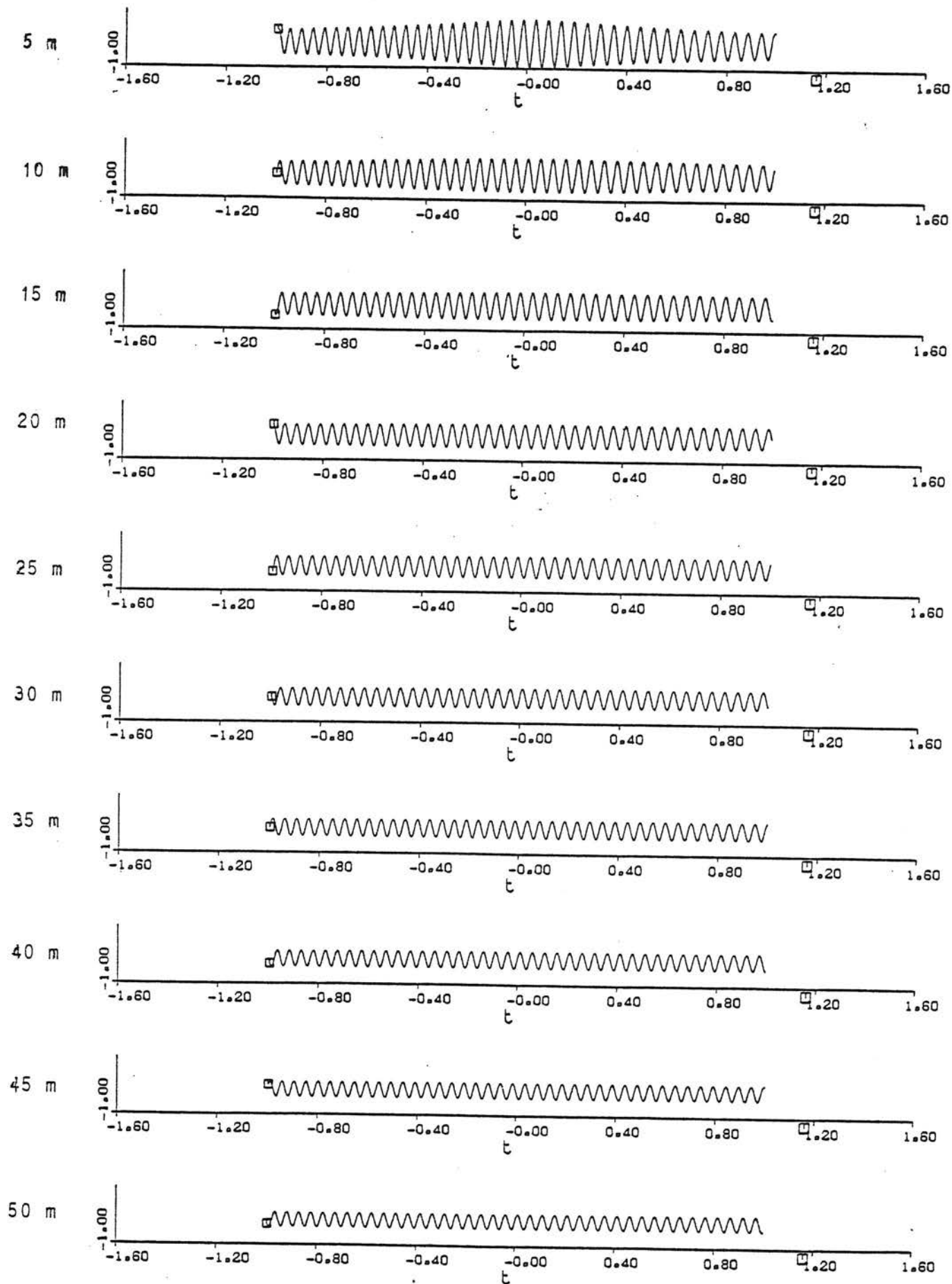


Bild 4 - Schwingantworten des Bodens auf eine mit $v = 60 \text{ km/h}$ vorbeifahrende harmonische Punktlast

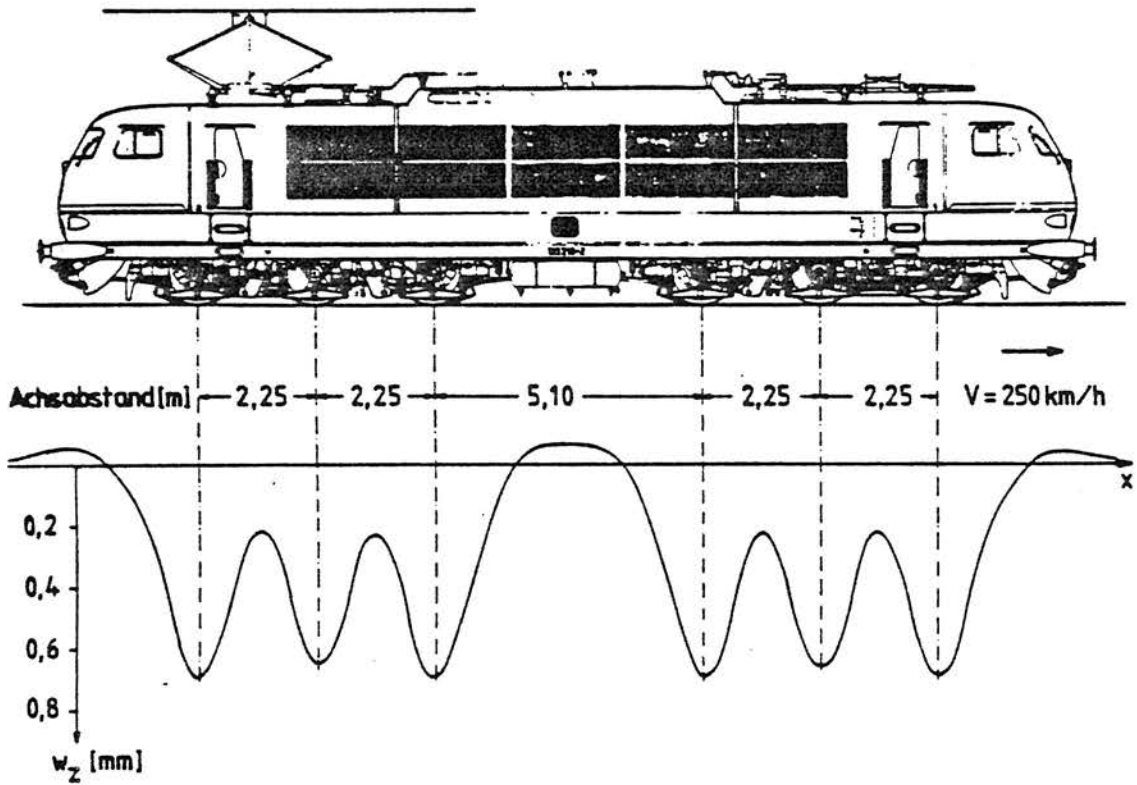
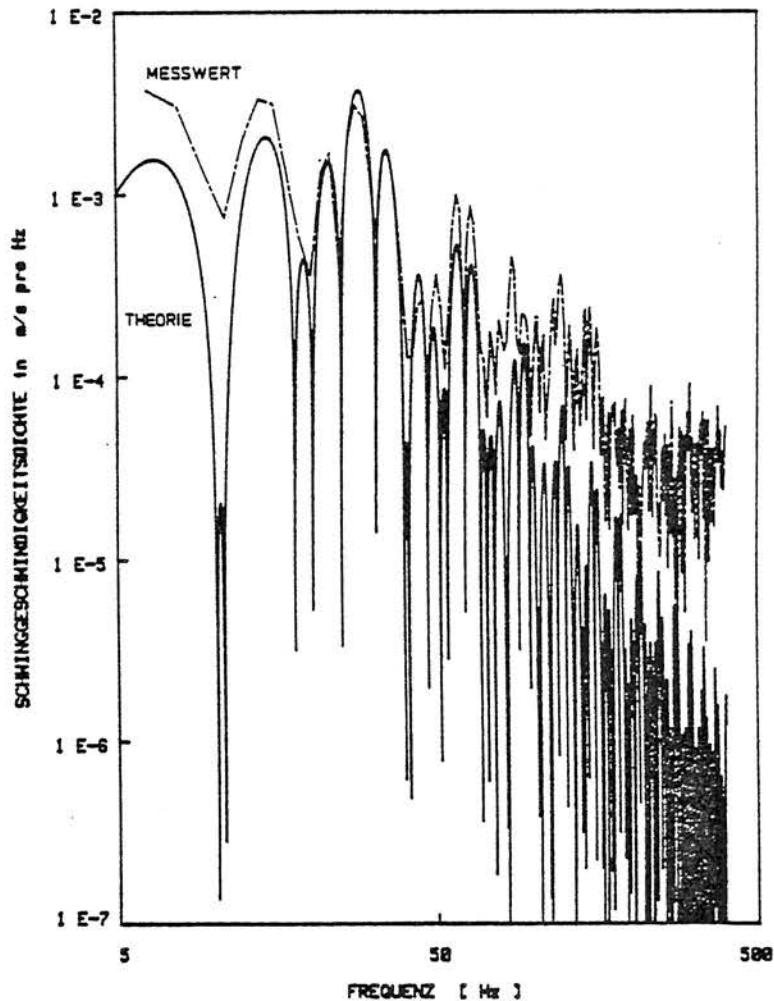


Bild 5 - Überfahrt einer LOK 103 $\bar{v} = 250 \text{ km/h}$
Einsenkungslinie bei Schotteroberbau (oben),
Amplituden einer Schwelle (unten)



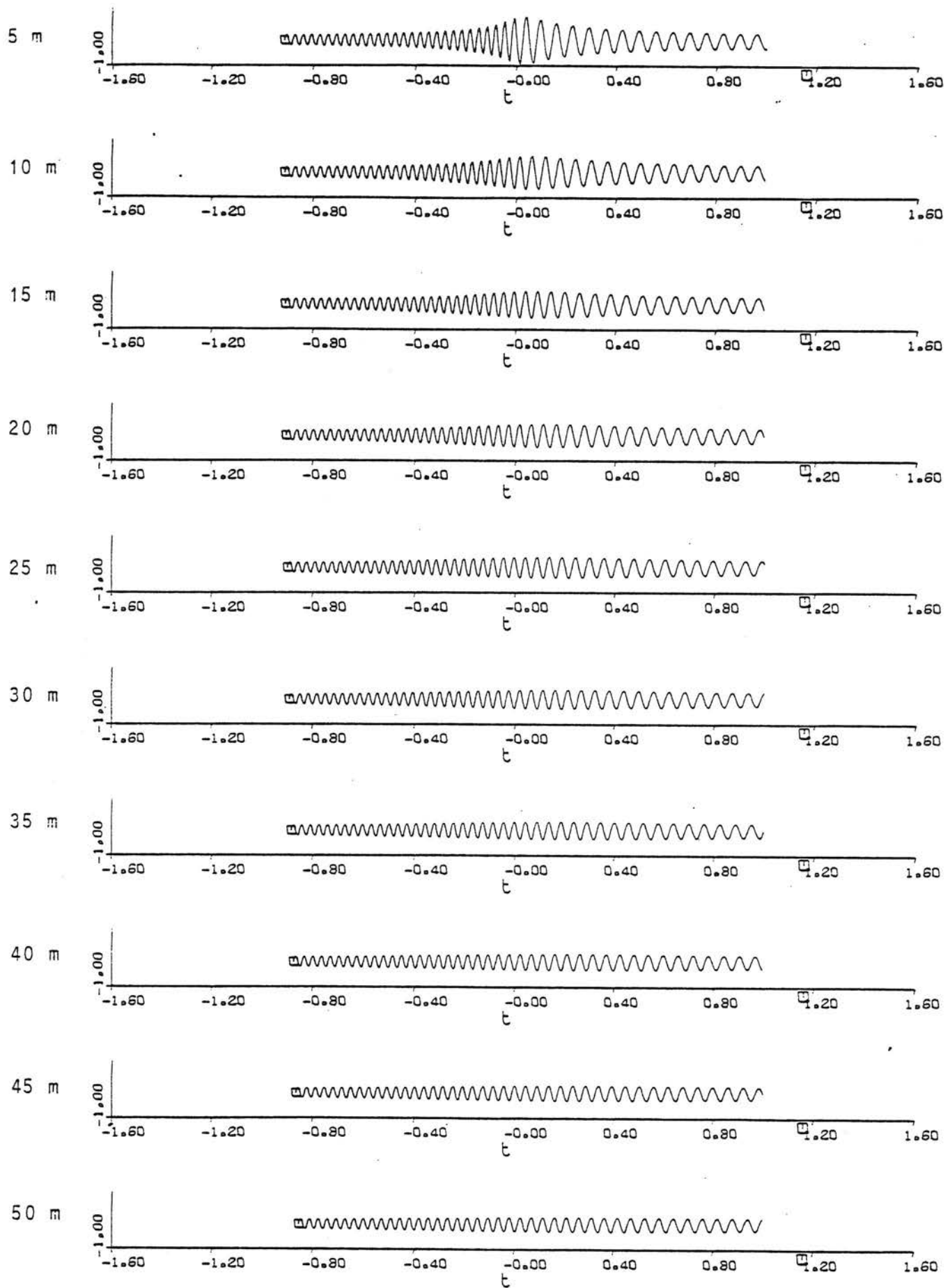


Bild 6 - Schwingantworten des Bodens auf eine mit $v = 250 \text{ km/h}$ vorbeifahrende harmonische Punktlast

5. Relevanz einzelner Anregungsanteile, Quantifizierung

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

- $\mu = \frac{m_1}{m_2}$ das Verhältnis von ungefederter zu abgefederter Masse,
- $\kappa = \frac{K}{c}$ das Verhältnis von Fahrbahnsteifigkeit zur Federsteifigkeit zwischen Wagenkasten und Drehgestell,
- $D = \frac{r}{2\sqrt{cm_2}}$ das Dämpfungsmaß für die Wagenkastenschwingungen,

und bei Betrachtung harmonischer Störgrößen:

- $\eta = \frac{f}{f_0}$ das Verhältnis der Anregungsfrequenz zur Eigenfrequenz
 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m_2}}$ des ungedämpft gelagerten Wagenkastens.

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

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

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

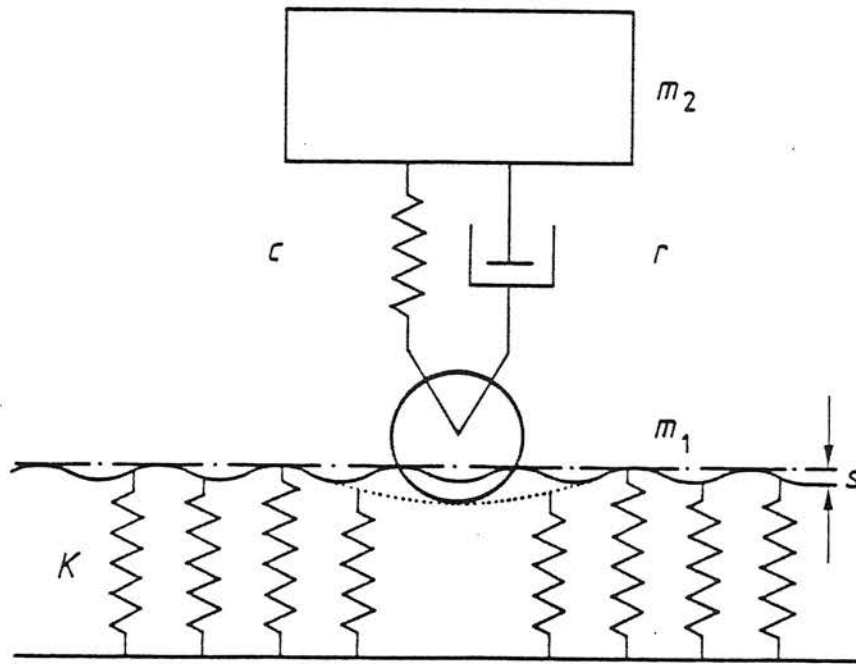


Bild 7 - Ein einfaches Fahrzeug-Fahrweg-Modell zur Berechnung der dynamischen Aufstandskraft

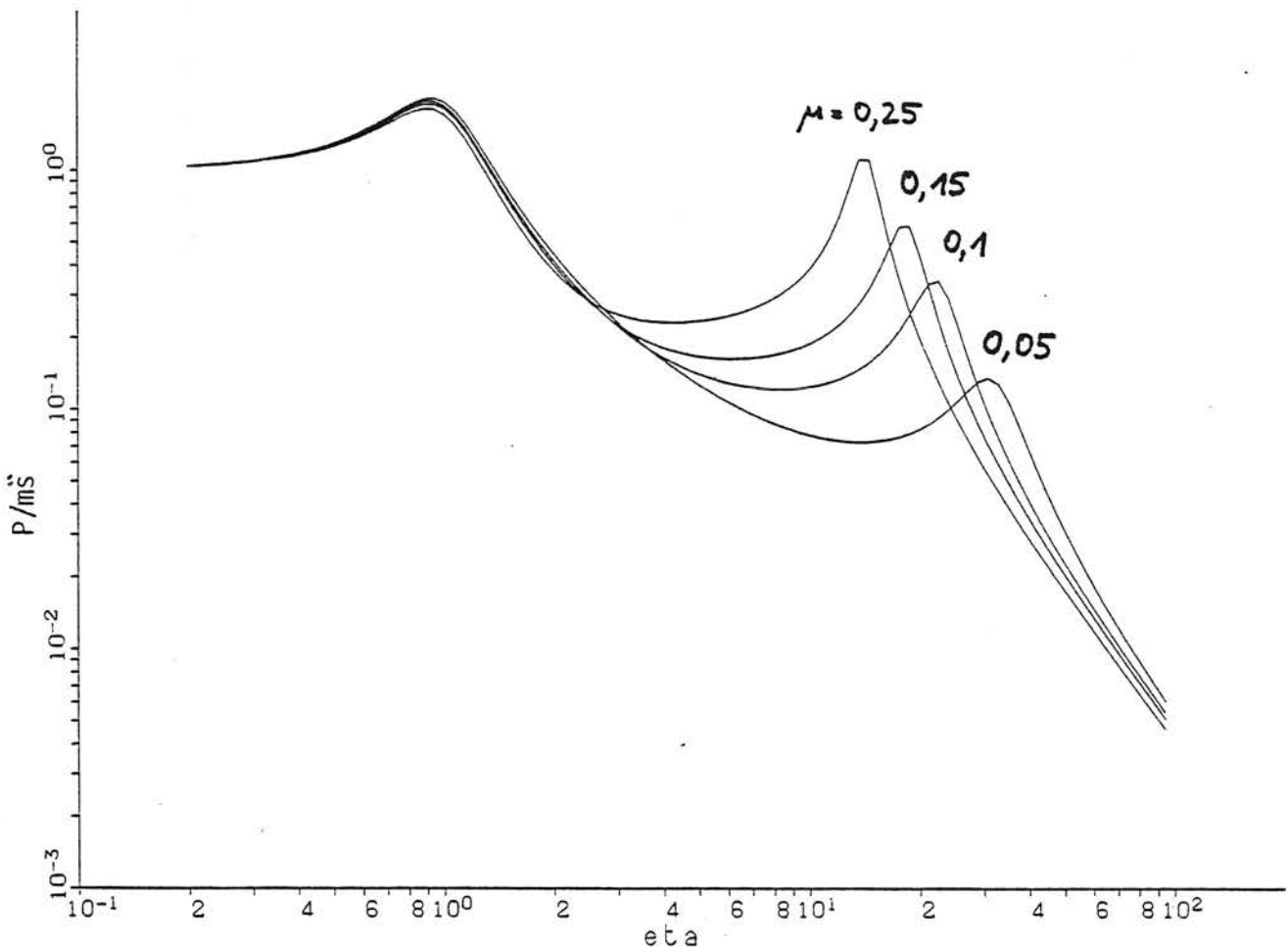


Bild 8 - Dynamische Aufstandskraft im Verhältnis zur Störbeschleunigung, Amplitudenfrequenzgänge des Zwei-Massen-Fahrzeugmodells, Variation des Masseverhältnisses μ ($\kappa=50, D=0,3$)

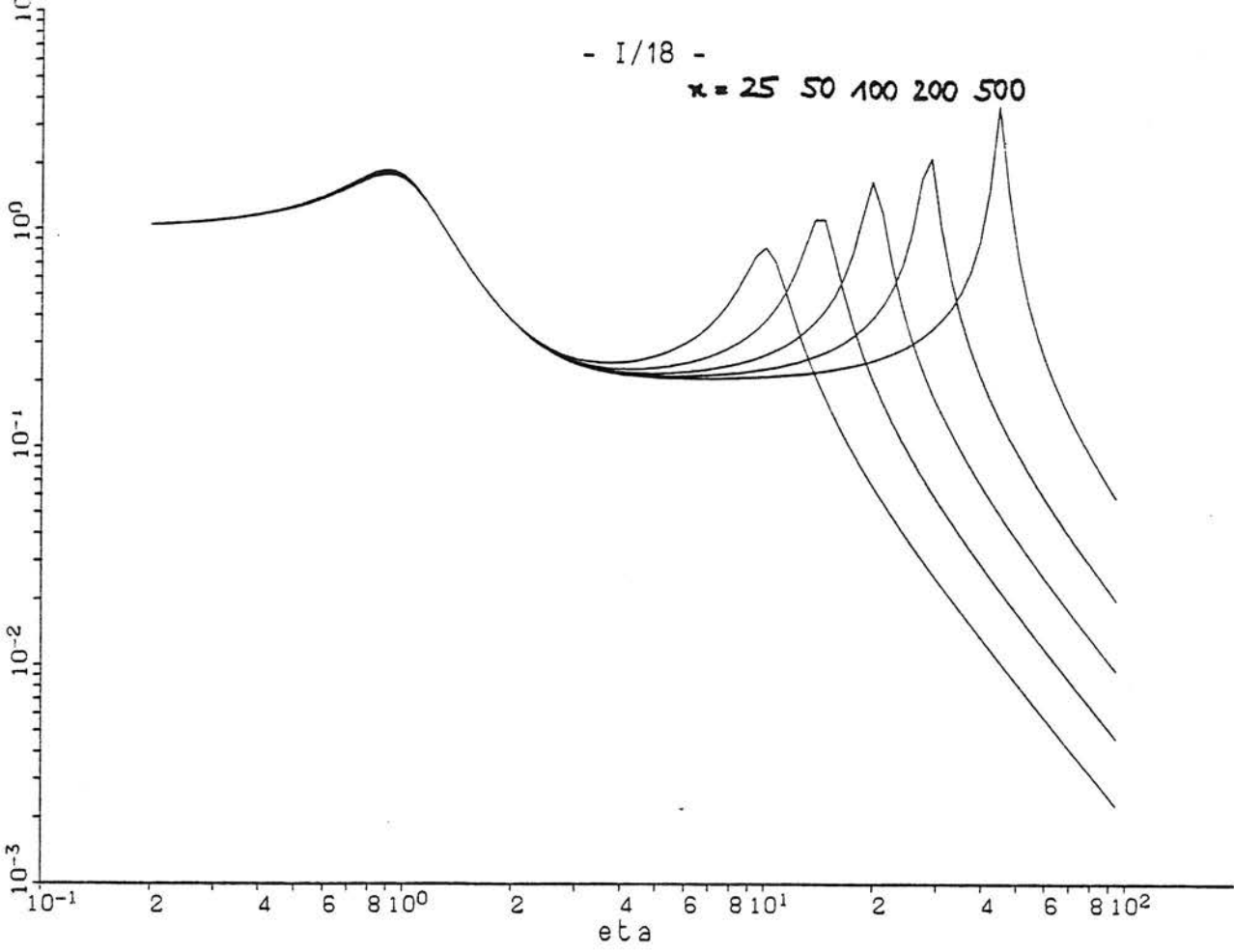


Bild 9 - Variation des Steifigkeitsverhältnisses κ ($\mu = 0,25$; $D = 0,3$)

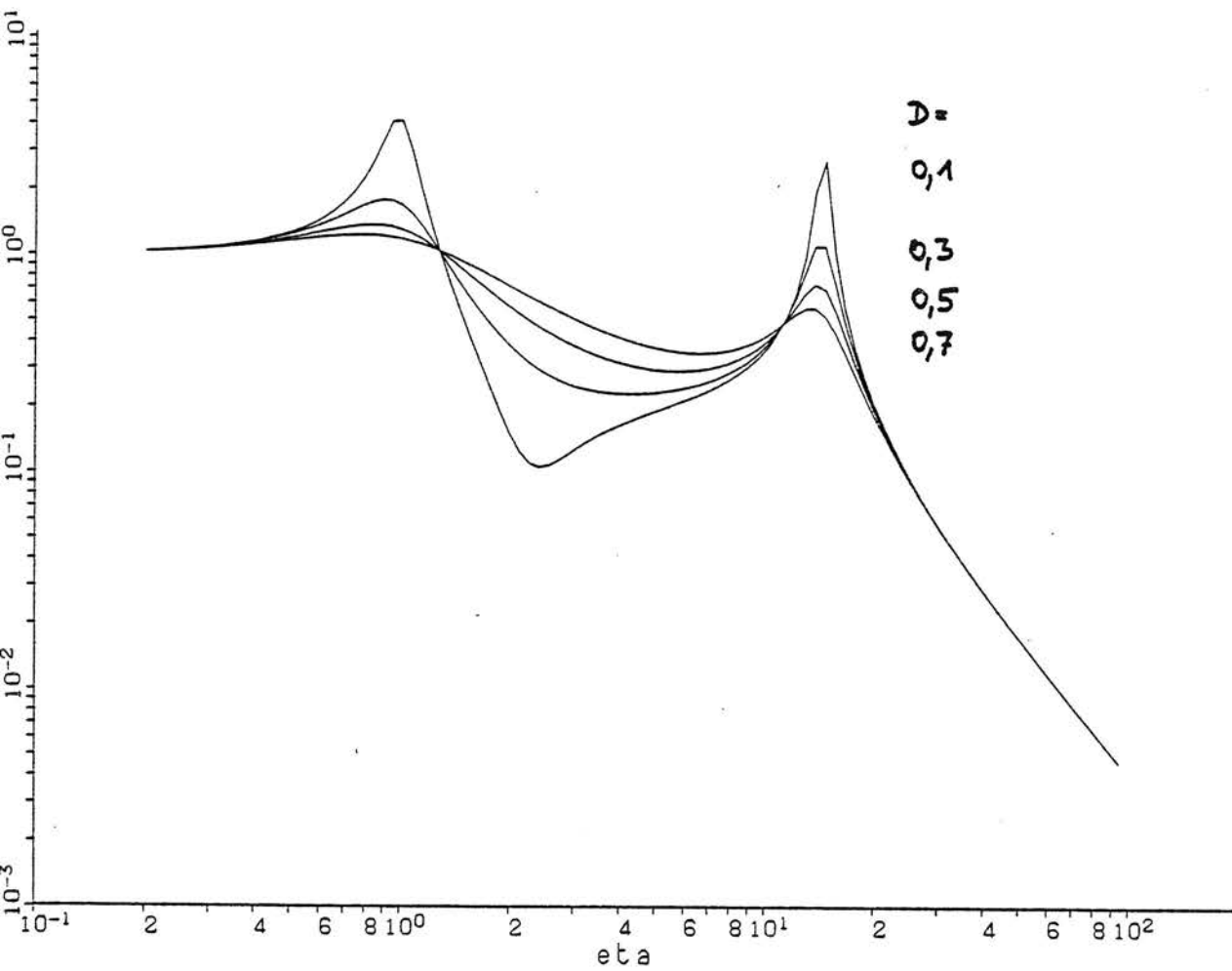


Bild 10 - Variation der Dämpfung D ($\mu = 0,25$; $\kappa = 50$)

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

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

$$- \mu_2 = \frac{m_3}{m_1} \quad \text{Verhältnis der Masse des Drehgestellrahmens zur Masse der Radsätze und}$$

$$- \kappa_2 = \frac{c_R}{c} \quad \text{Verhältnis der Federkonstanten von Radsatz und Drehgestellrahmen.}$$

Der Parametersatz für den U-Bahnwagen ist

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

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

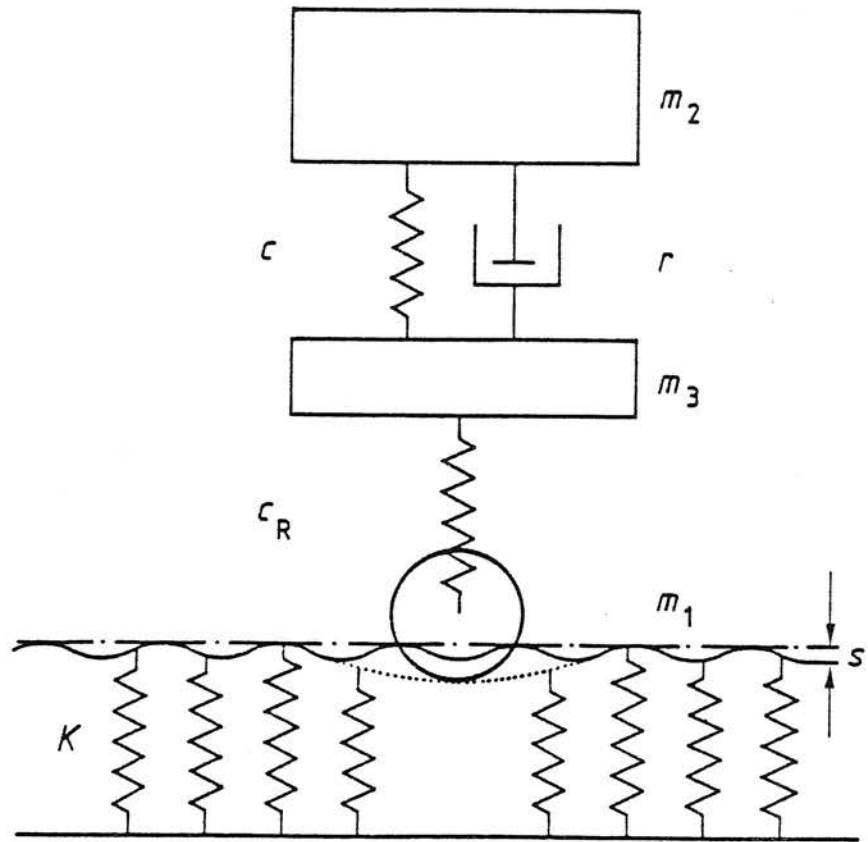


Bild 11 - Das Drei-Massen-Fahrzeugmodell auf nachgiebigem Fahrweg

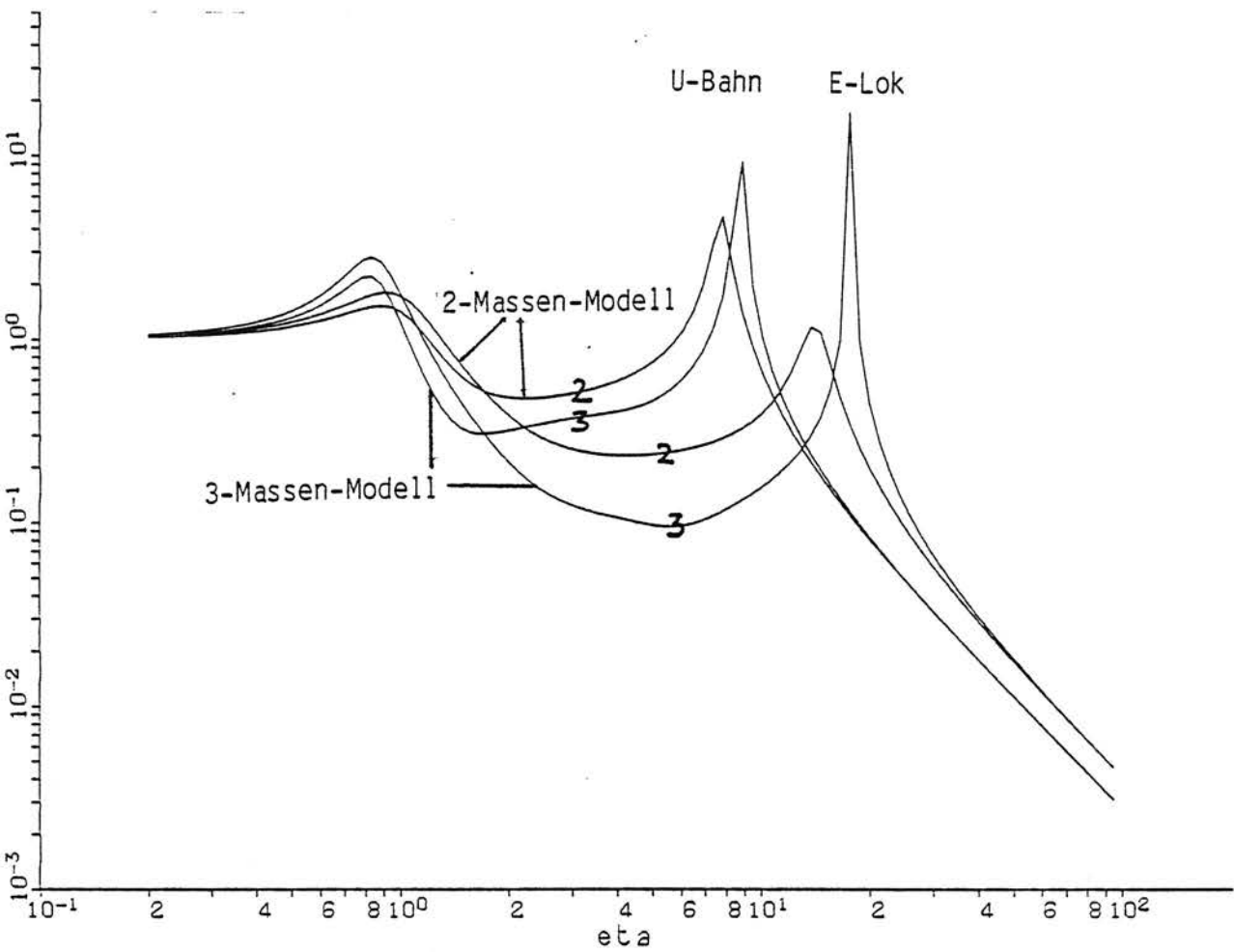


Bild 12 - Dynamische Aufstandskraft im Verhältnis zur Störbeschleunigung, Amplitudenfrequenzgänge des Zwei- und des Drei-Massen-Modells im Vergleich

U-Bahn $\mu_1 = 0,7$; $\mu_2 = 0,2$; $\kappa_1 = 50$; $\kappa_2 = 2,5$; $D = 0,3$
 E-Lok $\mu_1 = 0,17$; $\mu_2 = 0,5$; $\kappa_1 = 50$; $\kappa_2 = 2,5$; $D = 0,3$

Außerdem wird auch das Modell der Lokomotive mit dem gleichen Steifigkeitsverhältnis $\kappa_2 = 2,5$ und dem Massenverhältnis $\mu_2 = 0,5$ erweitert. Der geringere Wert $\mu_2 = 0,2$ beim U-Bahnwagen kommt von der großen ungefederten Masse μ_1 , in der der Motorblock, der direkt auf den Radsätzen abgestützt ist, enthalten ist. Bild 12 zeigt jeweils den Vergleich zwischen dem 2-Massen- und dem 3-Massen-Modell. In den dargestellten Frequenzgängen der dynamischen Auflagerkraft macht sich die doppelte Federung nur wenig bemerkbar. Es gibt keine zusätzliche Resonanzstelle, auch für die (hier nicht dargestellte) Schwingung des Drehgestellrahmens ergibt sich keine Resonanzüberhöhung bei der dritten Eigenfrequenz ($\eta_3 \approx 5$). Die zweifache Abfederung hat vielmehr ähnliche Auswirkungen wie eine Verminderung der Dämpfung (vergleiche Bild 10). Die Resonanzen werden verstärkt und die Werte im Frequenzbereich zwischen den Resonanzen sind kleiner. Diese Ähnlichkeit beruht darauf, daß auch hier wie beim schwachgedämpften 2-Massen-System eine zusätzliche Phasendrehung durch den Drehgestellrahmen dazu führt, daß sich die Trägheitskräfte zum Teil kompensieren können. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß bei der Lok oberhalb der "Drehgestellrahmeneigenfrequenz" ($\eta_3 \approx 5$) nur noch die halbe ($\mu_2 = 0,5!$) Drehgestellmasse der Anregung $s(t)$ folgt.

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

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

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

Nimmt man als Beispiel eine Unebenheit

$$s_0 = 0,05 \text{ mm mit}$$

$$f = 30 \text{ Hz an und}$$

$$m_1 = 2 \cdot 10^3 \text{ kg,}$$

so ergibt sich eine Kraft von

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

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

$$P = K s.$$

Für eine Unebenheit von

$$s_0 = 0,05 \text{ mm und mit}$$

$$K = 100 \text{ kN/mm}$$

ergibt das

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

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

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

den konstanten mittleren Anteil K_1 und den Schwankungsanteil $K_2(t)$. Die Differentialgleichung für die ungefederte Fahrzeugmasse lautet

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

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

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

Die rechte Seite entspricht einer Wegerregung mit

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

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

$$z_0 + \delta = \frac{G}{K_1 - K_2} \quad z_0 - \delta = \frac{G}{K_1 + K_2} \quad 2\delta = G \frac{K_1 + K_2 - (K_1 - K_2)}{K_1^2 - K_2^2} \doteq 2G K_2 / K_1^2.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Der dynamische Anteil ist demnach

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

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

Über die Erregerkräfte, die durch regellose Schwankungen der Fahrbahnsteifigkeit K zustandekommen, läßt sich mit obigen Ergebnissen zumindest sagen,

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

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

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

Für einen Lockerboden mit der Scherwellengeschwindigkeit $v_S = 200$ m/s und dem Fundamentradius $R = 0,45$ für eine Schwelle bedeutet das, daß bei 70 Hz Dämpfungs- und Federkraft gleich groß sind. Dementsprechend liegt bei der Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenz bei etwa 35 Hz eine Dämpfung von $D = 0,25$ und damit nur eine Resonanzüberhöhung um den Faktor 2 vor. Nach diesen Überlegungen ist also auch die Rad-Fahrbahn-Eigenfrequenz ebenso wie die Eigenfrequenz des starren Wagenkastens so stark gedämpft, daß sie in der dynamischen Radlast kaum herausragen dürfte.

Eigenschwingungen, die sich in der Aufstandskraft und damit den Erschütterungen der Umgebung deutlich bemerkbar machen, können nur Eigenschwingungen mit geringer Dämpfung sein, also insbesondere elastische Eigenschwingungen von Fahrzeugteilen, bei denen hauptsächlich nur die sehr geringe Materialdämpfung wirkt. In [9] werden experimentell und rechnerisch die elastischen Eigenfrequenzen und Schwingformen des Wagenkastens untersucht. Für die erste

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

Die Eigenschwingungen des Fahrzeugs wurden so ausführlich diskutiert, um aufzuzeigen, daß es nicht ausreicht, lediglich die Eigenfrequenz auszurechnen und mit den Frequenzbereichen, in denen große Schwingungsanteile gemessen werden, zu vergleichen. In vielen Fällen dürfte die Eigenschwingung genügend stark gedämpft sein, oder sie kann von den Fahrbahnstörungen kaum angeregt werden oder die Eigenschwingung bleibt ohne Auswirkung auf den Untergrund.

Ähnlich kritisch wie die Interpretation von Meßwerten durch Eigenfrequenzen ist die Betrachtung der Frequenzen, die sich aus Achsgeometrie und Fahrgeschwindigkeit formal berechnen lassen. Eine einzelne Schwelle erfährt bei der Überfahrt eines Zuges eine Impulsfolge, wobei der zeitliche Abstand der Impulse den Achsabständen entspricht und die Impulsdauer durch die Breite der Einsenkungslinie der Schiene gegeben ist. Im Frequenzgehalt spiegeln sich diese Merkmale der Impulsfolge folgendermaßen wider: Ein einzelner

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

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

wegen der hohen Geschwindigkeit sehr hoch. Bei 50 km/h liegt der Frequenzgehalt unter 10 Hz. Die Breite der Schieneneinsenkung $l = 2,5$ m stimmt im übrigen mit dem kleinsten Achsabstand (dem Abstand im Drehgestell) annähernd überein, so daß die Frequenzen, die aus der Achsgeometrie abgeleitet werden, immer in dem wesentlichen Frequenzbereich der Impulse liegen. Die Erläuterungen sollen jedoch zeigen, daß es sich im wesentlichen um ein breitbandiges Impulsspektrum und nicht um Schwingungen in den "Achsen-Abstands-Frequenzen" handelt. Wie bereits im Abschnitt 4 dargelegt, sind die Achsüberfahrten außerdem nur im Gleis und dessen unmittelbarer Umgebung zu beobachten.

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

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

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

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

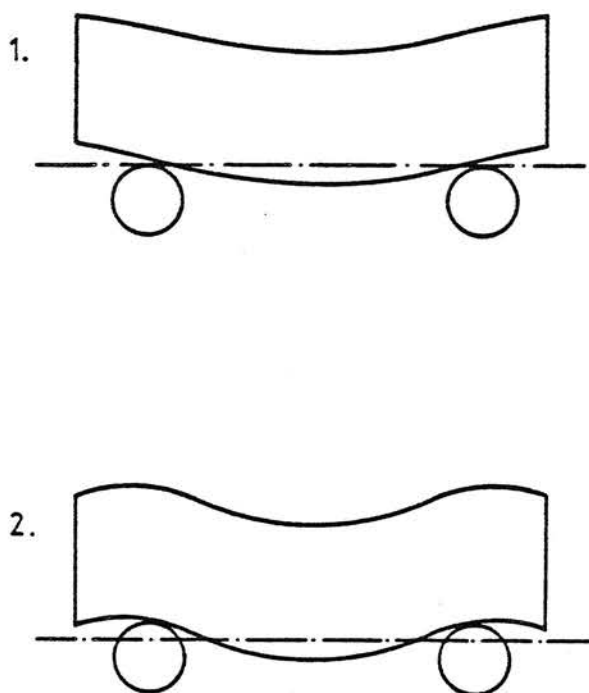


Bild 13 - 1. und 2. Biegeeigenform des Wagenkastens

6. Zusammenfassung

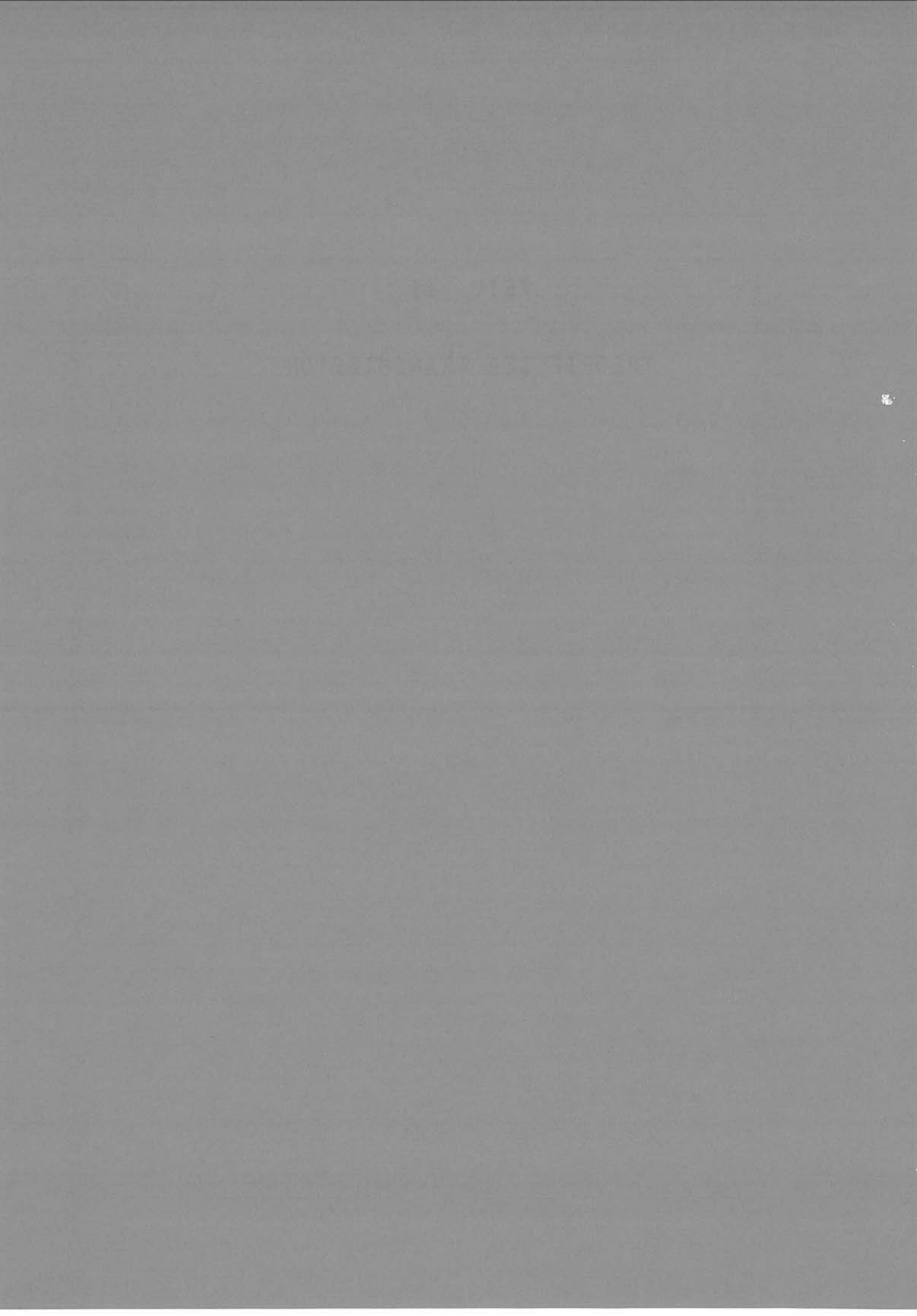
Die Zusammenstellung der einzelnen Anteile der Erschütterungsanregung infolge Zugverkehr führt zur Konkretisierung des transienten und stochastischen Charakters der Erregung. Als Ergebnisse, die für die Berechnung der Ausbreitung durch den Boden benötigt werden, sind festzuhalten:

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

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

TEIL II

THEORIE DER TRANSMISSION



Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil II: Theorie der Transmission</u>	
1. Einleitung und Zielsetzung	II/1
2. Besonderheiten der Erregung durch Zugverkehr	II/4
3. Die elementaren Lastfälle und die zur Ableitung der Abnahmegesetze verwendeten Methoden	II/7
3.1 Punkt- und Linienlast	II/7
3.2 Berücksichtigung der hysteretischen Materialdämpfung des Bodens	II/7
3.3 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei deterministischen und stochastischen Streckenlasten ("Superpositionsverfahren")	II/10
3.4 Ein Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung bei harmonischen Lasten, die über ein starres Fundament in den Boden eingeleitet werden	II/11
4. Einflüsse auf das Amplituden-Abstands-Gesetz	II/12
4.1 Zerstreung durch regellose Schwankungen der Bodeneigenschaften	II/12
4.2 Nichtlineare Dämpfung des Bodens	II/13
4.3 Impulsartige Anregung	II/14
4.4 Abhängigkeit von der betrachteten Amplitudengröße	II/15
4.5 Dämpfungseinwirkung breitbandiger Anregung	II/18
4.6 Übersicht über die in Abschnitt 4 abgeleiteten Amplituden-Abstands-Gesetze	II/21
5. Die Schwingungsausbreitung bei einer gleichphasigen Streckenlast	II/22
5.1 Berechnung mit dem Superpositionsverfahren	II/22
5.2 Berechnung mit dem Wechselwirkungsverfahren	II/28
6. Gesetzmäßigkeiten bei stochastischer Lastverteilung über die Zuglänge	II/32
6.1 Simulationsrechnungen mit zufällig erzeugten Phasen	II/32
6.2 Eine theoretische Grundlage zur Ableitung der "stochastischen Abnahmegesetze"	II/38
6.3 Berechnung der gemittelten Abnahmegesetze	II/39
6.4 Ein explizites Amplituden-Abstands-Gesetz für stochastische Anregung	II/43
6.5 Einfluß bestimmter Korrelationen zwischen den Quellen der veränderlichen Anregungsorte während der Vorbeifahrt und der Materialdämpfung	II/45
7. Zusammenfassung	II/53
Anhang A	
Ein Verfahren zur Berechnung des Schwingungsverhaltens starrer Fundamente auf dem Boden	
Anhang B	
Das Amplituden-Abstands-Gesetz für eine stochastische Streckenlast	
Literatur zu den Teilen I und II	

1. Einleitung und Zielsetzung

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

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

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

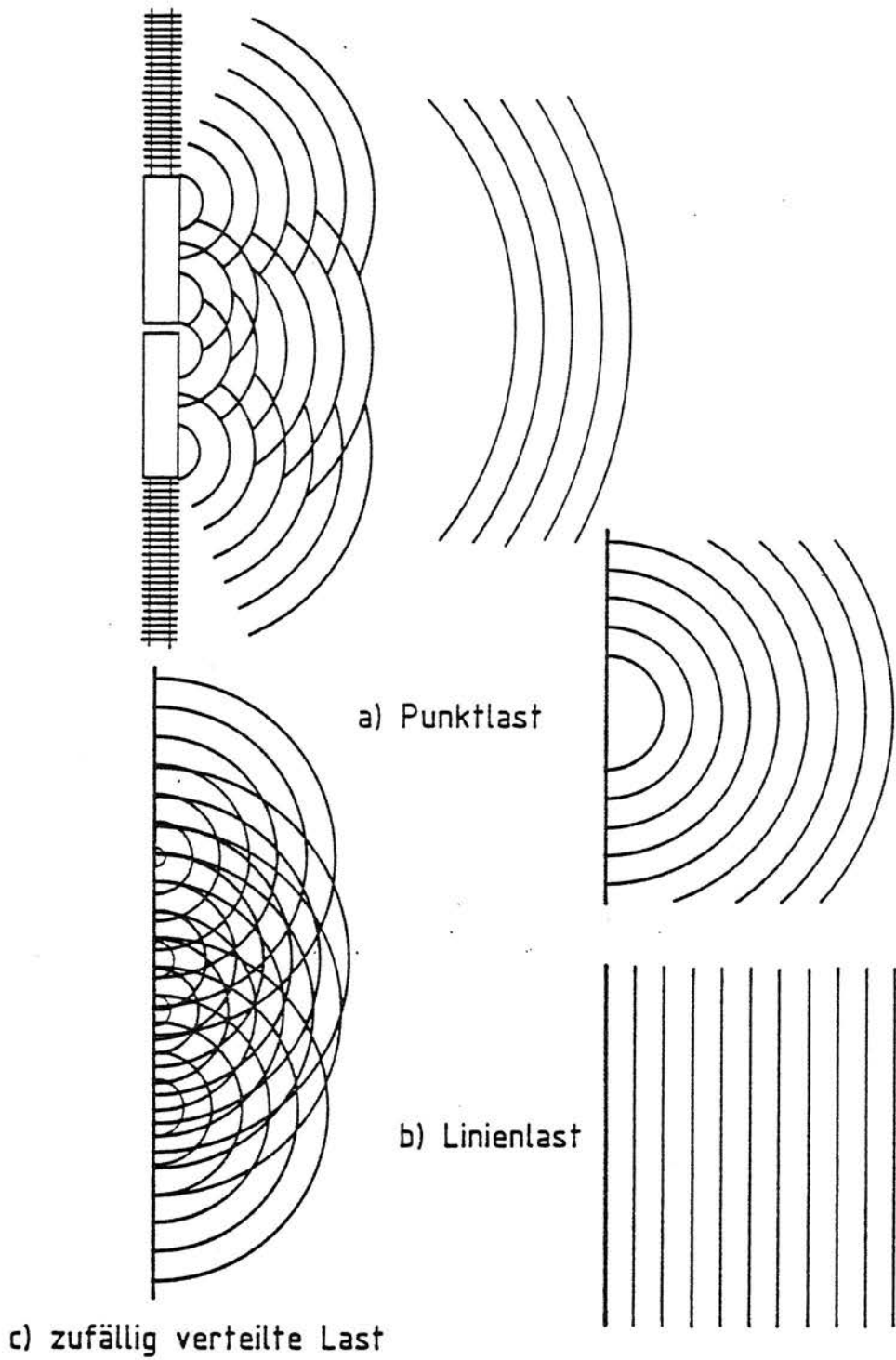


Bild 1 - Erschütterungsanregung durch Schienenverkehr und deren Idealisierung als a) Punkt-, b) Linien- und c) zufällig verteilte Last

Die bisher entwickelte Prognose stellt also jeweils zwei Werte zur Verfügung, wobei der Linienlastwert nur im Nahbereich und der Punktlastwert nur im Fernbereich sinnvoll ist. Um die Zweigleisigkeit der Prognose zu beseitigen, ist das erste Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen zur Erschütterungsausbreitung, die theoretische Lücke zu schließen und die Abnahmegesetzmäßigkeit für eine über die Zuglänge verteilt wirkende Kraft zu bestimmen.

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

2. Besonderheiten der Erregung durch Zugverkehr

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

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

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

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

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

und durch an den Radaufstandspunkten konzentrierten Leistungsdichten.

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

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

Im Teil I ist die Schwingungsantwort bei der Vorbeifahrt einer harmonischen Punktlast für verschiedene Entfernungen berechnet worden. Bild 2 zeigt noch einmal das Ergebnis. Da schon in 15 Metern Entfernung praktisch keine Ampli-

tudenänderung mehr zu verzeichnen ist, wurde für die Ausbreitungsberechnungen darauf verzichtet, die Bewegung der Erschütterungsquelle zu berücksichtigen. Die Einflüsse der Anregung über die Zuglänge, der zufälligen Überlagerung der einzelnen Achsanteile oder der Impulshaftigkeit werden an ortsfesten Quellen untersucht und berechnet. Bei dem im nächsten Abschnitt beschriebenen Rechenverfahren zur Schwingungsausbreitung beliebiger (deterministischer oder stochastischer) Streckenlasten besteht allerdings die Möglichkeit, die Schwingantworten für verschiedene Stellungen der Erregung (des Zuges) zu berechnen und aus deren Überlagerung die Antwort während einer Vorbeifahrt zu ermitteln.

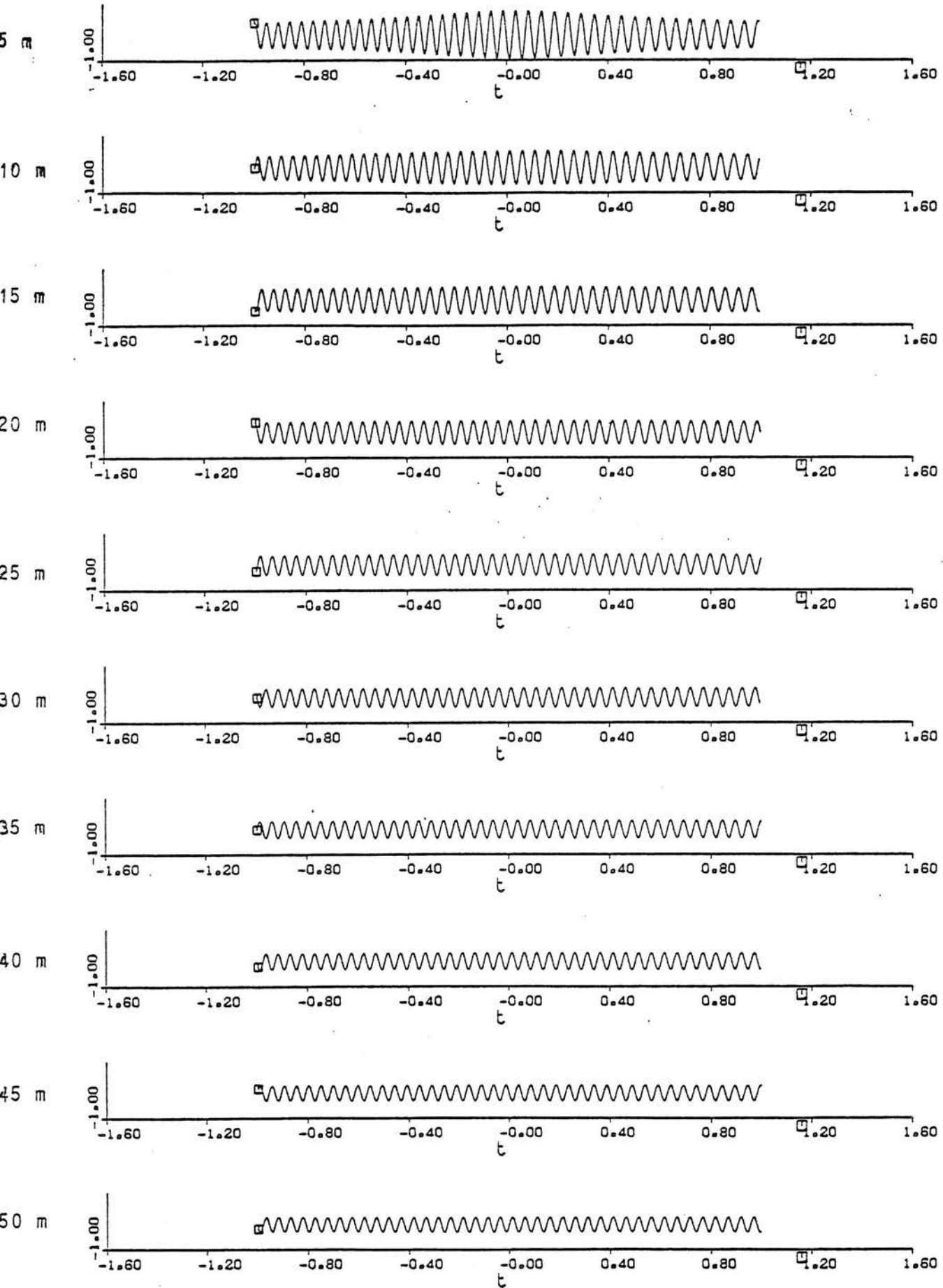


Bild 2 - Schwingantworten des Bodens auf eine mit $v = 60$ km/h vorbeifahrende harmonische Punktlast

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

3.1 Punkt- und Linienlast

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

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

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

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

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

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

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

Bei einer Punktquelle hat man Zylinderwellen mit einer Fläche

$$F \sim r .$$

Bei einer Linienquelle hat man ebene Wellen mit

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

Aus der Konstanz der Energie folgt damit

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

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

3.2 Berücksichtigung der hysteretischen Materialdämpfung des Bodens

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

Ein hysteretisch gedämpfter Boden hat ein

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

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

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

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

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

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

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

und für die Amplituden gilt

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

Der exponentielle Charakter des Dämpfungseinflusses läßt sich auch folgendermaßen ableiten:

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

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

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

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

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

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

Für einen elastischen Boden gilt

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

Daraus folgt

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

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

Da immer mit einem ganzzahligen n

$$F = k r^n$$

gilt, ist

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

und

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

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

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

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

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

Die Lösung der Differentialgleichung lautet

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

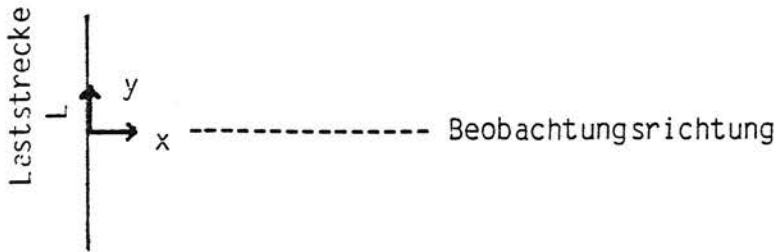
$$n \frac{A}{A_0} = -k_1 \ln \frac{r}{r_0} - k_2(r-r_0)$$

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

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

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

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



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

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

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

mit dem jeweiligen Abstand

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

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

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

Die Auswirkungen der Lastverteilung über eine größere Fläche (den vom Zug belasteten Gleisabschnitt) wird zusätzlich, neben der vereinfachten Berechnung mit dem Superpositionsverfahren, mit einem aufwendigeren Rechenprogramm ermittelt. Es wird die Amplitudenabnahme für den Fall berechnet, daß ein rechteckiges, langgestrecktes starres Fundament auf dem elastischen Halbraum aufliegt und durch eine vertikale Kraft angeregt wird. Diese Situation läßt sich mit dem Programm zur Berechnung der Wechselwirkung zwischen starren Fundamenten und dem Boden untersuchen. Das Programm beziehungsweise das zugrundeliegende Verfahren wird, da es auch für die Teile "Theorie Emission" und "Theorie Immission" verwendet wird, im Anhang A beschrieben.

Damit sind die Methoden zur Bestimmung der Ausbreitungscharakteristik

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

beschrieben.

4. Einflüsse auf das Amplituden-Abstands-Gesetz

4.1 Zerstreuung durch regellose Schwankungen der Bodeneigenschaften

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

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

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

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

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

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

4.2 Nichtlineare Dämpfung des Bodens

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

$$D = k A .$$

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

Dazu muß die im Abschnitt 3.2 hergeleitete Differentialgleichung modifiziert werden

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

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

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

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

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

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

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

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

4.3 Impulsartige Anregung

Bei einer impulsartigen Erregung ist der zeitliche Verlauf der Schwingungen zu beachten. Ist der Boden dispersiv, das heißt er besitzt für verschiedene Frequenzen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, so dehnen sich die zeitlichen Schwingungsverläufe mit zunehmender Entfernung. Bei genügend großen Entfernungen bzw. genügend kurzem Lastimpuls ist die Dauer der Schwingung annähernd proportional zur Entfernung.

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

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

Je nach Quellenart hat man ein n mit

$$F \sim r^n$$

und für ΔT gilt nach dem oben gesagten

$$\Delta T \sim r.$$

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

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

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

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

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

4.4 Abhängigkeit von der betrachteten Amplitudengröße

Als mögliche Amplitudengrößen werden hier

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

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

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

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

Ein Teil der hier abgeleiteten Abnahmegesetze hängen von der Frequenz ab, so wie die Abnahme infolge der Materialdämpfung. Der Exponent der Exponentialfunktion ist proportional zur Frequenz, und dementsprechend ist die Abnahme für hohe Frequenzen stärker. Auch die im Abschnitt 5 dargestellten Abnahmegesetze für verteilte Lasten (Streckenlasten) sind frequenzabhängig. Diese Abnahmegesetze lassen sich nur durch die Analyse einzelner Frequenzanteile verifizieren, oder bei Verwendung eines monofrequenten Erregers, zum Beispiel eines Unwuchtschwingers. Die Analyse einzelner Frequenzanteile setzt allerdings voraus, daß es sich beim Boden um ein lineares Übertragungssystem handelt. Nur dann ist gewährleistet, daß die Übertragungsverhältnisse für eine Frequenz nicht durch die anderen Frequenzanteile beeinflußt werden. Als Gegenbeispiel soll dazu die schon in Abschnitt 4.2 betrachtete nichtlineare Dämpfung herangezogen werden. In einem gewissen Amplitudenbereich nimmt die Dämpfung mit kleiner werdenden Amplituden ab. Für die Stärke der Dämpfung ist aber nicht die Amplitude einer gerade untersuchten Frequenz, sondern die gesamte Amplitude, die Amplitude des zeitlichen Verlaufs, maßgeblich. Bei der Analyse eines Frequenzgemischs wird in diesem Fall die Amplitudenabnahme eines Frequenzanteils auch von der Amplitudenabnahme der anderen Frequenzen abhängen. Zum Beispiel wird auch für eine tiefe Frequenz wegen der starken Abnahme der hohen Frequenzen und damit der Gesamtamplitude die Dämpfung stärker reduziert. Klare Ausbreitungsverhältnisse wird man bei nichtlinearer Dämpfung nur bei einer harmonischen Erregung erwarten können, sofern die Nichtlinearität nicht schon ausreicht, um die harmonische Schwingung in ein Frequenzgemisch zu verwandeln.

Für die Analyse einzelner Frequenzanteile bleibt also festzuhalten

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

Bei der weiteren Betrachtung soll ein lineares Verhalten vorausgesetzt werden. Liefert nun die Auswertung der zeitlichen Schwingungsverläufe die gleichen Abnahmegesetze? Für den quadratischen Zeitmittelwert war am Anfang dieses Abschnitts ein Zusammenhang zum Spektrum der Schwingung genannt worden. Daraus geht hervor, daß selbstverständlich das gleiche Abnahmegesetz wie im Frequenzbereich gelten muß, wenn das Abnahmegesetz nicht frequenzabhängig ist. Hat man von der Frequenz abhängige Abnahmegesetze, so gilt für den quadratischen Zeitmittelwert ein gemitteltes Abnahmegesetz. Dabei sind die ein-

zelen Abnahmegesetze entsprechend dem Frequenzinhalt der Erregung gewichtet. Dominiert ein bestimmter Frequenzbereich, so wird sich auch im Zeitbereich das Abnahmegesetz dieser Frequenz herausbilden. Die Auswirkung dieser Mittelung bei breitbandiger Anregung wird in Abschnitt 4.5 für den Dämpfungseinfluß untersucht.

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

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

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

4.5 Dämpfungswirkung bei breitbandiger Anregung

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

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

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

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

$$\begin{aligned} M(u^2) &\sim \int_0^{\infty} e^{-\frac{2Dr}{v_R} \omega} \omega d\omega \\ &= \frac{v_R}{2Dr} . \end{aligned}$$

Für den quadratischen Mittelwert bedeutet das

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

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

Das zur Berechnung der Streckenlast erstellte in Abschnitt 3.3 beschriebene Superpositionsprogramm wurde auch benutzt, um diesen Dämpfungseinfluß nachzurechnen. Bild 3 zeigt das Ergebnis für eine Punktquelle. Es werden die Abnahmegesetze für neun Frequenzen zwischen 10 und 90 Hz berechnet und zusammen mit dem daraus gebildeten quadratischen Mittelwert dargestellt. Die Asymptoten für $r \rightarrow 0$ besitzen die Abnahme $A \sim r^{-0,5}$. Im Vergleich dazu erkennt man die stärkere Abnahme der gemittelten, das heißt also der gesamten Amplitude. In einem mittleren Entfernungsbereich zwischen etwa 10 und 30 Me-

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

2 Quellen,

gleiche Phasen

Boden :

f wird variiert

$v_r = 200.0 \text{ m/s}$

$L = 0.1 \text{ m}$

$D = 3.0 \%$

Bezugsamplitude: $A(\text{Punktquelle})$

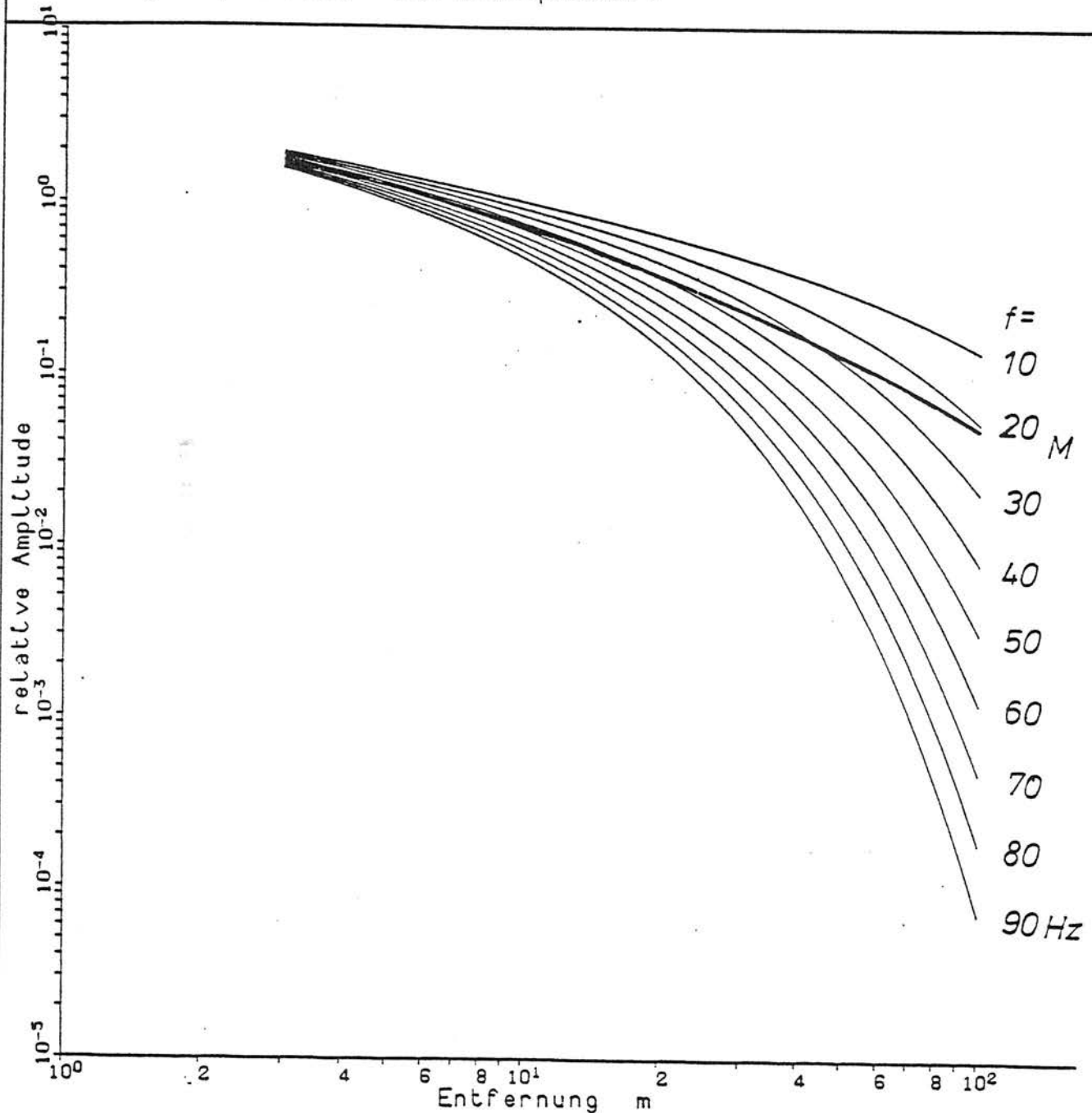


Bild 3 - Dämpfungswirkung bei breitbandiger Anregung:
Amplitudenabnahme einzelner Frequenzanteile und des
quadratischen Mittelwertes

tern ist die Abnahme annähernd linear, das heißt sie folgt einem Potenzgesetz $A \sim r^{-n}$ mit $n = 0,93$. Die Abweichungen im Nahbereich unter 10 Metern und im Bereich über 30 Metern vom theoretischen Ergebnis $A \sim r^{-1}$ zeigen, wie wichtig die tatsächliche Breitbandigkeit des Spektrums ist: Im Nahbereich fehlen die hohen Frequenzen über 100 Hz mit starker Dämpfung, so daß auch der Mittelwert nur eine Abnahme mit $r^{-0,5}$ zeigt. Im Bereich über 30 Metern dominiert die tiefste Frequenz 10 Hz und der Mittelwert folgt im wesentlichen dem zu 10 Hz gehörenden exponentiellen Gesetz. Hier fehlen die Frequenzen unterhalb von 10 Hz.

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

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

proportional zu ω und das Beschleunigungsspektrum

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

proportional zu ω^2 . Die entsprechenden Integrale für die quadratischen Mittelwerte ergeben

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

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

Für die Amplituden bedeutet dies eine Abnahme von

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

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

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

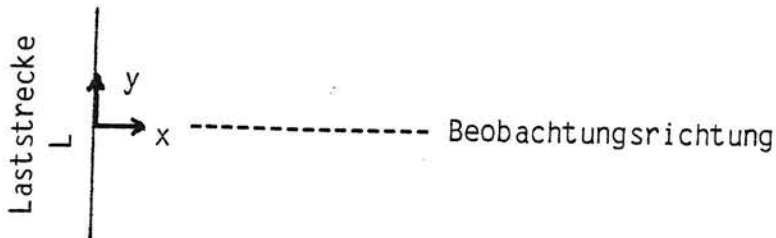
4.6 Übersicht über die in Abschnitt 4 abgeleiteten Amplituden-Abstands-Gesetze

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

5. Die Schwingungsausbreitung bei einer gleichphasigen Streckenlast

5.1 Berechnung mit dem Superpositionsverfahren

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



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

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

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

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

mit der gleichen Lastintensität pro Länge P/L normiert.

Bei den Rechnungen werden

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

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

Ab einer bestimmten Entfernung x_0 nehmen die Amplituden wie bei einer Punktlast mit $r^{-0,5}$ ab. In diesem Fernfeldbereich kann man auch die absoluten Amplitudenwerte aus der Punktlastlösung berechnen, wenn man die gesamte Kraftamplitude der über die Strecke L verteilten Lasten zugrundelegt. An dem Punkt x_0 ist der Wert der relativen Amplitude ungefähr 1, was besagt, daß an diesem

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

50 Quellen, gleiche Phasen Boden :
f wird variiert $v_r = 200.0 \text{ m/s}$
 $L = 15.0 \text{ m}$ $D = 0.0 \%$
Bezugsamplitude : $A(\text{Linienquelle})$

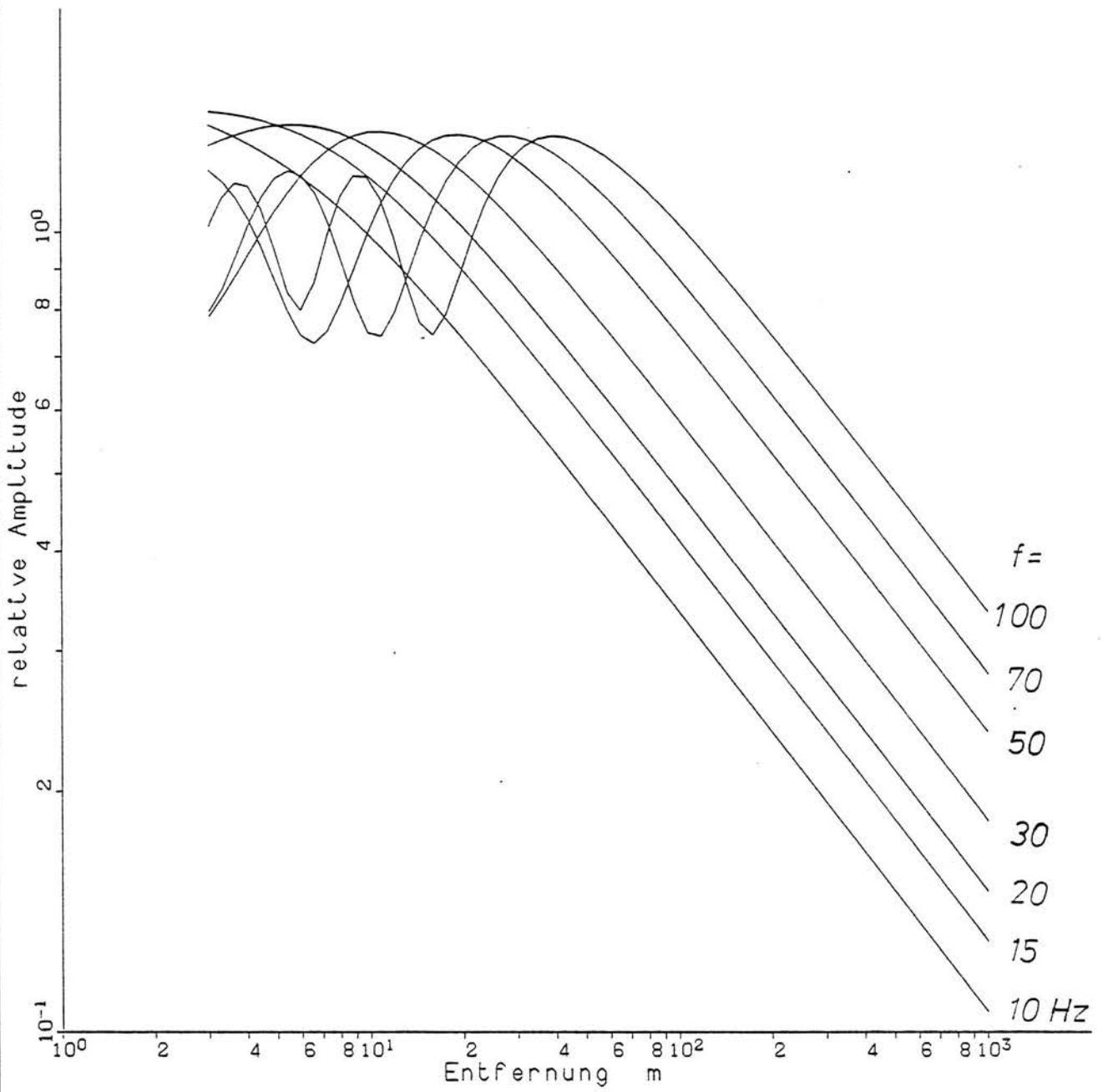


Bild 4 - Gleichphasige Streckenlast, Variation der Frequenz

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

50 Quellen,

gleiche Phasen

Boden :

$f = 50.0 \text{ Hz}$

$v_r = 200.0 \text{ m/s}$

L wird variiert

$D = 0.0 \%$

Bezugsamplitude: $A(\text{Linienquelle})$

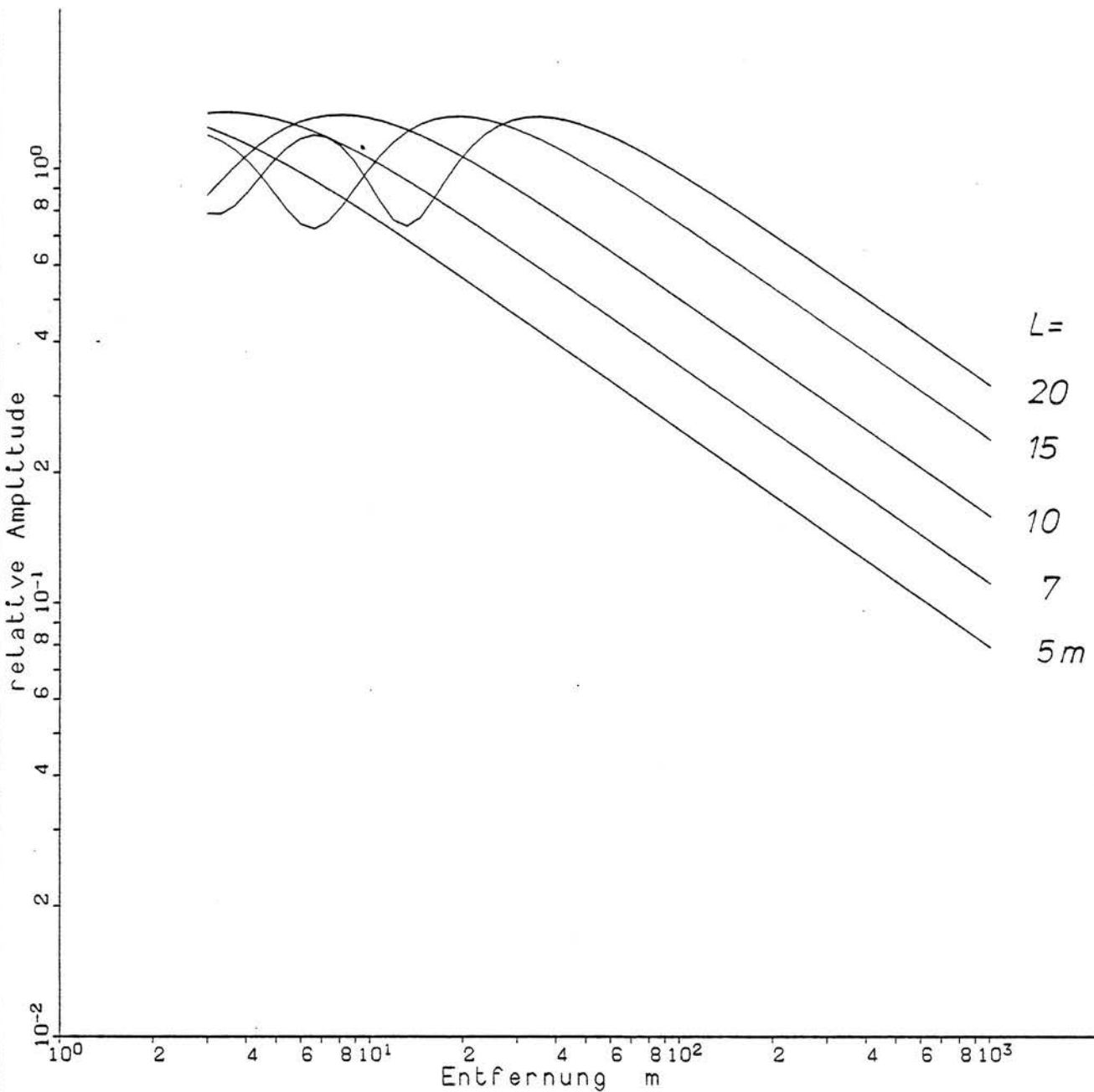


Bild 5 - Gleichphasige Streckenlast, Variation der Laststreckenlänge

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

50 Quellen, gleiche Phasen Boden :
 $f = 40.0 \text{ Hz}$ v_R wird variiert
 $L = 15.0 \text{ m}$ $D = 0.0 \%$
Bezugsamplitude : $A(\text{Linienquelle})$

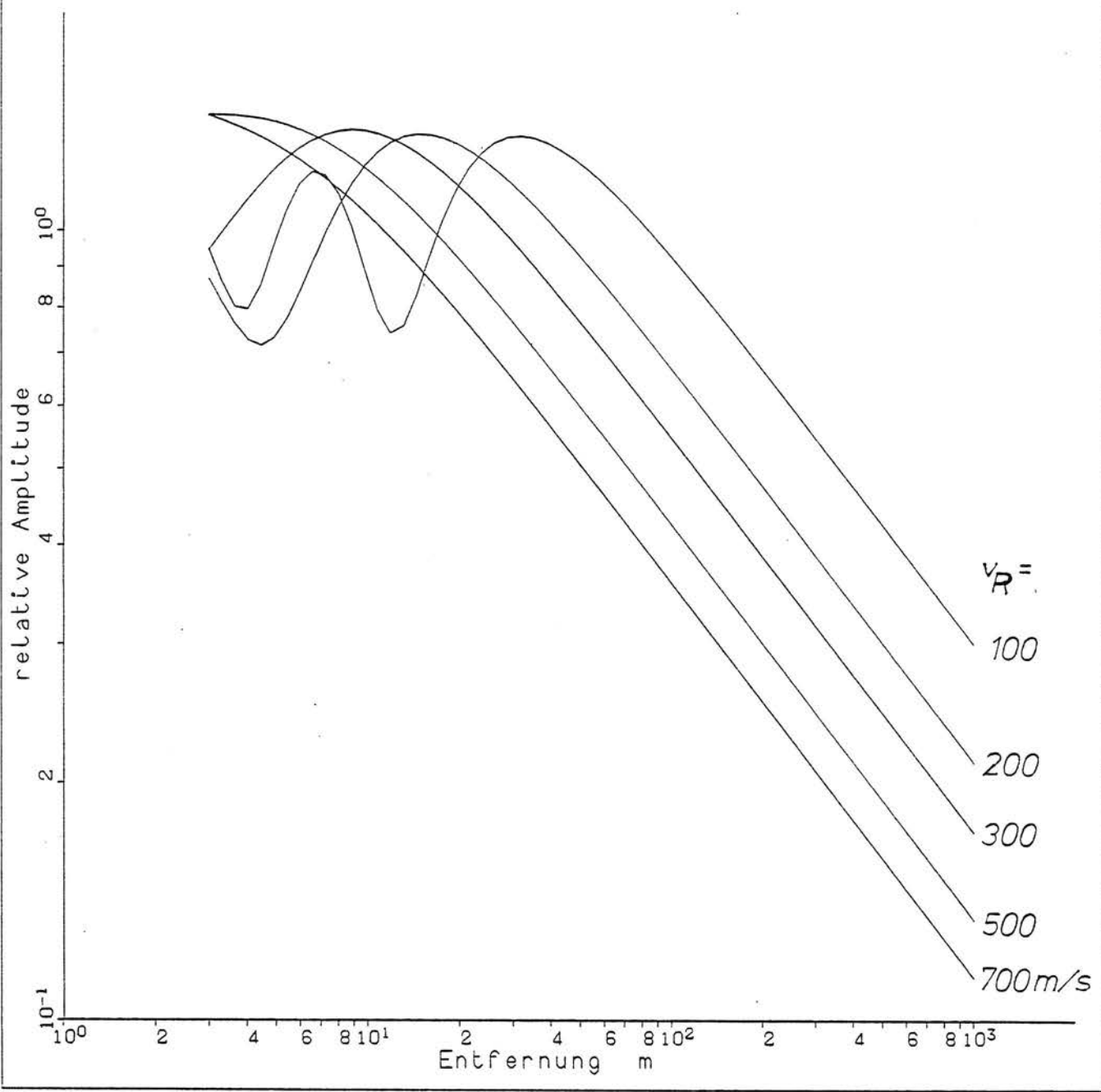


Bild 6 - Gleichphasige Streckenlast, Variation der Bodensteifigkeit (der Rayleighwellengeschwindigkeit)

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

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

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

Der konstante Nahbereich wird

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

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

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

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

gewinnen. Aus

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

ergibt sich

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

50 Quellen,

gleiche Phasen

Boden :

f wird variiert

$v_r = 200.0$ m/s

$L = 15.0$ m

D wird variiert

Bezugsamplitude: $A(L$ inienquelle)

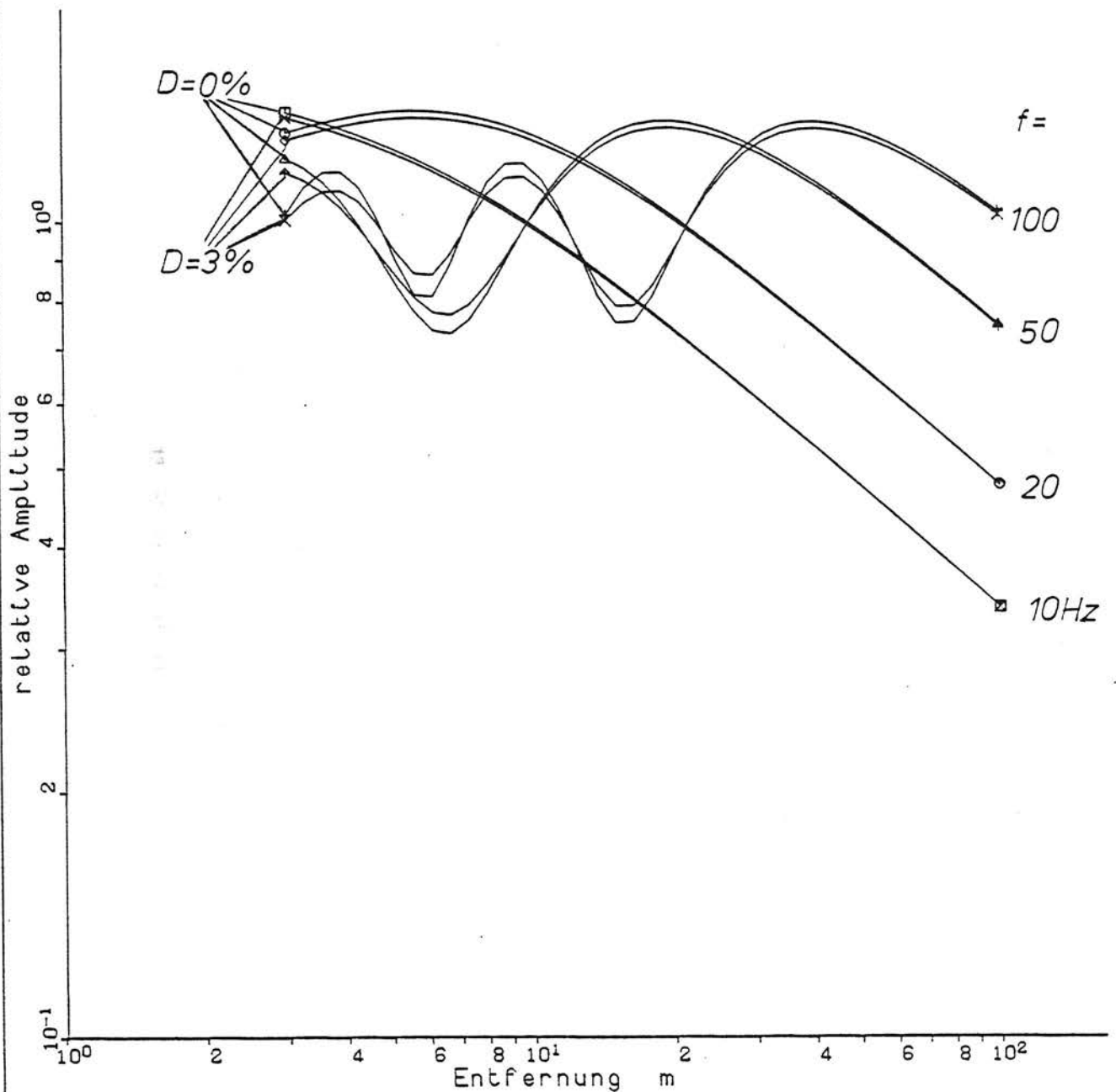


Bild 7 - Gleichphasige Streckenlast mit und ohne Bodendämpfung

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

Mit

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

folgt

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

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

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

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

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

5.2 Berechnung mit dem Wechselwirkungsverfahren

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

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

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

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

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

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

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

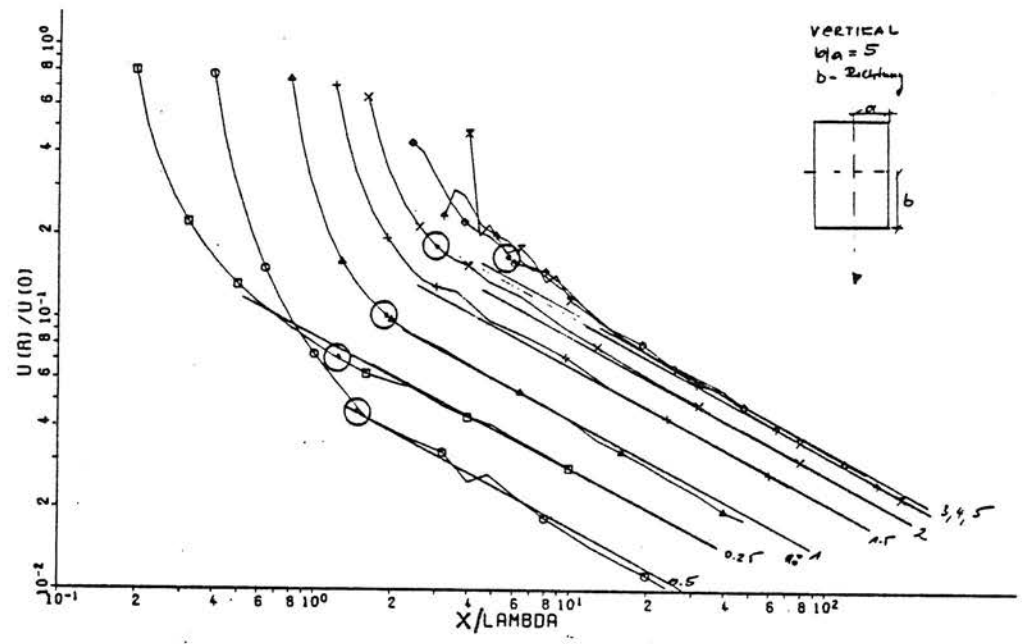
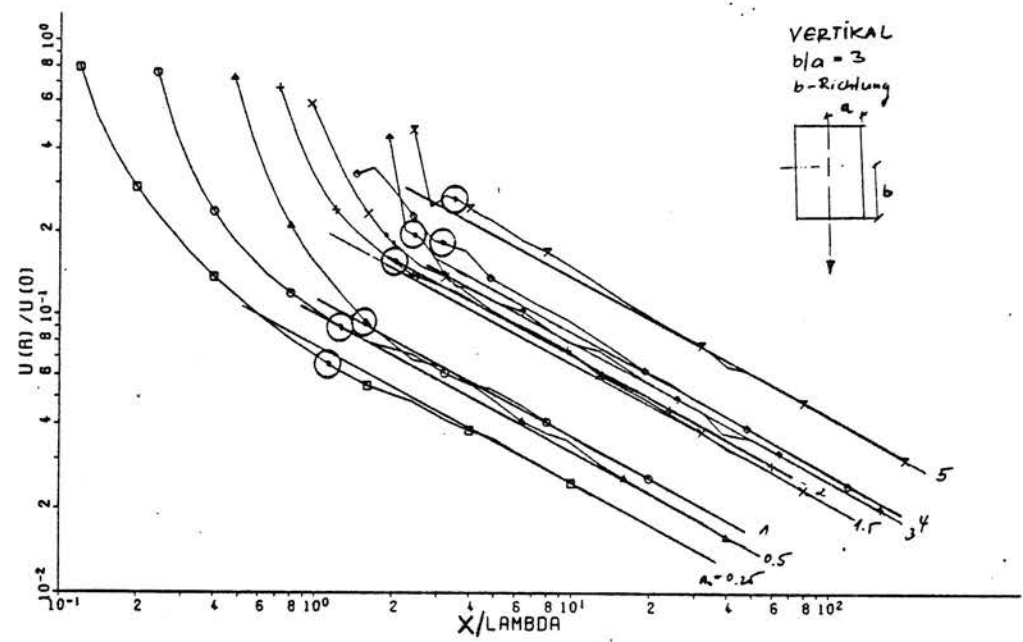
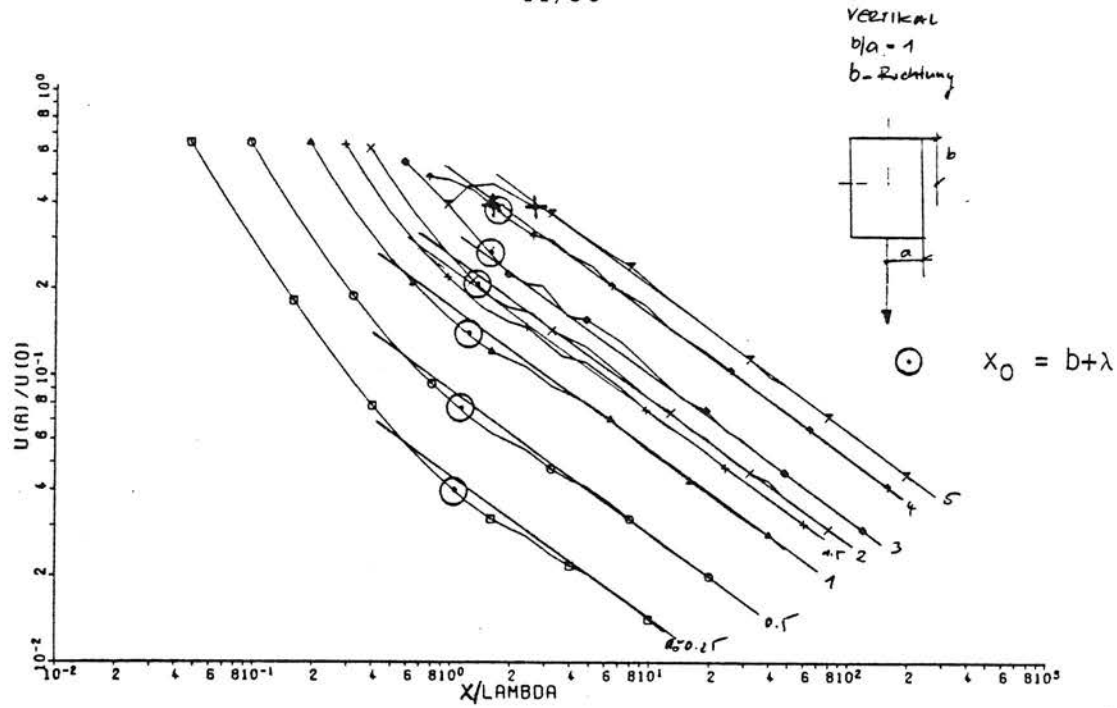


Bild 9 - Amplituden-Abstands-Gesetze bei Lasteinleitung über ein starres Rechteckfundament (Meßachse senkrecht zur kürzeren Seite)

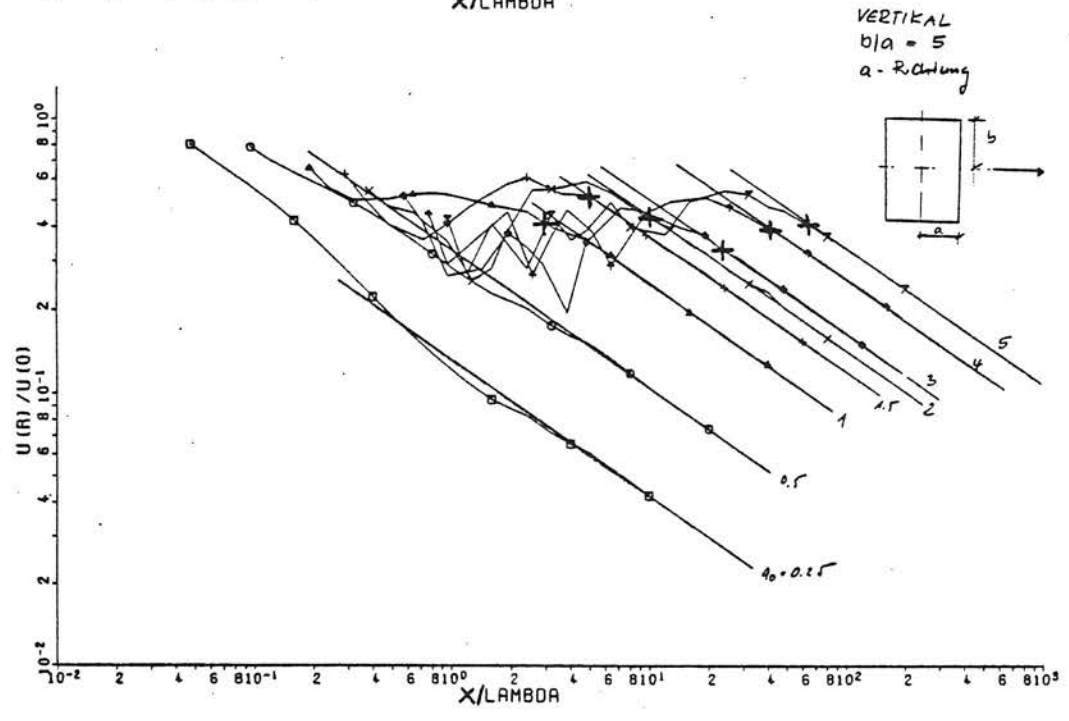
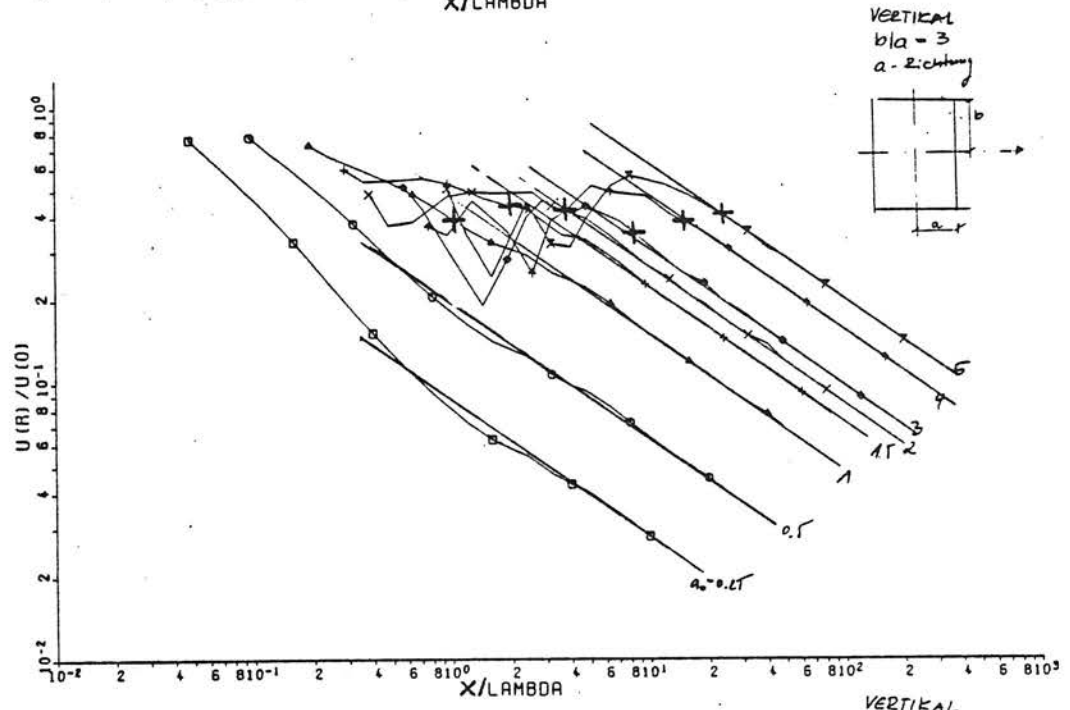
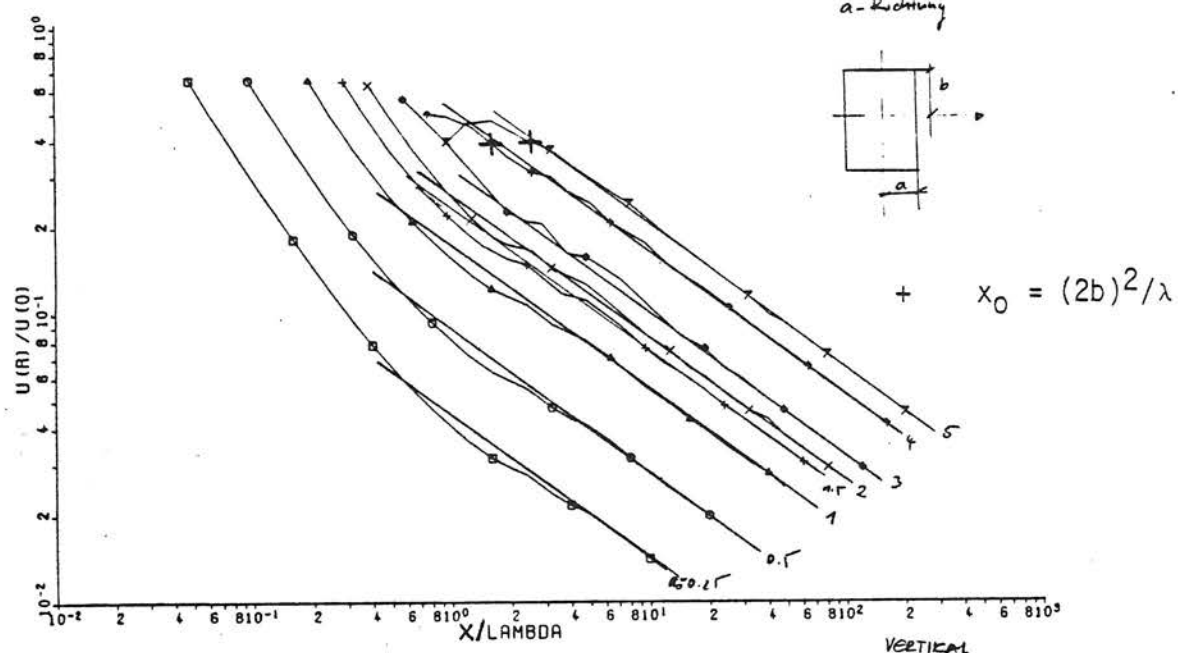


Bild 8 - Amplituden-Abstands-Gesetze bei Lasteinleitung über ein starres Rechteckfundament (Meßachse senkrecht zur längeren Seite)

6. Gesetzmäßigkeiten bei stochastischer Lastverteilung über die Zuglänge

6.1 Simulationsrechnungen mit zufällig erzeugten Phasen

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

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

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

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

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

2) Die Frequenz wird variiert (Bild 11)

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

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

n Quellen, zufällige Phasen Boden :
 $f = 30.0$ Hz $v_r = 200.0$ m/s
 $L = 1.0$ m $D = 0.0$ %
Bezugsamplitude: $A(\text{Punktquelle})$

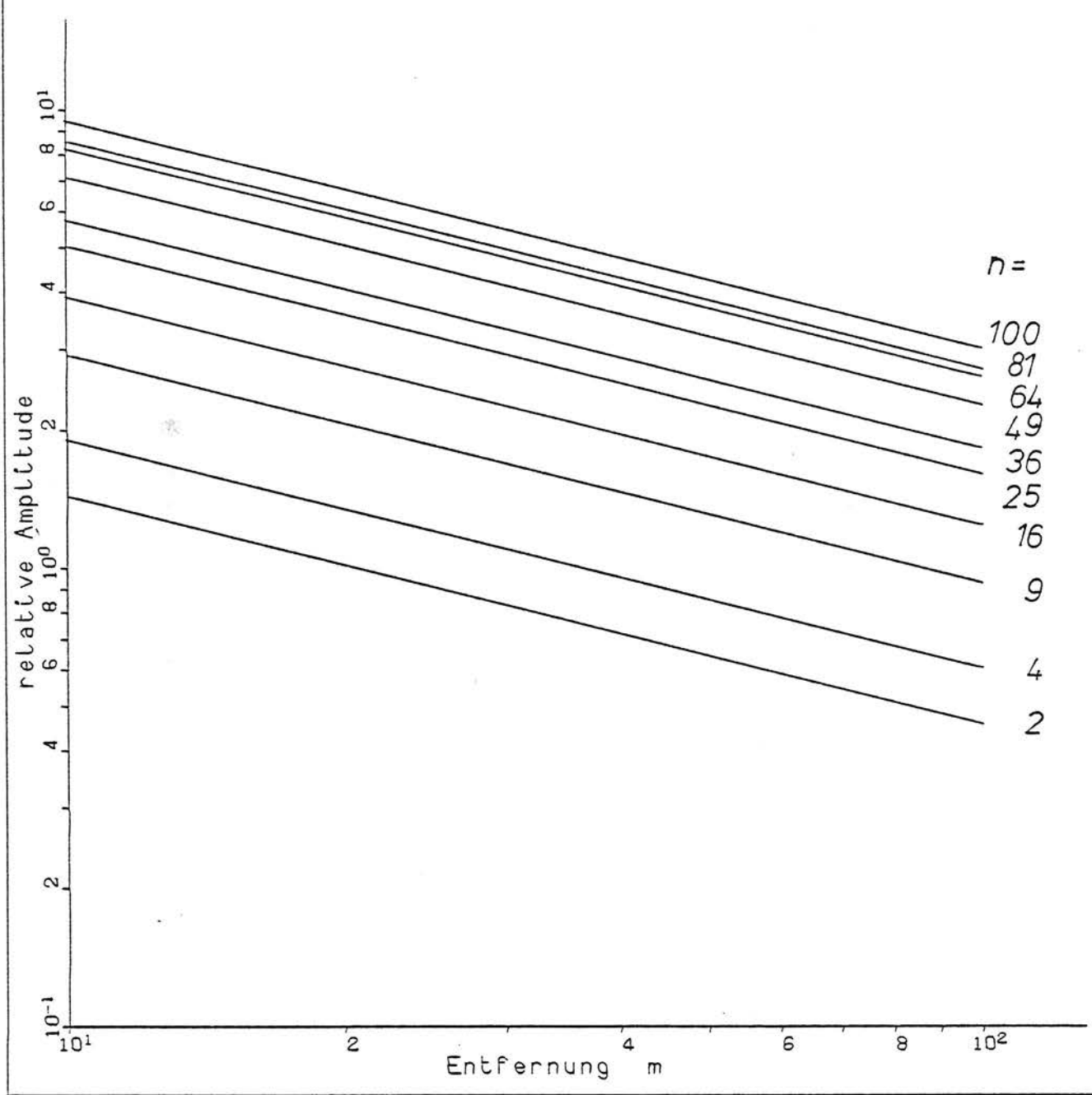


Bild 10 - Überlagerung von unkorrelierten Zufallsschwingungen, Abhängigkeit der Amplitude von der Anzahl der Quellen

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

100 Quellen, zufaellige Phasen Boden ;
f wird variiert $v_r = 200.0 \text{ m/s}$
 $L = 40.0 \text{ m}$ $D = 0.0 \%$
Bezugsamplitude: A(Punktquelle)

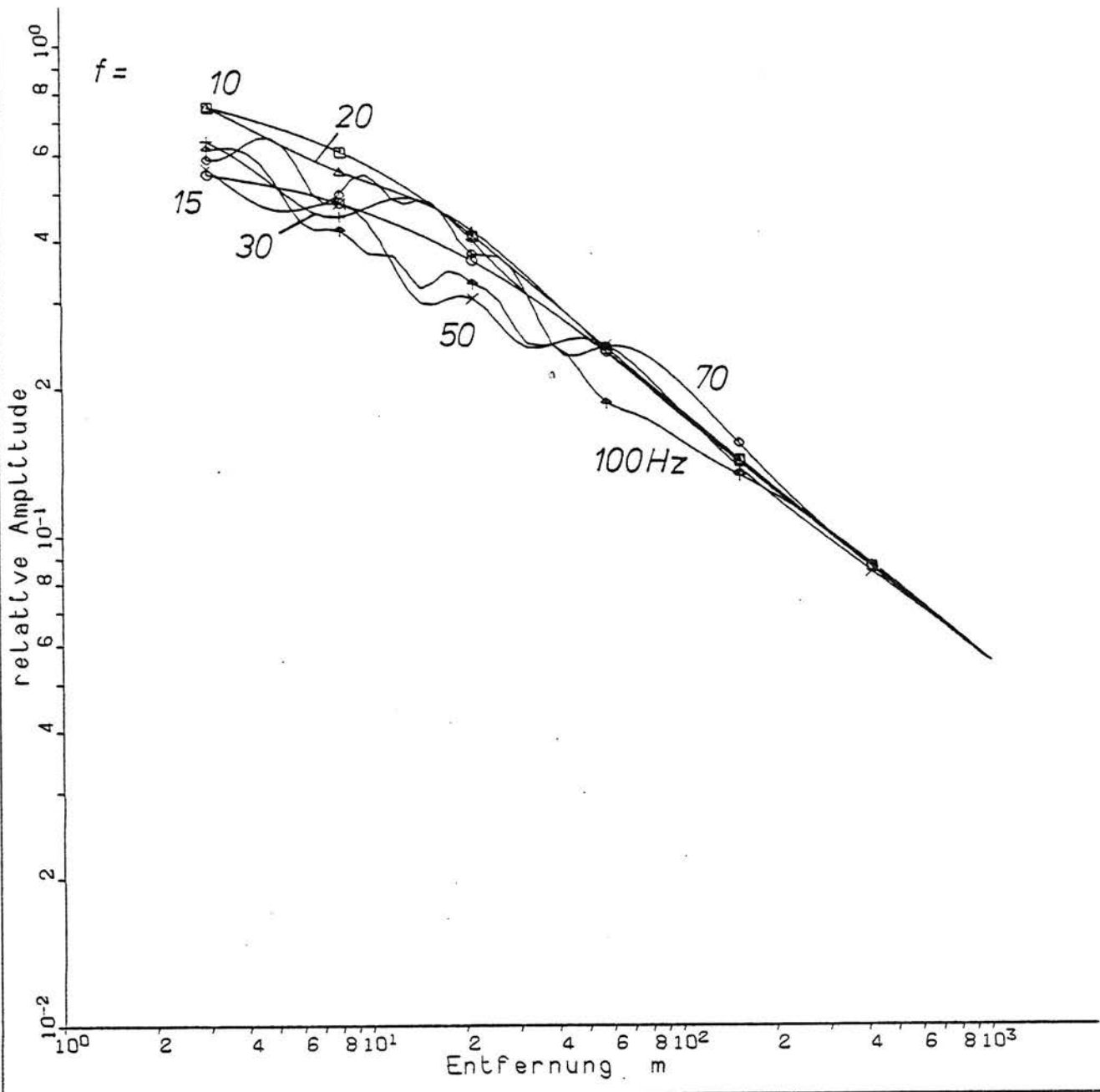


Bild 11 - Simulation einer zufaelligen Streckenlast, Variation der Frequenz

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

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

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

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

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

Die Erwartung, daß die Abnahmekurven mit zunehmender Quellenzahl sich einer Grenzkurve nähern, wird mit dieser Rechnung nicht bestätigt. Man kann lediglich feststellen, daß ab etwa $x = 100$ m alle Kurven annähernd das Punktlastgesetz erreicht haben. Die Abweichungen im quellnäheren Bereich sind aber keineswegs von eindeutiger Tendenz (bis auf die Tatsache, daß die Amplituden kleiner als bei Punktlastanregung sind). Sie sind offensichtlich zufälliger Natur und geben nicht die richtigen Gesetzmäßigkeiten wieder.

Die noch unbefriedigenden Ergebnisse der stochastischen Simulation zu 1) bis 4) sind in den Bericht mitaufgenommen worden, um zu illustrieren, mit welcher

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

50 Quellen, zufaellige Phasen Boden :
 $f = 10.0$ Hz $v_r = 200.0$ m/s
L wird variiert $D = 0.0$ %
Bezugsamplitude: A(Punktquelle)

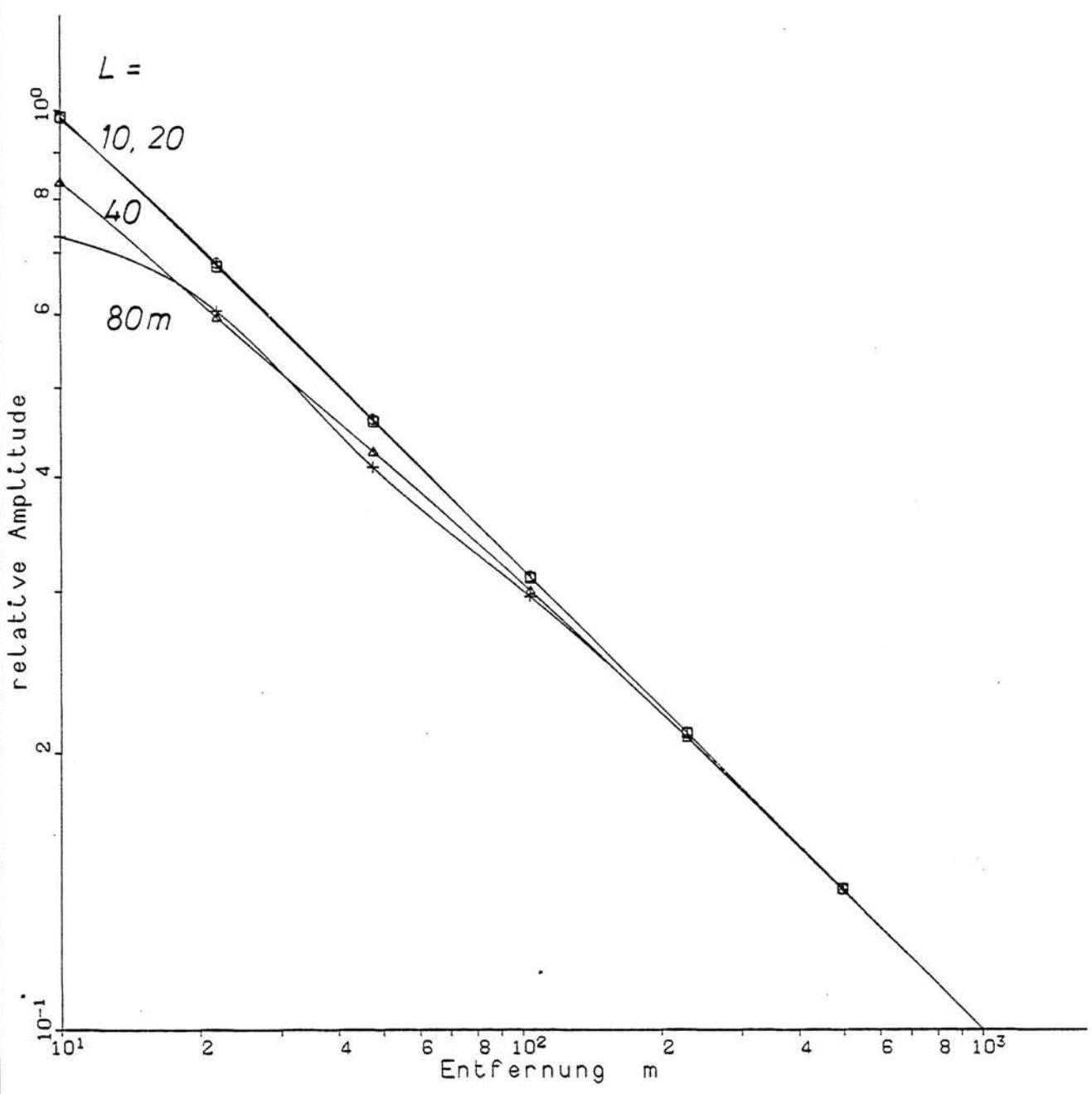


Bild 12 - Simulation einer zufaelligen Streckenlast, Variation der Laststreckenlänge

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

n_q Quellen, zufaellige Phasen Boden :
 $f = 10.0$ Hz $v_r = 200.0$ m/s
 $L = 40.0$ m $D = 0.0$ %
Bezugsamplitude: $A(\text{Punktquelle})$

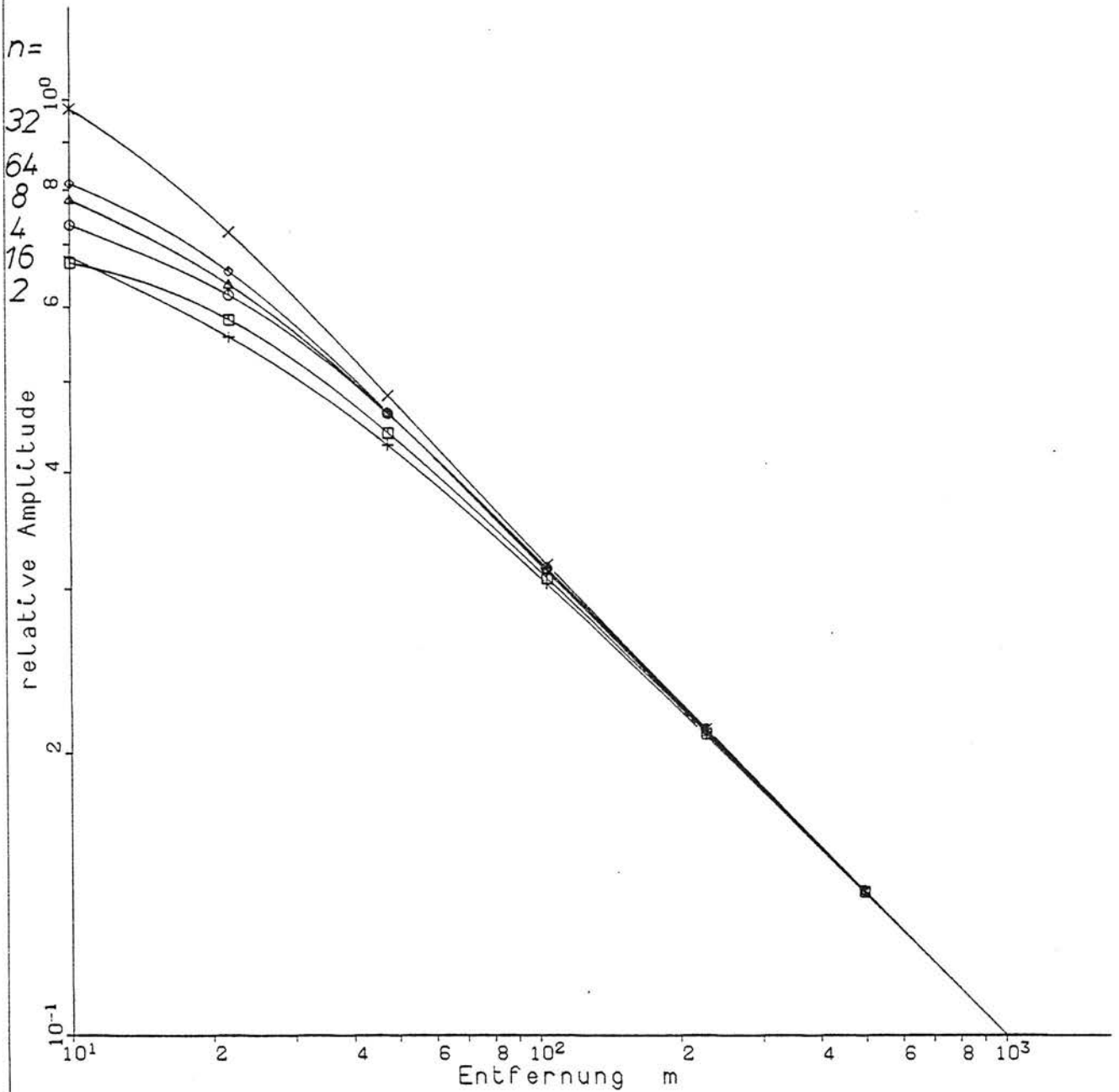


Bild 13 - Simulation einer zufälligen Streckenlast, Variation der Quellenzahl

großen Abweichungen vom zu erwartenden mittleren Abnahmegesetz zum Beispiel bei Messungen zu rechnen ist, selbst bei einer großen Anzahl von Mittelungen.

6.2 Eine theoretische Grundlage zur Ableitung der "stochastischen Abnahmegesetze"

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

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

bzw.

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

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

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

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

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

das heißt:

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

Dieses Ergebnis erscheint vielleicht auch unmittelbar einsichtig:

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

6.3 Berechnung der gemittelten Abnahmegesetze

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

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

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

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

n_q Quellen, zufällige Phasen

Boden :

$f = 10.0$ Hz

$v_r = 200.0$ m/s

$L = 40.0$ m

$D = 0.0$ %

Bezugsamplitude : $A(\text{Punktquelle})$

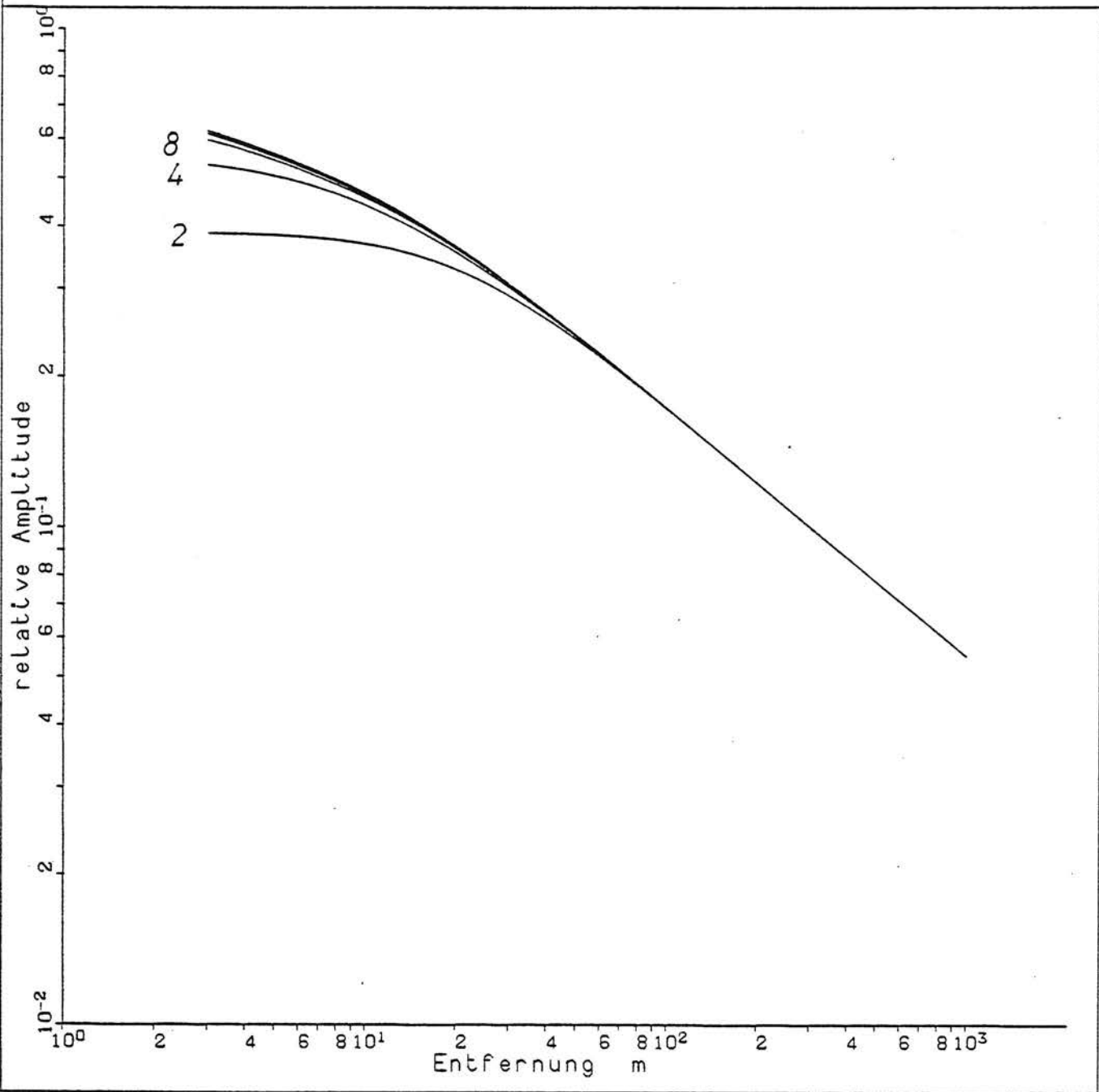


Bild 14 - Gemittelte Amplituden-Abstands-Gesetze für eine zufällige Streckenlast, Variation der Quellenanzahl

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

50 Quellen, zufaellige Phasen

Boden :

$f = 10.0 \text{ Hz}$

$v_r = 200.0 \text{ m/s}$

L wird variiert

$D = 0.0 \%$

Bezugsamplitude: $A(\text{Punktquelle})$

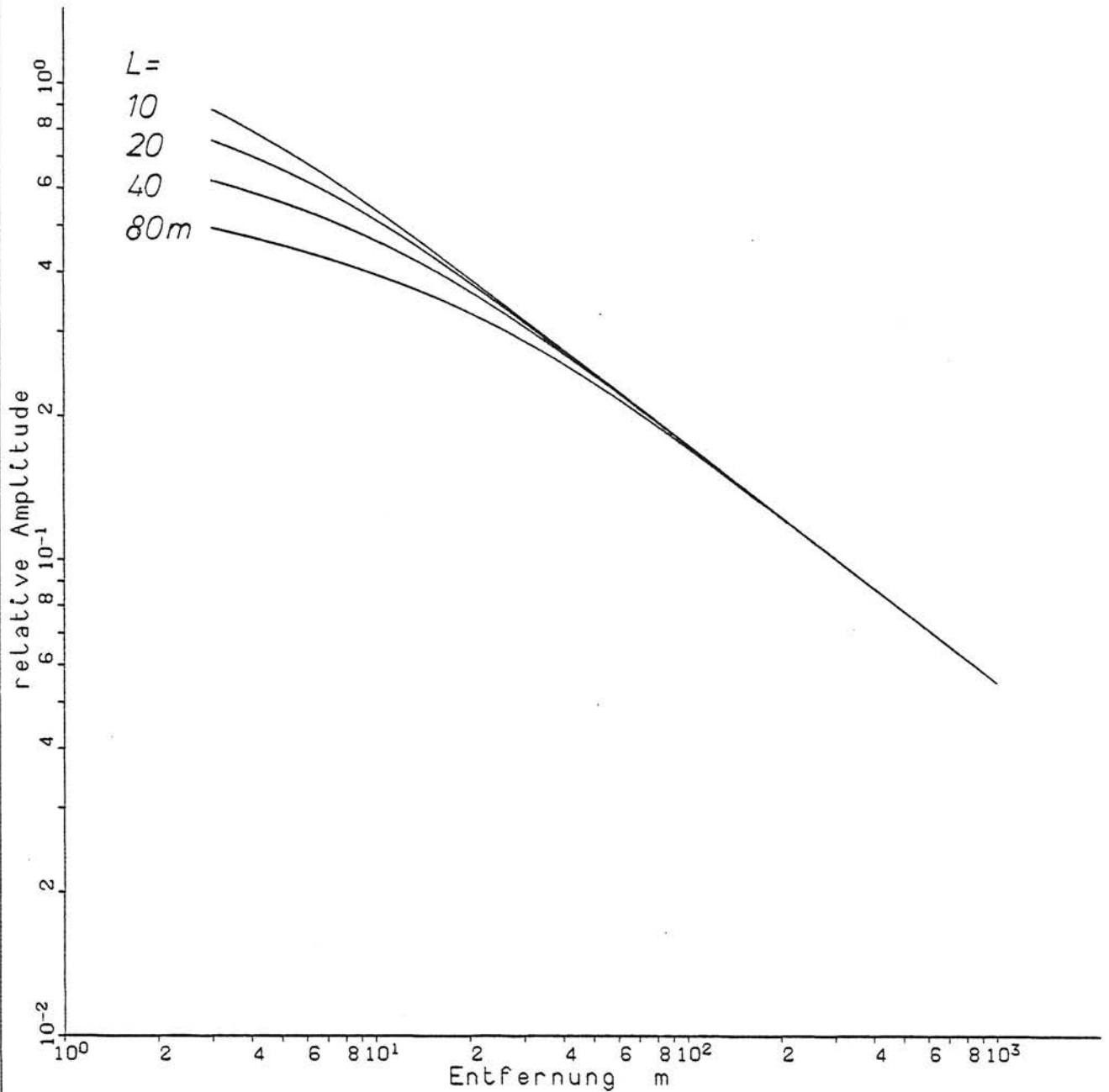


Bild 15 - Gemittelte Amplituden-Abstands-Gesetze für eine zufällige Streckenlast, Variation der Laststreckenlänge

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

n_q Quellen, zufällige Phasen Boden :
 $f = 20.0$ Hz $v_r = 200.0$ m/s
 L wird variiert $D = 0.0$ %
Bezugsamplitude: $A(\text{Linienquelle})$

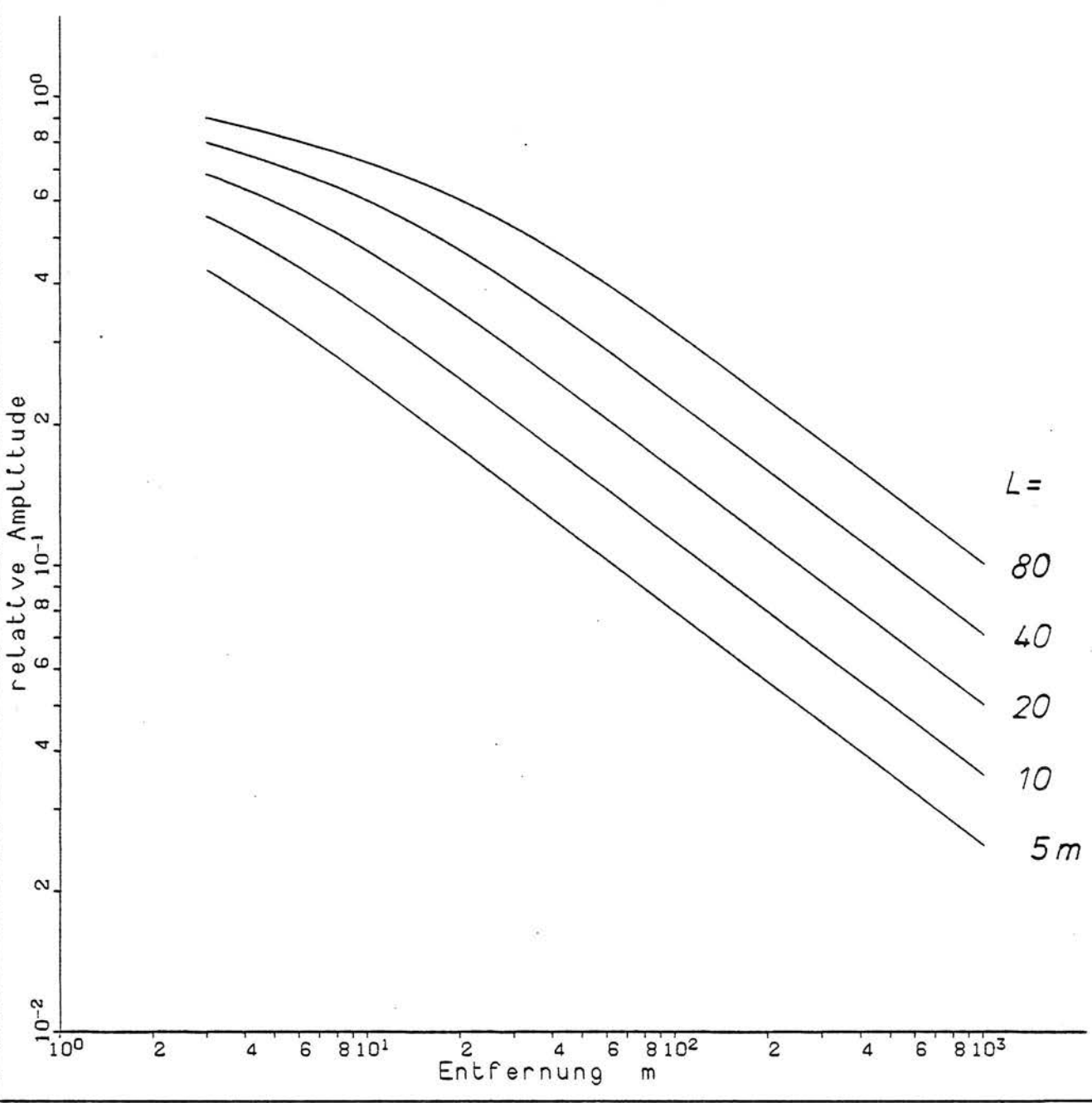


Bild 16 - Gemittelte Amplituden-Abstands-Gesetze für eine zufällige Streckenlast, gleichzeitige Variation der Anzahl und der Länge bei gleichbleibender Lastdichte $n/L = 4/5$ m

2) Die Länge der Laststrecke variiert (Bild 15)

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

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

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

6.4 Ein explizites Amplituden-Abstands-Gesetz
für stochastische Anregung

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

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

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

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

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

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

Die Berechnung dieses Integrals führt auf

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

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

Die Abnahmegesetzmäßigkeit steckt allein in dem Term

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

der sich auch als

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

schreiben läßt. Für große Entfernungen (große ξ) gilt die Näherung

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

Es wird deshalb eine Korrekturfunktion

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

definiert, für die

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

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

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

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

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

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

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

Zunächst soll die Auswirkung einer beliebigen aber festen Phasenlage der Achsanteile zueinander, wie sie etwa für Unrundheiten der Räder vorliegen könnte, untersucht werden (Bild 17). Es werden zufällige Phasen erzeugt und die Schwingantworten für verschiedene Stellungen des Zuges während der Vorbeifahrt berechnet. Für jede Stellung ergeben die zufälligen Phasen sehr starke Interferenzen im Amplituden-Abstands-Gesetz. Der ebenfalls eingezeichnete Mittelwert, der einem zeitlichen Mittelwert über 2 Sekunden bei einer Fahrgeschwindigkeit von 70 km/h entspricht, verläuft dagegen annähernd gleichmäßig.

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

dies, daß dieselben Störungen in bestimmten Zeitabständen die einzelnen Achsen passieren. Für diesen Fall kann die in Abschnitt 6.2 genannte Beziehung zwischen den Leistungsdichten herangezogen werden. Es müssen hier im Gegensatz zu den unkorrelierten Quellen die Kreuzleistungsdichten je zweier Quellen mitberücksichtigt werden.

Die Kreuzleistungsdichte $\Phi_{P_k P_l}$ von zwei zeitlich versetzten Kraftverläufen $P_l(t) = P_k(t-T)$ ist

$$\Phi_{P_k P_l}(\omega) = \Phi_{P_k P_k}(\omega) e^{-i\omega T}.$$

Damit läßt sich die stochastische Ein-Ausgangsbeziehung

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

umschreiben in

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

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

Damit ist gezeigt, daß sowohl eine feste aber zufällige Phasenlage (Unrundheiten der einzelnen Räder) als auch zeitliche versetzte identische Erregungen (durch die einzelnen Achsen) - wegen des ausmittelnden Effekts der Vor-

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

16 Quellen, zufaellige Phasen

Boden :

$f = 10.0 \text{ Hz}$

$v_r = 200.0 \text{ m/s}$

$L = 40.0 \text{ m}$

$D = 0.0 \%$

Bezugsamplitude: $A(\text{Punktquelle})$

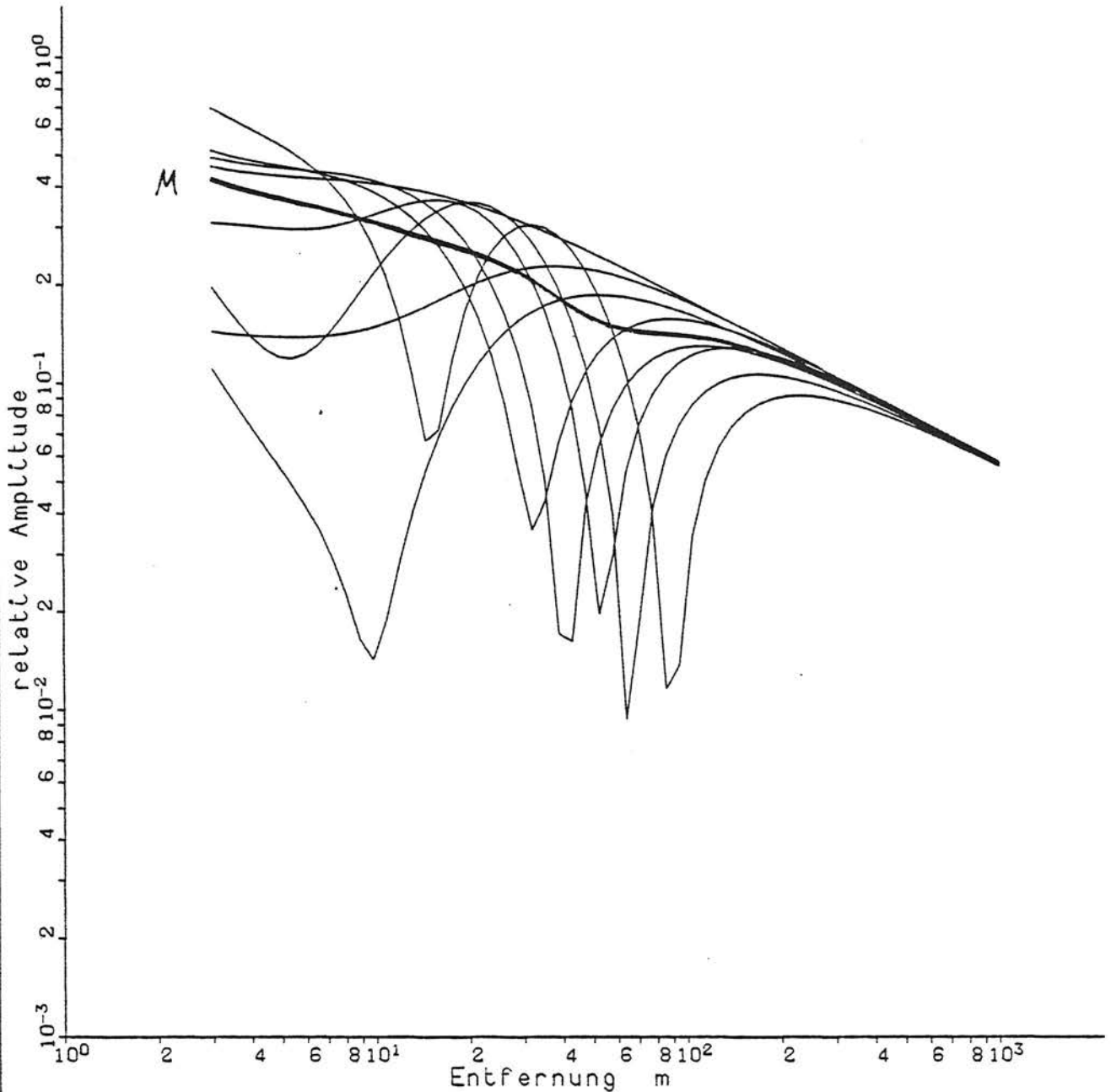


Bild 17 - Auswirkungen einer zufälligen aber festen Phasenlage: Momentbilder der Amplituden-Abstands-Beziehungen während der Zugvorbeifahrt (Fahrstrecke = 20 m) und Mittelwert

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

16 Quellen, *deterministische* Phasen

Boden :

$f = 5.0$ Hz

$v_r = 200.0$ m/s

$L = 40.0$ m

$D = 0.0$ %

Bezugsamplitude : $A(\text{Punktquelle})$

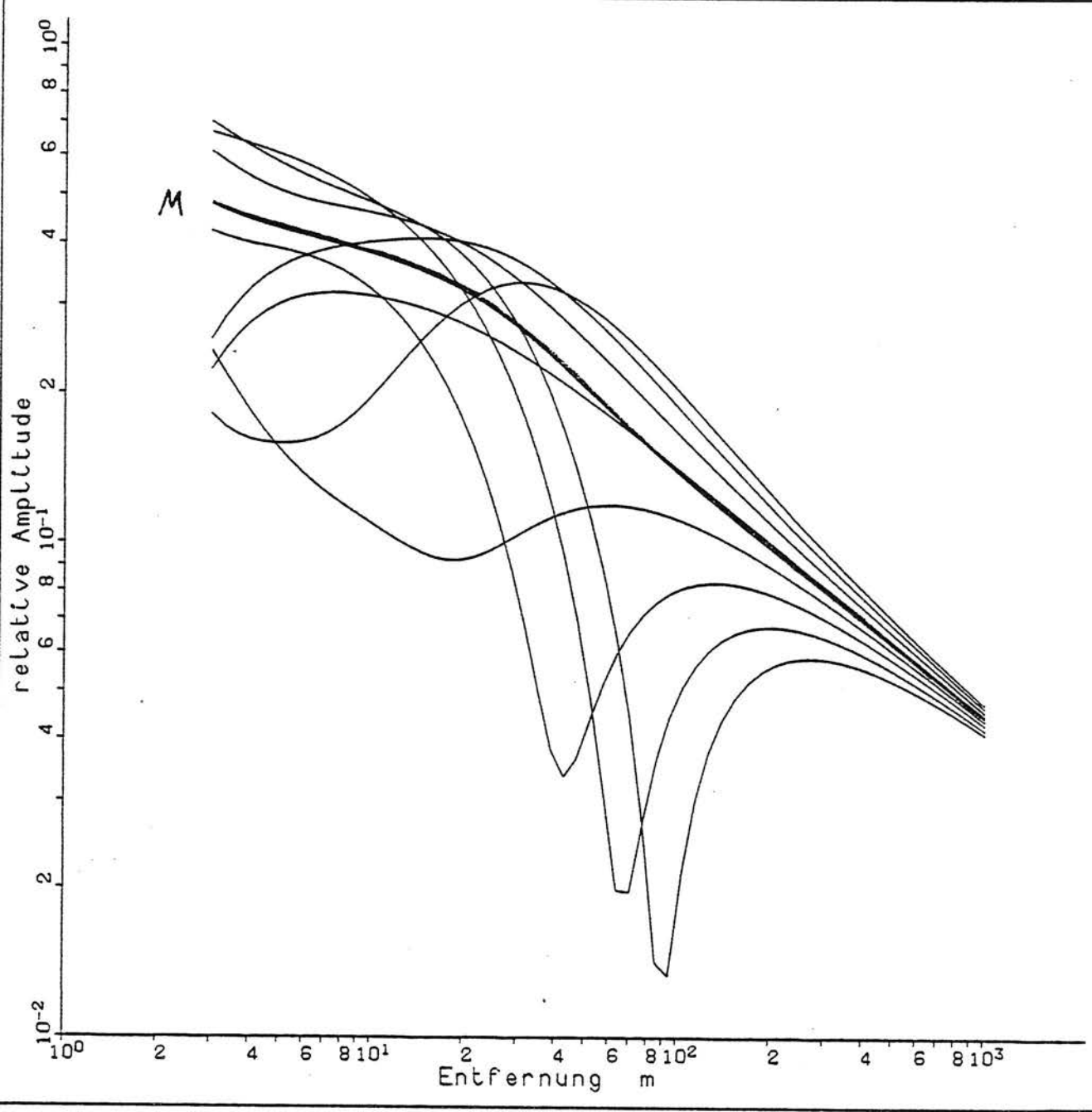


Bild 18 - Auswirkungen zeitlich versetzter identischer Anregungen: Momentbilder der Amplituden-Abstands-Beziehungen während der Zugvorbeifahrt (Fahrstrecke = 20 m) und Mittelwert

beifahrt - zu keiner prinzipiellen Abweichung vom Abnahmegesetz für unkorrelierte Quellen (s. 6.4) führen.

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

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

vorgegeben, weil die tatsächlichen Entfernungen r_j und die dabei auftretenden Dämpfungen $e^{-\alpha r_j}$ größer sind. Für diesen Fall (hohe Frequenz, große Dämpfung, langer Zug) wurde durch eine Reihe von Rechnungen folgendes explizites Amplituden-Abstands-Gesetz gefunden:

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

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

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

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

50 Quellen, zufaellige Phasen

Boden :

f wird variiert

$v_r = 200.0 \text{ m/s}$

$L = 40.0 \text{ m}$

D wird variiert

Bezugsamplitude: A(Linienquelle)

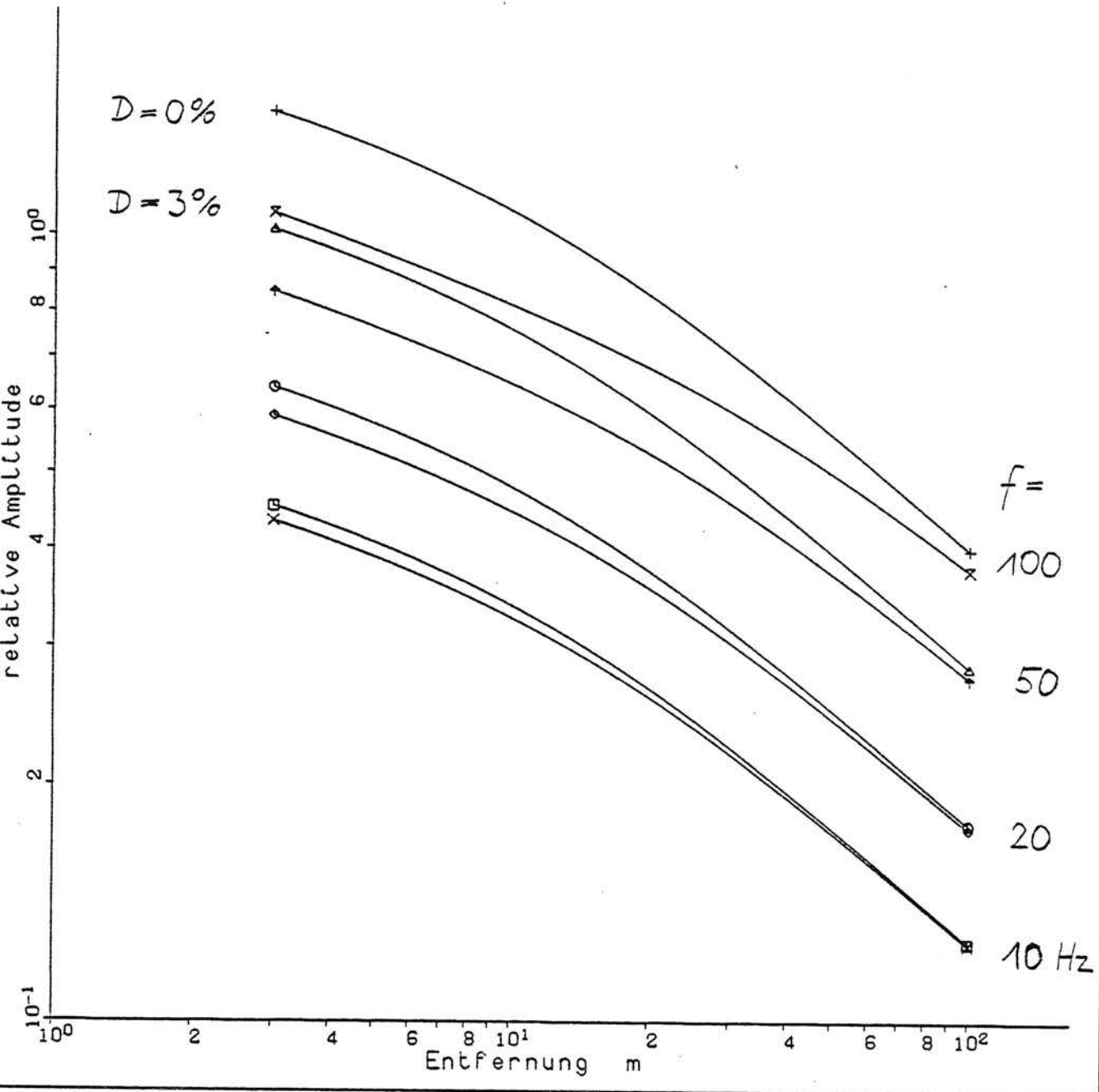


Bild 19 - Zufällige Streckenlast mit und ohne Bodendämpfung

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

nq Quellen, zufaellige Phasen

Boden :

$f = 100.0 \text{ Hz}$

$v_r = 200.0 \text{ m/s}$

L wird variiert

$D = 3.0 \%$

Bezugsamplitude: $A(\text{Linienquelle})$

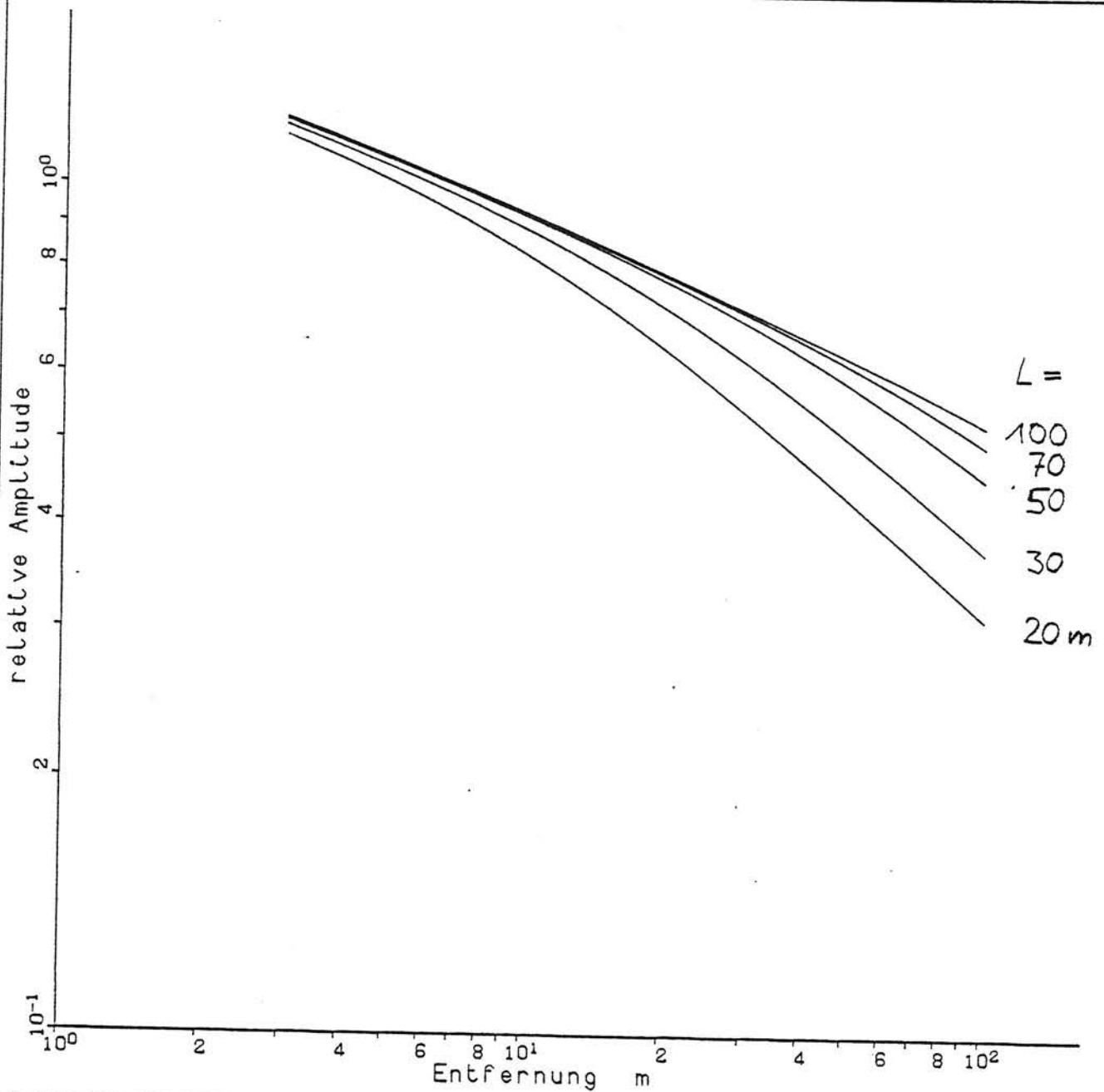


Bild 20 - Zufällige Streckenlast mit Bodendämpfung:
Variation der Lastlänge bei konstanter Lastdichte

7. Zusammenfassung

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

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

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

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

Anhang A

Ein Verfahren zur Berechnung des Schwingungsverhaltens starrer Fundamente auf dem Boden

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Zusammen ergibt sich daraus eine Beziehung

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

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

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

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

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

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

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

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

und die Kraft-Spannungs-Äquivalenz

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

wird für jedes Fundament einzeln angeschrieben.

Anhang B

Das Amplituden-Abstands-Gesetz für eine stochastische Streckenlast

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

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

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

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

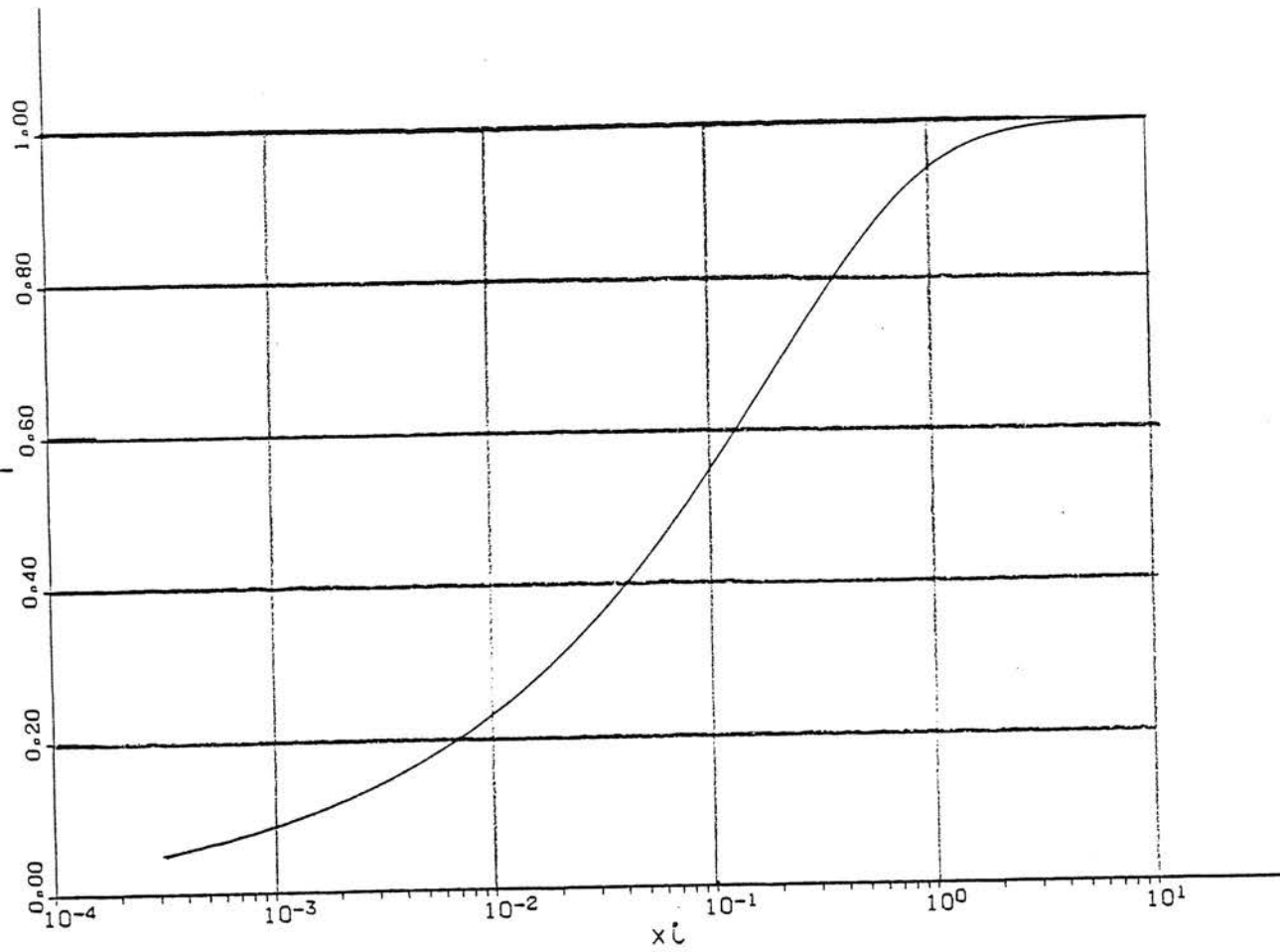


Bild 17 - Das Verhältnis der Amplituden bei stochastischer Streckenlast und bei einer Punktlast als Korrekturfunktion $f(\xi)$,
 $\xi = 2x/L$

Literatur

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

- [11] B. Prange, G. Huber, T. Triantafyllidis: Dynamisches Rückwirkungsmodell des Gleisoberbaus.
Schlußbericht zum BMFT Forschungsvorhaben TV 7815B, Institut für Boden- und Felsmechanik, Karlsruhe, 1982.
- [12] H. Lamb: On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid.
Phil. Trans. Royal Soc., A203, S. 1-42, 1904.
- [13] U. Holzlöhner, L. Auersch: Propagation of shock waves at the surface of heterogeneous soil grounds.
Int. J. Num. Anal. Meth. Geom., Vol. 8, S. 57-70, 1984.
- [14] R. V. Whitman: The response of soils to dynamic loadings.
Rep. No. 3-26, U.S. Army Eng. Waterways Exper. Station, Vicksburg (Miss.), 1970.
- [15] W. Rücker: Dynamic behaviour of rigid foundations of arbitrary shape on a halfspace.
Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol.10, S. 675-690, 1982.
- [16] W. Rücker: Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund.
Forschungsbericht 78, BAM, Berlin, 1981.

TEIL III

MESSSUNGEN ZUR EMISSION UND TRANSMISSION

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil III: Messungen zur Emission und Transmission</u>	
1.	Einleitung III/1
2.	Beschreibung der Meßeinrichtung III/2
3.	Auswertephilosophie und Auswerteverfahren III/5
3.1	Ausbreitungsverhalten im Zeit- und Frequenzraum III/6
3.1.1	Theoretischer Hintergrund III/6
3.1.2	Ausbreitungsgesetzmäßigkeit für zeitliche Maximalwerte III/8
3.1.3	Ausbreitungsgesetzmäßigkeit für frequenzabhängige Maximalwerte III/10
3.2	Zeit- und Frequenzcharakteristik III/11
3.3	Bestimmung der bodendynamischen Kennwerte III/12
3.4	Statistische Auswertung III/15
4.	Meßorte und Meßprogramm III/18
4.1	Meßort 1 BVG, Berlin-Britz III/18
4.2	Meßort 2 DB Strecke Dachau-Karlsfeld III/19
5.	Meßergebnisse III/21
5.1	Bodendynamische Kennwerte III/22
5.2	Darstellung und Diskussion relevanter Meßergebnisse III/24
5.2.1	Meßort 1 III/24
5.2.2	Meßort 2 III/28
6.	Zusammenfassung III/32
Anhang A1 - Gleichungssystem für Ausgleichsrechnung	
Anhang A2 - Berechnung von Histogrammen	
Anhang A3 - Autokorrelation und Kreuzkorrelation	
Anhang B1 - Lageplan und Materialkennwerte des Meßortes 1	
Anhang B2 - Lageplan und Materialkennwerte des Meßortes 2	
Anhang C1 - Meßergebnisse des Meßortes 1	
Anhang C2 - Meßergebnisse des Meßortes 2	
Literatur	

1. Einleitung

Im Rahmen des Gesamtziels des Vorhabens, ein einfaches Prognosemodell zur Vorhersage von Erschütterungen durch schienengebundenen Nahverkehr zu entwickeln, nimmt neben der Beschreibung des Ausbreitungsverhaltens die Beschreibung der Erschütterungsquelle eine zentrale Stellung ein. Dabei sind die geometrischen Eigenschaften der Quelle, ihr Zeitverhalten und ihre Ankopplung an das Übertragungssystem Boden von besonderer Wichtigkeit. Im vorangegangenen Vorhaben [1] wurde angenommen, daß die Quelle durch zwei extreme Lastsysteme - harmonische Punktlast bzw. harmonische Linienlast - beschrieben werden kann. Hierbei liefert die Linienlast eine Näherung für die unmittelbare Umgebung der Quelle, während die Punktlast Näherungslösungen für große Entfernungen angibt.

Diese Art der Betrachtung berücksichtigt u.a. nicht die Dreidimensionalität - Einwirkung längs einer endlichen Strecke mit unterschiedlicher Phasenlage - sowie das instationäre Zeitverhalten. Zur Ergänzung und Befruchtung der theoretischen Überlegungen zu diesem Sachverhalt wurden im Rahmen dieses Vorhabens Messungen durchgeführt, bei denen insbesondere die Einflüsse aus Zuglänge, Fahrgeschwindigkeit und Oberbauart untersucht wurden, um aus dem gemessenen Ausbreitungsverhalten auf die Charakteristik der Quelle zu schließen.

Die Messungen wurden an zwei verschiedenen Orten durchgeführt. Während am Meßort "1" an einer Betriebsstrecke der BVG in Berlin-Britz vor allem die Parameter Zuglänge und Fahrgeschwindigkeit untersucht wurden, konnten am Meßort "2" in Dachau Messungen an zwei verschiedenen Oberbauarten, das sind "Schwellen/Schotter" und feste Fahrbahn "System Rheda", durchgeführt werden.

In diesem Bericht sollen zunächst die Meßeinrichtung und die für die speziellen Anforderungen dieses Vorhabens erstellte Auswertesoftware vorgestellt werden. Danach folgt die Beschreibung der Meßorte, die Darstellung der Meßergebnisse und die Herausstellung gemessener Effekte.

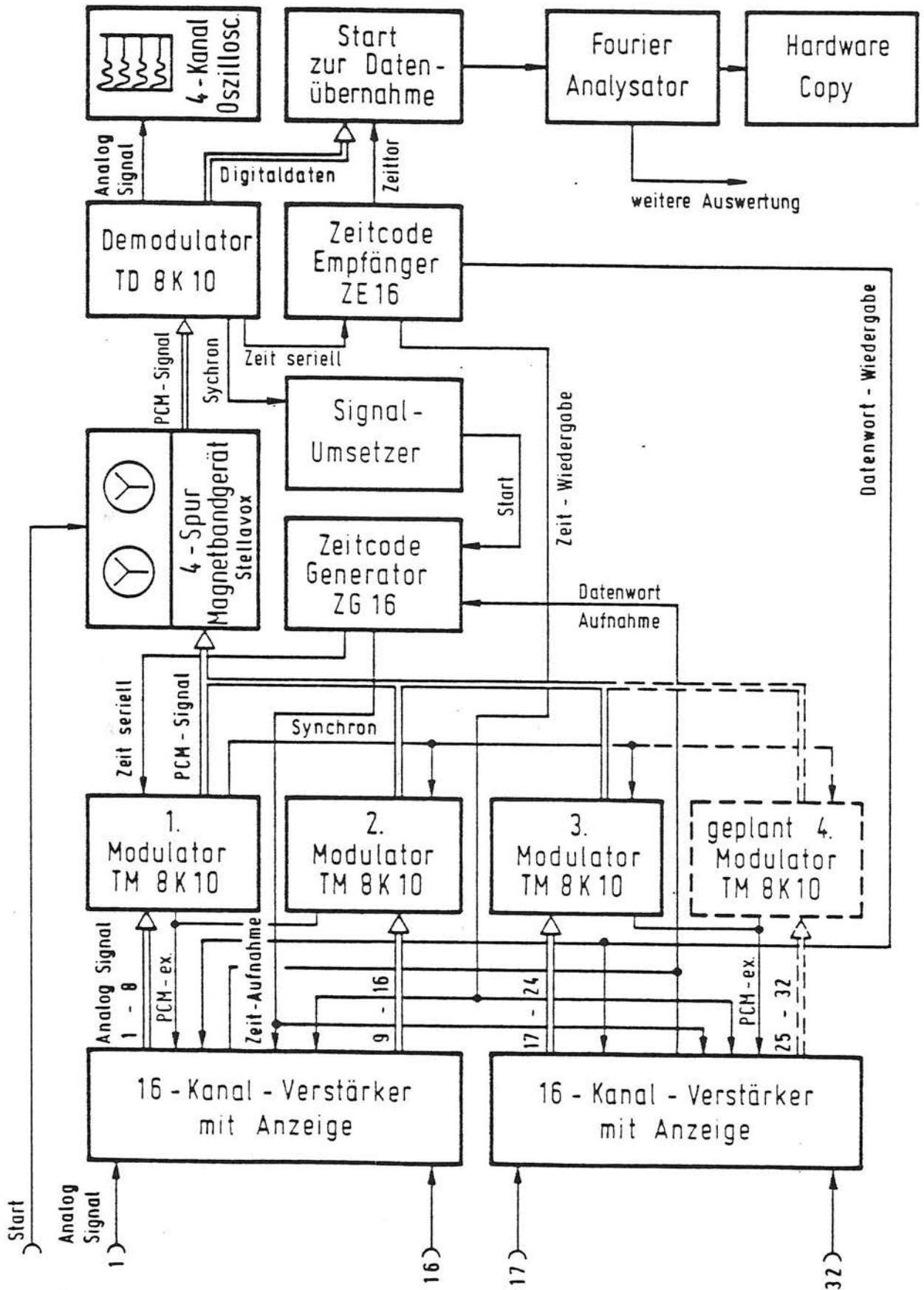
2. Beschreibung der Meßeinrichtung

Die meßtechnische Aufgabe im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist das Ausmessen des Übertragungs- und Antwortverhaltens des Systems "Gleisoberbau-Baugrund-Bauwerk", sowie die Bestimmung relevanter dynamischer Systemparameter. Diese Aufgabe erfordert ein Meßwerterfassungssystem, das folgende Eigenschaften erfüllt:

- einfache und billige Meßaufnehmer
- simultane Registrierung möglichst vieler Signale
- ausreichende Aufzeichnungsgenauigkeit des Registriersystems (orientiert an der Genauigkeit der Meßaufnehmer und der Meßvorverstärker)
- bedienungssicher, leicht transportierbar, robust und unter Baustellenbedingungen einsetzbar
- ohne Vorbereitungszeit einsetzbar
- Möglichkeit der rechnerischen Auswertung vor Ort und im Labor mit Mehrfachauswertungen.

In der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, wird seit längerer Zeit ein digital aufzeichnendes Meß- und Registriersystem benutzt, das alle oben genannten Anforderungen erfüllt. Die wesentlichen Komponenten dieses Systems sind in Bild 1 schematisch dargestellt und sollen im nachfolgenden beschrieben werden.

Für die Registrierung der Schwingungen im Untergrund und an Bauwerken werden nach dem elektrodynamischen Prinzip arbeitende Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer, sogenannte Geophone, eingesetzt. Das Eigengewicht eines Aufnehmers beträgt ca. 150 g, die Eigenfrequenz liegt bei dem verwendeten Typ bei 4.5 Hz. Die Aufnehmer besitzen eine weitgehend konstante Übertragungseigenschaft im Frequenzbereich von $6 \text{ Hz} \leq f \leq 600 \text{ Hz}$, der bei Berücksichtigung des tatsächlichen Frequenzganges (z.B. bei einer rechnergestützten Auswertung) bis etwa 2 Hz und über 1000 Hz hinaus ausgedehnt werden kann. Die Hauptvorteile dieses Aufnehmers, verglichen mit Weg- oder Beschleunigungsaufnehmern, liegen zum einen darin, daß bei Bauwerken die Schädlichkeit der



Meßaufnehmer 1 - 32

Bild 1 : PCM - Meßsystem

einwirkenden Erschütterungen direkt proportional der Schwinggeschwindigkeit ist. Notwendige Differentiationen bzw. Integrationen zur Erlangung des Schwinggeschwindigkeitssignales aus gemessenen Weg- oder Beschleunigungssignalen entfallen somit. Zum anderen sind die Geophone erheblich preiswerter als z.B. Beschleunigungsaufnehmer (mindestens Faktor 10), so daß eine reichliche Ausstattung mit diesen Aufnehmern kein finanzielles Problem darstellt. Die von den Aufnehmern abgegebene Meßspannung liegt im Millivoltbereich, üblicherweise bei 10 - 20 mV/mm/s. Über gut abgeschirmte Kabel können diese Spannungen auch über größere Entfernungen (etwa bis 300 m) ohne Beeinträchtigungen übertragen werden. Am Ende der Übertragungsstrecke müssen die Meßspannungen jedoch mit Vorverstärkern auf den Eingangsspiegel des Aufzeichnungssystems angehoben werden. Hierzu reichen üblicherweise Verstärkungsfaktoren von 1 bis 500 aus. Für Sonderfälle kann es manchmal auch nötig sein, die Meßspannungen herabzusetzen. Nach der Spannungsverstärkung werden die analogen Meßsignale auf ein System von z.Zt. insgesamt 6 PCM (Pulse-Code-Modulation) Modulatoren gleitet, mit denen insgesamt 48 Signale simultan aufgezeichnet werden können. Die Modulatoren tasten die analogen Signale in äquidistanten Zeitabschnitten ab, digitalisieren die jeweils angetroffenen Augenblickswerte in 10-bit-Datenwörter und speichern diese anschließend auf ein Magnetband. Gleichzeitig mit den Meßdaten wird eine mittels eines Zeitcodegenerators erzeugte Echtzeit sowie die am Meßverstärker eingestellten Verstärkerstufen auf das Magnetband mitaufgezeichnet. Mit dieser für den praktischen Betrieb äußerst wichtigen Eigenschaft der automatischen Aufzeichnung der Verstärkerstufen sowie durch die ebenfalls vorhandene Möglichkeit der externen Magnetbandsteuerung kann das gesamte Meßaufzeichnungssystem vollständig automatisch betrieben werden. Das ganze System ist in einem Meßwagen installiert. Für Orte, an die der Meßwagen nicht unmittelbar hinfahren kann, kann das ganze System, bzw. auch Teile des Systems, aus dem Meßwagen entfernt und "per Hand" an den Meßort transportiert werden.

Zur Auswertung werden jeweils vorab ausgewählte Echtzeiten an einem Zeitcodeempfänger eingestellt und die digitalen Signale

dann über eine Zeittorschaltung vollautomatisch an einen Rechner übergeben. Gleichzeitig mit den Meßdaten werden die abgespeicherten Verstärkerstufen an den Rechner überspielt, so daß im Zusammenhang mit den im Rechner abgespeicherten Übertragungskennlinien der einzelnen Aufnehmer eine problemlose Umrechnung von elektrischen Meßgrößen in physikalische Einheiten möglich ist.

Beim Einsatz vor Ort wird im allgemeinen zur optischen Kontrolle der Meßsignale ein Oszilloskop in die Meßkette geschaltet. Weiterhin besteht die Möglichkeit, nach der Messung die registrierten Signale mit Hilfe eines 8-Kanal Lichtstrahloszillographen auf lichtempfindlichem Papier wiederzugeben. Diese Darstellung erlaubt einerseits eine Grobauswertung vor Ort, andererseits kann anhand der UV-Schriebe eine Auswahl des Zeitraumes getroffen werden, der einer ausführlicheren numerischen Auswertung unterzogen werden soll.

3. Auswertephilosophie und Auswerteverfahren

Für die numerische Auswertung der auf Magnetband gespeicherten Signale wurde ein Softwarepaket erstellt, das eine differenzierte Darstellung der Ergebnisse erlaubt. Einige der speziell für dieses Vorhaben entwickelten Programmteile sollen hier beschrieben werden. Es handelt sich um die Programmteile:

- Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten für die zeitlichen Maximalwerte
- Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten für die frequenzabhängigen Maximalwerte
- Zeit- und Frequenzcharakteristik der Untergrundschwingungen
- Materialkenndaten für den Untergrund
- Statistische Kenngrößen und Kennfunktionen

3.1 Ausbreitungsverhalten im Zeit- und Frequenzraum

3.1.1 Theoretischer Hintergrund

Im wesentlichen breiten sich im Untergrund - beschrieben als linear elastischer isotroper Halbraum - drei verschiedene Arten von Wellen aus; die P-Welle (Kompressionswelle), die S-Welle (Scherwelle) und die R-Welle (Rayleigh-Welle). P- und S-Wellen sind Raumwellen, die sich in alle drei Richtungen des Raumes, also kugelförmig, ausbreiten. Die R-Wellen, die sich aus den Randbedingungen des Halbraumes, der spannungsfreien Oberfläche, herleiten lassen, breiten sich zylinderförmig - ähnlich den Wasserwellen - an der Oberfläche aus.

Alleine aus der Betrachtung der Energiedichte-Verteilung läßt sich auf anschauliche Weise ein Abnahmegesetz für die sogenannte geometrische Abnahme der Raumwellen und Oberflächenwellen herleiten.

Für ein elastisches Medium gilt die Energieerhaltung. Die in einer Wellenfront enthaltene Energie E ist proportional dem Quadrat der Schwinggeschwindigkeitsamplituden A und proportional einer Fläche F der Wellenfront

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

Bei einer punktförmigen Quelle gilt für die Raumwellen $F \sim r^2$ (Kugeloberfläche) und für die Oberflächenwellen $F \sim r$ (Zylinderoberfläche). Die Abnahme der Amplituden über die Entfernung r läßt sich somit unter der Voraussetzung der Energieerhaltung durch

$$A \sim r^{-1} \text{ für die Raumwelle}$$

und

$$A \sim r^{-0.5} \text{ für die Oberflächenwelle}$$

beschreiben.

Bei einer Linienquelle (mathematisch gesehen unendlich lang) gilt aus analogen Betrachtungen

$A \sim r^{-0.5}$ bei Raumwellen

und

$A \sim r^0$; $A = \text{konst.}$ bei Oberflächenwellen.

Zu dieser geometrischen Amplitudenabnahme kommt bei Ansatz einer hysteretischen Dämpfung noch ein Faktor

$$A \sim e^{-2\pi \frac{D \cdot r}{\lambda}}$$

hinzu, wobei D das Dämpfungsmaß - üblicherweise im Bereich 1 % bis 10 % - des Bodens ist.

Mithin läßt sich die Ausbreitung von harmonischen Wellen im Halbraum durch eine Gleichung der Form

$$A(r) = A_R \cdot \left(\frac{r}{\lambda}\right)^{-n} \cdot e^{-D2\pi \frac{r}{\lambda}}, \quad (1)$$

beschreiben, mit

r Entfernung von der Erregerquelle

A_R Referenzamplitude

λ Wellenlänge.

Diese Art der Approximation berücksichtigt selbstverständlich nicht die viel komplexeren tatsächlichen Ausbreitungsverhältnisse bei z.B. phasengleicher Lasteinleitung längs einer gewissen Strecke (3D-Lasteinleitung). Dies zu erfassen, ist hier aber nicht die Aufgabe, da dies im theoretischen Teil dieses Vorhabens durchgeführt wird. Der Sinn dieser Approximation ergibt sich daraus, daß aus der Abweichung dieser für einfache Fälle gültigen Approximation zu dem tatsächlich gemessenen Verhalten auf den Grad des Einflusses einer dreidimensionalen Lasteinleitung geschlossen werden kann und soll.

3.1.2 Ausbreitungsgesetzmäßigkeit für zeitliche Maximalwerte

Zuerst wird die Ausbreitungsgesetzmäßigkeit im Zeitbereich untersucht. Hierzu werden aus den zeitlichen Meßsignalen die je-

weiligen Maximalwerte herausgesucht und diese doppelt-logarithmisch über der Entfernung aufgetragen. Aus dem Vergleich dieser so ermittelten Abnahmegesetzmäßigkeit mit der im Frequenzraum ermittelten Abnahmegesetzmäßigkeit nach Gl.1 läßt sich u.a. erkennen, ob der Untergrund dispersive Eigenschaften besitzt oder nicht. Dispersive Eigenschaften treten dann auf, wenn der Untergrund eine Inhomogenität besitzt und die Quelle impulsförmig emittiert.

Eine Inhomogenität tritt dann auf, wenn der anstehende Boden, wie es fast immer der Fall ist, eine Schichtung aufweist. Selbst wenn dies nicht der Fall sein sollte, so ist stets eine Inhomogenität infolge der mit der Tiefe zunehmenden Steifigkeit - dies ist eine Folge der Spannungsabhängigkeit des Schubmoduls - vorhanden. Emittiert eine Quelle impulsförmig, so entstehen durch die Steifigkeitsunterschiede in Zusammenhang mit der wellenlängenabhängigen Eindringtiefe der Oberflächenwelle dispersive Effekte. Bei einem dispersiven Untergrund besitzen verschiedene Frequenzen verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Dadurch dehnen sich die zeitlichen Schwingungsverläufe mit zunehmender Entfernung, wobei gilt, daß bei genügend großer Entfernung von der Quelle bzw. bei genügend kurzem Lastimpuls die Dauer der Schwingung proportional zur Entfernung ist. Damit läßt sich entsprechend obiger Energiebetrachtung für das Amplitudenabstandsgesetz ableiten - als Amplitude soll hier der Maximalwert des Zeitverlaufes bezeichnet werden -, daß die Dispersion eine zusätzliche Amplitudenabnahme mit $r^{-0.5}$ bewirkt. Dies bedeutet z.B., daß im Falle einer punktförmigen Quelle die geometrische Amplitudenabnahme von $A \sim r^{-0.5}$ auf $A \sim r^{-1}$ anwächst.

Zur Demonstration dieses Effektes sind in Bild 2 die Verschiebungen an der Oberfläche eines homogenen (a) und inhomogenen (b) Untergrundes infolge der Belastung

$$p(t) = \begin{cases} p \sin \omega t & 0 \leq t \leq \pi/\omega \\ 0 & t > \pi/\omega \end{cases}$$

dargestellt.

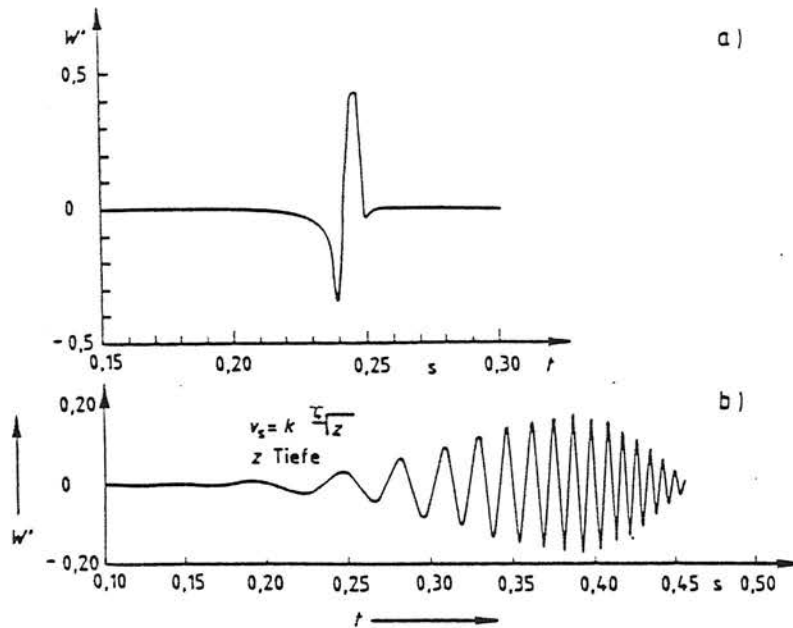


Bild 2: Impulsverschiebungsverläufe eines homogenen (a) und inhomogenen (b) Halbraumes

Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei noch folgendes erwähnt: Betrachtet man eine regellose Impulsfolge als Erregung und untersucht die Schwingantworten mit den üblichen stochastischen Methoden, so kann man die oben angeführte zusätzliche Amplitudenabnahme weder im quadratischen Mittelwert, noch in der spektralen Leistungsdichte feststellen. Für den quadratischen Mittelwert ist die Wirkung der Dispersion, die Verteilung der Amplituden auf eine längere Zeit, uninteressant. Für einen harmonischen Anteil des Zeitverlaufs ist die Dispersion gar nicht vorhanden. Letzteres besagt auch, daß bei der diskreten Fouriertransformation einer impulsförmig emittierenden Punktquelle die einzelnen Frequenzanteile nur mit $A \sim r^{-0.5}$ abnehmen.

3.1.3 Ausbreitungsgesetzmäßigkeit für frequenzabhängige Maximalwerte

Im nächsten Schritt erfolgt die Untersuchung der Abnahmegesetzmäßigkeit im Frequenzraum. Hierzu werden die zeitlichen Signale zunächst fouriertransformiert. Aus den Fourieramplitudenspektren werden danach charakteristische Frequenzen herausgesucht und deren Amplituden in gleicher Weise wie die zeitlichen Maximalwerte doppelt-logarithmisch dargestellt. Da ein dispersiver Untergrund seine dispersiven Eigenschaften im Falle einer harmonischen Schwingung nicht offenbart, können aus dieser Darstellung die geometrischen Effekte der Quelle wie z.B. phasengleiche Lasteinleitung längs einer gewissen Strecke mit der daraus resultierenden ebenen Ausbreitungscharakteristik in Quellennähe erkannt werden. Voraussetzung ist hierbei aber, daß zum einen die Wellenart (Raum- oder Oberflächenwelle) ausreichend genau bekannt ist und zum anderen die Materialdämpfung des Untergrundes vorher bestimmt wurde. Die Kenntnis der Wellenart ist notwendig, weil entsprechend Bild 3 je nach Wellenart bei ein- und derselben Quelle verschiedene Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten möglich sind.

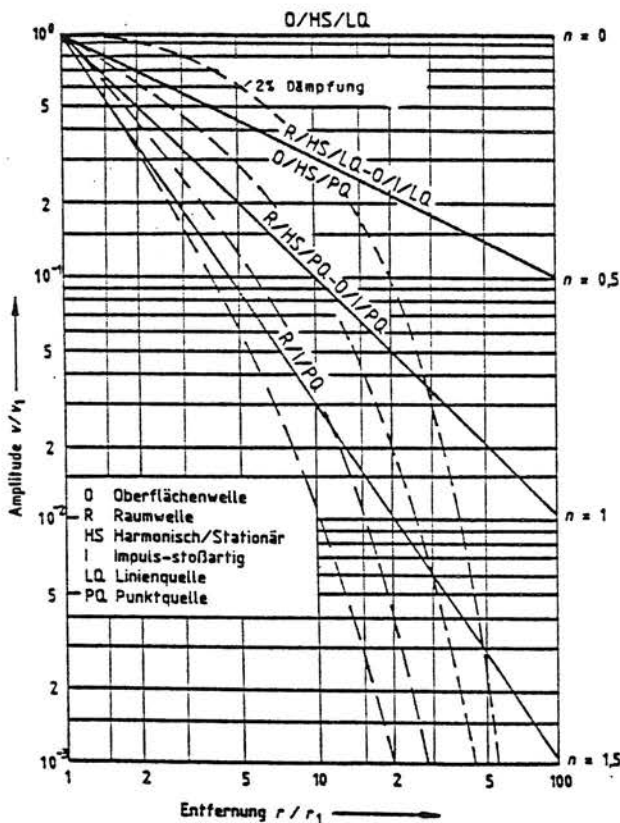


Bild 3:

Abnahme der Erschütterungsamplituden v/v_1 mit der Entfernung r/r_1

Die Kenntnis der Materialdämpfung ist notwendig, weil sich die gesamte Ausbreitungsgesetzmäßigkeit abbildet aus einem "geometrischen" Abnahmeterm und einem "Materialdämpfungsterm".

Um Messungen unterschiedlicher Frequenzen und Amplitudenniveaus erfassen und interpretieren zu können, erwies es sich als notwendig, in einem zweiten Diagramm normierte Amplituden über die auf die Wellenlänge bezogene Entfernung aufzutragen. Für die Normierung ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwelle bzw. Scherwelle notwendig, da gilt $\lambda = v/f$.

Aus diesen so normierten Meßwerten werden dann unter Zugrundelegung des in 3.1.1 beschriebenen Ausbreitungsgesetzes (s.Gl.1) die Parameter n und D wahlweise bestimmt.

Nach Logarithmieren der Gl.(1)

$$\begin{aligned} \log A_i(r_j) &= \log A_{Ri} - n \cdot \log r_j / \lambda_i - D \cdot 2\pi \cdot r_j / \lambda_i \\ a_{ij} &= b_i - n \cdot c_{ij} - D \cdot d_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

mit i - Index über die Anzahl der Messungen (Frequenzen)

j - Index über die Anzahl der Meßpunkte (Entfernungen)

erhält man ein lineares überbestimmtes Gleichungssystem für b_i , n und D , das mit einer linearen Ausgleichsrechnung gelöst wird (Zur Aufstellung des Gleichungssystems siehe Anhang A1). Es wird also die beste Approximation im Sinne der Fehlerquadratnorm berechnet. In der zeichnerischen Darstellung werden die gemessenen Amplitudenwerte der Messungen i auf b_i normiert und die Ausgleichskurve geplottet.

3.2 Zeit- und Frequenzcharakteristik

Zur Verbesserung der Interpretationsmöglichkeit der in 3.1 ermittelten, gezeichneten und gegebenenfalls ausgeglichenen zeit-

lichen und frequenzabhängigen Maximalwerte wird das jeweilige gesamte Zeit- und Frequenzverhalten der Meßsignale herangezogen.

Die Untersuchung erfolgt, indem alle Zeitverläufe mit den zugehörigen Fourieramplitudenspektren geplottet werden. Ob ein Meßsignal mehr harmonischen oder mehr impulsförmigen Charakter besitzt, kann dann zum einen visuell aus den Meßsignalen selbst und zum anderen aus der Frequenzverteilung (signifikante Peaks!) erkannt werden. Einen weiteren Hinweis auf die vorherrschende Art der Zeitcharakteristik erhält man aus der Berechnung der Autokorrelationsfunktion mit zugehörigem Histogramm (siehe 3.4).

Aus den Fourieramplitudenspektren der einzelnen Meßsignale können signifikante Eigenschaften des Erregermechanismus, wie z.B. geschwindigkeits- und geometrieabhängige Erregerfrequenzen bedingt durch Schwellenabstand, Drehgestellabstand, Achsabstand usw., erkannt werden.

3.3 Bestimmung der bodendynamischen Kennwerte

Für die oben angeführten Auswertungen sind eine Reihe von bodendynamischen Kennwerten des Untergrundes notwendig.

Dies sind im einzelnen die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_s der Scherwelle bzw. die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_R der Rayleighwelle, die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_p der Kompressionswelle sowie die Materialdämpfung D .

Zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle und der Rayleighwelle besteht ein fester Zusammenhang, der von der Poissonzahl ν abhängig ist. Bei den üblicherweise vorhandenen Poissonzahlen von $0.25 \leq \nu \leq 0.4$ ist der Unterschied in den Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Scher- und Rayleighwelle sehr gering (<5 %), so daß es für diese Untersuchung gerechtfertigt ist, $v_R \approx v_s$ zu setzen. Folgender Zusammenhang zwischen dem Schubmodul G , der Dichte ρ , der Poissonzahl ν und den Wellengeschwindigkeiten v_s und v_p ist jedoch wichtig:

$$v_s = \sqrt{G/s}, \quad (3)$$

$$v = \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2 \quad / \quad 2 \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2.$$

Bei der praktischen Durchführung wird der Untergrund mittels eines Unwuchtschwingers in harmonische Schwingungen verschiedener Frequenzen versetzt und die Antworten an möglichst vielen Punkten an der Oberfläche mit einem Abstand kleiner $\lambda/4$ gemessen. Aus dieser Messung ergeben sich direkt die frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Oberflächenwelle - falls der Untergrund dispersiv ist - sowie die Materialdämpfung.

Innerhalb des entwickelten Programmsystems werden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf zweierlei Art ermittelt. Zum einen werden die gemessenen Schwinggeschwindigkeitsverläufe so geplottet, daß die Abstände der Kurven auf dem Blatt den Entfernungen der Meßpunkte entsprechen. Durch Verbindung zusammengehöriger Nulldurchgänge ergeben sich eine oder mehrere Geraden, deren Steigungen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten entsprechen. Neben dieser Auswertung "von Hand" wird eine vollautomatische Auswertung durchgeführt. Hierbei wird eine Kreuzkorrelation (s. Gl. T15 der Tabelle 1) zweier benachbarter Meßsignale durchgeführt. Der erste markante Peak der Korrelationsfunktion gibt dann direkt die Laufzeit der Wellenfront von einem Meßpunkt zum anderen an. Diese Art der Laufzeitbestimmung ist allerdings nicht ganz unproblematisch, da der Ermessensspielraum, den man bei dem grafischen Verfahren hat, hier wegfällt. Deshalb kann diese Methode der Laufzeitbestimmung in der derzeitigen Entwicklungsphase nur als Ergänzung zu den Ergebnissen der grafischen Laufzeitbestimmung aufgefaßt werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswelle kann auf die gleiche Weise ermittelt werden. Der Untergrund muß hierbei nur impulsartig, z.B. durch Fallenlassen eines Gewichts, angeregt werden. Der erste Einsatz der an den jeweiligen Meßpunkten ankommenden Wellenfront entspricht dann der P-Welle.

aus Ensemblemittelung

aus Zeitmittelung

Verteilungen	$p(x, t_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} [\text{Anzahl } x_k(t_i) \leq x]$	(T 1)	$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T \Delta x} \sum_{i=1}^n \Delta t$	(T 2)
linearer Mittelwert	$\int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx$	(T 3)	$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt$	(T 4)
quadrat. Mittelwert	$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx$	(T 5)	$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt = \phi_{xx}(\tau=0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{xx}(\omega) d\omega$	(T 6)
Varianz	$\int_{-\infty}^{\infty} (x-\bar{x})^2 p(x) dx$	(T 7)	$\bar{x}^2 - \bar{x}$	(T 8)
Auto-korrelationsfunktion	$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t+\tau) p[x(t), x(t+\tau)] dx(t) dx(t+\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{xx}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$	(T 9)	$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau) dt$	(T 11)
		(T 10)	$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{xx}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$	(T 12)
Kreuz-korrelationsfunktion	$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau) p[x(t)y(t+\tau)] dx(t) dy(t+\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{xy}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$	(T 13)	$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau) dt$	(T 15)
		(T 14)	$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{xy}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$	(T 16)
Auto-leistungsdichte	$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$	(T 17)	$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{X_T(i\omega)^* X_T(i\omega)}{2T}$	(T 18)
			$X_T(i\omega) = \int_{-T}^T x(t) e^{-i\omega t} dt, X_T^*(i\omega) = X_T(-i\omega)$	
Kreuz-leistungsdichte	$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$	(T 19)	$\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{X_T^*(i\omega) \cdot Y_T(i\omega)}{2T}$	(T 20)

Tabelle 1: Erwartungswerte aus der Zeit- und Ensemblemittelung für eine stationäre Zufallsfunktion x(t)

Die Materialdämpfung wird aus den Schwingerversuchen" bestimmt. Dies kann deshalb gemacht werden, weil bei punktförmiger harmonischer Erregung die "geometrische" Ausbreitungsgesetzmäßigkeit mit $A \sim r^{-0.5}$ bekannt ist. Die Abweichung von dieser Ausbreitungsgesetzmäßigkeit ist auf den Einfluß der Materialdämpfung zurückzuführen. Zur Berechnung der Dämpfung D wird auf den Programmteil "lineare Ausgleichsrechnung" zurückgegriffen, wobei jetzt für den Abnahmeexponenten ein Wert von $n = 0.5$ vorgegeben wird.

3.4 Statistische Auswertung

Da die durch Schienenverkehr ausgelösten Erschütterungen, wie z.B. in [2] dargestellt, stets zufälligen Schwankungen unterworfen sind, müssen die Erreger- und Antwortprozesse als Zufallsprozesse betrachtet werden. Die Definition stochastischer Prozesse und die Grundlagen für stationär stochastische Schwingungen sind, soweit sie zur Implementierung benötigt wurden, in Tabelle 1 in kompakter Form dargestellt.

Stochastische Schwingungen werden vollständig charakterisiert durch die

- spektralen Leistungsdichten, die das Frequenzverhalten beschreiben,
- den Korrelationsfunktionen, die das Zeitverhalten angeben.
- sowie durch die Wahrscheinlichkeitsfunktion, die das Amplitudenverhalten der Zufallschwingungen beschreibbar macht.

Die prinzipielle Vorgehensweise und weitere Zusammenhänge, insbesondere zwischen den Leistungsdichten und Korrelationsfunktionen, soll im folgenden kurz skizziert werden.

Ausgegangen wird von einer Stichprobe $x_j(t)$ - das ist die jeweilige Messung, der zu untersuchenden Zufallsschwingung $x(t)$.

Zur Vereinfachung der folgenden Darstellung sei angenommen, daß in der Stichprobe alle relevanten Eigenschaften der Zufallsschwingung enthalten seien (ist dies nicht der Fall, so ist eine "getriggerte" Zeitmittelung aus mehreren Stichproben durchzuführen).

Der Zeitverlauf der einzelnen Stichprobe bzw. der gemittelten Stichproben wird nun benutzt, um zum einen die Autokorrelationsfunktion $Q_{XX}(\tau)$ des Zufallsprozesses zu berechnen. Die Autokorrelation (s. Gl. T9 bis T12 in Tabelle 1) ist der zeitabhängige Repräsentant der Zufallsschwingung. Daneben liefert die Autokorrelationsfunktion $Q_{XX}(\tau)$ den quadratischen Mittelwert $\bar{x}^2 = Q_{XX}(\tau=0)$ der Zufallsschwingung. Aus der Autokorrelationsfunktion kann ebenfalls erkannt werden, ob die Zufallsfunktion harmonische (deterministische) Anteile enthält. Die Autokorrelation ist deshalb ein wichtiger Gradmesser für den Zufallscharakter einer Schwingung.

Die mathematische Funktion der Verteilungsdichte der Zufallsschwingung wird ebenfalls aus dem repräsentativen Zeitverlauf ermittelt. Hierbei wird das Histogramm gebildet und dessen Verlauf mit theoretischen Verteilungen verglichen. Kann das Histogramm z.B. durch eine Gaußverteilung

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \quad (4)$$

approximiert werden, so ist es möglich mit Hilfe der Gl.(4) Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einer vorgegebenen zeitlichen Maximalamplitude \hat{A} angeben, bzw. bei vorgegebener Wahrscheinlichkeit erhält man die zu erwartenden zeitlichen Maximalamplituden. Der Wert der Varianz σ_x^2 der theoretischen Gaußverteilung in Gl.(4) wird hierbei durch den quadratischen Mittelwert $\bar{x}^2 = Q_{XX}(\tau=0)$ bestimmt.

Zur vollständigen Beschreibung der gesamten Zufallsschwingung ist noch das Frequenzverhalten darzustellen. Das Frequenzverhalten wird durch die spektrale Leistungsdichte \bar{G}_{XX} beschrieben (s. Gl. T17 bis T18 der Tabelle 1). Hierbei ist \bar{G}_{XX} der lineare Erwartungswert (Mittelwert) der Leistungsdichten $G_{x_j x_j}$ der einzelnen Stichproben $x_j(t)$.

$$E[G_{XX}(f)] = \bar{G}_{XX}(f) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n |X_j(f)|^2 . \quad (5)$$

In Gl. (5) ist $|X(f)|$ die Fouriertransformierte der Stichprobe $x_j(t)$. Weiter sei darauf hingewiesen, daß die Autokorrelationsfunktion die Fouriertransformierte der spektralen Leistungsdichte ist (s. Gl. T17 in Tabelle 1). Weiter gilt, daß das Frequenzintegral über die spektrale Leistungsdichte dem quadratischen Mittelwert \bar{x}^2 entspricht, der ebenfalls aus der Korrelationsfunktion für $\tau=0$ (s.o.) gewonnen werden kann.

Die spektrale Leistungsdichte ist zwar die statistisch äquivalente Beschreibung des Zufallsprozesses. Für praktische Untersuchungen ist es jedoch oftmals besser, den linearen Mittelwert der Fouriertransformierten $|X(f)|$ selbst zu benutzen, der in analoger Weise wie der Mittelwert der Leistungsdichte definiert ist. Da die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Zufallsprozesses durch eine lineare Transformation (Bildung der Fouriertransformierten) nicht verändert wird [2], ist die Verteilungsfunktion der Zeitcharakteristik ebenfalls für die Frequenzcharakteristik gültig. Dies kann dazu benutzt werden, um Vertrauensintervalle für den linearen Mittelwert der Fouriertransformierten zu berechnen.

Es gilt

$$\bar{X}(f) - k S(f) \leq X(f) \leq \bar{X}(f) + k S(f). \quad (6)$$

Hierbei ist $X(f)$ der wahre Mittelwert der Zufallsschwingung mit einer gewissen vorgegebenen Wahrscheinlichkeit, $\bar{X}(f)$ ist der Mittelwert der Stichprobe und $S(f)$ ist die Streuung, die ermittelt wird aus

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n} (\sum (X(f) - \bar{X}(f))^2)}. \quad (7)$$

k ist ein Multiplikator, der von der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit abhängt. Unter der Voraussetzung, daß die gültige Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Gaußverteilung ist, erhält man für k Werte von

k = 1 für eine Wahrscheinlichkeit von 68,3 %
k = 2 für eine Wahrscheinlichkeit von 95,4 %
k = 3 für eine Wahrscheinlichkeit von 99,7 %.

Die Implementierung der Gl.(7) erfolgte derart, daß in einer Programmeinheit die linearen Mittelwerte für die Schmalbandspektren in einen 68 %igen Vertrauensintervall, die Varianz und der lineare Mittelwert der spektralen Leistungsdichte von beliebig vielen Messungen, für ausgewählte Meßpunkte ermittelt und graphisch dargestellt werden können.

In den Anhängen A2 und A3 sind die Algorithmen zur Berechnung der Histogramme und der Korrelationsfunktionen zusammengestellt.

4. Meßorte und Meßprogramm

4.1 Meßort 1 BVG, Berlin-Britz

Der Meßort 1 befindet sich auf dem Betriebsgelände der BVG in Berlin-Britz. Durch freundliche Unterstützung seitens der BVG konnten hier eine Reihe von Meßfahrten mit gezielten Parametervariationen durchgeführt werden. Unmittelbar angrenzend an den Betriebsbahnhof in Berlin-Britz befindet sich ein ebenes, freies Gelände, auf dem problemlos ohne Störungen bis in eine Entfernung von 100 m von der Gleisachse Meßaufnehmer gestellt werden konnten (siehe Lageplan Anlage B1-1). Der anstehende Boden ist ein fester Geschiebelehm, der in diesem Bereich laut geologischer Karte von Berlin eine Mächtigkeit von ca. 10 m hat. Bei der Gleisanlage handelt es sich um einen konventionellen Schotteroberbau mit Betonschwellen im Abstand von 0,70 m. Die Gleise liegen etwa in Höhe des Geländeniveaus. Im Abstand von 2,50 m von der Gleisachse verläuft parallel ein etwa 50 cm tiefer Entwässerungsgraben. Senkrecht zur Gleisachse bis zu einer Entfernung von 98 m wurden insgesamt 17 Meßpunkte installiert. Davon waren an 6 Meßpunkten 3 Komponenten-Meßstationen, an den übrigen wurden nur die Vertikalkomponenten gemessen. Insgesamt wurden 29 Geophone eingesetzt, die während der Gesamtdauer der

Zugmessungen an ihren Standorten verblieben. Die Lage der einzelnen Meßpunkte und ein Geländeschnitt können der Anlage B1-2 entnommen werden. Die Meßaufnehmer wurden allesamt in den gewachsenen Boden gesteckt und obwohl dies mit besonderer Sorgfalt geschah, war nicht zu verhindern, daß bei einigen Aufnehmern der Kraftschluß mit dem Boden nicht ausreichend war und somit die Meßwerte an diesen Punkten unbrauchbar waren. Der Gesamterfolg der Messungen wurde dadurch allerdings nur unerheblich beeinträchtigt. Für weitere Messungen sollte ein System entwickelt werden, das einen sicheren Kraftschluß zum Boden gewährleistet, indem es den unterschiedlichen Bodenverhältnissen angepaßt werden kann.

Meßprogramm

Zur Bestimmung der bodendynamischen Kennwerte wurden Laufzeitmessungen bei harmonischer Erregung und Impulserregungen durchgeführt. Die harmonische Erregung wurde mittels eines mechanischen Unwuchtschwingers erzeugt. Bei 10 Frequenzstufen zwischen 10 und 60 Hz wurden die Schwinggeschwindigkeiten im Boden registriert. Die Impulsbelastung wurde durch Fallenlassen eines 20 kg schweren Fallgewichtes aus 0,80 m Höhe aufgebracht.

Die Durchführung der Zugmessungen gestaltete sich derart, daß jeweils für eine Serie von 6 Fahrten die Parameter Zuglänge und Zuggeschwindigkeit konstant blieben. Insgesamt wurde die Zuglänge dreimal variiert; 2 Wagen, 4 Wagen, 6 Wagen; dies entspricht Zuglängen von 30,60 und 90 m. Die Geschwindigkeiten waren 30 km/h und 50 km/h. Da immer dieselben Wagen denselben Gleisabschnitt befuhren, konnten die Zufälligkeiten hinsichtlich der Zug- und Gleisbeschaffenheit weitgehend eliminiert werden.

4.2 Meßort 2 DB Strecke Dachau-Karlsfeld

Der Meßort 2 befindet sich an der Versuchsstrecke der Deutschen Bundesbahn Dachau - Karlsfeld. Hier bot sich die Gelegenheit,

an der gleichen Trasse Messungen an 2 verschiedenen Oberbauarten zu machen. Auch diese Strecke verlief im freien Feld, so daß auch hier die Meßaufnehmer bis zu einer Entfernung von ca. 100 m von der Gleisachse aufgestellt werden konnten. Der anstehende Boden im Bereich des freien Feldes war Kies, während in unmittelbarer Nähe der Gleisanlage bis zu einem Entwässerungsgraben organischer Boden vorgefunden wurde. Hier wurden zwei verschiedene Meßreihen jeweils senkrecht zur Gleisachse in einem Abstand von etwa 400 m aufgebaut. Die geologische Situation war bei beiden Meßreihen etwa gleichwertig.

Meßreihe 1 wurde im Bereich eines konventionellen Schotteroberbaus aufgebaut, während sich die Meßreihe 2 im Bereich eines Oberbaus auf fester Fahrbahn, Bauart "Rheda", befand. Die Lage der Meßreihen zeigt Anlage B2-1.

Zusätzlich zu den Meßpunkten im Feld wurden hier noch Meßpunkte an den Schwellen und in unmittelbarer Nähe der Gleisanlage aufgebaut. Die Anordnung der Meßpunkte beider Meßreihen und ein Geländeschnitt sind in Anlage B2-2 dargestellt.

Meßprogramm

Auch hier wurden zunächst Laufzeitmessungen durchgeführt, um die dynamischen Kennwerte des anstehenden Bodens zu ermitteln. Die Zugfahrten konnten an diesem Meßort leider nicht gezielt variiert werden. Hier mußte das gemessen werden, was der laufende Verkehr hergab. In diesem Bericht werden lediglich die Messungen bei Vorbeifahren von S-Bahnen dargestellt. Zusätzlich zu den Schwinggeschwindigkeiten wurde hier auch die Fahrgeschwindigkeit registriert. Das erreichte Meßziel bei Meßreihe 1 (konventioneller Oberbau) war, im Bereich des konventionellen Oberbaus 8 Fahrten mit nahezu gleicher Geschwindigkeit und gleichen Zuglängen zu registrieren. Die Fahrgeschwindigkeit der registrierten Fahrten lag zwischen 110 und 120 km/h, die Zuglängen waren etwa 100 m. Bei Meßreihe 2 wurden je 4 Fahrten gleicher Zuglänge mit Geschwindigkeiten von ~120 km/h und ~80 km/h registriert. Um ausreichend viele Messungen zu registrieren, mußten Schwankungen in den Fahrgeschwindigkeiten von $\pm 8 \%$ in Kauf genommen werden.

5. Meßergebnisse

Die Auswertung und Darstellung der Meßergebnisse erfolgt für alle Messungen nach dem gleichen Schema. Die Darstellung erfolgt in erster Linie graphisch. Nur, wo es für die Zusammenhänge notwendig ist, werden auch die numerischen Werte aufgeführt.

Zunächst wurden die Messungen zur Bestimmung der bodendynamischen Kennwerte ausgewertet. Aus diesen Messungen wurde für Meßort 1 - Betriebsgelände BVG - Berlin - zusätzlich zu den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten der Materialdämpfungskoeffizient mit Hilfe der in Kap. 3.1 beschriebenen Ausgleichsrechnung bestimmt.

Die Auswertung der Messungen der Zugvorbeifahrten wird dergestalt vorgenommen, daß zunächst für ausgewählte Meßpunkte mit unterschiedlicher Entfernung von der Quelle die für eine Meßserie typischen Geschwindigkeits-Zeitverläufe und die zugehörigen Schmalbandspektren dargestellt werden. Anschließend werden Autokorrelation und Histogramm für die gleichen Meßpunkte ermittelt und gezeichnet. Danach folgen Plots der linearen Mittelwerte der Schmalbandspektren aller Messungen einer Serie für die ausgewählten Meßpunkte sowie die Mittelwerte der spektralen Leistungsdichten. Weiterhin wird die Amplitudenabnahme über die Entfernung sowohl der Maximalwerte im Zeitverlauf als auch der ausgewählten signifikanten Maximalwerte aus dem Frequenzverlauf dargestellt. Für die Amplituden diskreter Frequenzen wird die in 3.1.2 beschriebene Ausgleichsrechnung durchgeführt und unter Vorgabe der vorher ermittelten Dämpfungskoeffizienten der Exponent n als Parameter für die räumliche Amplitudenabnahme ermittelt.

Alle Bilder zur Dokumentation der Meßergebnisse sind im Anhang B und C zusammengestellt. Dabei wurde nach folgender Systematik verfahren: In beiden Anhängen beziehen sich die Zusätze 1 und 2 hinter der Bezeichnung der Anfangsseiten auf die Meßorte 1 und 2. Im Anhang B sind alle Bilder zur Darstellung der Meßorte einschließlich der Bilder zur Bestimmung des Materialverhaltens der Böden zusammengefaßt. Im Anhang C sind die Bilder zur Darstellung der Meßergebnisse der Zugfahrten zusammengestellt. Um

einen direkten Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Parameter zur ermöglichen, sind bei jeder Auswertekategorie die Ergebnisse aller Meßserien eines Meßortes hintereinander aufgeführt. Die Meßorte 1 und 2 können nur getrennt voneinander betrachtet werden, da die Randbedingungen von Ort zu Ort zu unterschiedlich waren.

5.1 Bodendynamische Kennwerte

Die Auswertung der durch den Unwuchterreger harmonisch angeregten Bodenschwingungen liefert für diskrete Frequenzen die Rayleighwellengeschwindigkeit v_R , die bei den üblicherweise im Boden ansetzbaren Poisson-Zahlen der Scherwellengeschwindigkeit v_S gleichgesetzt werden kann. Aus den impulserregten Schwingungen (erzeugt mittels eines Fallgewichtes) läßt sich zusätzlich die Kompressionswellengeschwindigkeit v_P bestimmen. Ausgewählte Plotterbilder, die der Bestimmung der Kennwerte zugrunde liegen, sind im Anhang B1 (für Meßort 1) und B2 (für Meßort 2) zu finden.

Eine zusammenfassende Darstellung der ermittelten Kennwerte gibt nachfolgende Tabelle 2 zusammen mit Bild 4.

Bild 4 zeigt bei Meßort 2 eine starke Frequenzabhängigkeit der S-Wellengeschwindigkeit und damit einen vom Überlagerungsdruck abhängigen Schubmodul, eine in der Bodenmechanik seit langem bekannte Tatsache. Bei Meßort 1 hingegen verläuft der Schubmodul über die Tiefe nahezu konstant, was auf den aus einer eiszeitlichen Vorlast resultierenden überkonsolidierten Zustand des anstehenden Geschiebelehms zurückzuführen sein dürfte.

Tabelle 2: Zusammenfassende Darstellung der Bodenkennwerte

		Meßort 1	Meßort 2	
		$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$	Bemerkungen
harm. Belast.	$v_S = v_R$ [m/sec]	210-260	200-790	frequenzabhängig (siehe Bild 2)
	G [kN/m ²]	$0,88 - 1,35 \cdot 10^5$	$1,5 - 12,0 \cdot 10^5$	
	D [%]	4,9	aus den Versuchen nicht ermittelbar	
Impulsbelastung	$v_S = v_R$ [m/sec]	282	333	
	v_p [m/sec]	492	676	
	v [-]	0,26	0,34	
	D [%]	4,3	aus den Versuchen nicht ermittelbar	

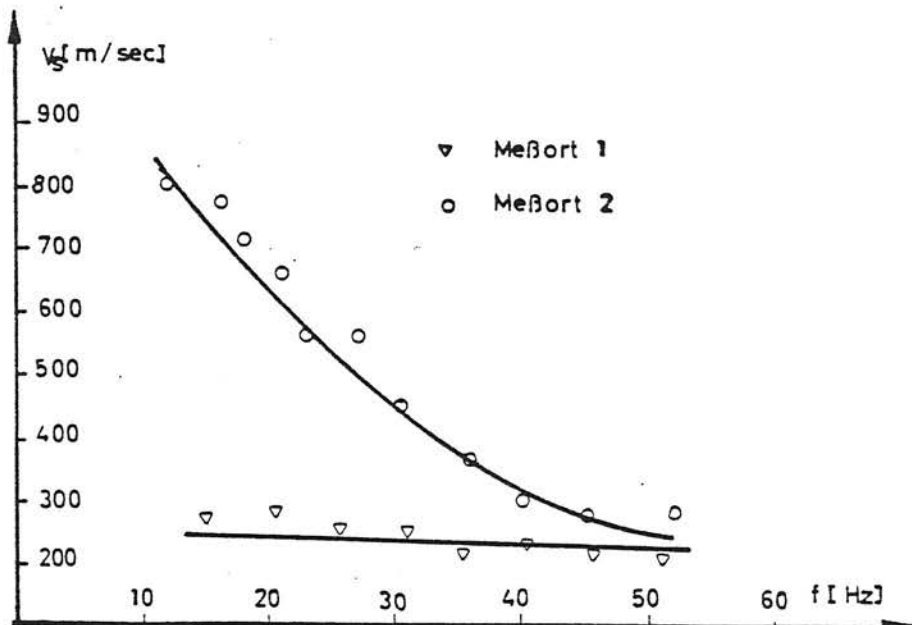


Bild 4: Frequenzabhängige Scherwellengeschwindigkeit

5.2 Darstellung und Diskussion relevanter Meßergebnisse

5.2.1 Meßort 1

Zeitverlauf, Frequenzspektren

In diesem Kapitel besprochene Messungen sind in Anlage C1 zusammengestellt. Die am Meßort 1 variierten Parameter waren die Fahrgeschwindigkeit und die Zuglänge. Auf den Seiten C1-1 bis C1-6 sind für die verschiedenen Messungen typische Amplituden-Zeit-Verläufe von ausgewählten Meßpunkten mit den dazugehörigen Fourieramplitudenspektren dargestellt. Tabelle 3 zeigt die am Meßpunkt 2V registrierten maximalen Schwinggeschwindigkeiten.

Tabelle 3 Maximale Schwinggeschwindigkeiten am MP:2V
(12 m von der Gleisachse) in [mm/sec]

	2 Wagen	4 Wagen	6 Wagen
30 km/h	0.16	0.2	0.2
50 km/h	0.30	0.4	0.4

Diese Werte sind als repräsentativ zu betrachten, da bei den verschiedenen Messungen bei konstanten Parametern nur Abweichungen bis $\pm 10\%$ auftraten. Zwei Tendenzen lassen sich aus dieser Tabelle herauslesen.

- eine Steigerung der Fahrgeschwindigkeit bewirkt eine Vergrößerung der Erschütterungsamplitude.
- Der Einfluß der Zuglänge läßt sich nur für den Sprung von 2 Wagen nach 4 Wagen feststellen, was darauf schließen läßt, daß ab einer Grenzlänge, die zwischen 30 und 60 m liegt, eine Vergrößerung der Zuglänge auf die Intensität der induzierten Schwingungen keinen Einfluß mehr hat.

Bemerkt werden muß hierzu, daß es sich bei den U-Bahnwagen um gleichwertige Einheiten handelte, die aneinander gekoppelt wurden, somit über die gesamte Zuglänge eine konstante Last aufgebracht wurde. Die Fourieramplitudenspektren zeigen einheitlich für alle Meßpunkte von 12 m bis 98 m Entfernung von der Gleisachse bei allen gemessenen Fahrten unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit markante Maximalwerte zwischen 18 und 20 Hz. Die zu erwartenden Peaks bei den Frequenzen, die sich aus Fahrgeschwindigkeit und Schwellenabstand (0,7 m) ergeben, liegen bei 12 Hz für 30 km/h und bei 20 Hz für 50 km/h. Während für die Serie mit $v = 30$ km/h ein Peak bei 12 Hz, wenn auch mit relativ kleiner Amplitude festgestellt werden kann, sind die 20 Hz für die Serie mit $v = 50$ km/h nicht eindeutig zuzuordnen, da die fahrgeschwindigkeitsabhängige Frequenz mit einer dem System "Zug-Fahrbahn-Untergrund" zugeordneten geschwindigkeitsunabhängigen Frequenz zusammenfällt.

Statistik

Ebenfalls auf den Seiten 1 bis 6 der Anlage C1, jeweils auf der rechten Hälfte des Blattes, sind die Autokorrelationsfunktionen und die Histogramme mit der theoretischen auf die Fläche des Histogramms normierten Gaußverteilung für die ausgewählten Meßpunkte dargestellt.

Es zeigt sich, daß die Histogramme sich durchaus befriedigend durch eine Gaußverteilung approximieren lassen, womit der stochastische Charakter der Einzelsignale dokumentiert ist.

Am Beispiel des Meßpunktes MP 6V soll demonstriert werden, welche Ergebnisse aus dem zeitlichen Verlauf $x(t)$, der Fouriertransformierten $|X(f)|$, der Autokorrelationsfunktion $Q_{xx}(\tau)$ sowie der Verteilungsdichte $\hat{p}(x)$ gewonnen werden können. Der in Bild C1-2 dargestellte zeitliche Verlauf des Signals des Meßpunktes 6V läßt vermuten, daß sich die Antwort aus einer Schwingung mit einer vorherrschenden Frequenz, der eine mehr oder weniger große Anzahl weiterer Schwingungen überlagert sind, zusammensetzt. Das Frequenzspektrum $|X(f)|$ zeigt nun, daß die Schwingung $x(t)$ überwiegend aus zwei Schwingungen mit direkt benachbarten Frequenzen entsteht. Ob diese "Haupt"-Schwingungen

nun deterministischen oder stochastischen Charakter besitzen, läßt sich aber noch nicht entscheiden. Die Entscheidung kann erst nach Bildung der Autokorrelationsfunktion $Q_{XX}(\tau)$ und Wahrscheinlichkeitsdichte $p(x)$ getroffen werden. Die Autokorrelationsfunktion zeigt nun einen Verlauf, der nahezu harmonisch ist - die Frequenz ist die doppelte Frequenz der vorherrschenden Schwingung im Zeitverlauf - und weiterhin ist keine Abnahme der Amplituden mit zunehmendem τ festzustellen. Dies deutet darauf hin, daß die vorherrschende Schwingung im Zeitverlauf deterministischen Ursprungs ist - vermutlich eine Systemeigenfrequenz des Systems "Zug-Oberbau-Untergrund" -, da bei einer stochastischen Schwingung bei wachsendem τ $Q_{XX}(\tau) \rightarrow 0$ streben müßte. Diese Hypothese wird dann aus dem Ergebnis der Wahrscheinlichkeitsdichte $\hat{p}(x)$ untermauert. Die Wahrscheinlichkeitsdichte setzt sich zum einen aus einer Gaußverteilung zusammen, wie sie üblicherweise bei Zugschwingungen auftritt. Der Gaußverteilung ist aber eine Verteilungsdichte der Art

$$\begin{aligned} \hat{p}(x) &= \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - x^2}} & |x| &\leq A \\ \hat{p}(x) &= 0 & |x| &> A \end{aligned}$$

überlagert. Diese Verteilungsdichte ist gültig für eine Sinusschwingung mit der Amplitude A.

Das Ergebnis dieser Betrachtungsweise kann zusammengefaßt werden zu: die stochastische Zugerregung ist durch einen Schmalbandfilter bzw. Resonanzsystem, nämlich das "Zug-Oberbau-Untergrundsystem", geschickt worden, wobei die Filterbandbreite klein ist, verglichen mit seiner Mittenfrequenz, die gleich der Resonanzfrequenz ist. Die gemessene Antwort ist also eine Sinusschwingung mit der Frequenz f_0 und einem Rauschen in dem Nachbarfrequenzband.

Auf den Seiten 7 bis 11 des Anhanges C1 sind die Ensemble-Mittelungen dargestellt. Gemittelt wurden jeweils 6 Messungen einer Serie. Dargestellt sind von oben nach unten: die linearen Mittelwerte in einem 68,3 %igen Vertrauensintervall, die Standardabweichungen und der lineare Mittelwert der

spektralen Leistungsdichten der ausgewählten Meßpunkte. Die relativ schmalen Bänder der Vertrauensintervalle zeigen, daß die Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen sehr gering sind.

Ausbreitung

Die Seiten 12 bis 19 der Anlage C1 dokumentieren das Ausbreitungsverhalten am Meßort 1. Zunächst (C1-12, C1-13) sind die Maximalwerte aus den zeitlichen Schwinggeschwindigkeitsverläufen über die Entfernung doppelt-logarithmisch dargestellt. Markante Unterschiede im Verlauf sind bei den Parametervariationen (Zuggeschwindigkeit und Zuglänge) nicht festzustellen. Der geometrische Abnahmeexponent n liegt zwischen 0.3 und 0.5. Außerdem ist ein Dämpfungseffekt zu erkennen, der aber aufgrund der definitionsgemäßen Frequenzabhängigkeit nicht quantifizierbar ist.

Ein "ebener Bereich", d.h. ein Bereich, in dem die Ausbreitung aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Quelle eine ebene Charakteristik - $A = \text{const}$ - aufweist, ist hier nicht festzustellen.

Die Bilder auf den Seiten C1-14 bis C1-19 zeigen die Ausbreitungscharakteristik der Fourieramplituden ausgewählter Frequenzen in absoluter und in normierter Darstellung. Die ausgewählten signifikanten Frequenzen liegen zwischen 14 und 26 Hz.

Mit der in Kap. 3.1.3 beschriebenen Ausgleichsrechnung wurde der geometrische Abnahmeexponent bestimmt. Dabei wurde der in den bodendynamischen Versuchen ermittelte Dämpfungskoeffizient zu $D = 4,5 \%$ angesetzt. Die unter dieser Voraussetzung errechneten Exponenten liegen zwischen $n = 0,01$ und $n = 0,49$. Bei Veränderung der Parameter Zuglänge und Fahrgeschwindigkeit läßt sich eine eindeutige Tendenz des Exponenten n nicht feststellen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sowohl für die zeitlichen Amplituden als auch für die Fourieramplituden eine Variation der Zuglänge von 30 m auf 90 m ab einer Entfernung von 10 m von der Quelle keinen signifikanten Einfluß auf die Ausbreitungscharakteristik hat. Das gleiche gilt für die Variation der Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h auf 50 km/h.

5.2.2 Meßort 2

Vorbemerkung

Bei den Messungen in Dachau wurde in erster Linie als Parameter die Oberbauart "feste Fahrbahn - System Rheda" und "konventioneller Schwellen/Schotteroberbau" untersucht. Leider konnten an diesem Meßort keine Sonderfahrten für die Messungen durchgeführt werden. Die Fahrgeschwindigkeiten wurden zwar mit Lichtschranken gemessen, doch war nicht gewährleistet, daß die Züge mit gleicher Geschwindigkeit auch von der gleichen Bauart bzw. gleich belastet waren. Aufgrund der daraus resultierenden Schwankungen ist der Vergleich von Zügen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Die bei Meßort 1 festgestellte Tendenz "steigende Erschütterungswerte bei steigender Geschwindigkeit" läßt sich dennoch auch hier feststellen, wenn sie auch nicht so klar quantifizierbar ist wie beim Meßort 1.

Zeitverläufe/Frequenzspektren

Im Anhang C2 Seite 1 und 2 sind repräsentative Amplituden-Zeitverläufe für die Messungen bei den unterschiedlichen Oberbauarten dargestellt. Von den ausgewählten Meßpunkten befindet sich jeweils einer (3V) an der Schwelle, die anderen drei im Feld von 2 m bis 75 m entfernt von der Gleisachse. Markante Unterschiede zwischen den Oberbauarten bei den Schwingungsverläufen zeigen sich nur an der Schwelle bzw. nahe der Gleisachse. Am Schwellen/Schotter-Oberbau lassen sich eindeutig mehrere

Impulse erkennen, die bei der Überfahrt der einzelnen Räder eingeleitet werden. Im Spektrum drückt sich das durch stark dominierende Amplituden im Frequenzbereich von 6 bis 16 Hz aus.

Beim festen Oberbau sind die einzelnen Impulse nicht mehr so eindeutig wahrnehmbar, da sie von höherfrequenten Anteilen überlagert werden. Hier dominieren Frequenzen von 40 bis 60 Hz, obwohl auch hier ein Peak bei 6 Hz festzustellen ist. Im weiteren Verlauf mit zunehmender Entfernung von der Quelle gleichen sich die Signale in ihrer Charakteristik für beide Oberbauarten immer mehr an.

Bemerkenswert ist, daß, obwohl sich bei äquivalenten Zügen die Schwinggeschwindigkeitsamplituden an der Schwelle zwischen fester Fahrbahn und Schwellen-Schotter-System um eine Zehnerpotenz unterscheiden, an den Meßpunkten im Feld Amplituden gleicher Größenordnung gemessen wurden (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4 Maximale Schwinggeschwindigkeitsamplitude bei äquivalenten Zügen

Oberbau	Schwelle	Entfernung 4,50-4,70 m
Schwelle/Schotter	36 mm/sec	2.7 mm/sec
feste Fahrbahn System Rheda	3.7 mm/sec	2.1 mm/sec

Dieses Ergebnis zeigt deutlich, daß eine feste Fahrbahn zwar sehr stark erschütterungsmindernd auf das System "Zug-Gleis-Oberbau" wirkt, der Einfluß auf die Erschütterungsemission jedoch unerheblich ist.

Differenzierter ausgedrückt heißt das, daß durch die geringere Spitzenbelastung der einzelnen Schwellen bei der festen Fahrbahn etwas geringere Erschütterungsamplituden im unmittelbaren

Nahfeld der Fahrbahn und im niedrigen Frequenzbereich bis ca. 30-50 Hz - je nach Untergrundsituation - auftreten. Im höheren Frequenzbereich treten im Nahbereich der festen Fahrbahn in Übereinstimmung mit der Theorie größere Erschütterungen als beim Schienen-Schwellen-System auf. Dies ist zum einen auf die fehlende Materialdämpfung des Schotters, die sich insbesondere bei höheren Frequenzen sehr erschütterungsmindernd bemerkbar macht, zum anderen auf die größere "ebene" Abstrahlung der festen Fahrbahn zurückzuführen.

Für größere Abstände sind dann jedoch unabhängig vom Frequenzbereich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Fahrbahntypen zu verzeichnen.

Statistik

Die Autokorrelationsfunktionen und Histogramme sind in C2-1 und C2-2 dargestellt. Bei den Meßpunkten im Feld lassen sich auch hier für beide ausgemessenen Oberbauarten die Histogramme befriedigend durch eine Gaußverteilung approximieren. Die Histogramme für die Meßpunkte an den Schwellen zeigen jedoch bei beiden Oberbauarten eine starke Impulscharakteristik, die in den gemessenen Zeitverläufen des Systems "Rheda" nicht so offensichtlich sind.

Die Ensemble-Mittelung (C2-3 bis C2-8) wurde für jeweils 8 Messungen durchgeführt. Es zeigt sich, daß hier die Bandbreite des Vertrauensintervalls erheblich größer als beim Meßort 1 ist, was aber aufgrund der in der Vorbemerkung zu diesem Kapitel beschriebenen Sachverhalte zu erwarten ist.

Ausbreitung

Die Plots zur Beschreibung der Ausbreitungscharakteristik sind im Anhang C2-9 bis C2-16 zusammengestellt. Die Maximalwerte der Zeitverläufe lassen einen bemerkenswerten Unterschied zwischen den verschiedenen Oberbauarten erkennen. Während beim Schwel-

len/Schotter-System (C2-9) über eine Entfernung von 3 m bis 100 m von der Gleisachse ein konstanter Abnahmekoeffizient von $n = 1$ festzustellen ist, bilden sich beim System feste Fahrbahn (C2-10) zwei unterschiedliche Bereiche aus. Bis ca. 8 m Entfernung findet keine Amplitudenabnahme statt. Danach stellt sich auch hier ein Abnahmeexponent von $n = 1$ ein. Hier ist also deutlich ein "ebener" Bereich zu erkennen, was aufgrund der Verteilung der Belastung durch die Betonfahrbahn auch plausibel ist. Ein Dämpfungseffekt ist hier nicht erkennbar. Der geometrische Abnahmeexponent von $n = 1$ auch in größerer Entfernung von der Quelle zeigt deutlich den Einfluß der in Kap. 5.1 festgestellten Tiefenabhängigkeit des Schubmoduls an diesem Meßort. Die Dispersion bewirkt hier, wie in Kap. 3.1.2 erläutert, eine geometrische Abnahme von r^{-1} für die zeitlichen Maximalwerte.

Wie die Anlagen C2-11 bis C2-16 zeigen, lassen sich die oben dargestellten Abnahmegesetzmäßigkeiten für die Abnahme der Fourieramplituden nicht bestätigen. Die Meßergebnisse für die Ausbreitung im Frequenzbereich sind hier relativ unbefriedigend, da die Streuung der Meßwerte um die Ausgleichskurve erheblich ist, und somit die Approximationen offensichtlich mehr zufälligen Charakter haben, so daß hier eine seriöse Interpretation nicht möglich ist. Ein Grund hierfür ist sicherlich, daß das Ausbreitungsverhalten, insbesondere im Nahbereich der Quelle, wo noch die Raumwellen wirksam sind, weitaus komplexer ist, als in Gl.(1) beschrieben. Bei diesem Meßort waren die Hälfte der Meßpunkte weniger als 12 m von der Gleisachse entfernt, so daß die Effekte aus Raumwellenausbreitung ($n=1$), Oberflächenwellenausbreitung ($n=0,5$), Materialdämpfung und spezifischer Quellenform ($n=0$ bis $n=1$) sich überlagern und eine Beschreibung mit Gl.(1) nicht mehr bzw. nur noch bedingt möglich ist. Dennoch sind die Ergebnisse der Vollständigkeit halber dargestellt.

6. Zusammenfassung

Zur Analyse des Emissions- und Transmissionsverhaltens von Erschütterungen induziert durch schienengebundene Nahverkehrsmittel wurden Schwingungsmessungen durchgeführt. In diesem Zwischenbericht wurden die Meßeinrichtung, die Meßdurchführung, die Meßauswertung sowie erste Meßergebnisse beschrieben.

Zur Auswertung der Messungen wurde ein umfangreiches EDV-Programmsystem entwickelt. Das Programm bietet folgende Möglichkeiten:

- Untersuchung der Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten von zeitlichen und frequenzabhängigen Maximalwerten
- Darstellung von Zeit- und Frequenzcharakteristik (Fourierspektren)
- Ermittlung der Materialkenndaten durch Laufzeittechnik
- Ermittlung und Darstellung von statistischen Kenngrößen und Kennfunktionen.

Die Messungen wurden an zwei verschiedenen Meßorten durchgeführt. An Meßort 1 mit einem Schotter-Schwellen-System als Oberbau wurden gezielt die Zuglänge und die Fahrgeschwindigkeit variiert. Meßort 2 gestattete die Untersuchung zweier verschiedener Oberbauarten, nämlich ein Schotter-Schwellen-System und ein System feste Fahrbahn.

Die Ergebnisse der Meßauswertung waren:

Beim Oberbautyp "Schienen-Schwellen-System" konnte sowohl am Meßort 1 als auch am Meßort 2 die Ausbreitungscharakteristik ab einer Entfernung ~ 10 m durch einen geometrischen Abnahmeterm und einen Materialdämpfungsterm dargestellt werden. Hierbei zeigte sich auch, daß eine Variation der Zuglänge und der Fahrgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluß auf die Art der Ausbreitungsgesetzmäßigkeit hat.

Hinsichtlich der auftretenden Erschütterungsamplituden bewirkt eine Steigerung der Fahrgeschwindigkeit eine Erhöhung der Amplituden. Die Erhöhung ist aber weitaus geringer als die Steigerung der Fahrgeschwindigkeit.

Bei der durchgeführten Variation der Zuglänge ergab sich, daß bei Längen $L > 60$ m keine signifikanten Erhöhungen der Amplituden mehr zu verzeichnen sind.

Die am Meßort 2 durchgeführten Messungen ergaben, daß ein markanter Einfluß der festen Fahrbahn auf die Art der Ausbreitungscharakteristik im Quellennahbereich bei den zeitlichen Maximalwerten festzustellen ist. Bis 8 m entfernt von der Quelle wurde keine Abnahme - somit die Charakteristik einer ebenen Quelle - festgestellt. Erst ab 8 m stellt sich eine geometrische Abnahme gemäß $A \sim r^{-1}$ ein, wie sie beim Schwellen-Schotter-System über die gesamte Entfernung vorhanden ist.

Der Vergleich der direkt auf den Schwellen gemessenen Erschütterungen ergab, daß beim Schienen-Schwellen-System um eine Potenz größere Werte als bei der festen Fahrbahn auftreten. Eine Auswirkung auf die Größe der Amplituden neben der Trasse war aber nicht zu beobachten. Die Amplituden sind in beiden Fällen nahezu gleich.

Schließlich konnte durch eine vollständige statistische Auswertung, speziell der am Meßort 2 durchgeführten Messungen, gezeigt werden, daß die gültige Wahrscheinlichkeitsdichte eine Gaußverteilung ist, mit Hilfe der Autokorrelationsfunktionen und Wahrscheinlichkeitsdichten wichtige Zusammenhänge über das Zeit- und Frequenzverhalten des gesamten schwingungsfähigen Systems "Zug-Oberbau-Untergrund" aufgedeckt werden können und mit Hilfe einer Varianzanalyse der Schmalbandspektren sich Vertrauensintervalle zur Verbesserung der Prognosesicherheit angeben lassen.

Anhang A1

Aufstellung des Gleichungssystems für die Ausgleichsrechnung.
Ausgangspunkt ist die logarithmierte Gl.(1)

$$\log A_i(r_j) = \log A_{Ri} - n \cdot \log(r_j/\lambda_i) - D \cdot 2\pi \cdot r_j/\lambda_i$$
$$a_{ij} = b_i - n \cdot c_{ij} - D \cdot d_{ij}$$

Der Index i läuft über die Anzahl der Messungen und j über die Anzahl der Meßpunkte.

Das daraus resultierende Gleichungssystem wird hier exemplarisch für 3 Messungen und 4 Meßpunkte aufgebaut.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & c_{11} & d_{11} \\ 1 & 0 & 0 & c_{12} & d_{12} \\ 1 & 0 & 0 & c_{13} & d_{13} \\ 1 & 0 & 0 & d_{14} & d_{14} \\ 0 & 1 & 0 & c_{21} & d_{21} \\ 0 & 1 & 0 & c_{22} & d_{22} \\ 0 & 1 & 0 & c_{23} & d_{23} \\ 0 & 1 & 0 & c_{24} & d_{24} \\ 0 & 0 & 1 & c_{31} & d_{31} \\ 0 & 0 & 1 & c_{32} & d_{32} \\ 0 & 0 & 1 & c_{33} & d_{33} \\ 0 & 0 & 1 & c_{34} & d_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ n \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{24} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \\ a_{34} \end{bmatrix}$$

$$\underline{M} \cdot \underline{s} = \underline{y}$$

Der Lösungsvektor \underline{s} beinhaltet die Normierungsfaktoren für die Amplituden und die unbekanntenen Exponenten n und D . Die rechte Seite \underline{y} wird mit den gemessenen Schwinggeschwindigkeitsamplituden gebildet, während die Matrix \underline{M} sich aus den Geometriefaktoren c_{ij} und d_{ij} zusammensetzt.

Anhang A2

Berechnung von Histogrammen

Ausgegangen wird von einem repräsentativen Zeitverlauf $x(t)$ mit dem Mittelwert $\bar{x}(t) = 0$. Der Zeitverlauf möge in Form eines "Samples" vorliegen mit N Datenpunkten; also

$$x(t) = \{x_n\}, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad \text{A2-1}$$

In üblicher Weise wird nun die Approximation der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion definiert durch

$$\hat{p}(x) = \frac{N_x}{N\Delta x} \quad \text{A2-2}$$

Hierbei ist Δx ein Intervall um den Wert x und N_x ist die Anzahl der Daten, die in das Intervall $x \pm \Delta x$ fallen.

Bei der praktischen Durchführung wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Zunächst wird der größte negative Wert A , dann der größte positive Wert B der Serie $\{x_n\}$ berechnet.
2. Dann wird eine Anzahl von Klassen K vorgegeben. Damit wird Δx berechnet zu.

$$\Delta x = \frac{B-A}{K} \quad \text{A2-3}$$

Der Endpunkt des i -ten Intervalls ist dann ebenfalls bestimmt durch

$$d_i = A + i\Delta x \quad i = 0, 1, 2, \dots, K \quad \text{A2-4}$$

3. Nun wird eine Sequenz von $K+2$ Zahlen N_i $i = 0, 1, 2, \dots, K+1$ definiert, so daß gilt:

$$\begin{aligned}
N_0 &= [\text{Anzahl von } x \text{ so, da\ss } x \leq d_0] \\
N_1 &= [\text{Anzahl von } x \text{ so, da\ss } d_0 < x \leq d_1] \\
N_i &= [\text{Anzahl von } x \text{ so, da\ss } d_{i-1} < x \leq d_i] \\
N_k &= [\text{Anzahl von } x \text{ so, da\ss } d_{k-1} < x \leq d_k] \\
N_{k+1} &= [\text{Anzahl von } x \text{ so, da\ss } x > d_k]
\end{aligned}
\tag{A2-5}$$

4. Werden die so ermittelten Werte N_i über d_i aufgetragen, erhält man das Histogramm. Die Wahrscheinlichkeit \hat{P}_i erhält man durch

$$\hat{P}_i = P[d_{i-1} < x \leq d_i] = \frac{N_i}{N}
\tag{A2-6}$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion \hat{p}_i ergibt sich aus

$$\hat{p}_i = \frac{\hat{P}_i}{\Delta x}
\tag{A2-7}$$

Anhang A3

Autokorrelation und Kreuzkorrelation

Wie bei der Berechnung der Histogramme wird auch hier von der Sequenz von Zeitdaten

$$\{x_n\}; n = 1, 2, \dots, N \quad \text{A3-1}$$

ausgegangen, die in gleichbleibenden Zeitabständen Δt vorliegen sollen. Die gesamte 'Sample'zeit ist somit

$$T = (N-1) \Delta t. \quad \text{A3-2}$$

Aus der in Tabelle 1 aufgeführten Gleichung T11 kann die für diskrete Werte geltende Beziehung für die Autokorrelation

$$Q_{xx}(r \cdot \Delta t) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-r} x_n x_{n+r}, \quad r = 0, 1, 2, \dots, m \quad \text{A3-3}$$

abgeleitet werden.

Zu beachten ist hierbei, daß die Zeitvariable r nur bis zu einem maximalen Index von

$$m = N/2 \quad \text{A3-4}$$

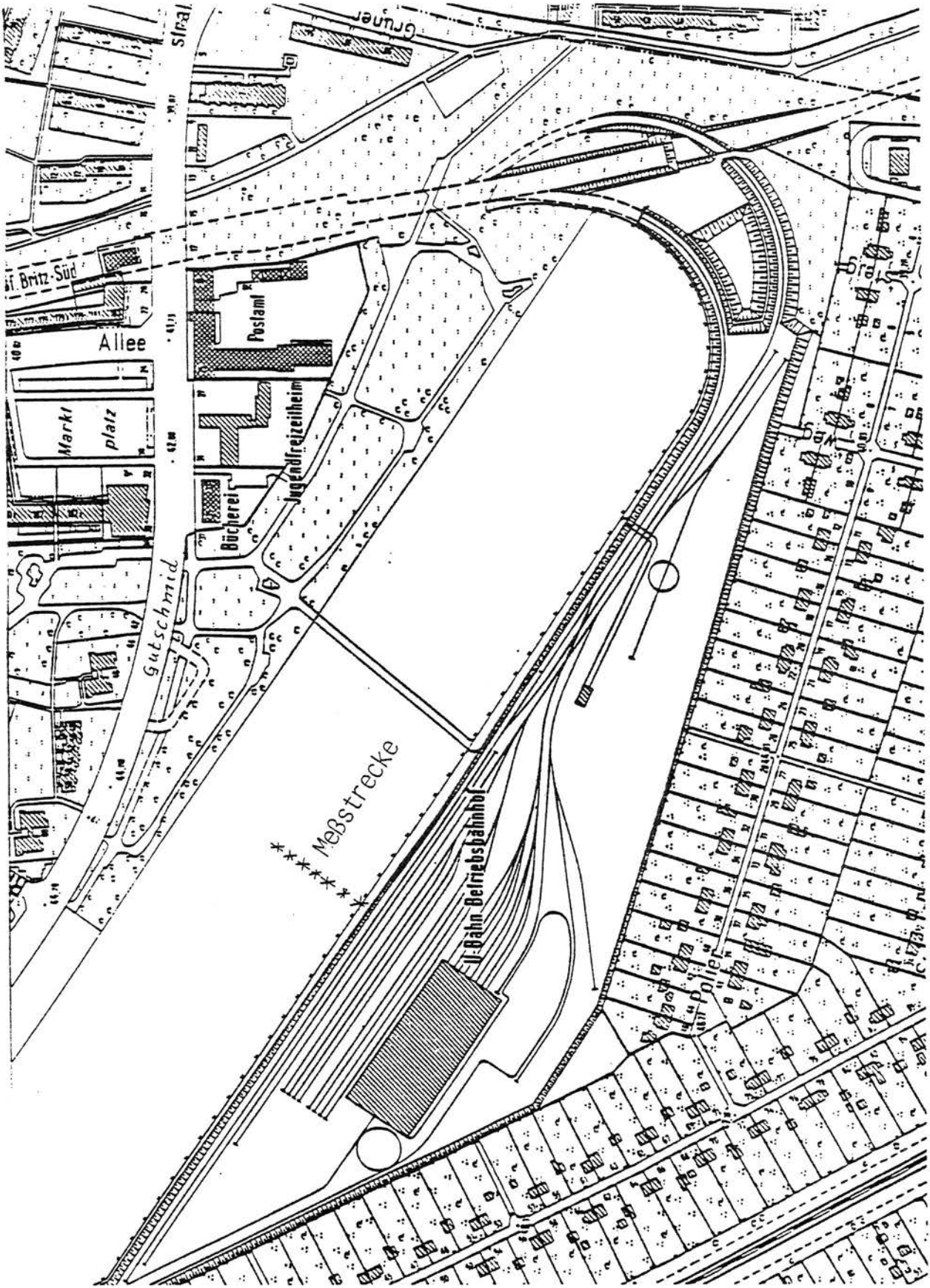
definiert ist, da darüber hinaus die Zeitverläufe $\{x_n\}$ nicht mehr definiert sind. Mit A3-4 ist somit die maximale Korrelationszeit τ festgelegt zu

$$\tau_{\max} = T/2. \quad \text{A3-5}$$

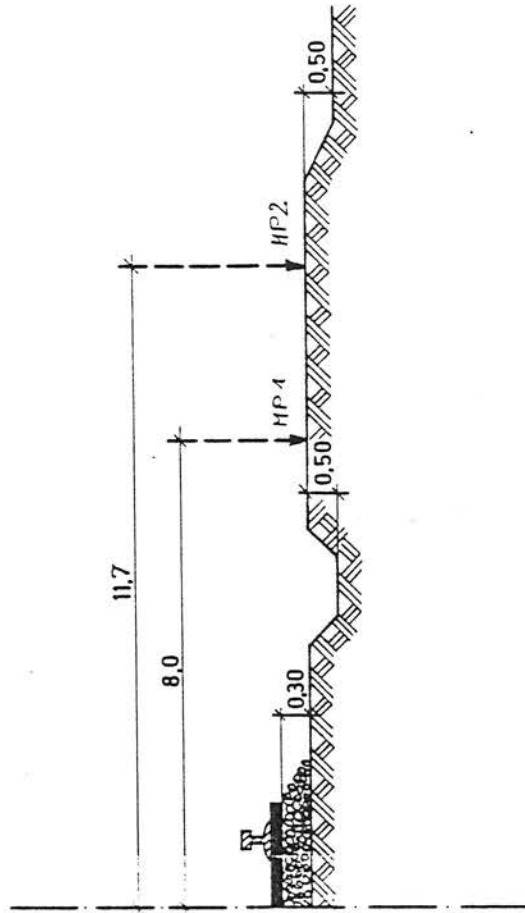
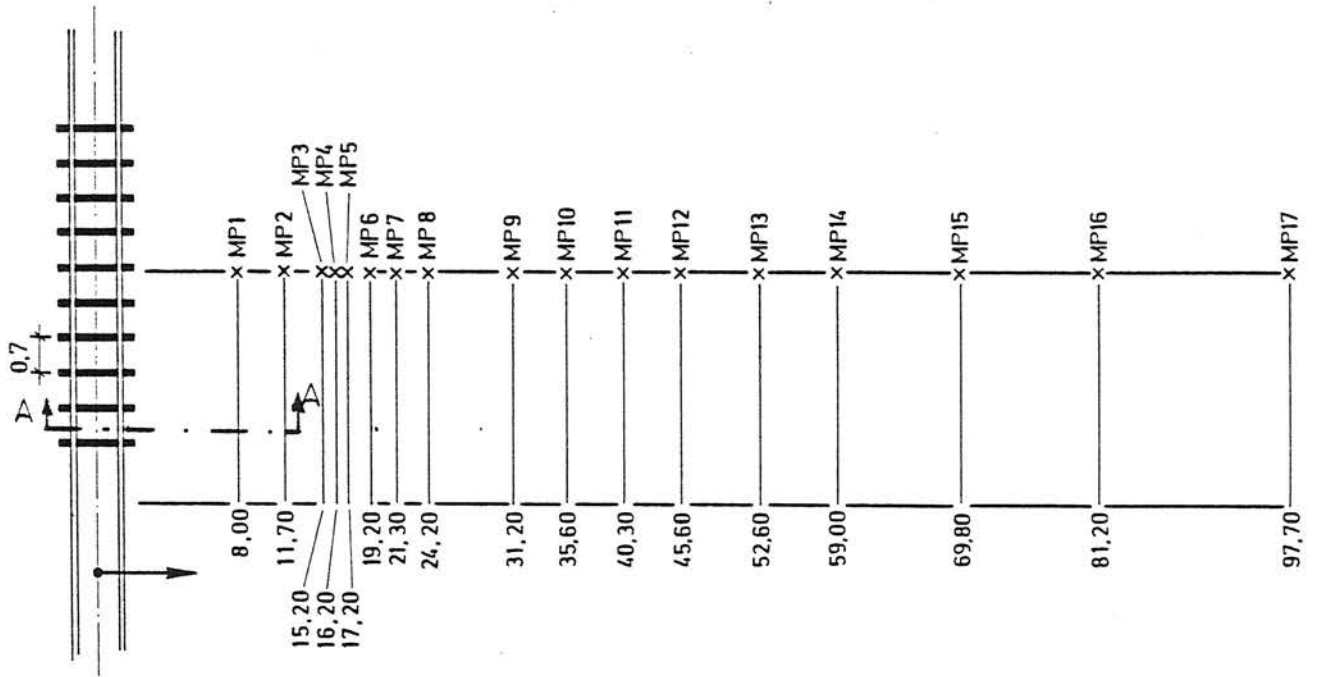
Mit Gl. A3-3 und Tabelle 1 kann die Beziehung für die Kreuzkorrelation zweier Zeitserien $\{x_n\}$ und $\{y_n\}$ direkt hingeschrieben werden zu

$$Q_{xy}(r \cdot \Delta t) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-r} x_n y_{n+r}, \quad r = 0, 1, 2, \dots, n \quad \text{A3-6}$$

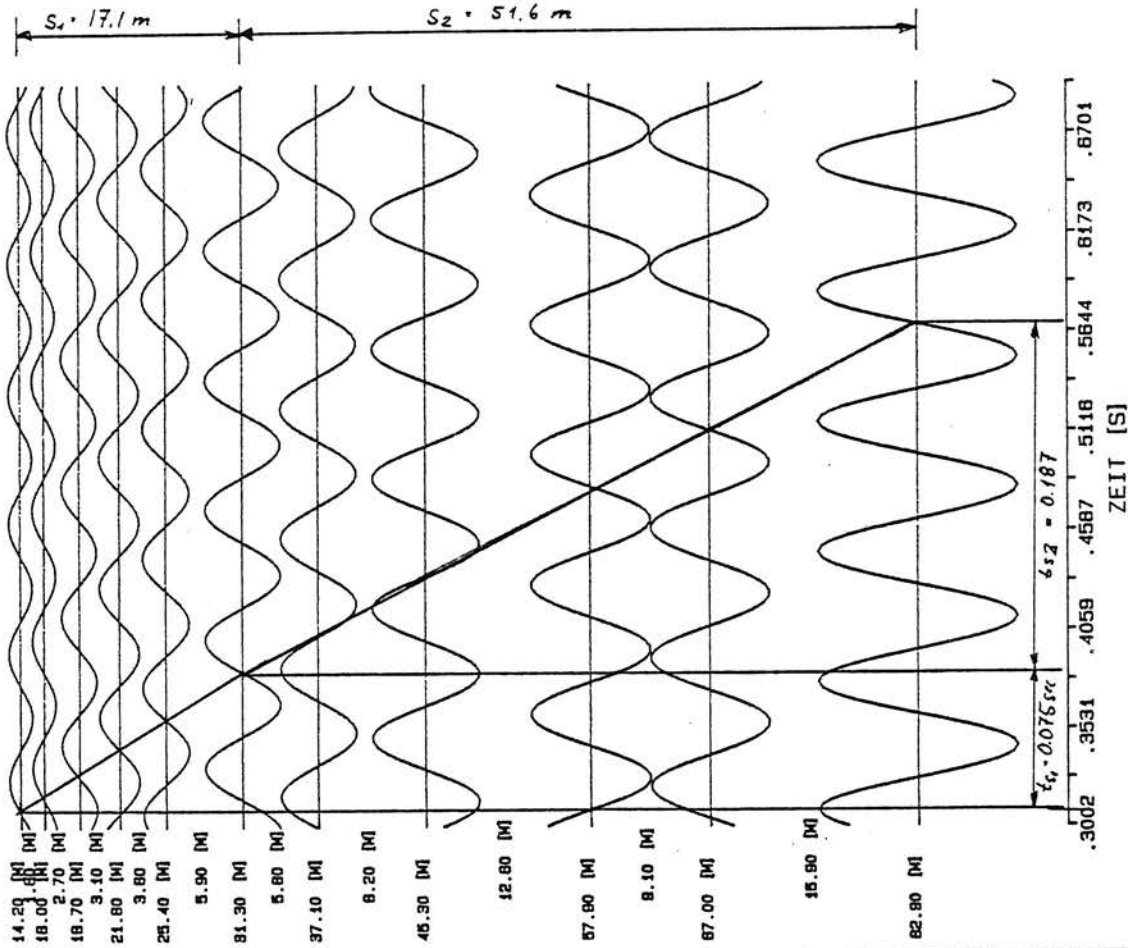
A N H A N G B1



BI-1 Lage der Meßstrecke



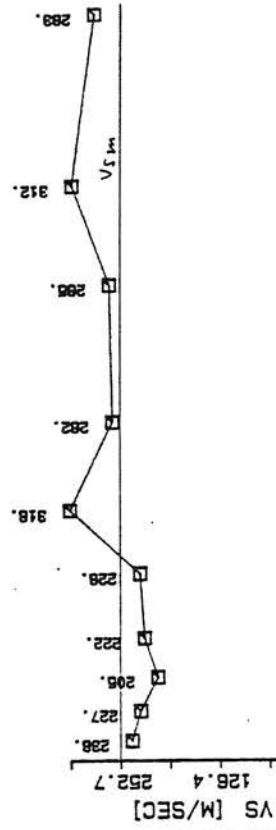
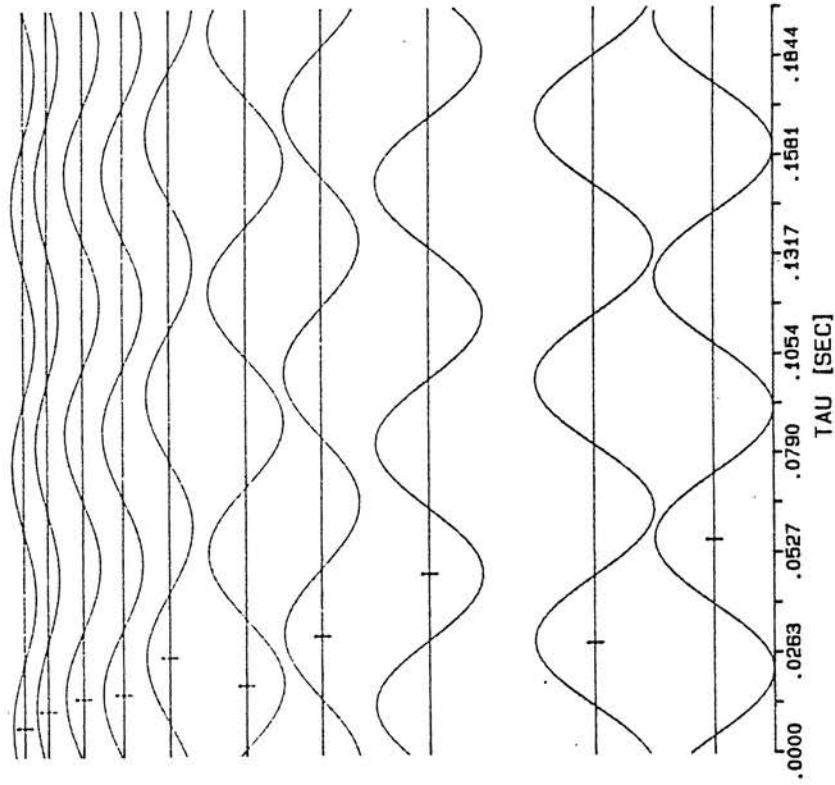
B1-2 Meßort 1
Anordnung der Meßpunkte/Geländeschnitt



B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BAUFUNDAMENTALIK
 ERSCHEINUNGSSCHITZ

BVG MESSUNG 30.4.84 $V_{C1} = 228 \text{ m/sec}$
 $V_{S2} = 276 \text{ m/sec}$
 SCHWINGERMESSUNG F=15 HZ $V_{SM} = 252 \text{ m/sec}$

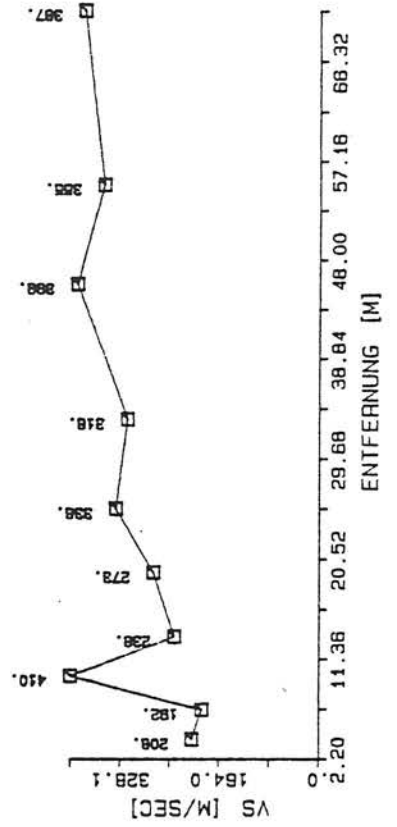
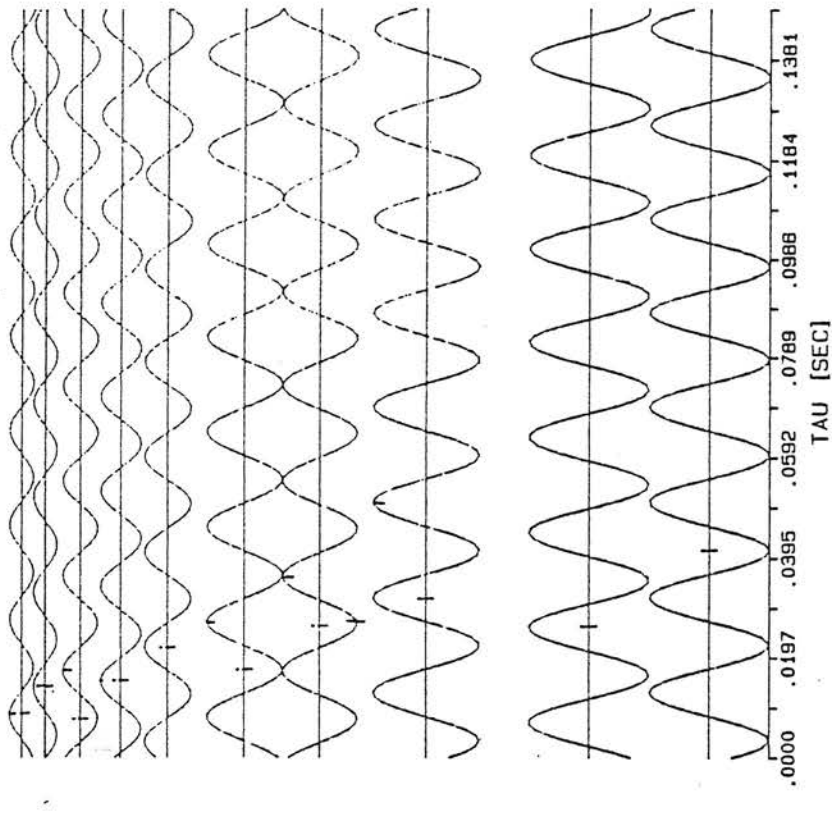
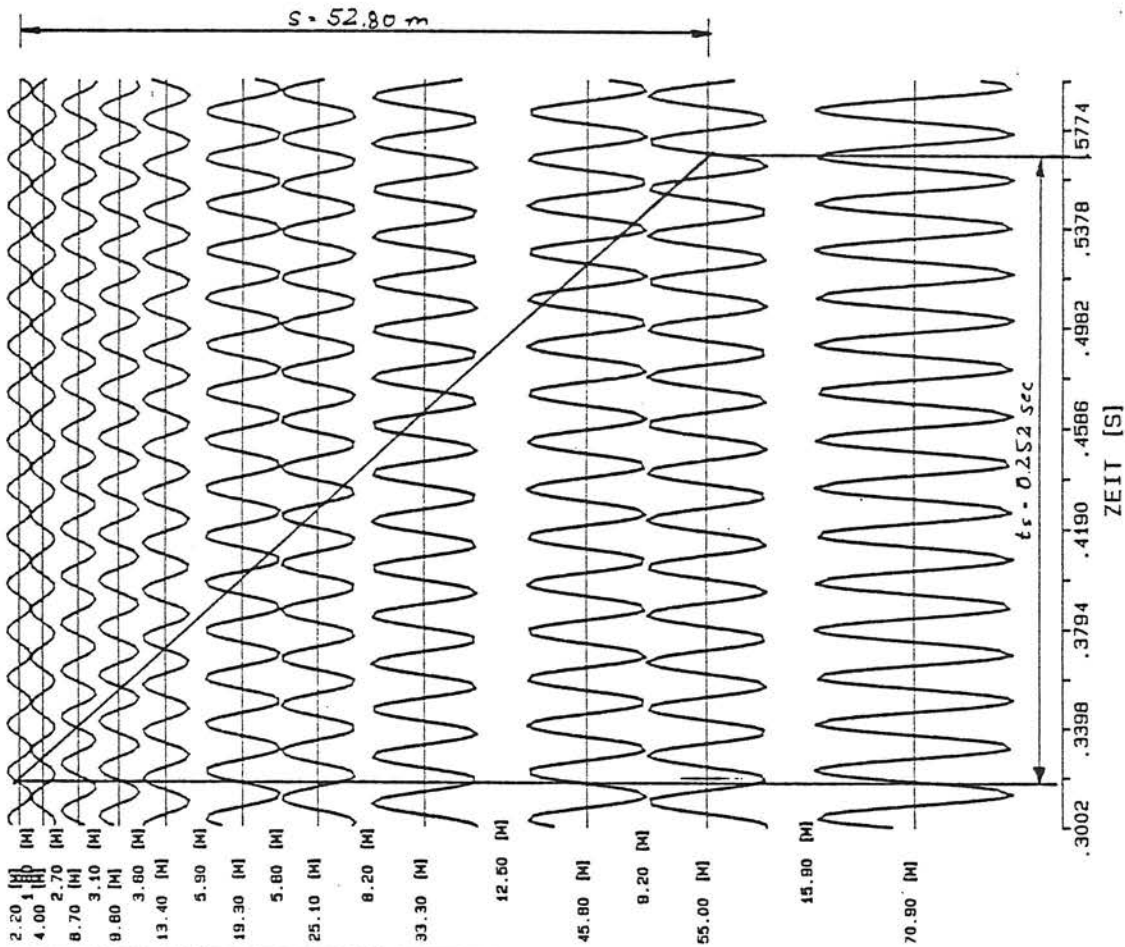
BLATT NR. 2



Bl-3 Laufzeitermittlung

2

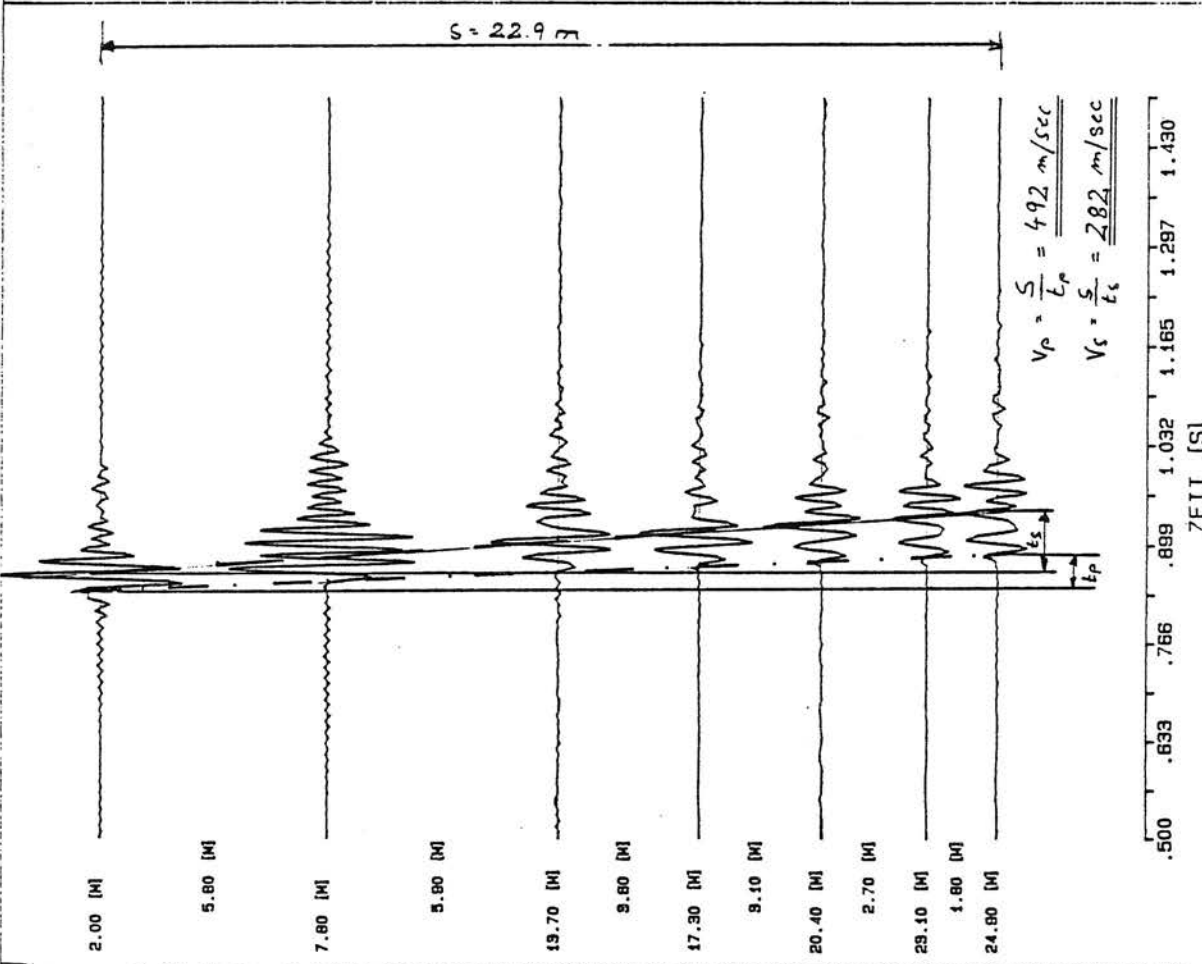
A



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BAUGRUNDYNAHIK
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

SCHWINGERMESSUNG BVG $V_s = \frac{s}{t_s} = 2.10 \frac{m}{sec}$

LAUFZEITEN $F = 53 \text{ HZ}$



$$V_p = \frac{S}{t_p} = 492 \text{ m/sec}$$

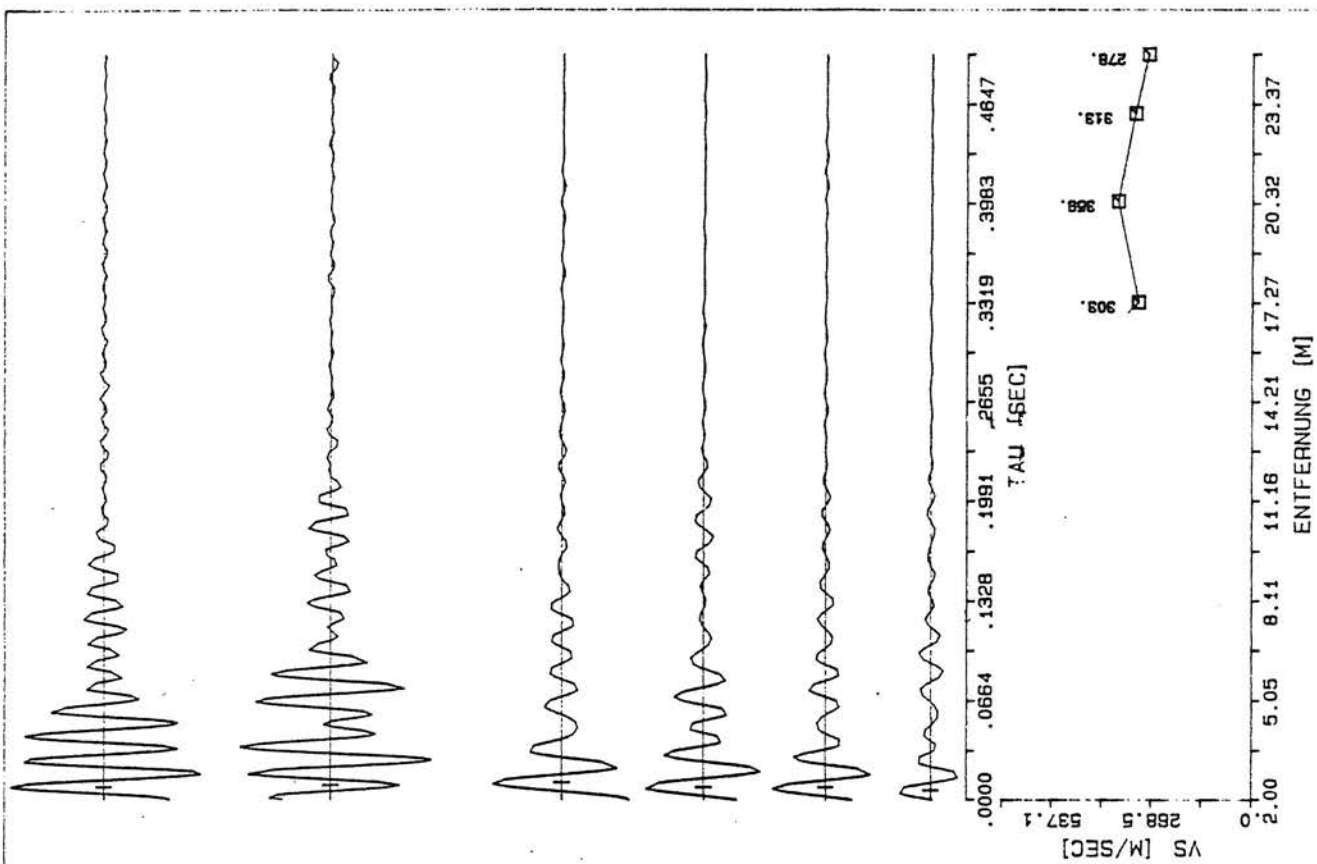
$$V_s = \frac{S}{t_s} = 282 \text{ m/sec}$$

B A M BERLIN
LABOR 2.32
BAUGRUNDYNAMIK
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

IMPULSMESSUNG BVG
LAUFZEITEN

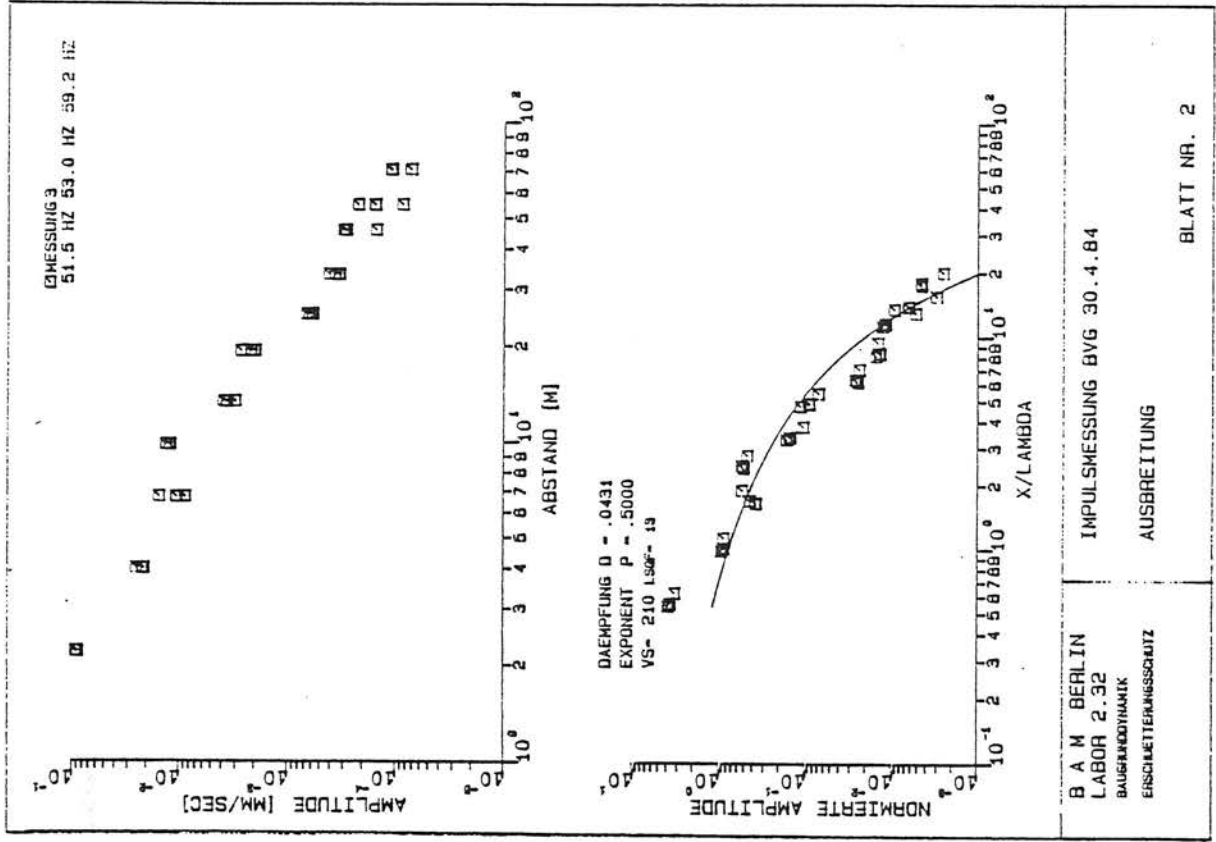
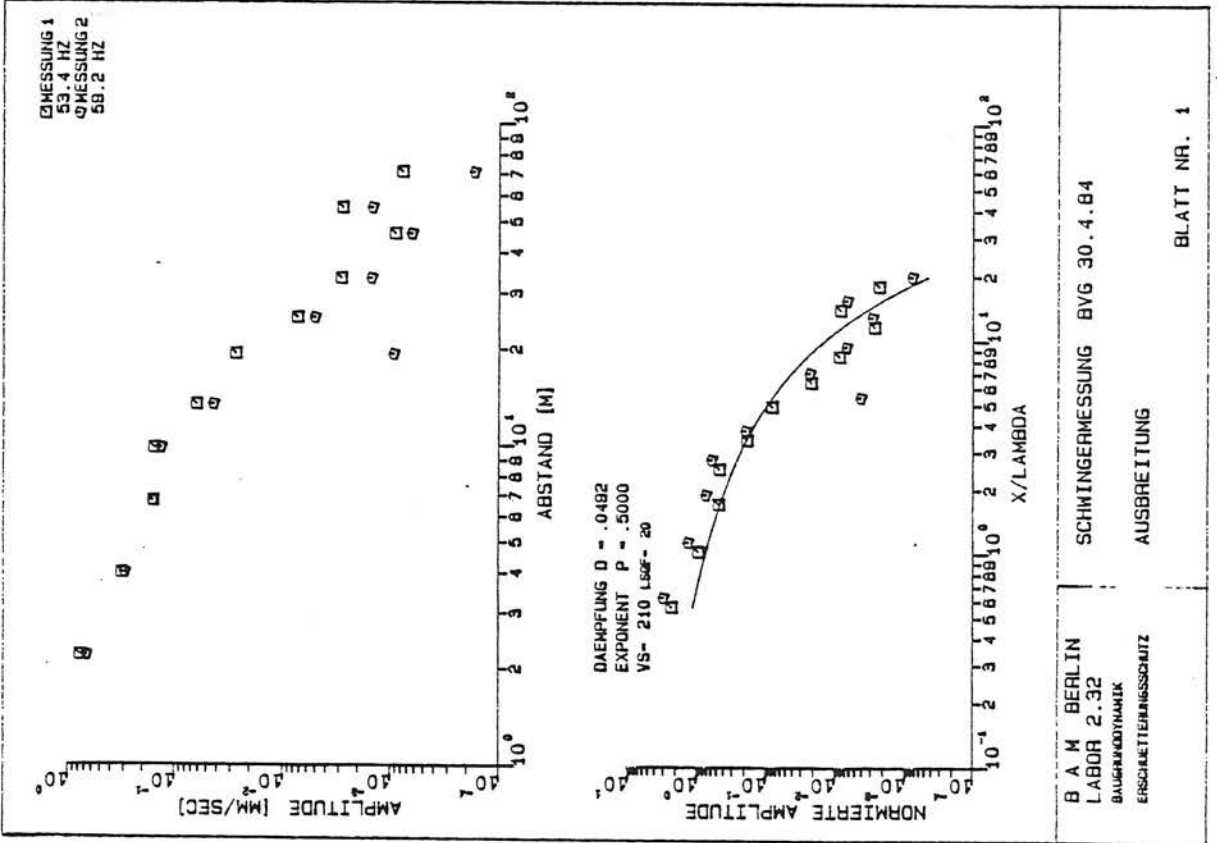
$t_p = 0.0467 \text{ sec}$
 $t_s = 0.0813 \text{ sec}$

BLATT NR. 4

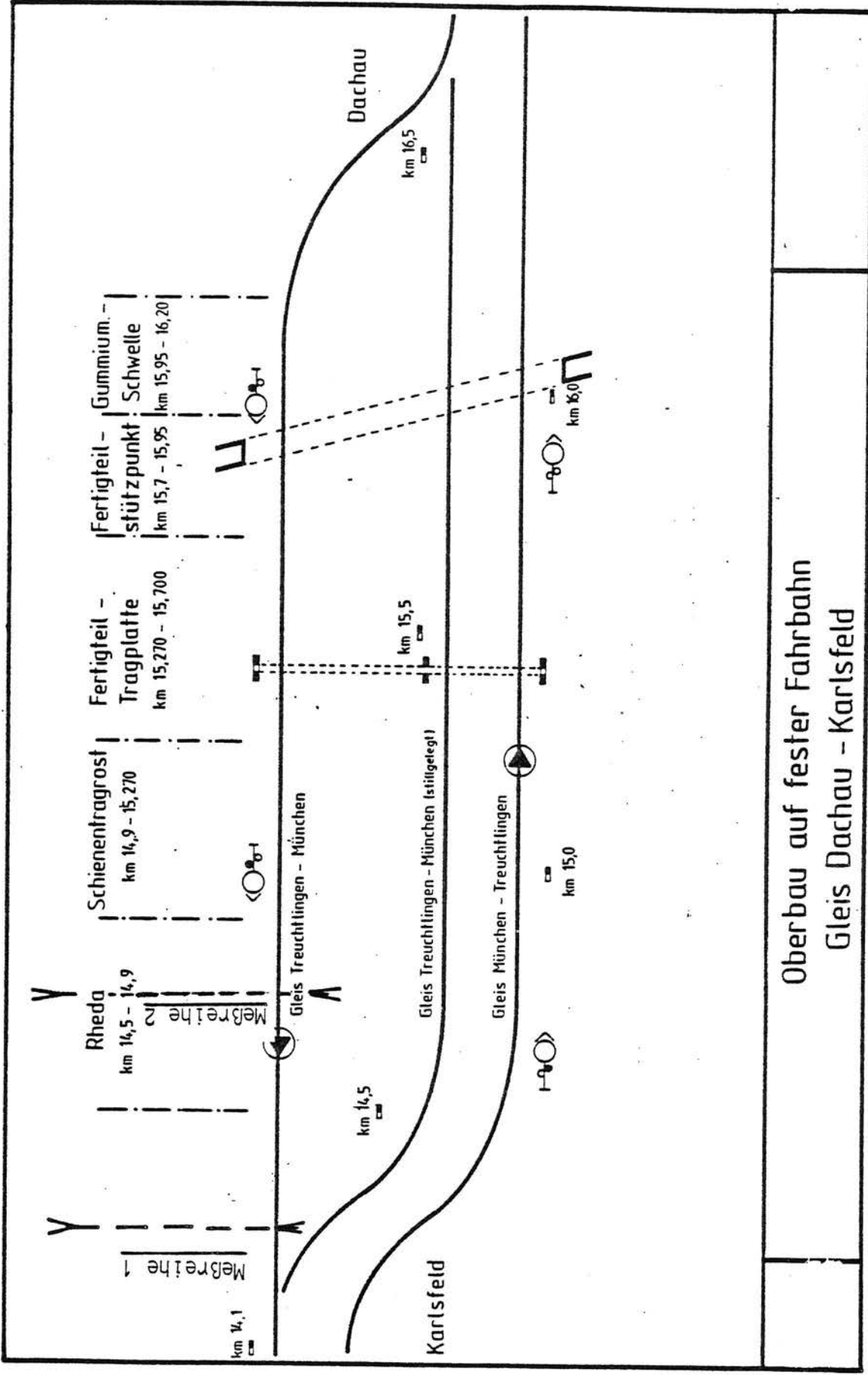


B1-5 Laufzeitermittlung

4 A

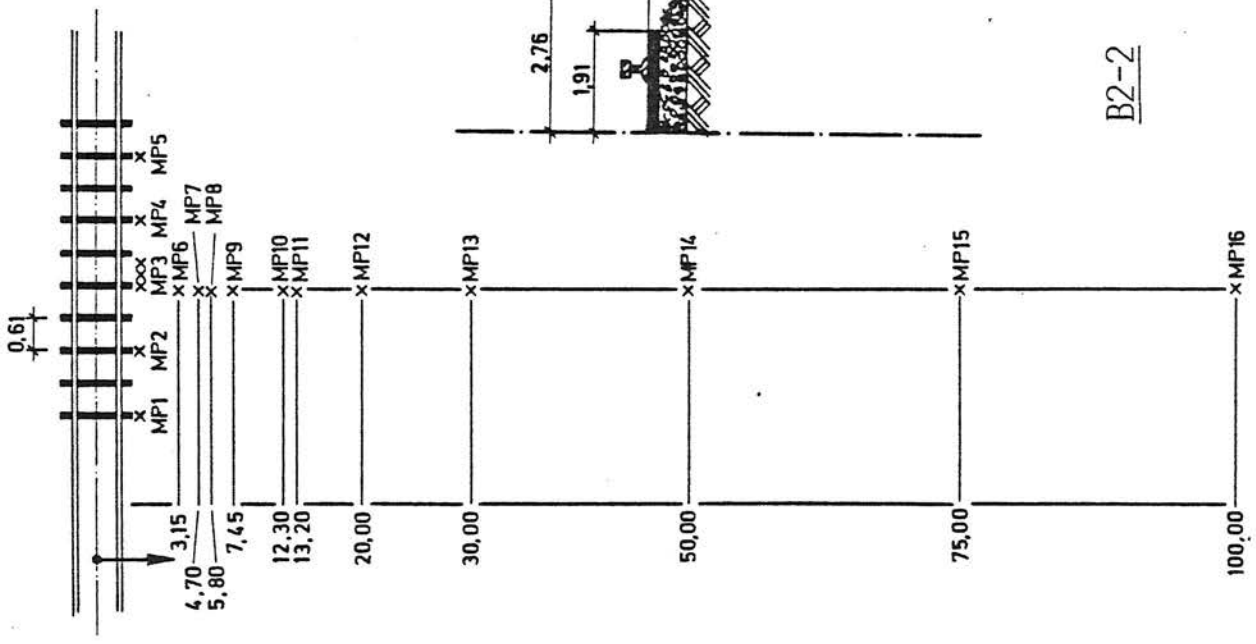


A N H A N G B 2

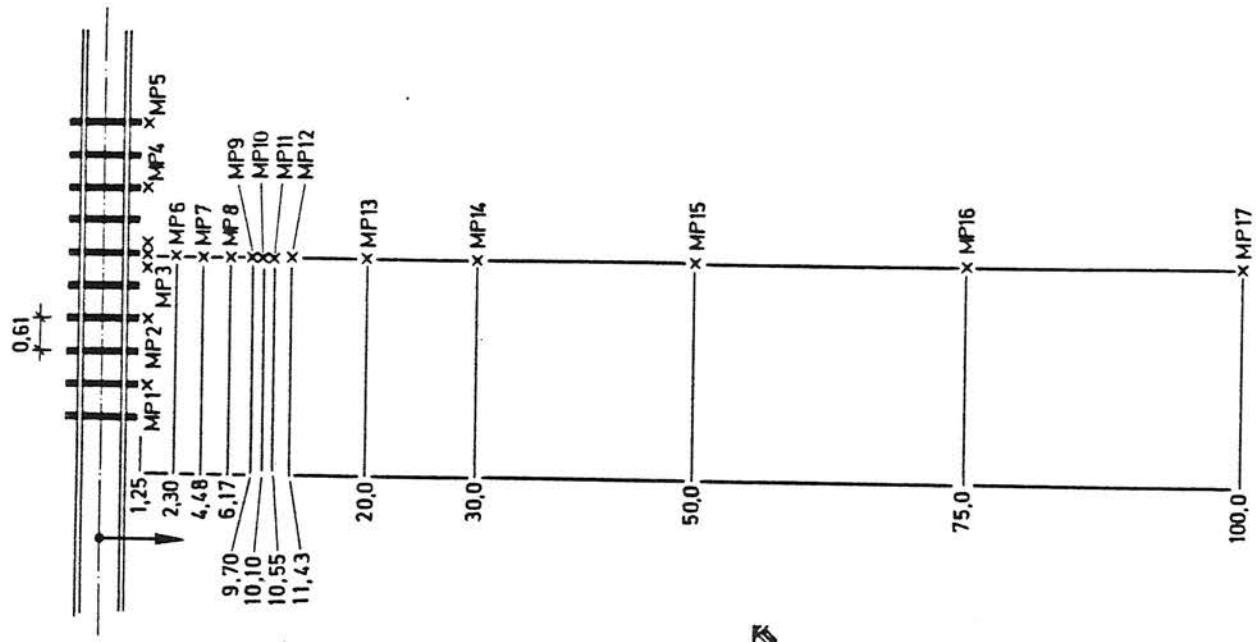


**Oberbau auf fester Fahrbahn
Gleis Dachau - Karlsfeld**

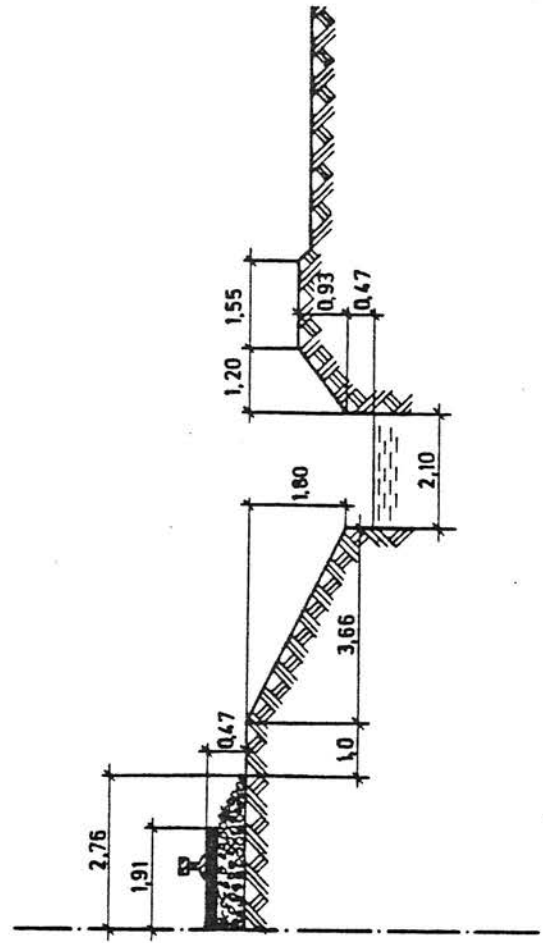
B2-1 Lage der Meßreihen



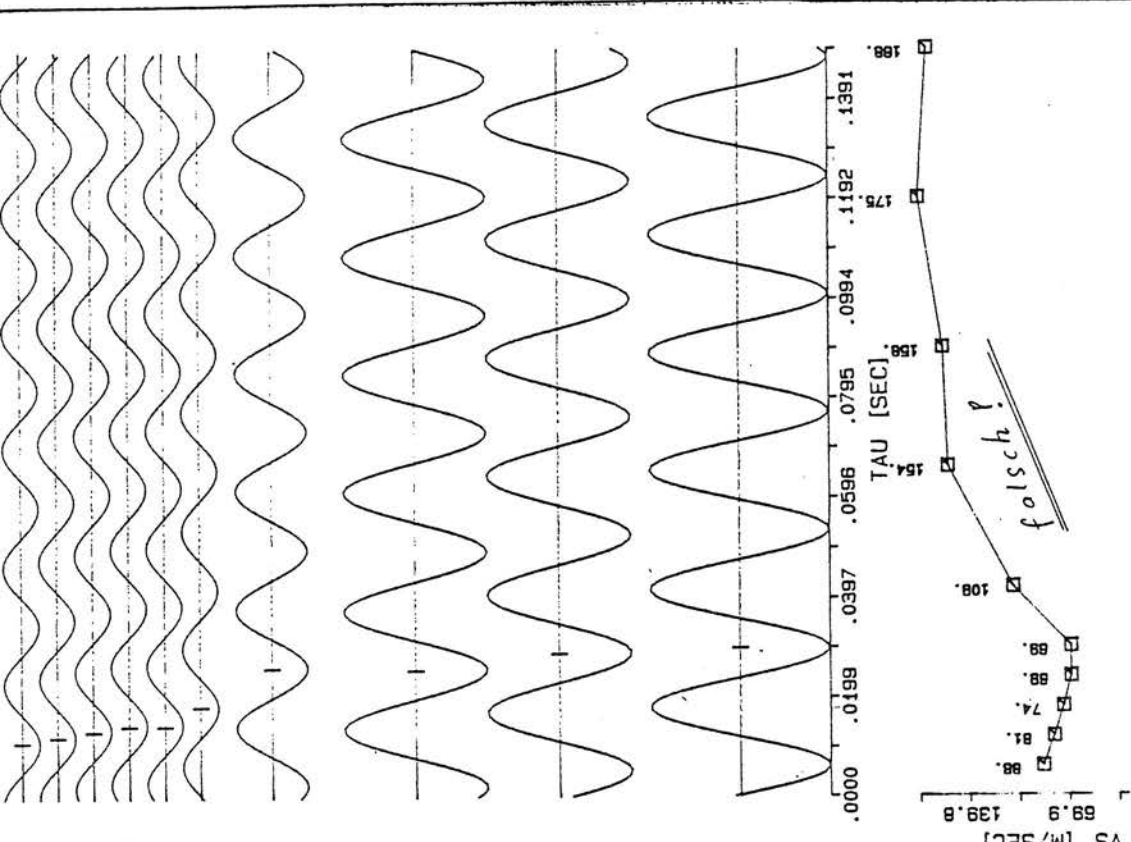
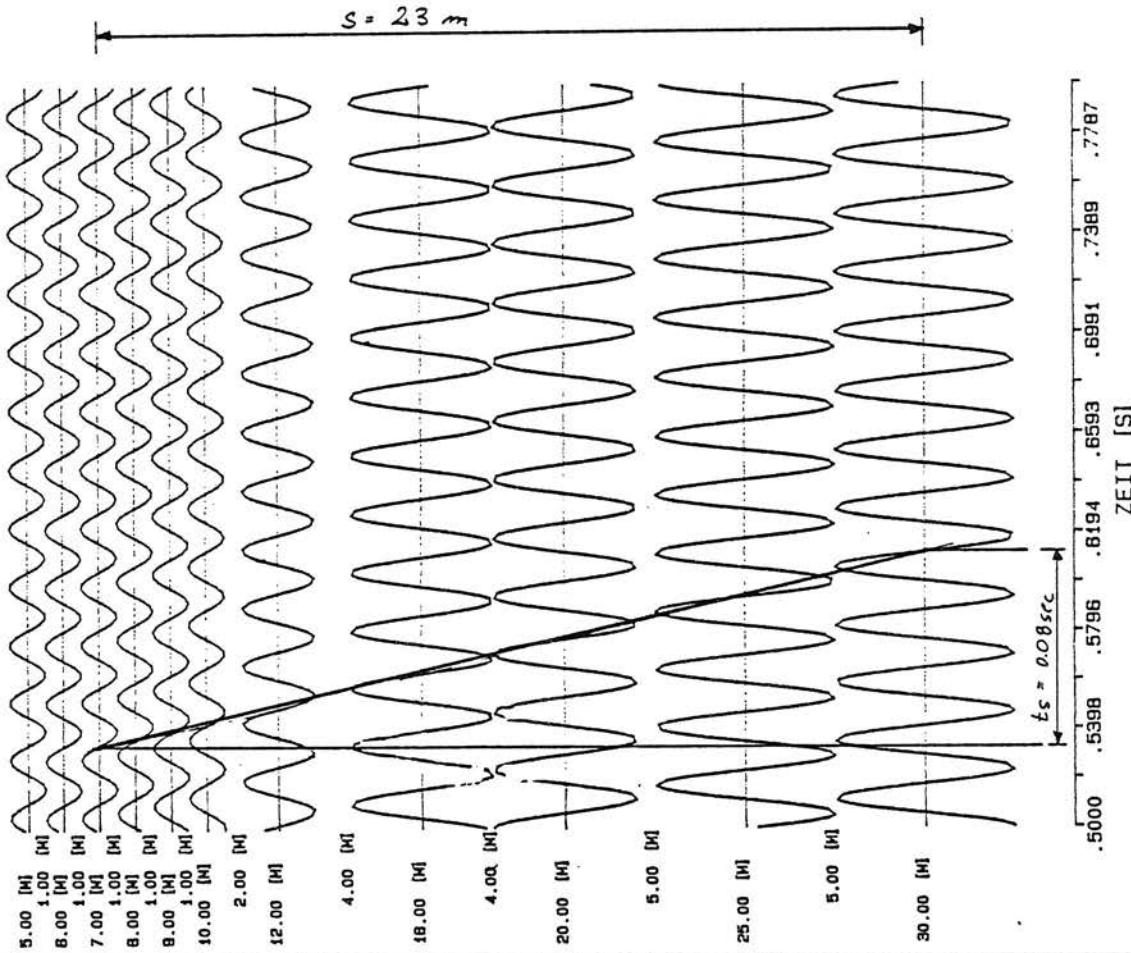
Meßreihe 1
Oberbau: Schwelle/Schotter



Meßreihe 2
Oberbau: Feste Fahrbahn



B2-2 Meßort 2
Anordnung der Meßpunkte/Geländeschnitt



B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BAUGRUNDYNIK
 ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

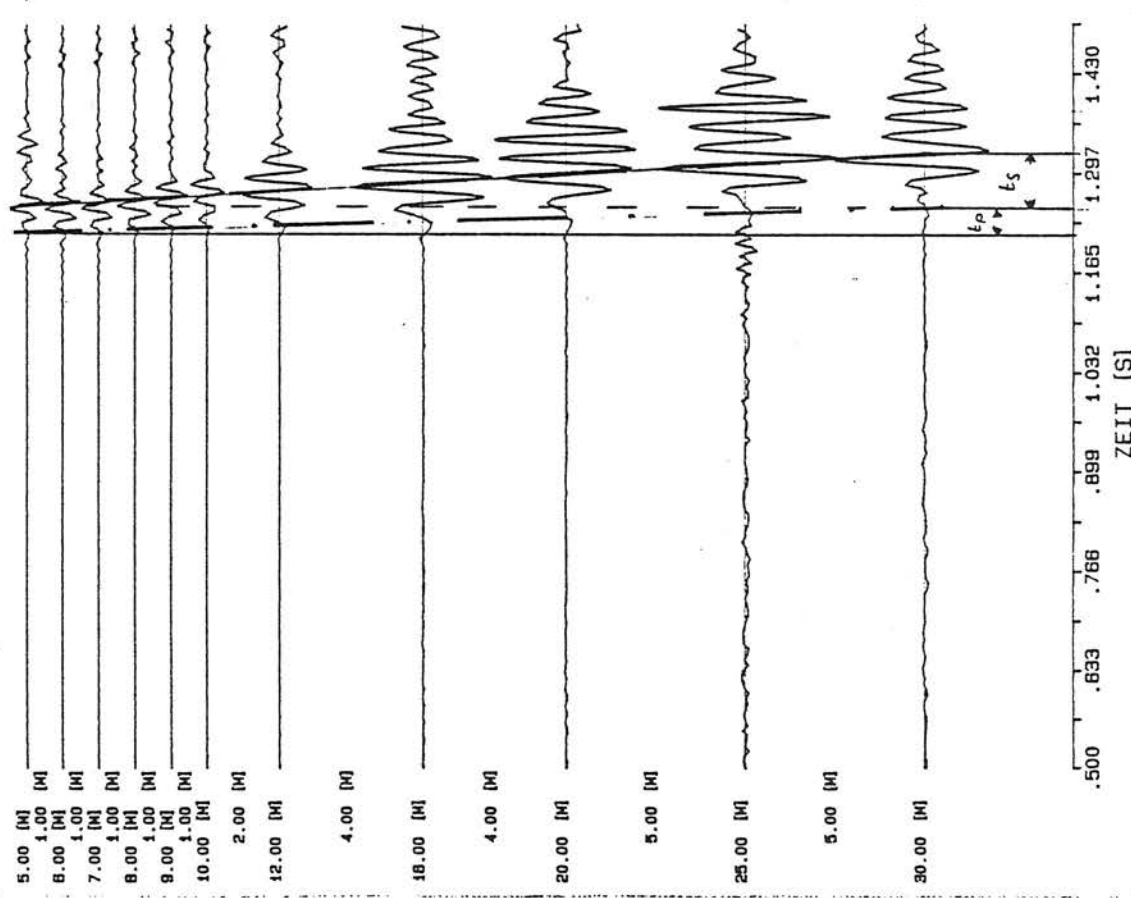
SCHWINGERMESSUNG DACHAU 45 HZ
 $V_S = \frac{s}{t_s} = 287.5 \text{ m/sec}$

LAUFZEITEN

BLATT NR. 1

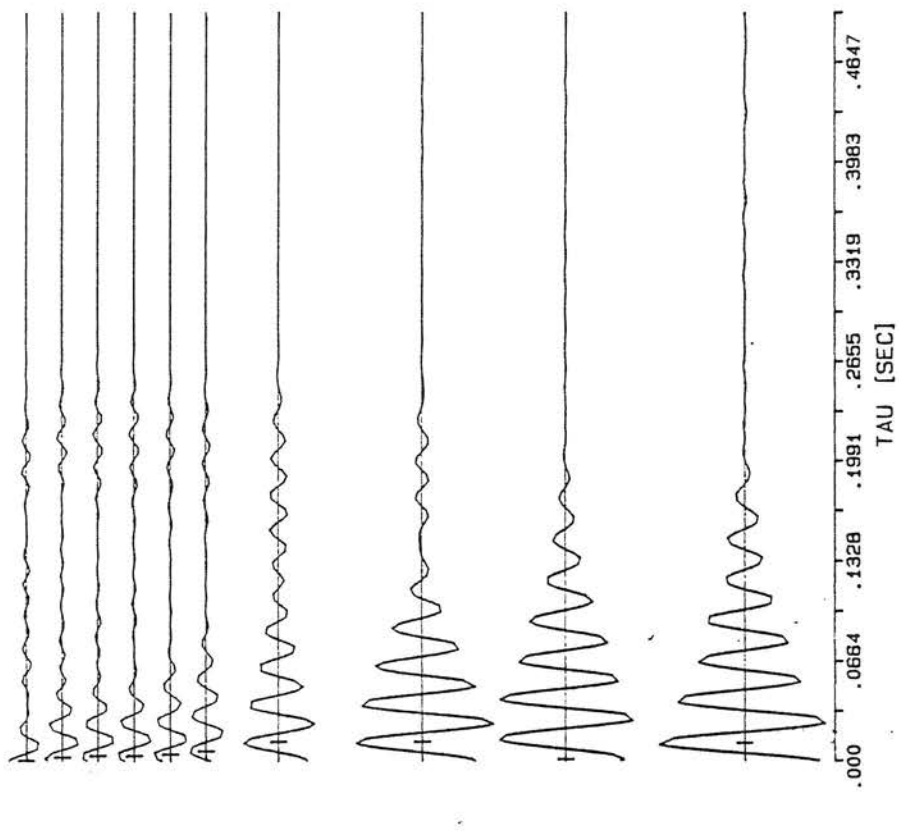
B2-3 Laufzeitbestimmung

1 A



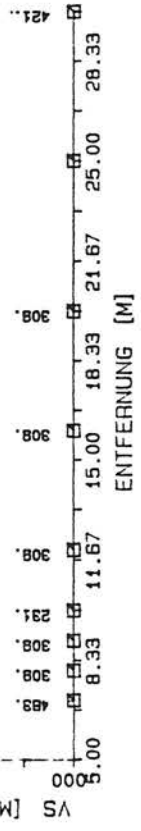
B A M BERLIN
LABOR 2.32
BAUGRUNDYNAMIK
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

IMPULSMESSUNG DACHAU $t_p = 0.037 \text{ scc}$
LAUFZEITEN $t_s = 0.075 \text{ scc}$

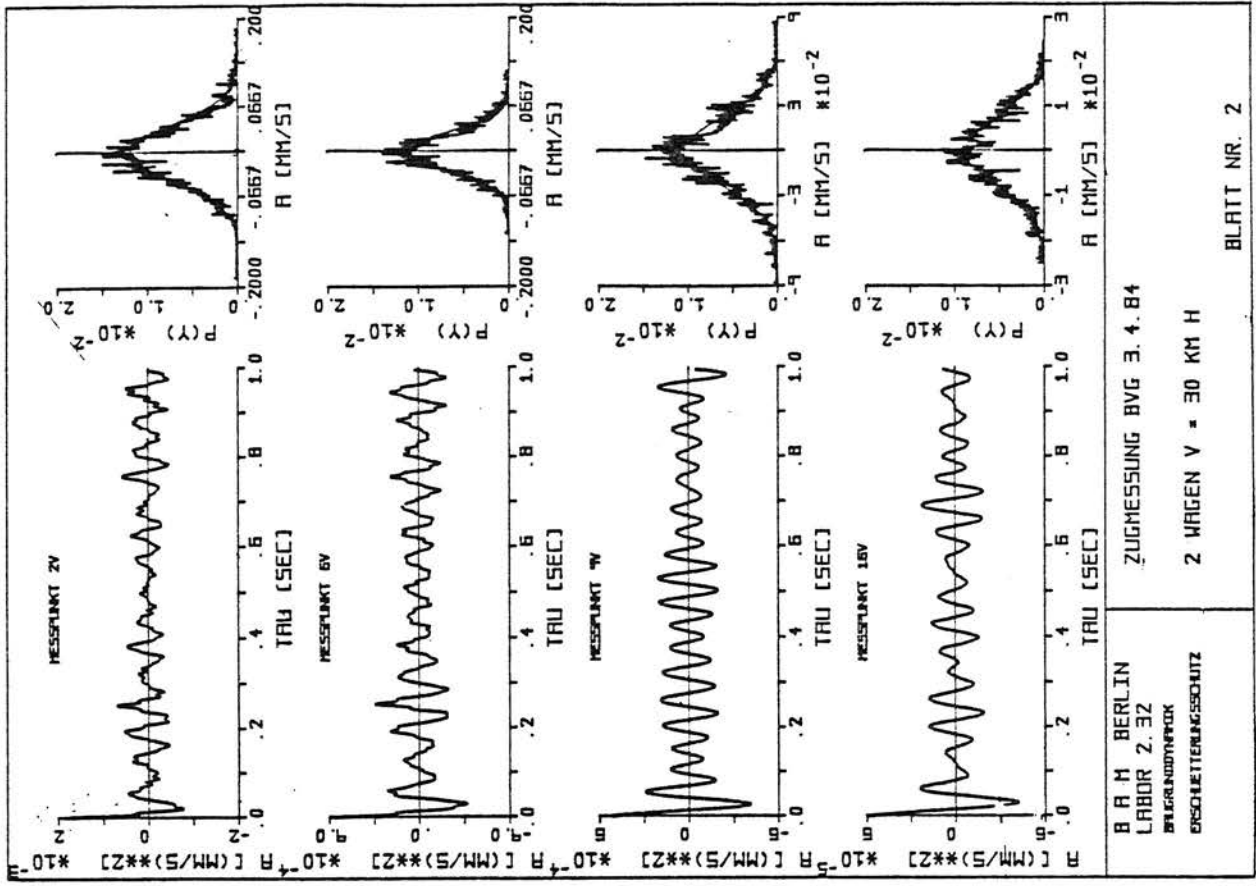
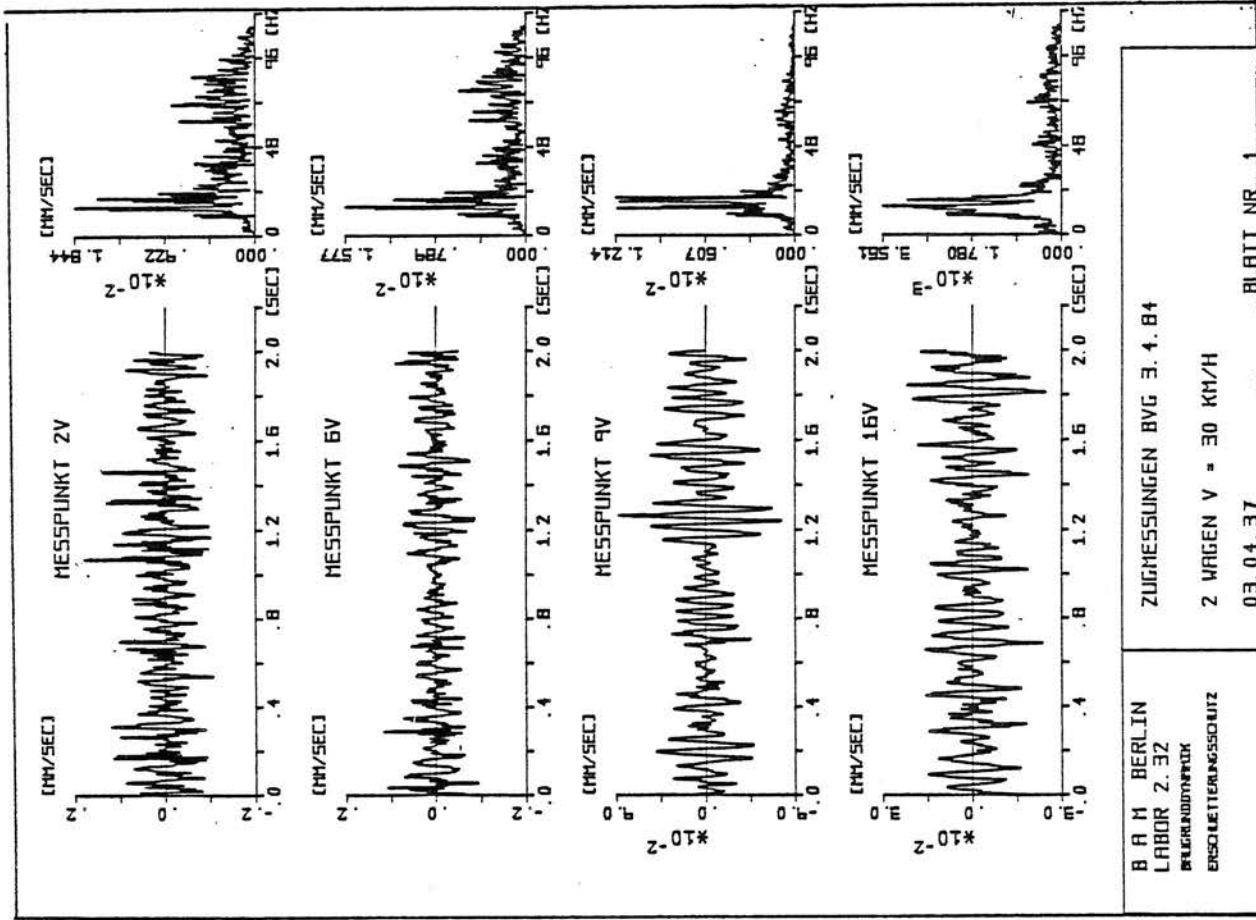


$$V_P = \frac{s}{t_P} = \frac{676 \text{ m}}{\text{scc}}$$

$$V_S = \frac{s}{t_S} = \frac{333 \text{ m}}{\text{scc}}$$

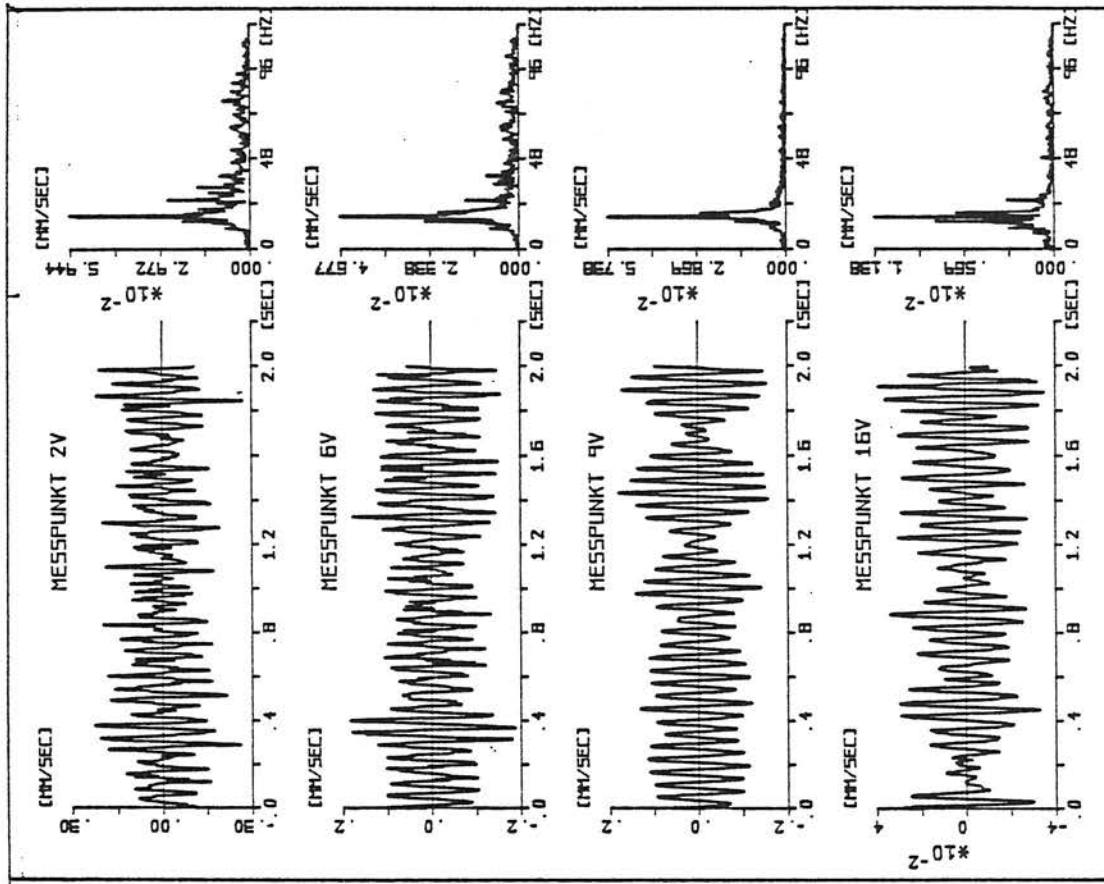


A N H A N G C I



C1-1 Zeitverläufe/Frequenzspektren

Autokorrelationsfunktion/Histogramm



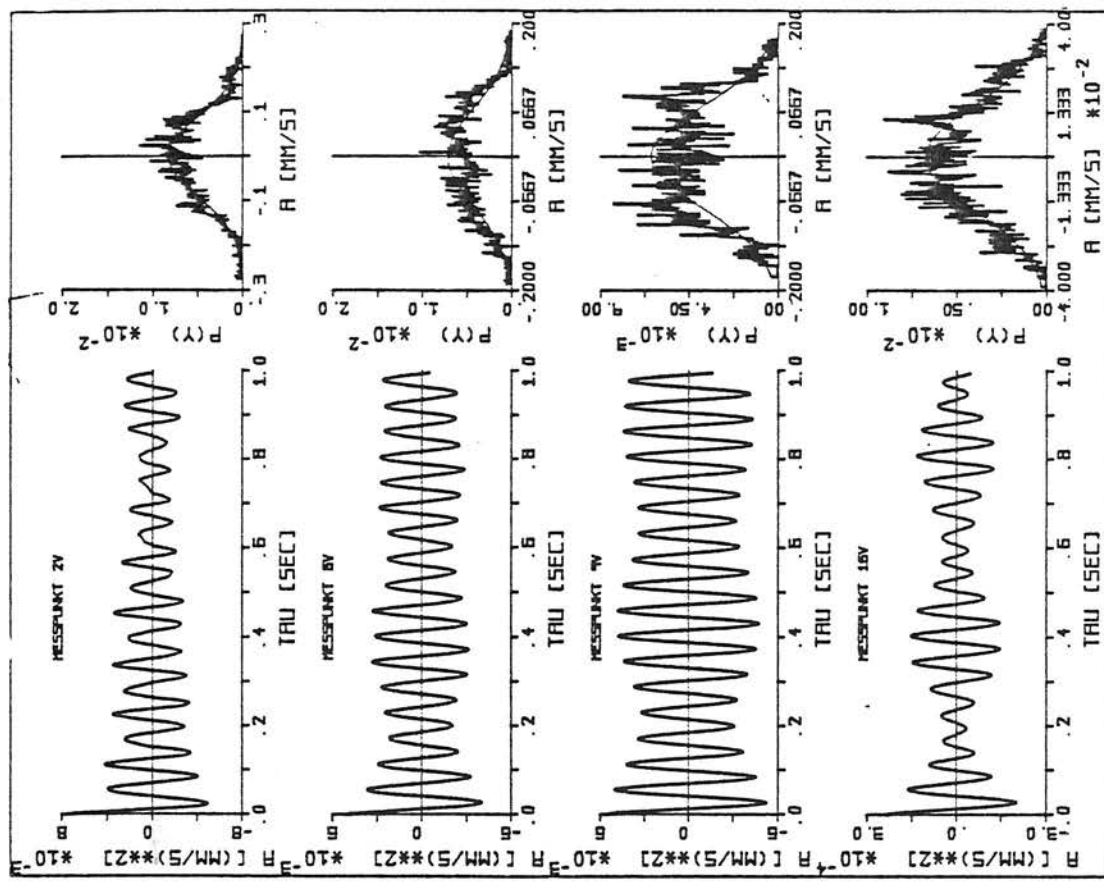
B A M BERLIN
LABOR 2.32
BELEGNUMMER
ERDSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ZUGMESSUNGEN BVG 3.4.84

2 WAGEN V = 50 KM/H

03.04.83

BLATT NR. 1

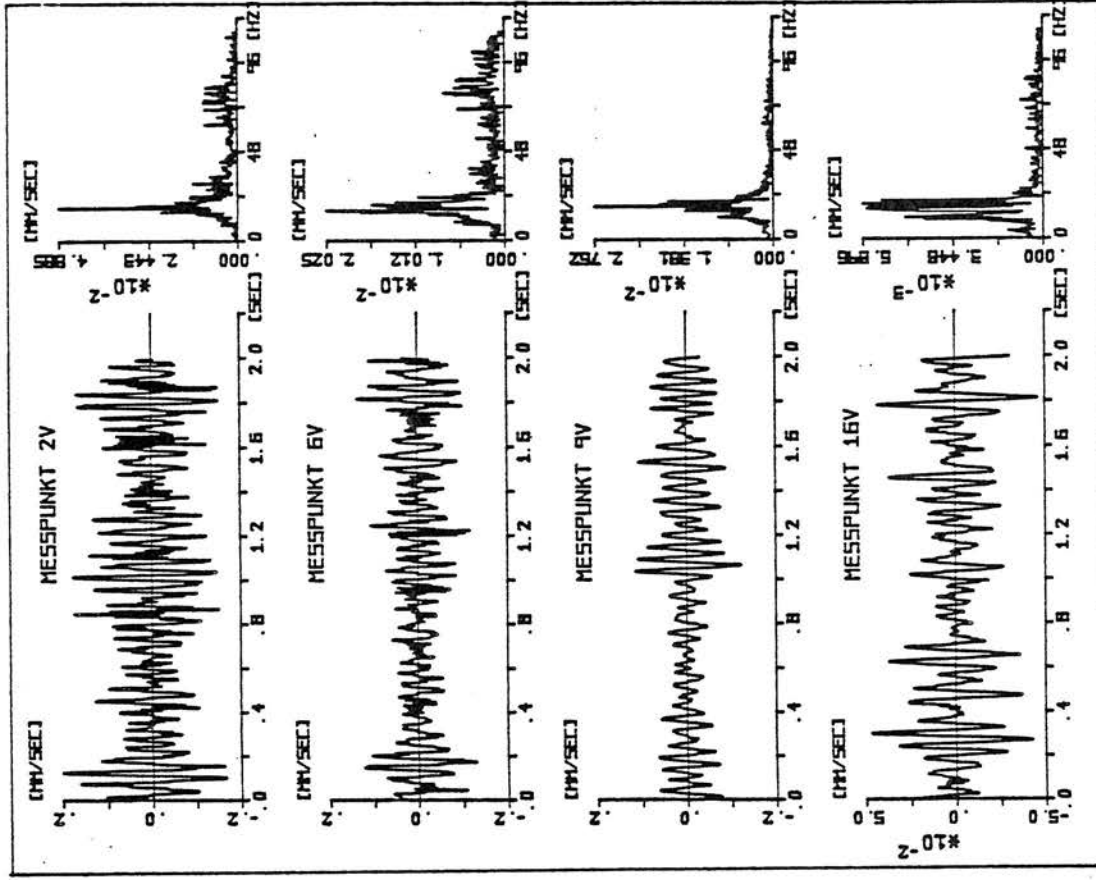


B A M BERLIN
LABOR 2.32
BELEGNUMMER
ERDSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ZUGMESSUNG BVG 3.4.84

2 WAGEN V = 50 KM/H

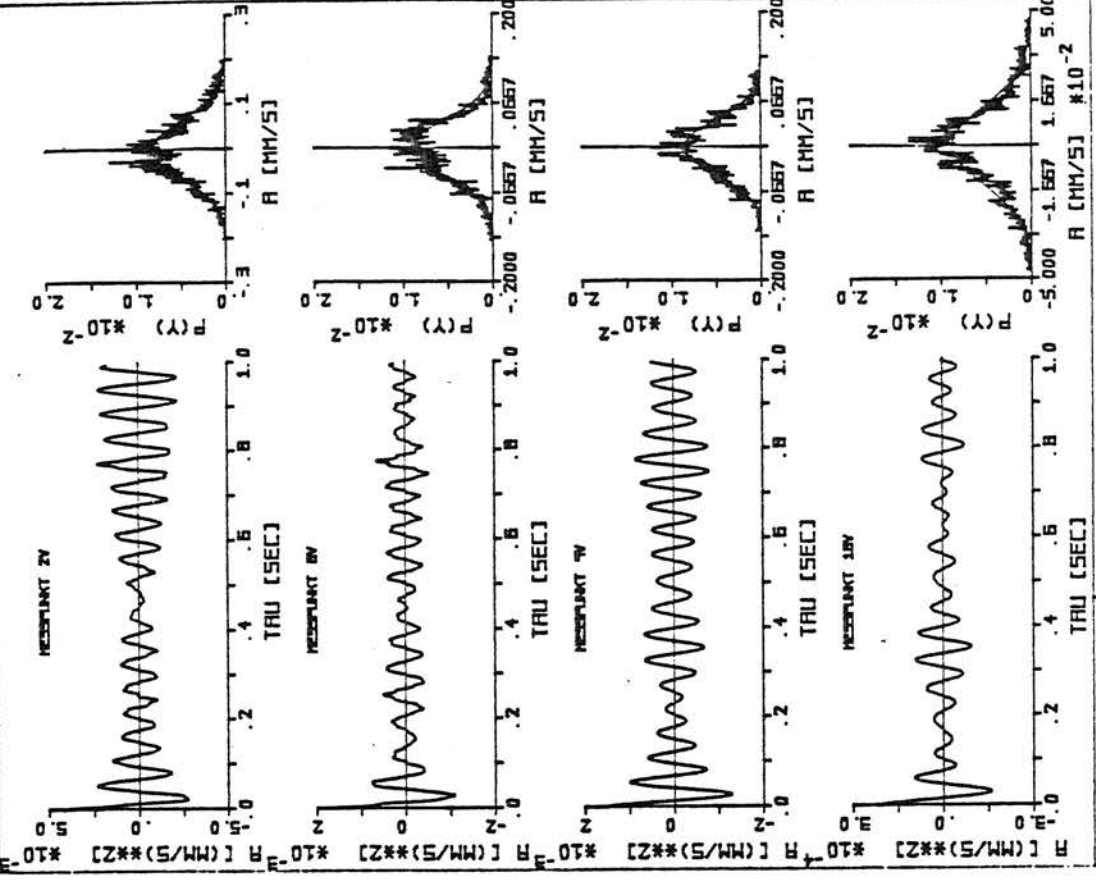
BLATT NR. 2



B R M BERLIN
LABOR 2.32
BREMSENSTÄBE
ERSCHEINUNGSSCHUTZ

ZUGMESSUNGEN BVG 3.4.84
4 WÄGEN V = 30 KM/H
03.04.24

BLATT NR. 1



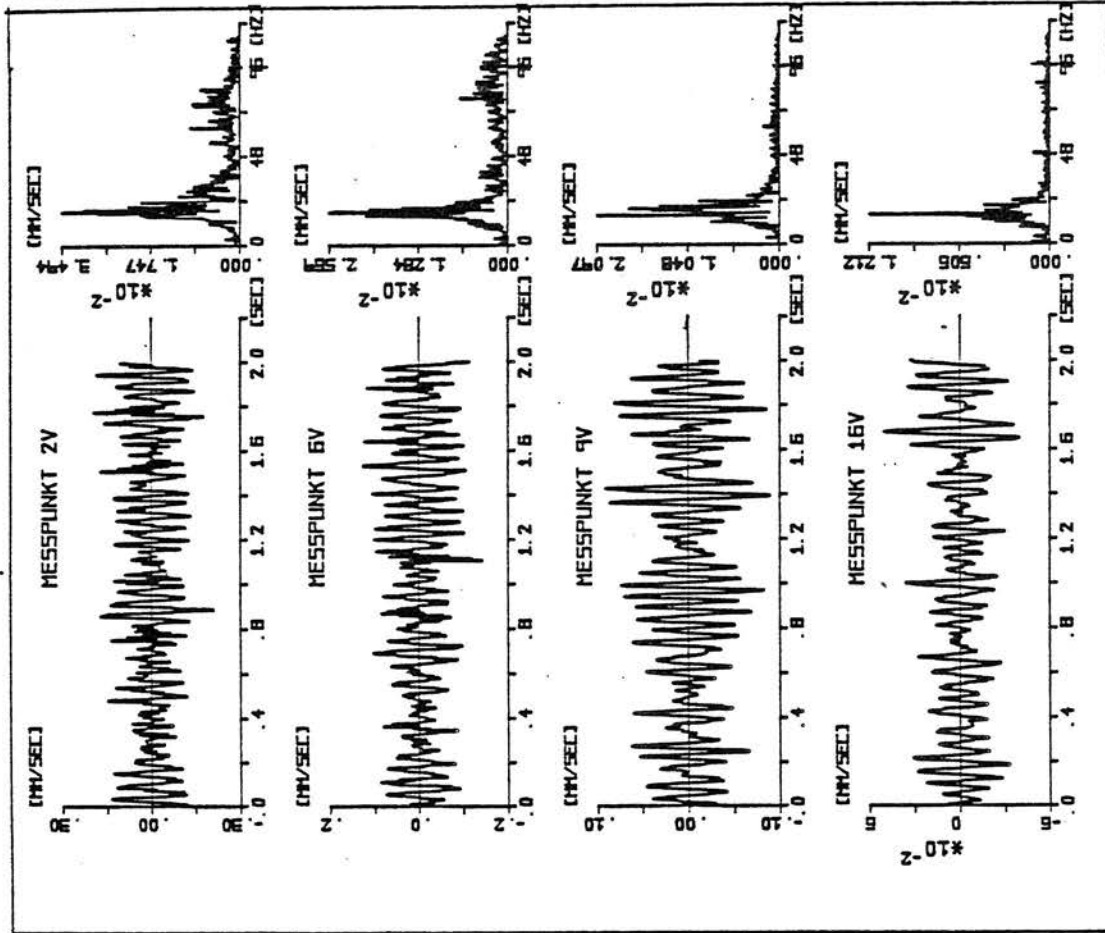
B R M BERLIN
LABOR 2.32
BREMSENSTÄBE
ERSCHEINUNGSSCHUTZ

ZUGMESSUNG BVG 3.4.84
4 WÄGEN V = 30 KM/H

BLATT NR. 2

C1-3 Zeitverläufe/Frequenzspektren

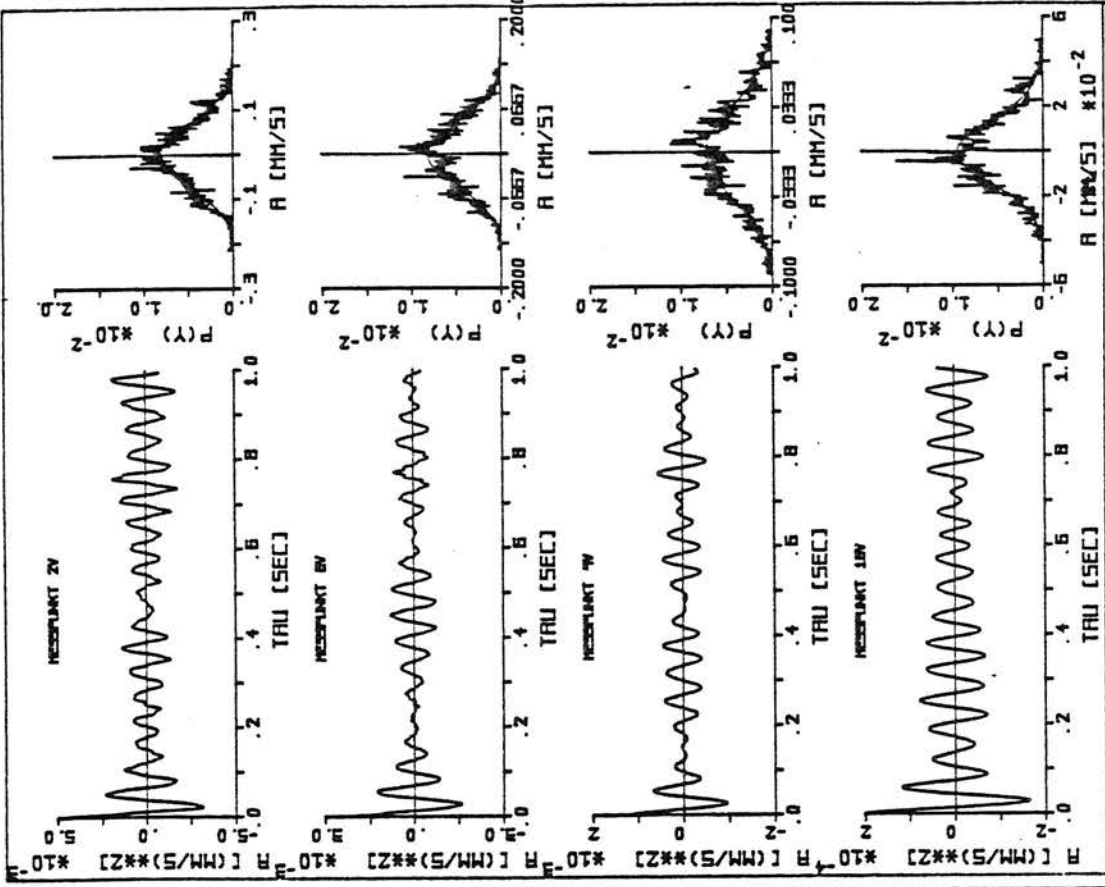
Autokorrelationsfunktion/Histogramm



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BILDFILMSYSTEM
PRODUKTIONSGESAMT

ZUGMESSUNGEN BVG 3.4.84
6 WAGEN V = 30 KM/H
03.04.17

BLATT NR. 1



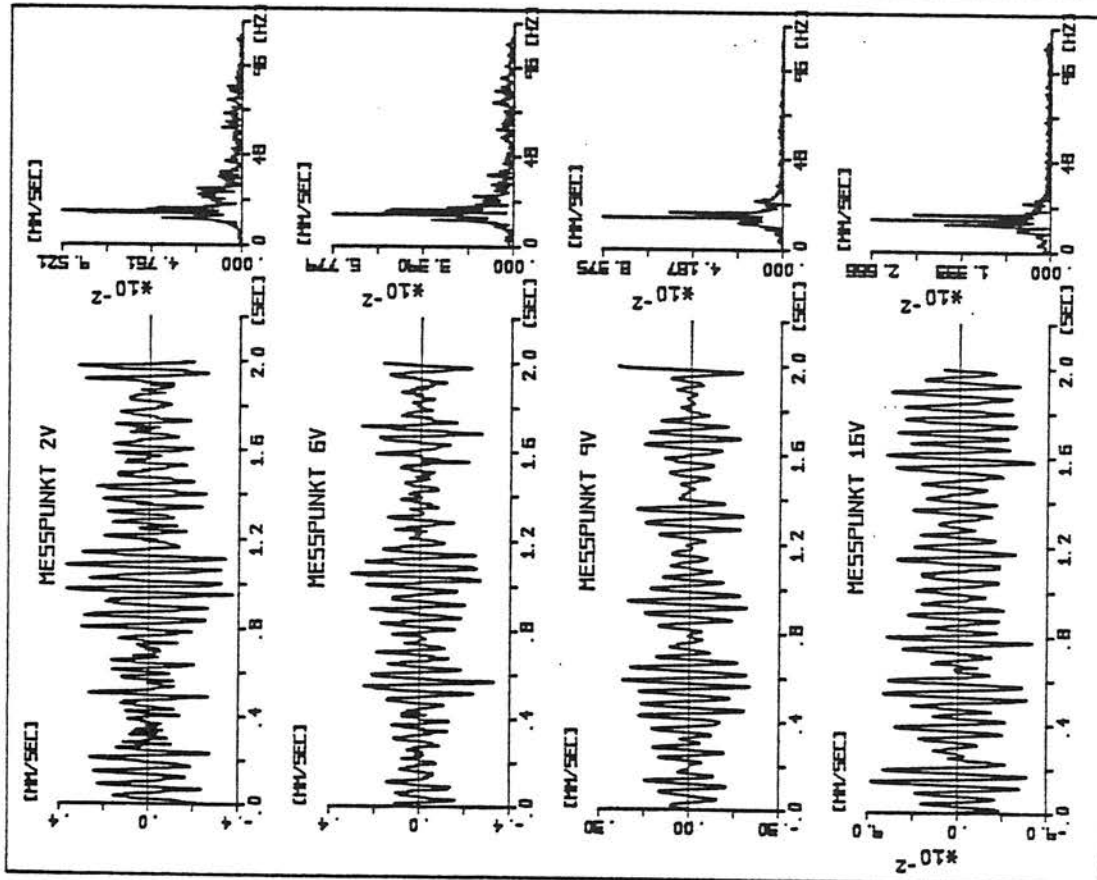
B A M BERLIN
LABOR 2.32
BILDFILMSYSTEM
PRODUKTIONSGESAMT

ZUGMESSUNG BVG 3.4.84
6 WAGEN V = 30 KM/H

BLATT NR. 2

CI-5 Zeitverläufe/Frequenzspektren

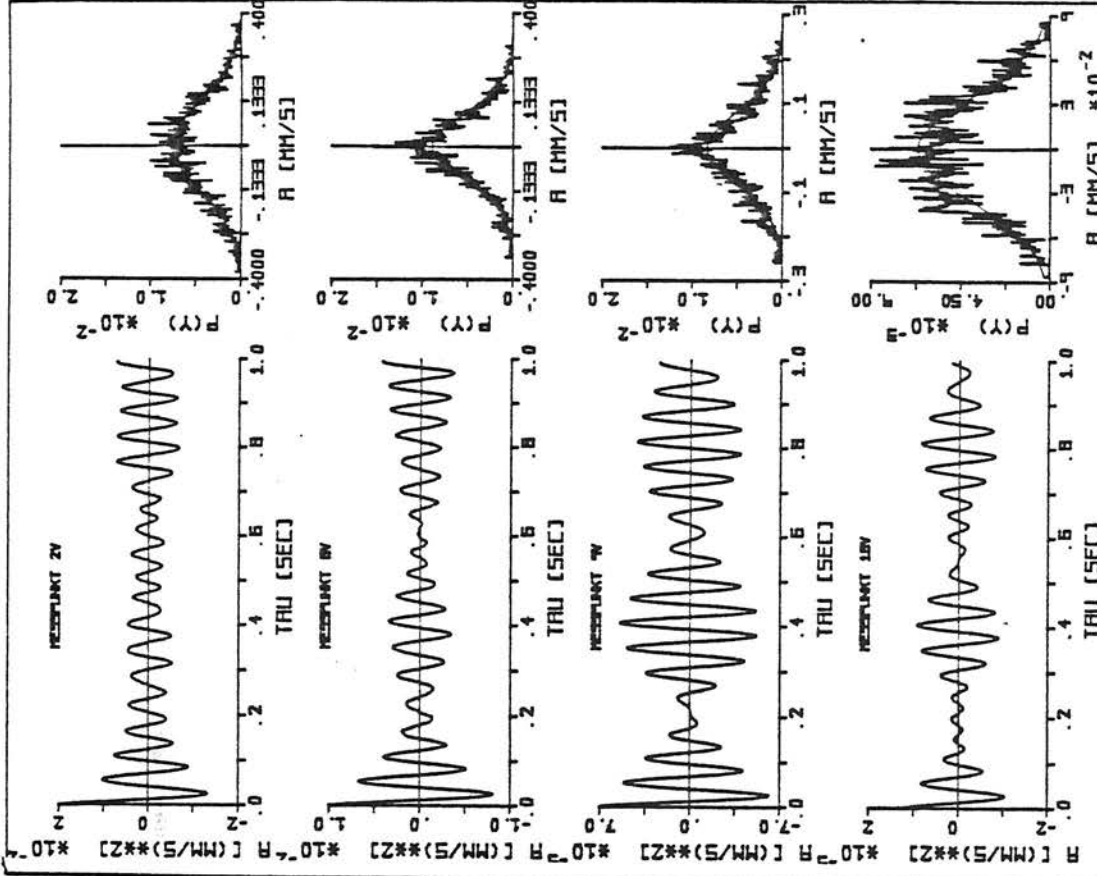
Autokorrelationsfunktion/Histogramm



B R M BERLIN
LABOR 2.32
BILDFORMUNG
PROLETARIATSSCHUTZ

ZUGMESSUNGEN BVG 3.4.84
6 WAGEN V = 50 KM/H
03.04.07

BLATT NR. 1

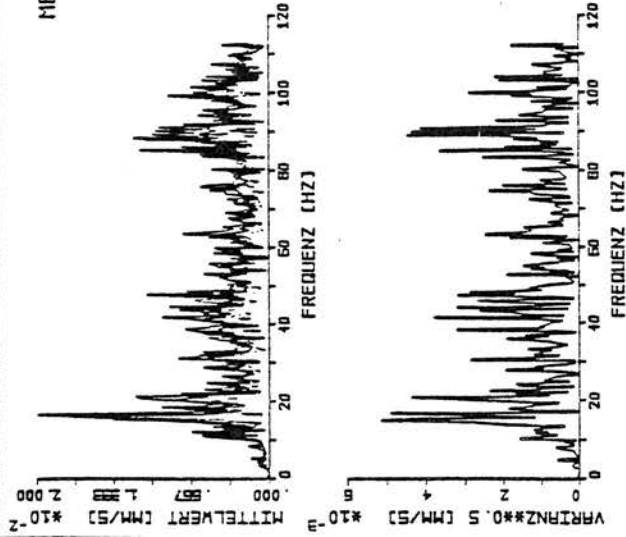


B R M BERLIN
LABOR 2.32
BILDFORMUNG
PROLETARIATSSCHUTZ

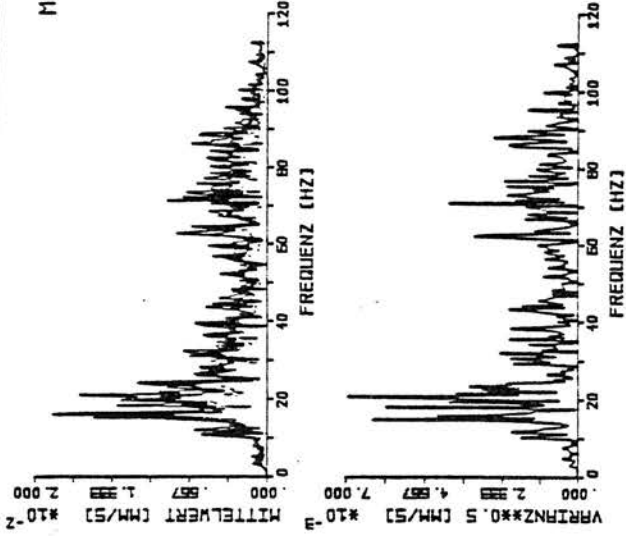
ZUGMESSUNG BVG 3.4.84
6 WAGEN V = 50 KM H

BLATT NR. 2

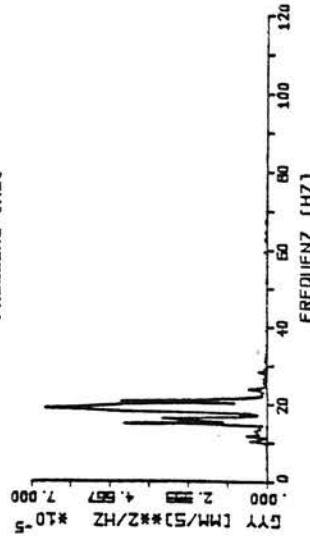
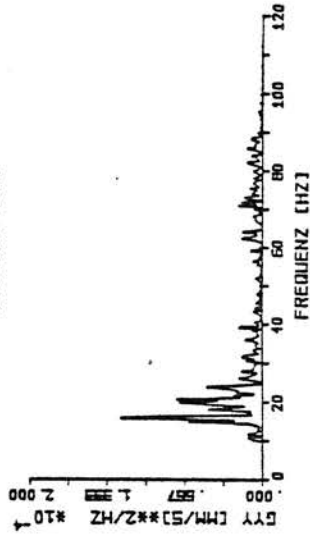
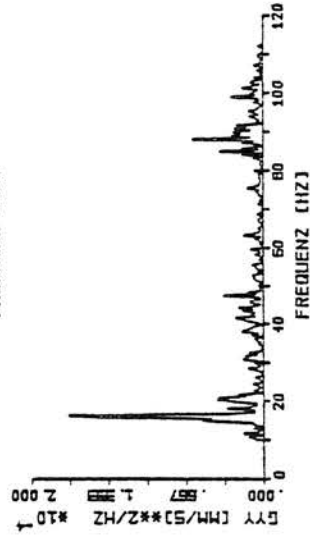
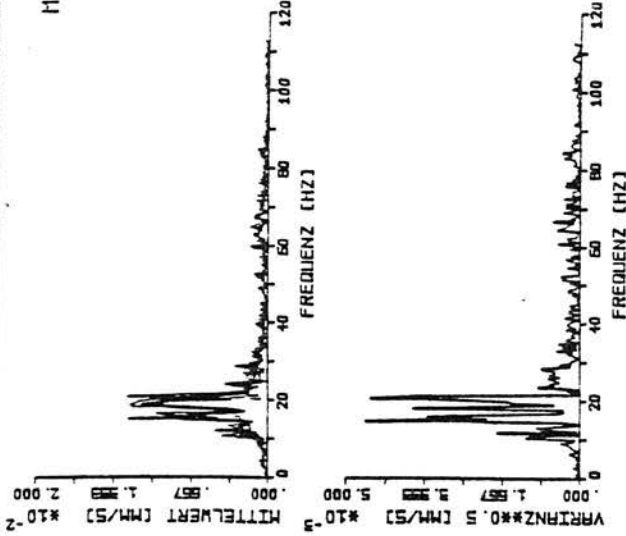
MESSPUNKT 1V



MESSPUNKT 2V



MESSPUNKT 3V



B A H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARIK
ERSCHEINUNGSGEWEINTE

ZUGMESSUNG BVG
2 WAGEN V= 30 KM/H

BLATT NR. 10

B A H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARIK
ERSCHEINUNGSGEWEINTE

ZUGMESSUNG BVG
2 WAGEN V= 30 KM/H

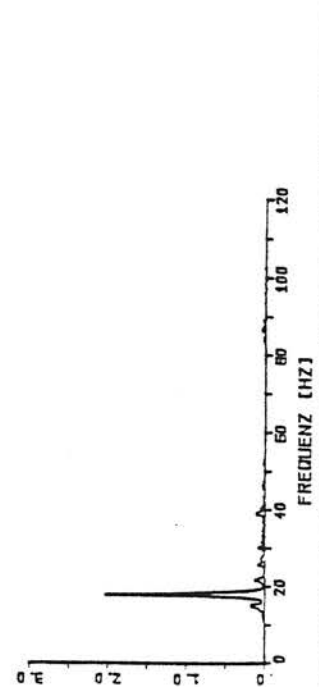
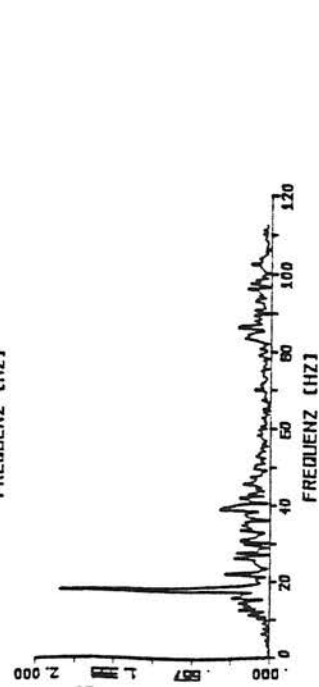
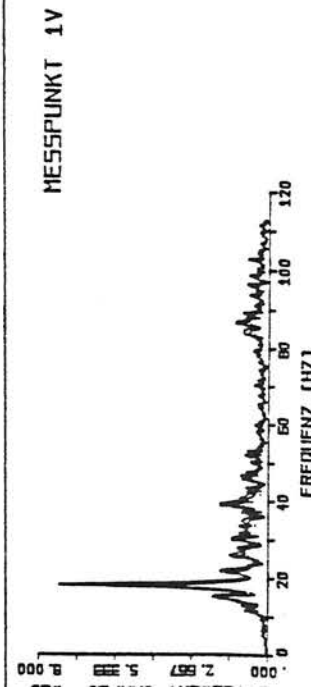
BLATT NR. 11

B A H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARIK
ERSCHEINUNGSGEWEINTE

ZUGMESSUNG BVG
2 WAGEN V= 30 KM/H

BLATT NR. 20

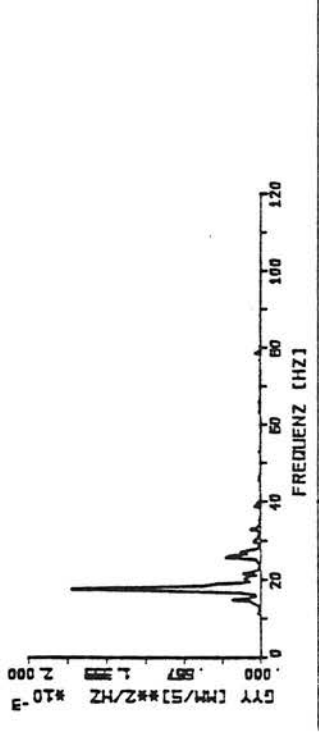
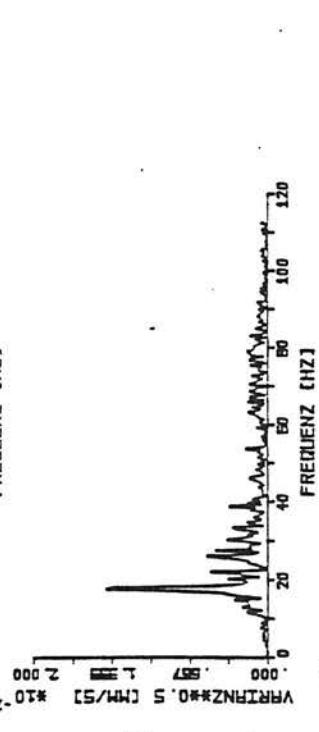
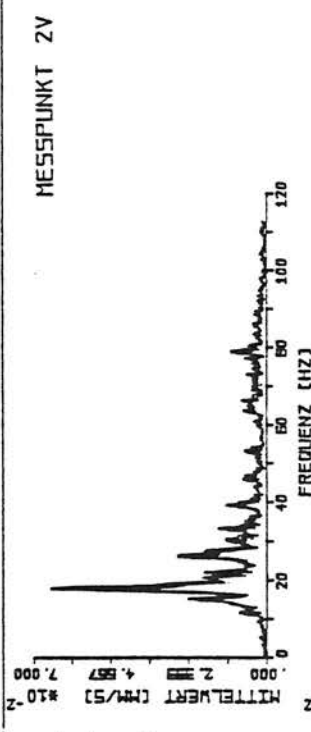
C1-7 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
Standardabweichung
Mittelwert der spektralen Leistungsdichte



A H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTAR
ERSCHEINUNGSDATUM

ZUGMESSUNG BVG
2 WAGEN V=50 KM/H

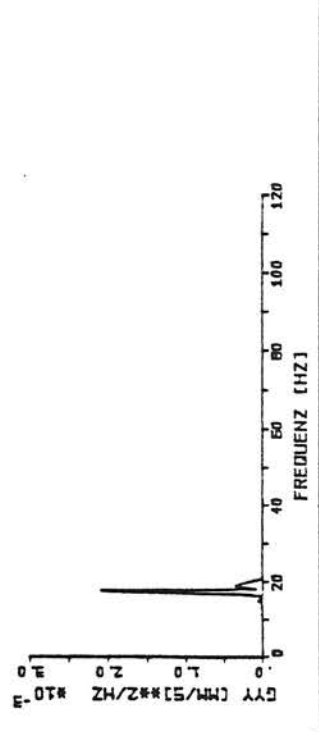
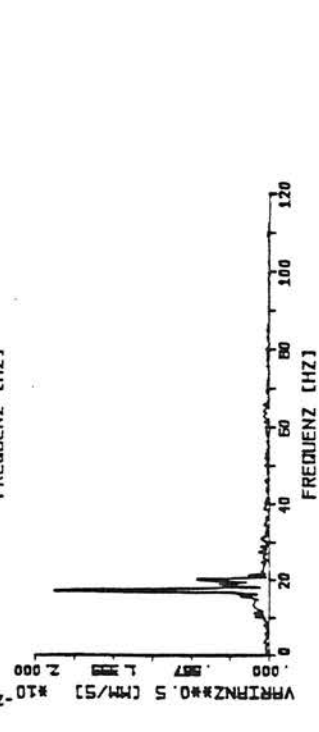
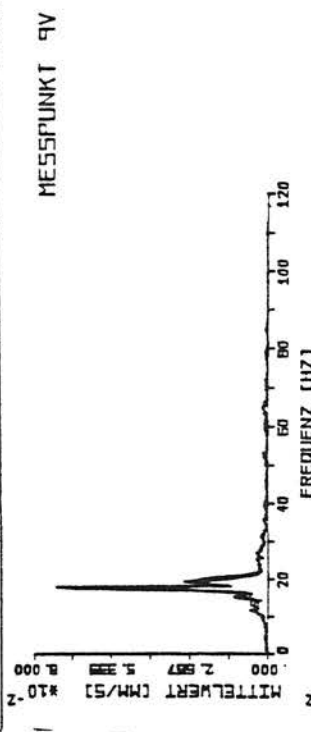
BLATT NR. 13



A H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTAR
ERSCHEINUNGSDATUM

ZUGMESSUNG BVG
2 WAGEN V=50 KM/H

BLATT NR. 14



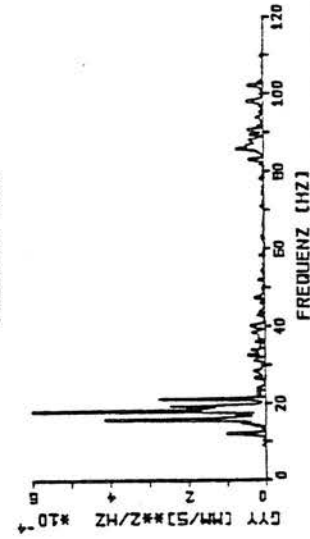
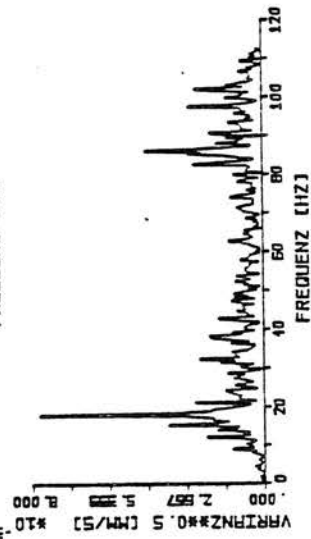
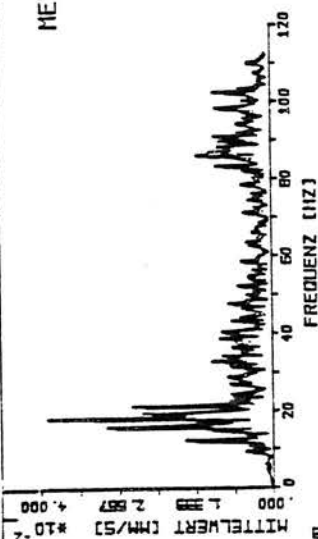
A H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTAR
ERSCHEINUNGSDATUM

ZUGMESSUNG BVG
2 WAGEN V=50 KM/H

BLATT NR. 15

C1-8 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
Standardabweichung
Mittelwert der spektralen Leistungsdichte

MESSPUNKT 1V

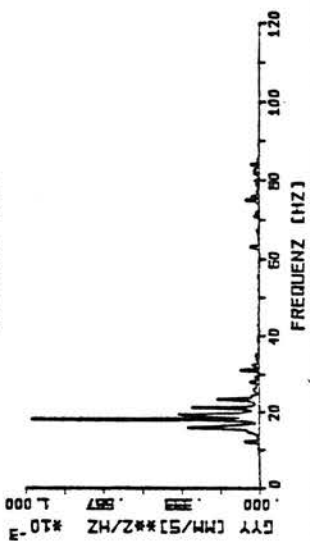
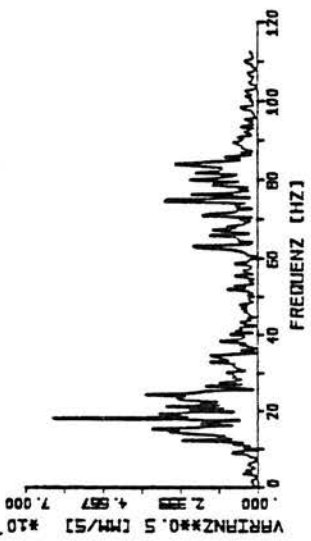
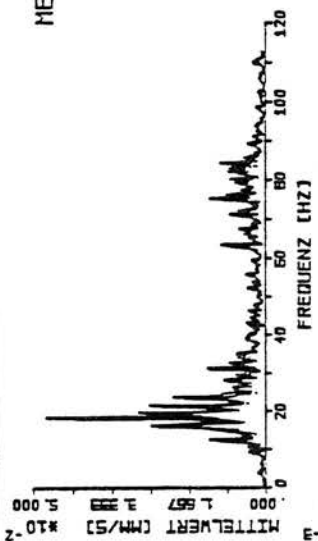


B R H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARTECHNIK
ERSCHEINUNGSBEZUGSZEIT

ZUGMESSUNG BVG
4 WAGEN V= 30 KM/H

BLATT NR. 7

MESSPUNKT 2V

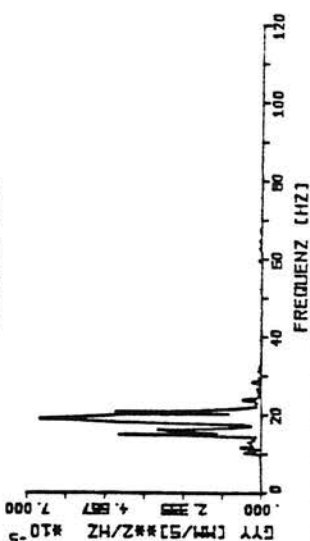
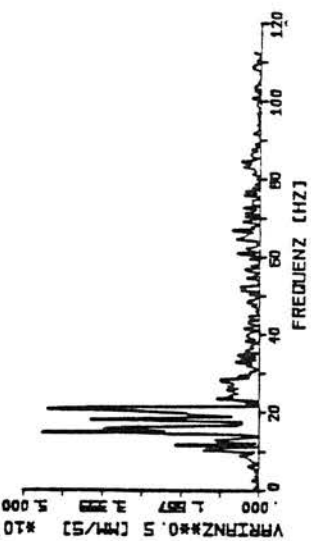
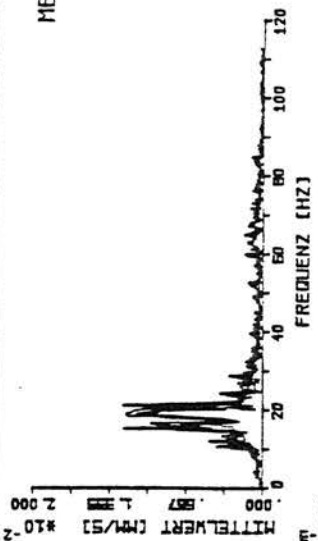


B R H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARTECHNIK
ERSCHEINUNGSBEZUGSZEIT

ZUGMESSUNG BVG
4 WAGEN V= 30 KM/H

BLATT NR. 8

MESSPUNKT 3V



B R H BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARTECHNIK
ERSCHEINUNGSBEZUGSZEIT

ZUGMESSUNG BVG
2 WAGEN V= 30 KM/H

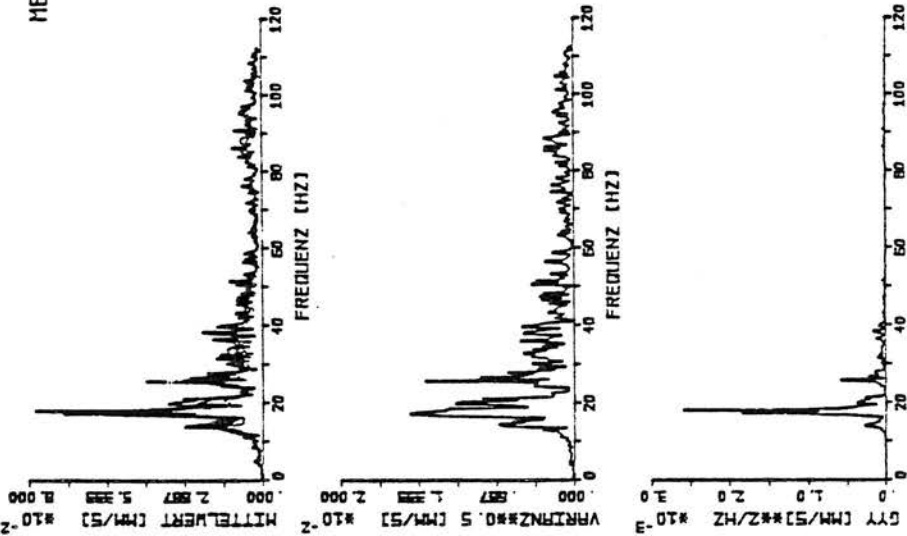
BLATT NR. 20

CI-9 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
Standardabweichung
Mittelwert der spektralen Leistungsdichte

MESSPUNKT 1V	MESSPUNKT 2V	MESSPUNKT
B A H BERLIN LABOR 2.32 BELEGSTÄTTE ERSCHEINUNGSSTUFE	B A H BERLIN LABOR 2.32 BELEGSTÄTTE ERSCHEINUNGSSTUFE	B A H BERLIN LABOR 2.32 BELEGSTÄTTE ERSCHEINUNGSSTUFE
ZUGMESSUNG BVG	ZUGMESSUNG BVG	ZUGMESSUNG BVG
6 WAGEN V= 30 KM/H	6 WAGEN V= 30 KM/H	6 WAGEN V= 30 KM/H
BLATT NR. 4	BLATT NR. 5	BLATT NR. 6

CI-10 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
 Standardabweichung
 Mittelwert der spektralen Leistungsdichte

MESSPUNKT 1V

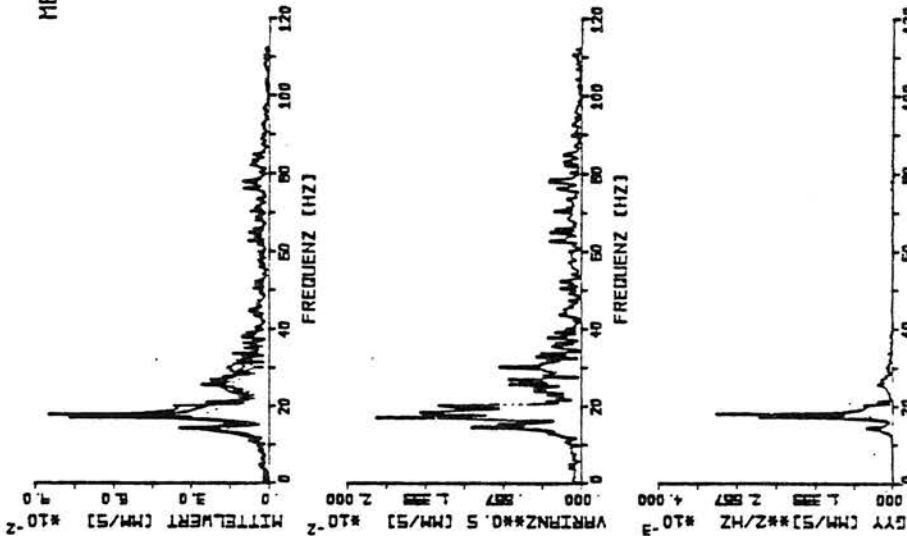


B A M BERLIN
LABOR 2.32
INFLUENZMETER
ERDSCHÜTTUNGSSCHUTZ

ZUGMESSUNG BVG
6 WAGEN V = 50 KM/H

BLATT NR. 1

MESSPUNKT 2V

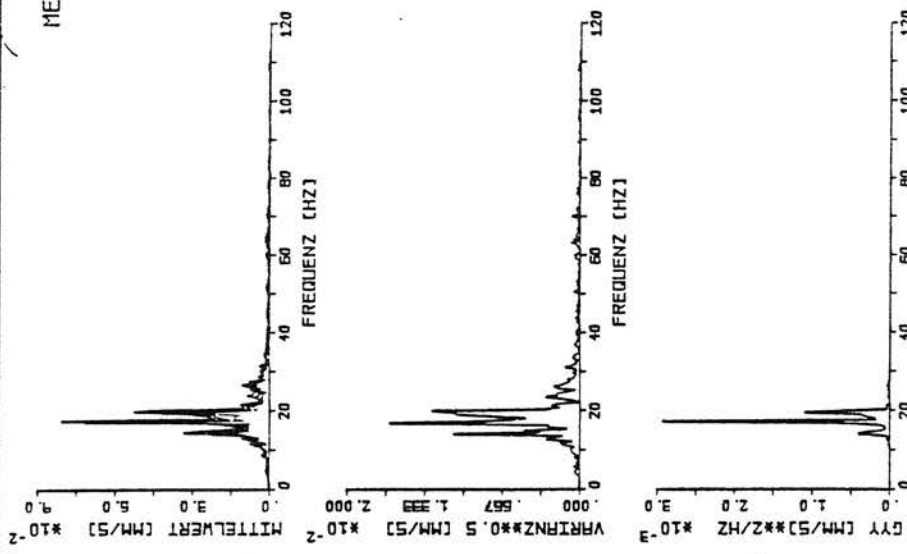


B A M BERLIN
LABOR 2.32
INFLUENZMETER
ERDSCHÜTTUNGSSCHUTZ

ZUGMESSUNG BVG
6 WAGEN V = 50 KM/H

BLATT NR. 2

MESSPUNKT 3

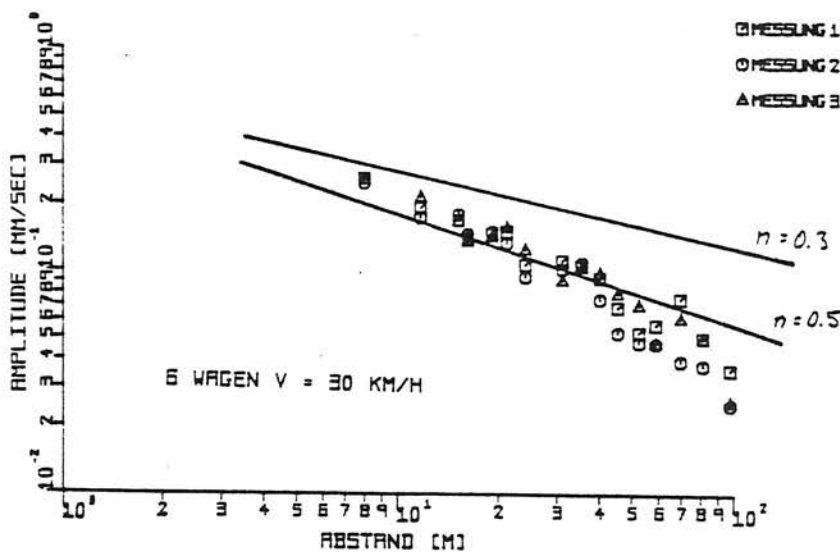
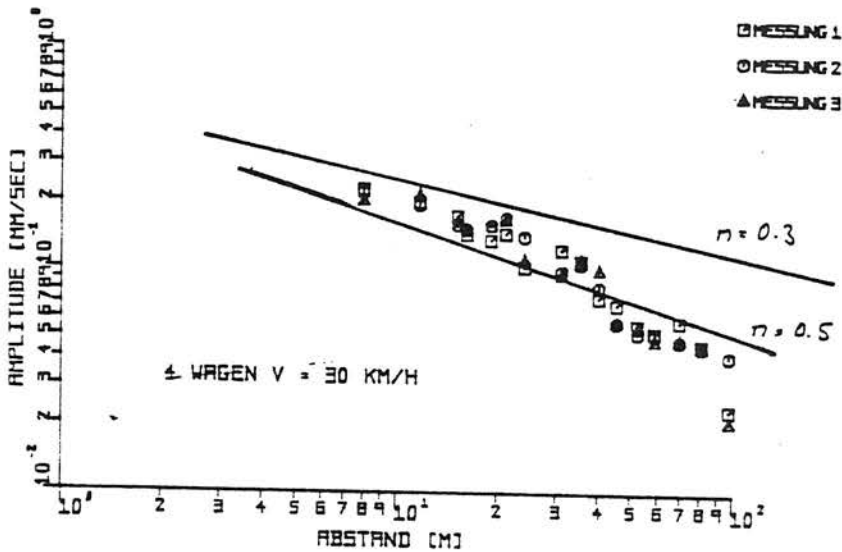
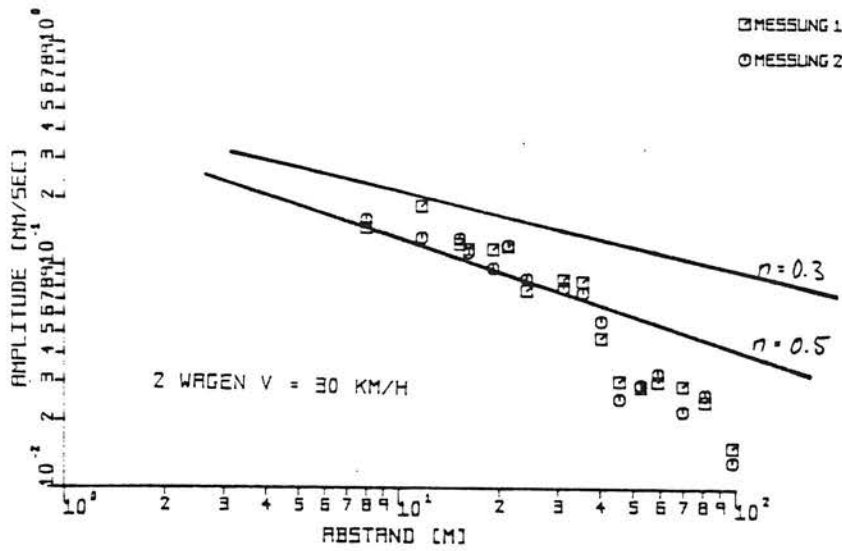


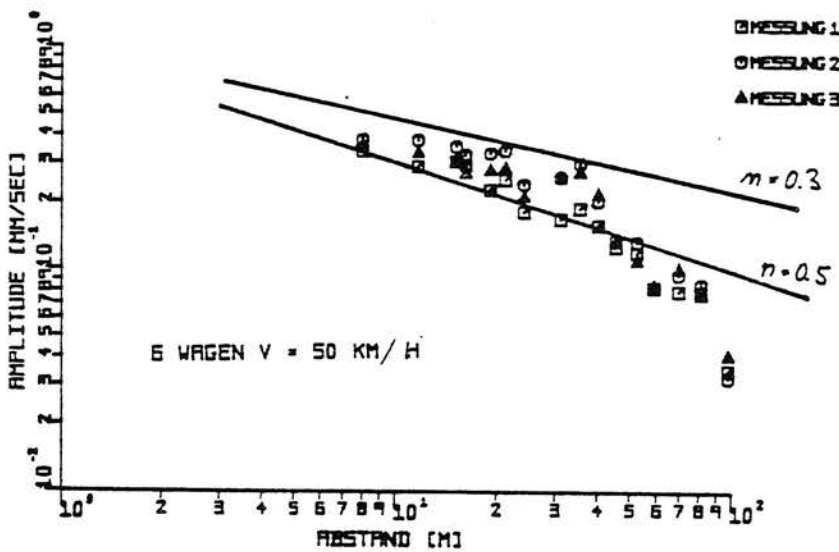
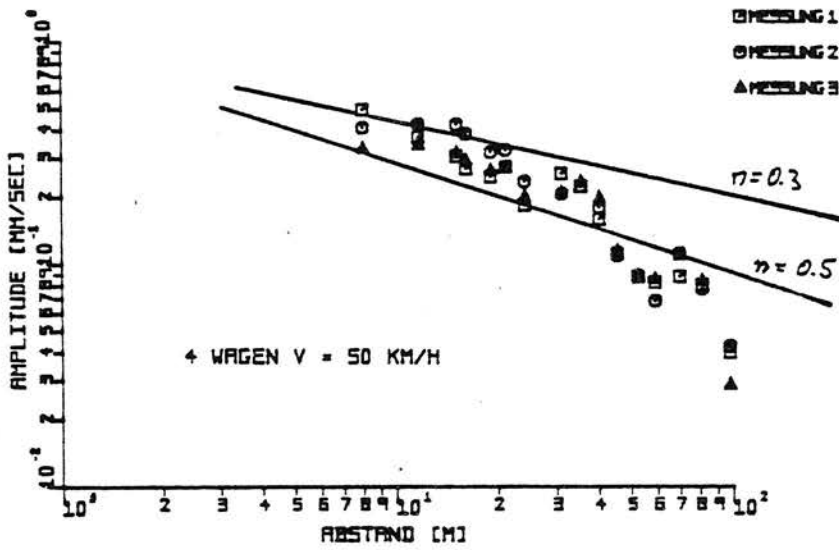
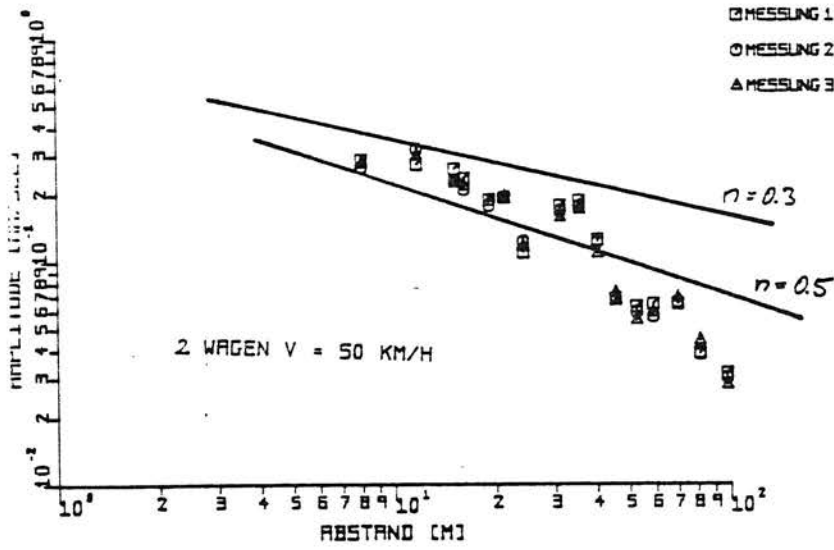
B A M BERLIN
LABOR 2.32
INFLUENZMETER
ERDSCHÜTTUNGSSCHUTZ

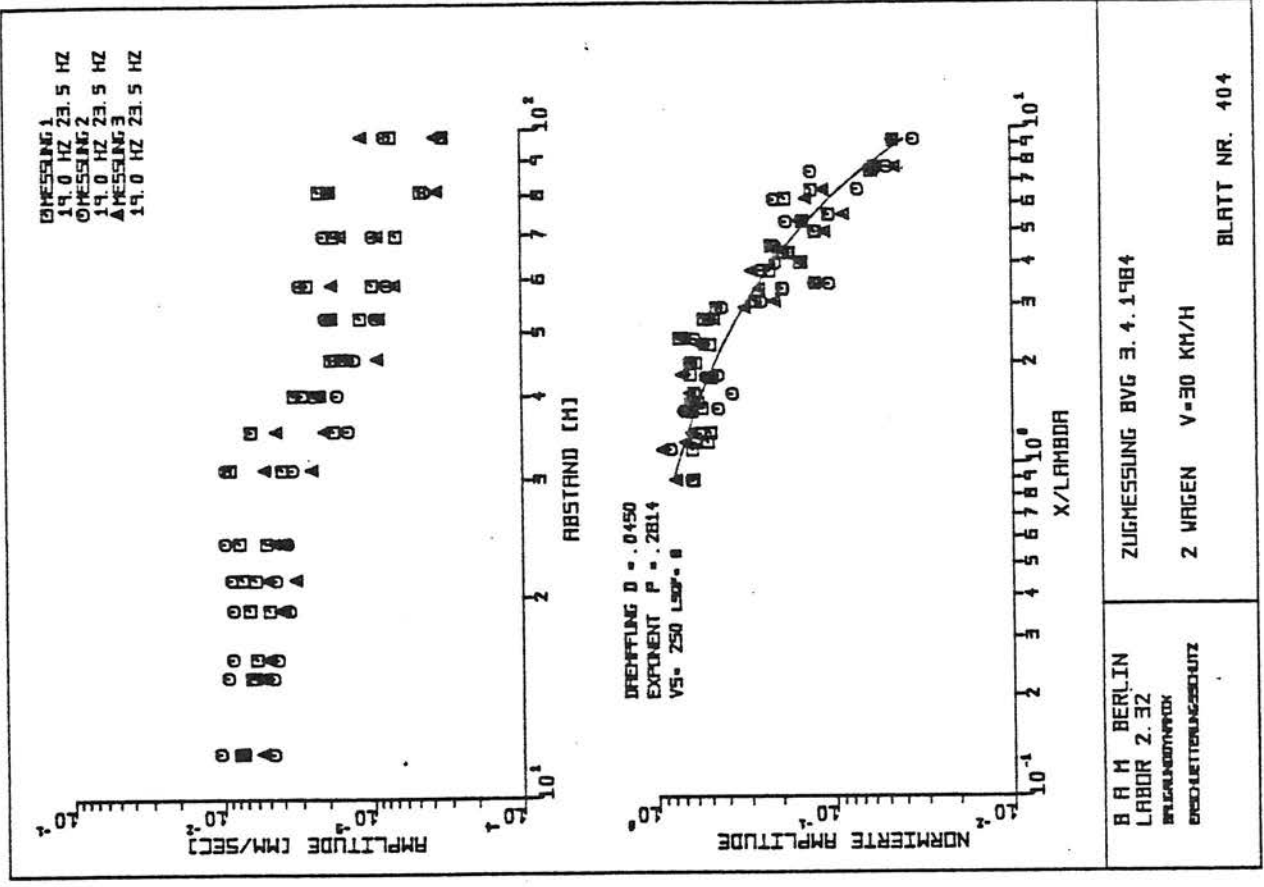
ZUGMESSUNG BVG
6 WAGEN V = 50 KM/H

BLATT NR. 3

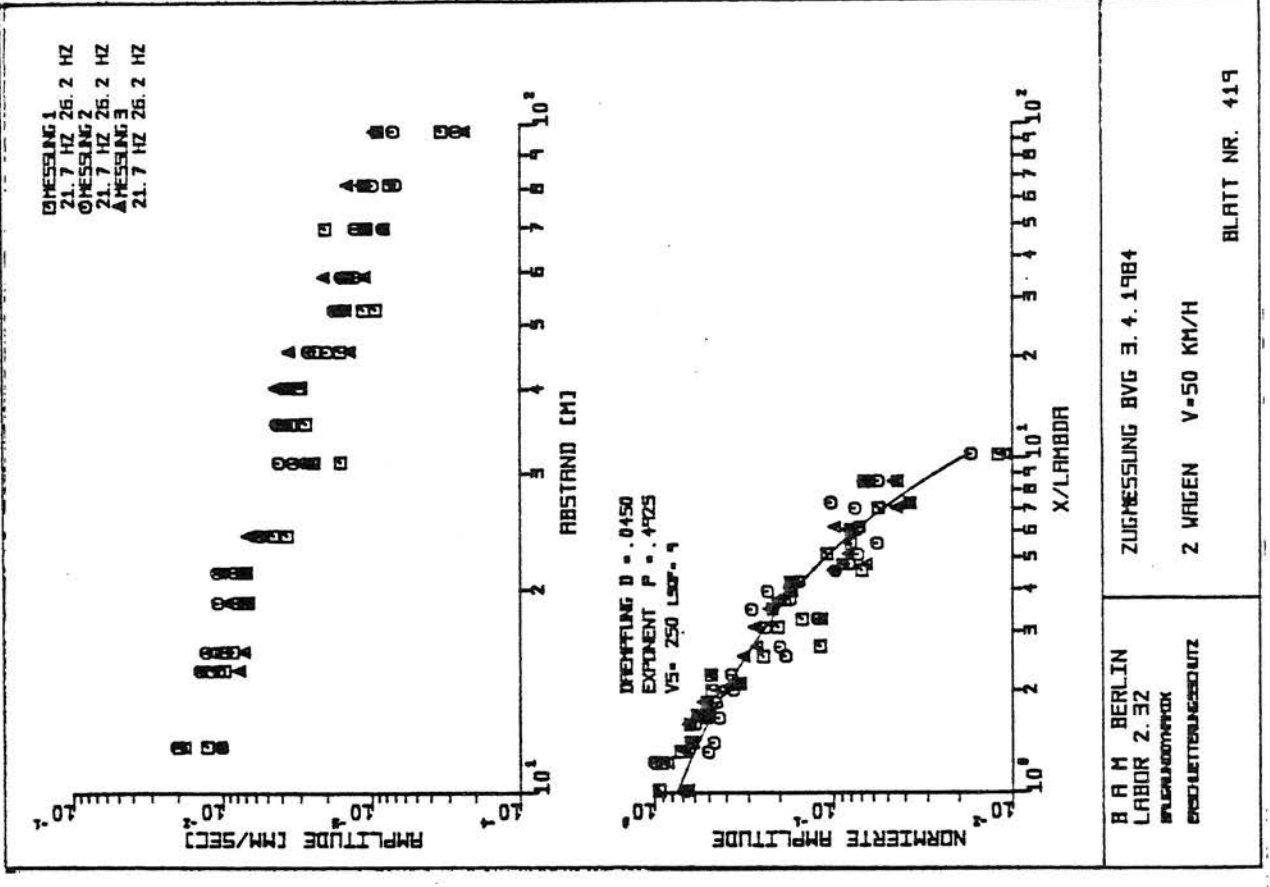
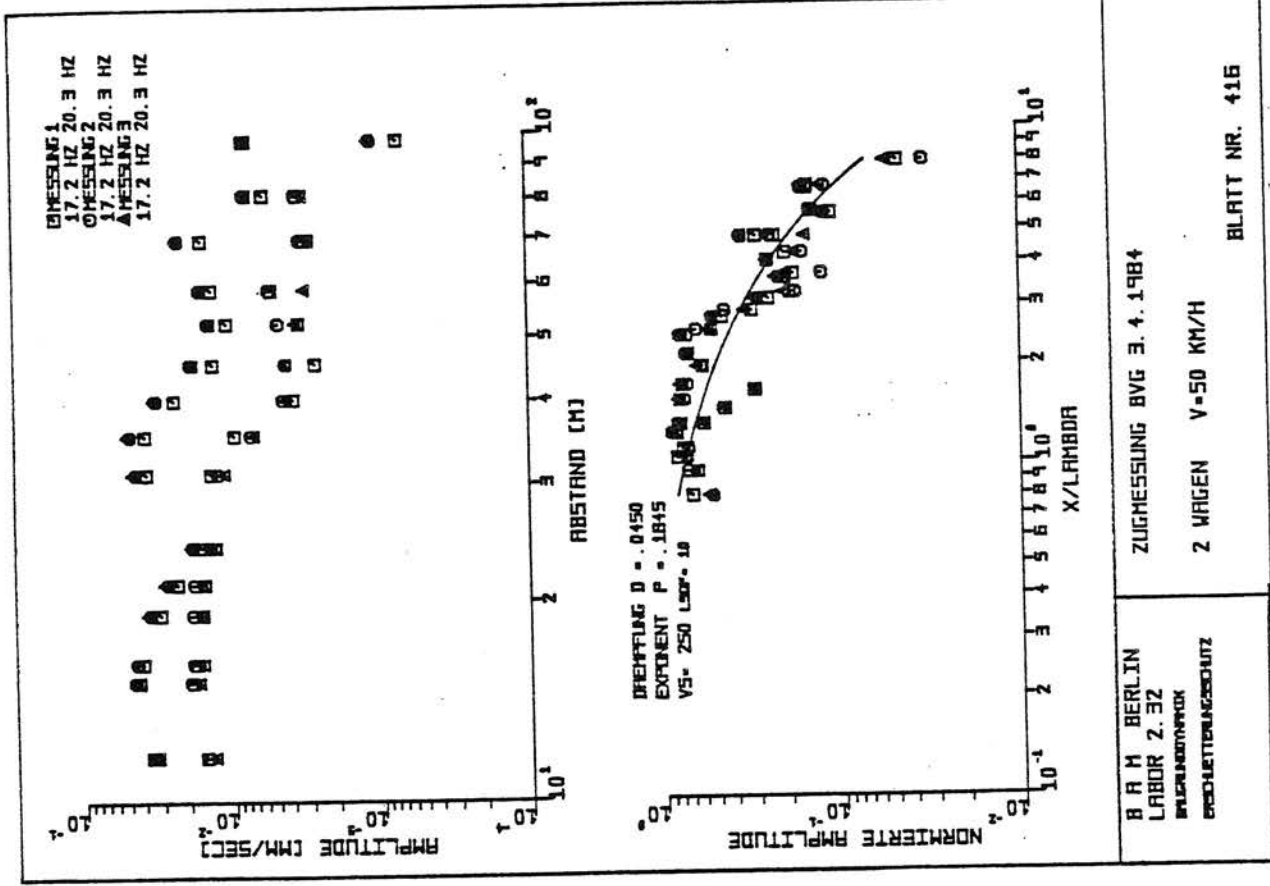
CI-11 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
Standardabweichung
Mittelwert der spektralen Leistungsdichte



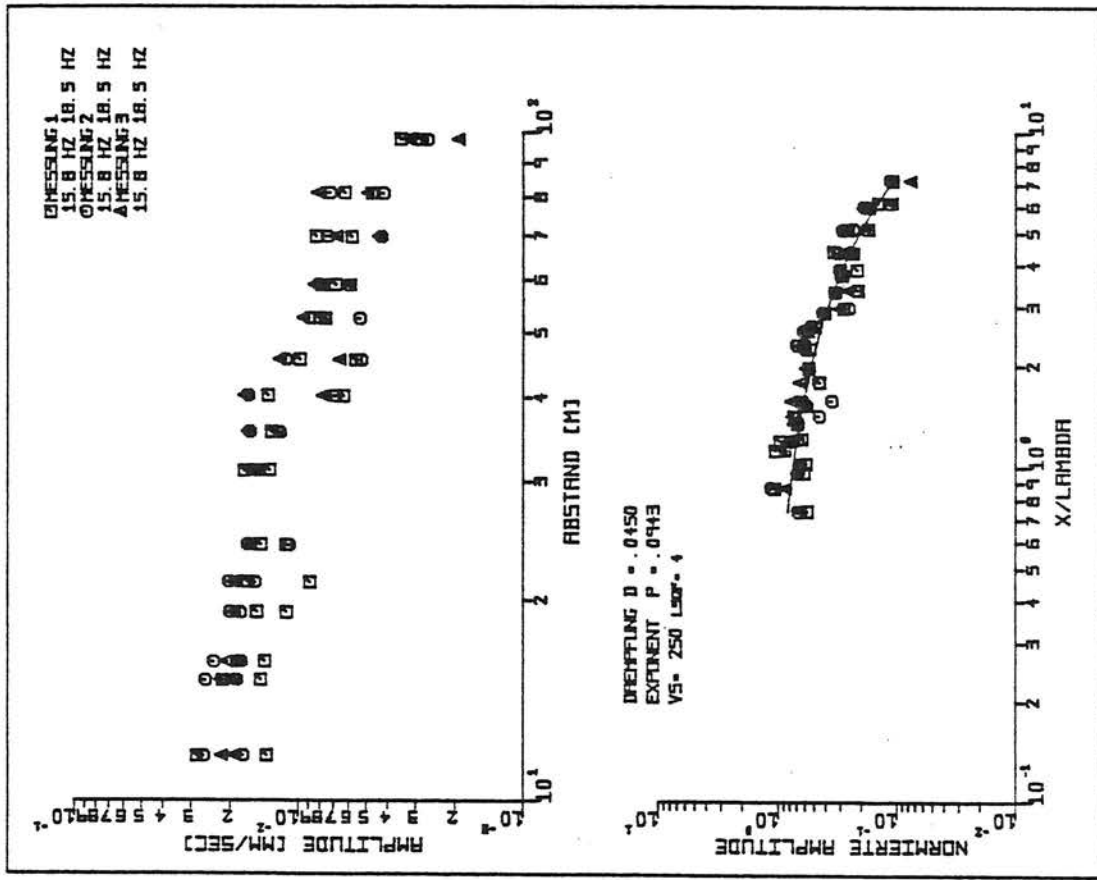




C1-14 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum



C1-15 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum

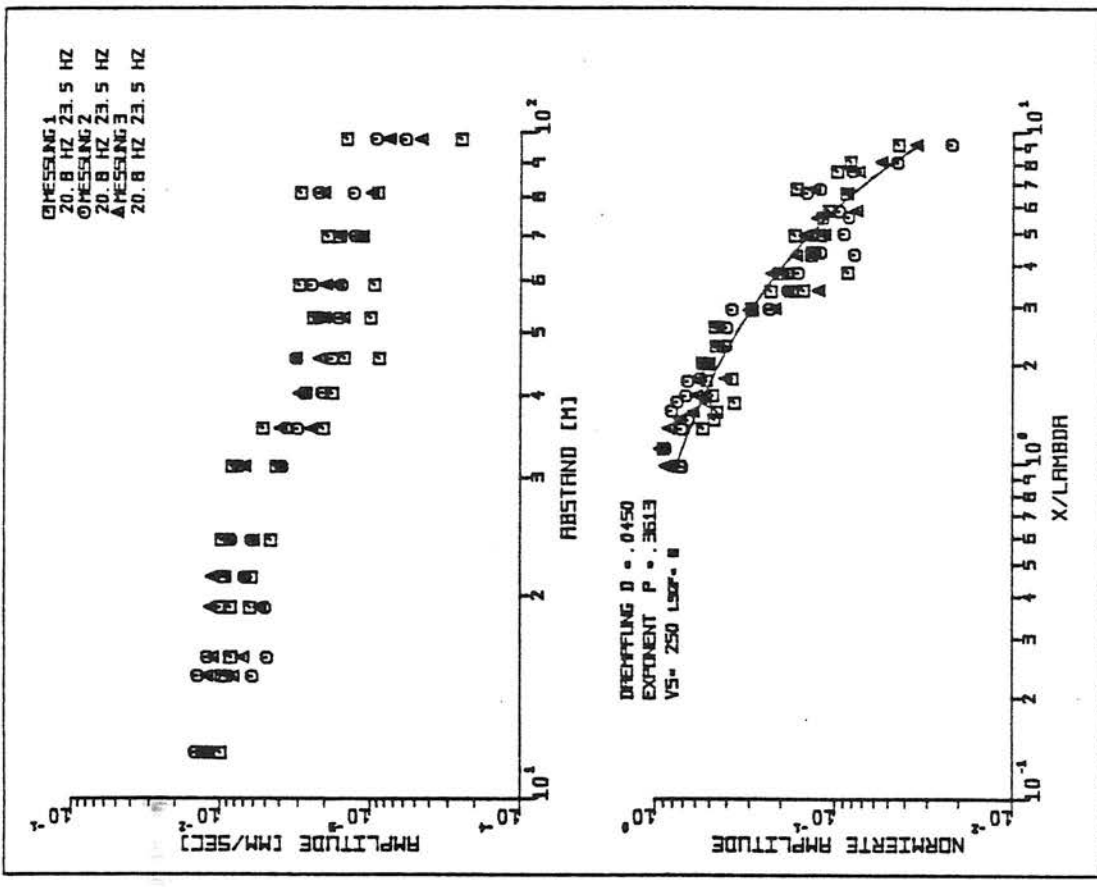


B R M BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARIK
PROJEKTLEITUNG

ZUGMESSUNG BVG 3.4.1984

4 WAGEN V=30 KM/H

BLATT NR. 398

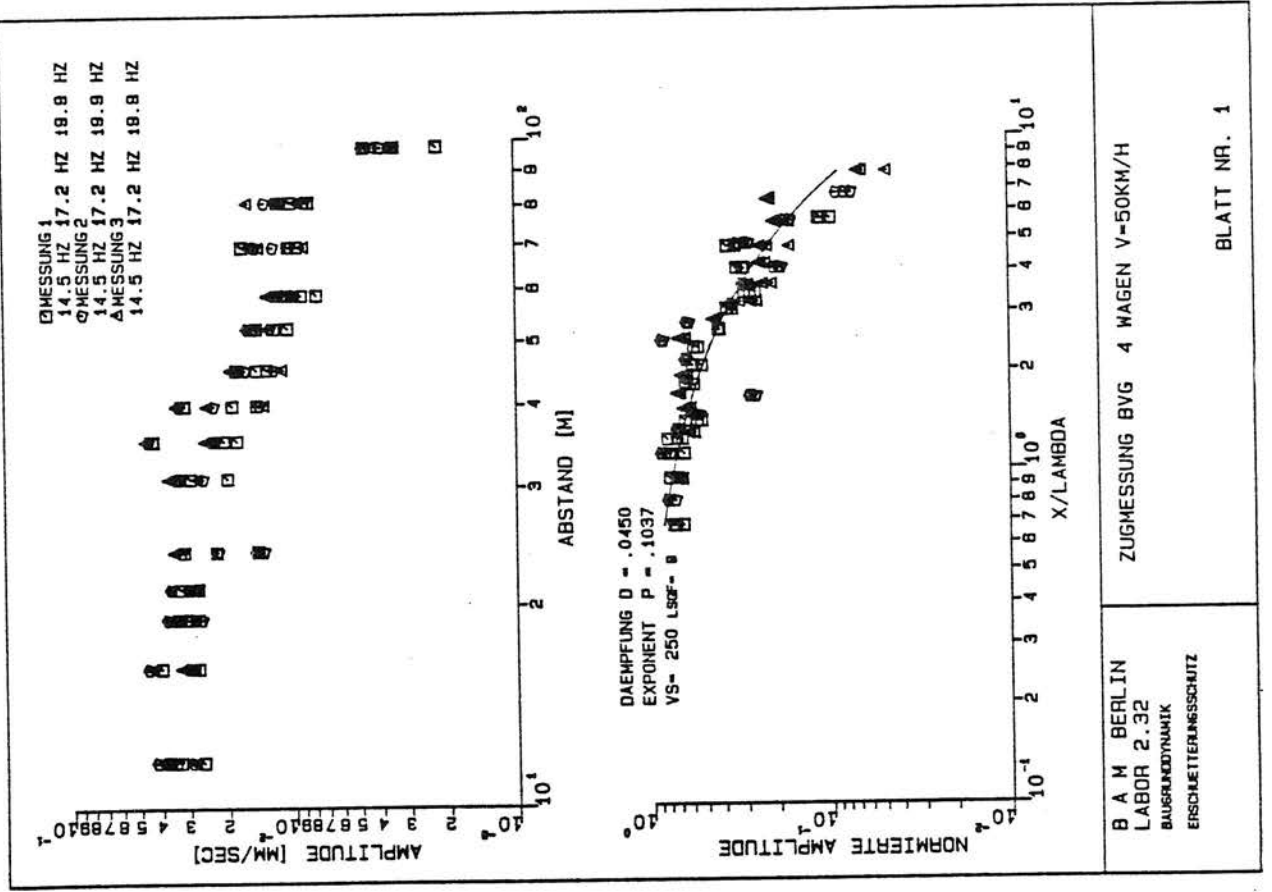
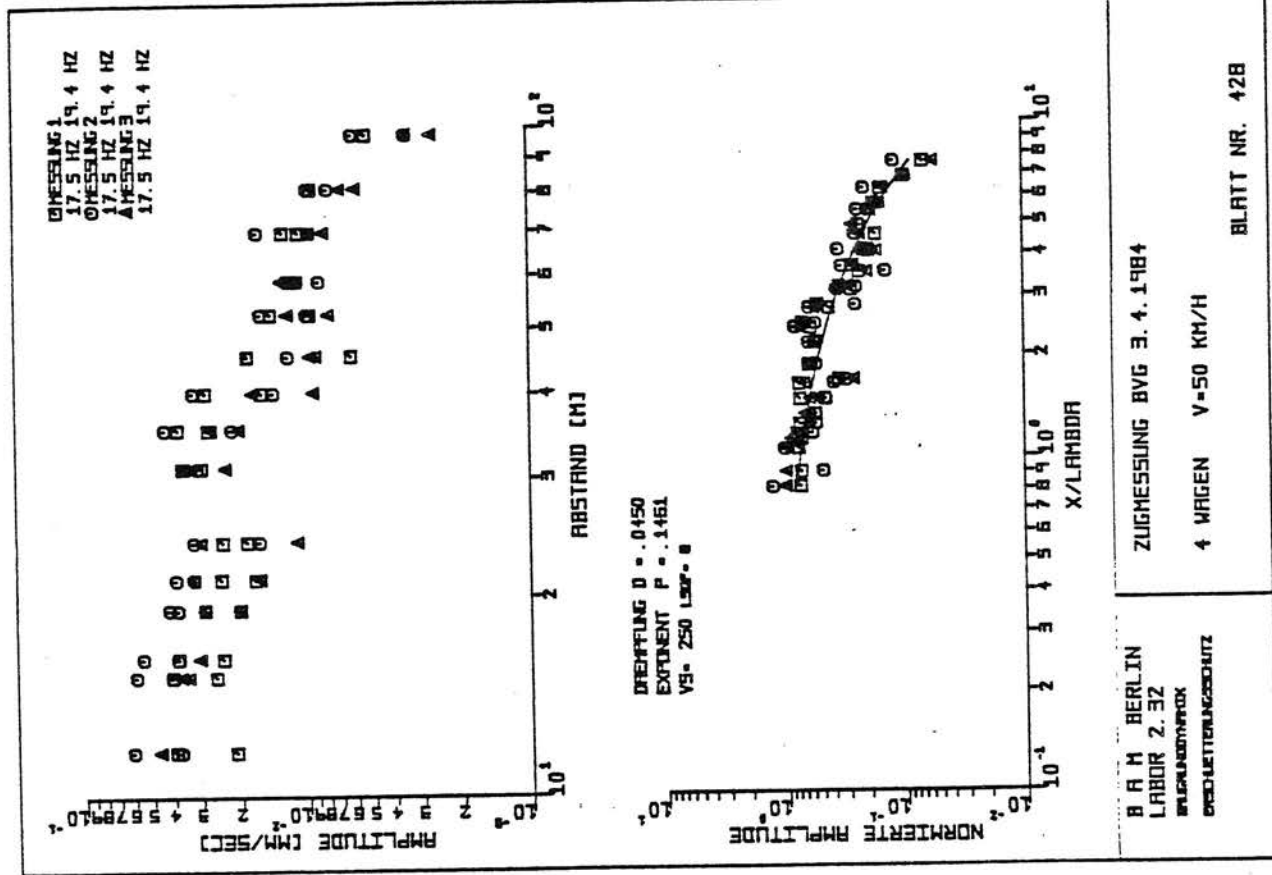


B R M BERLIN
LABOR 2.32
INSTRUMENTARIK
PROJEKTLEITUNG

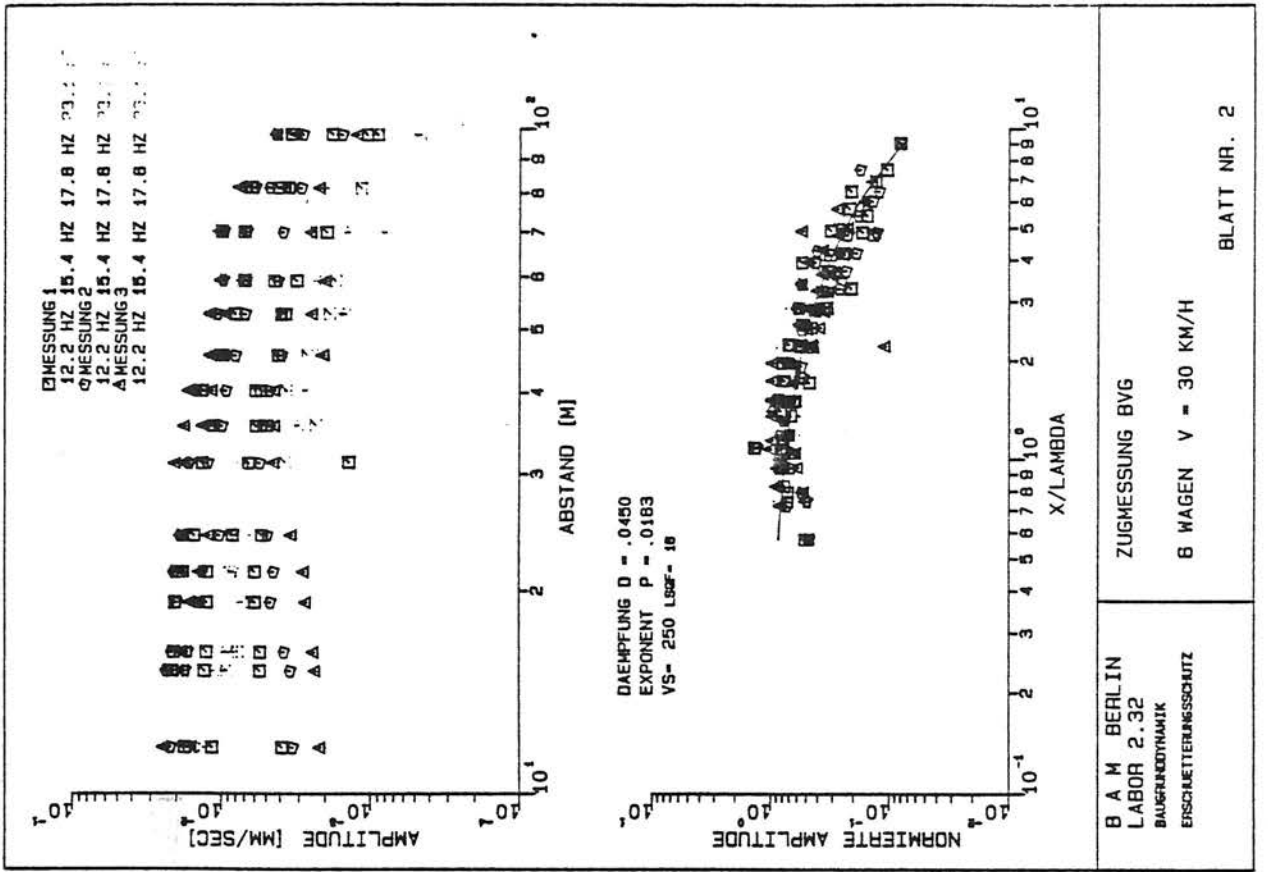
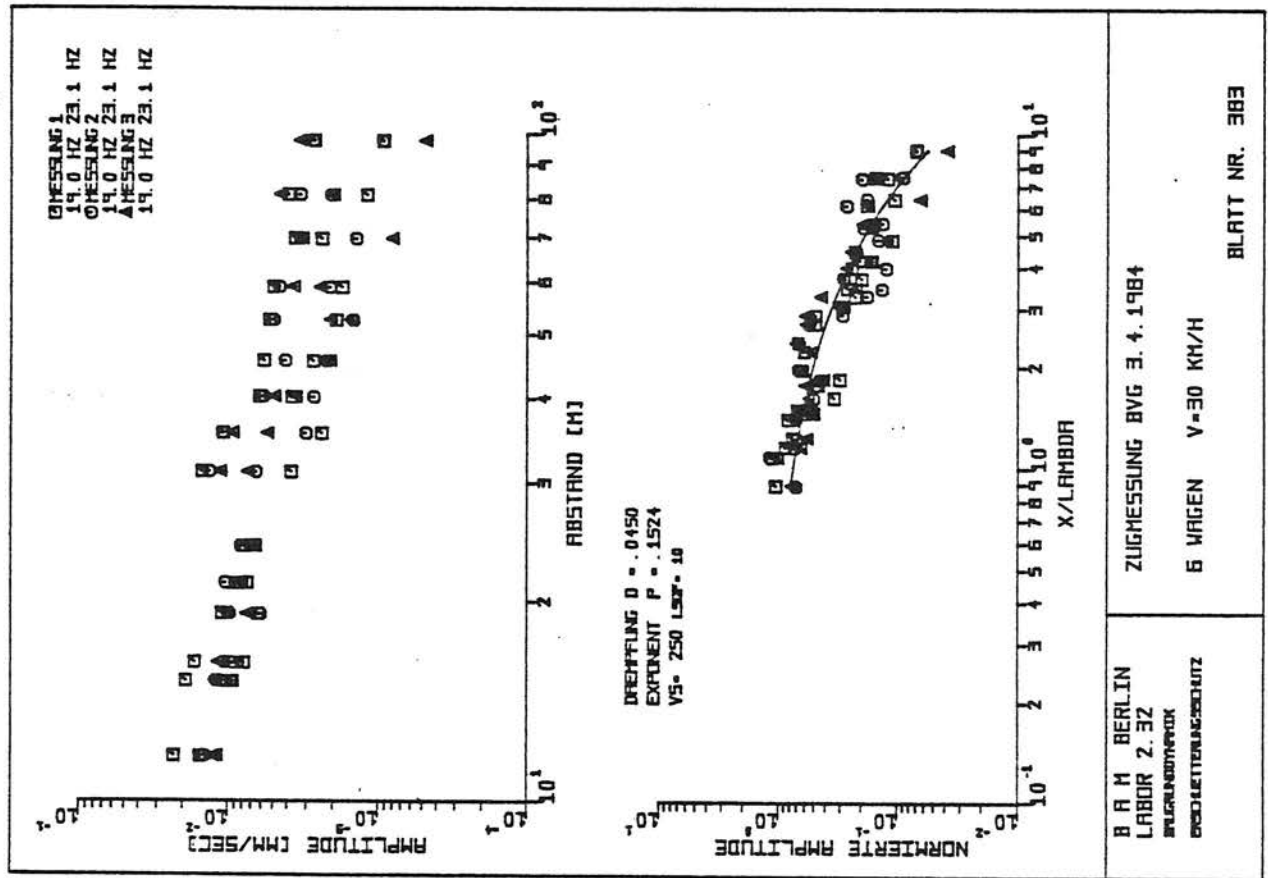
ZUGMESSUNG BVG 3.4.1984

4 WAGEN V=30 KM/H

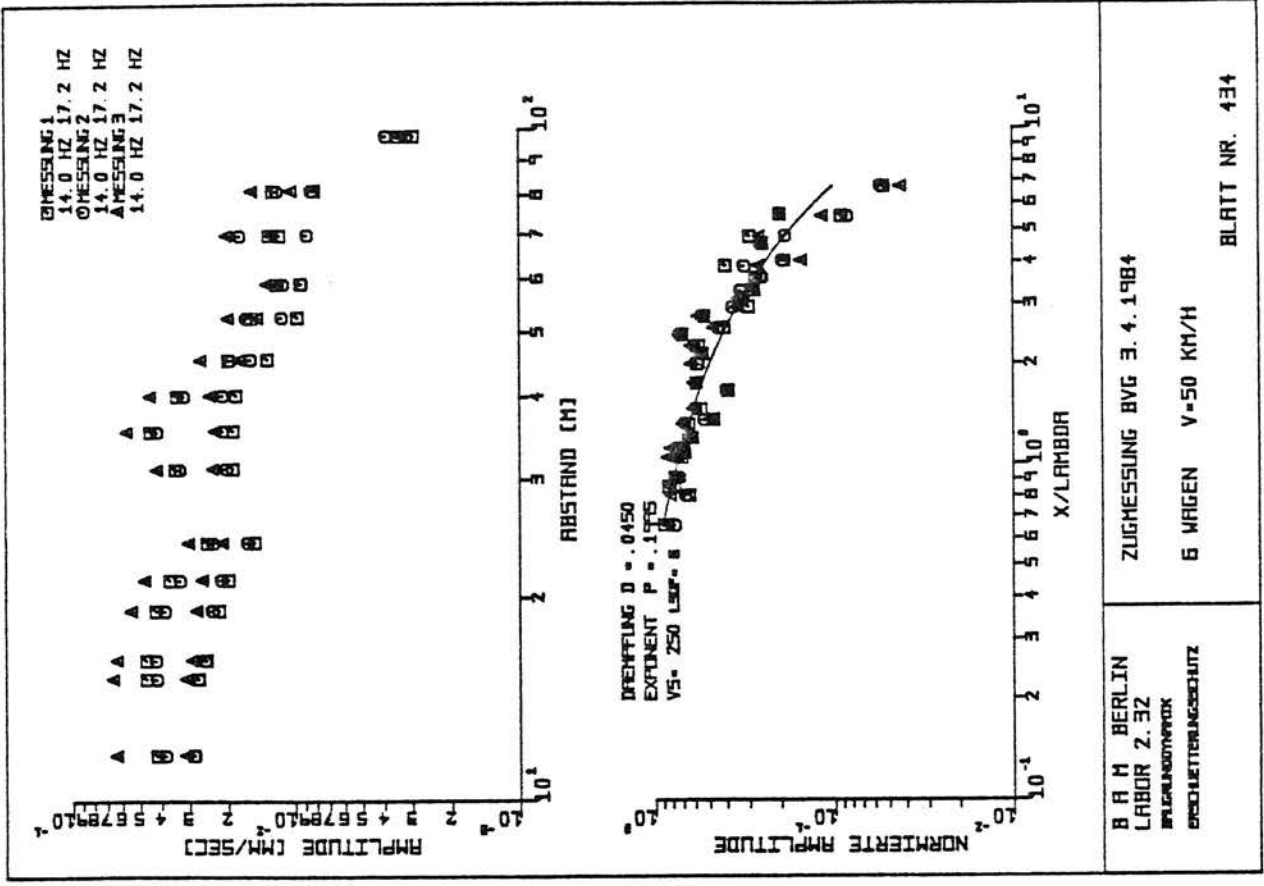
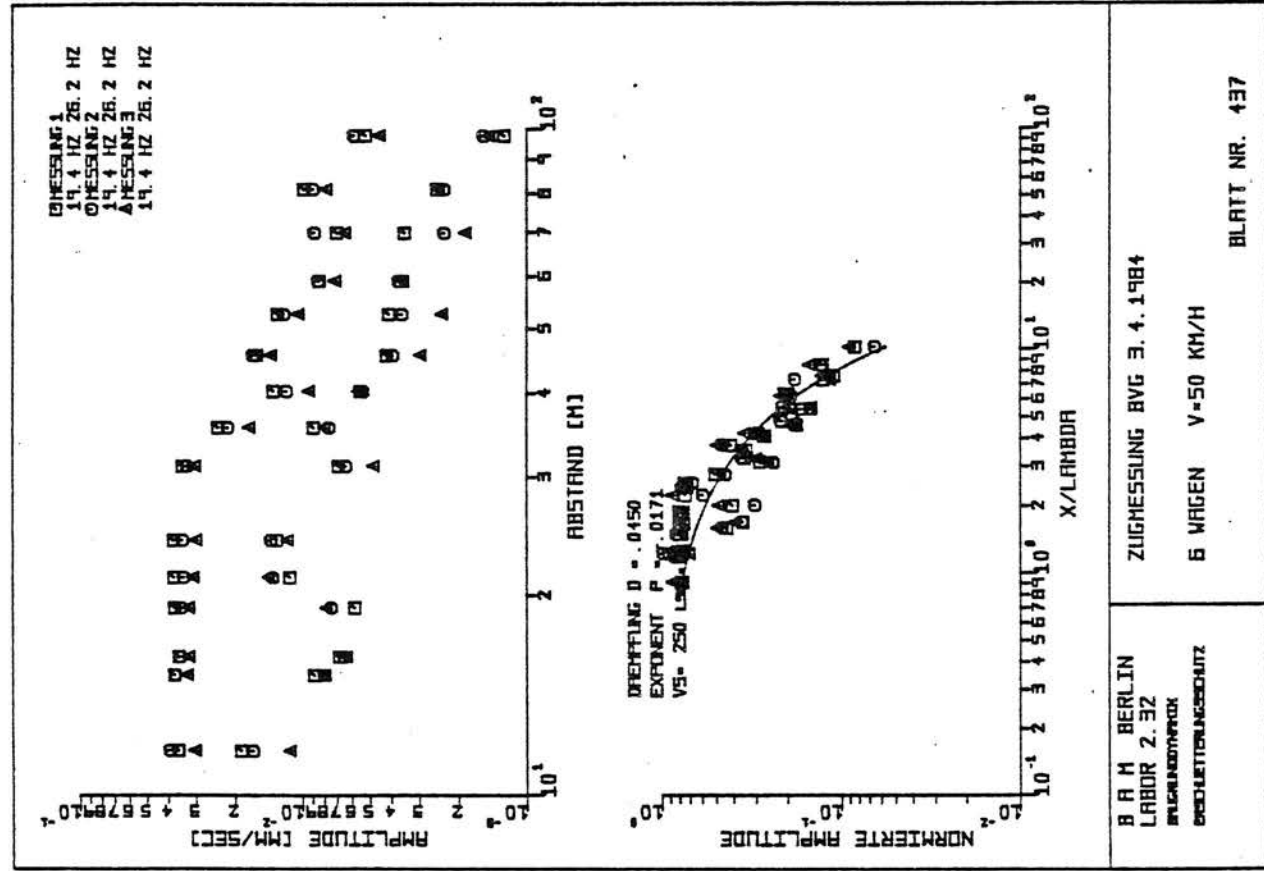
BLATT NR. 401



C1-17 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum

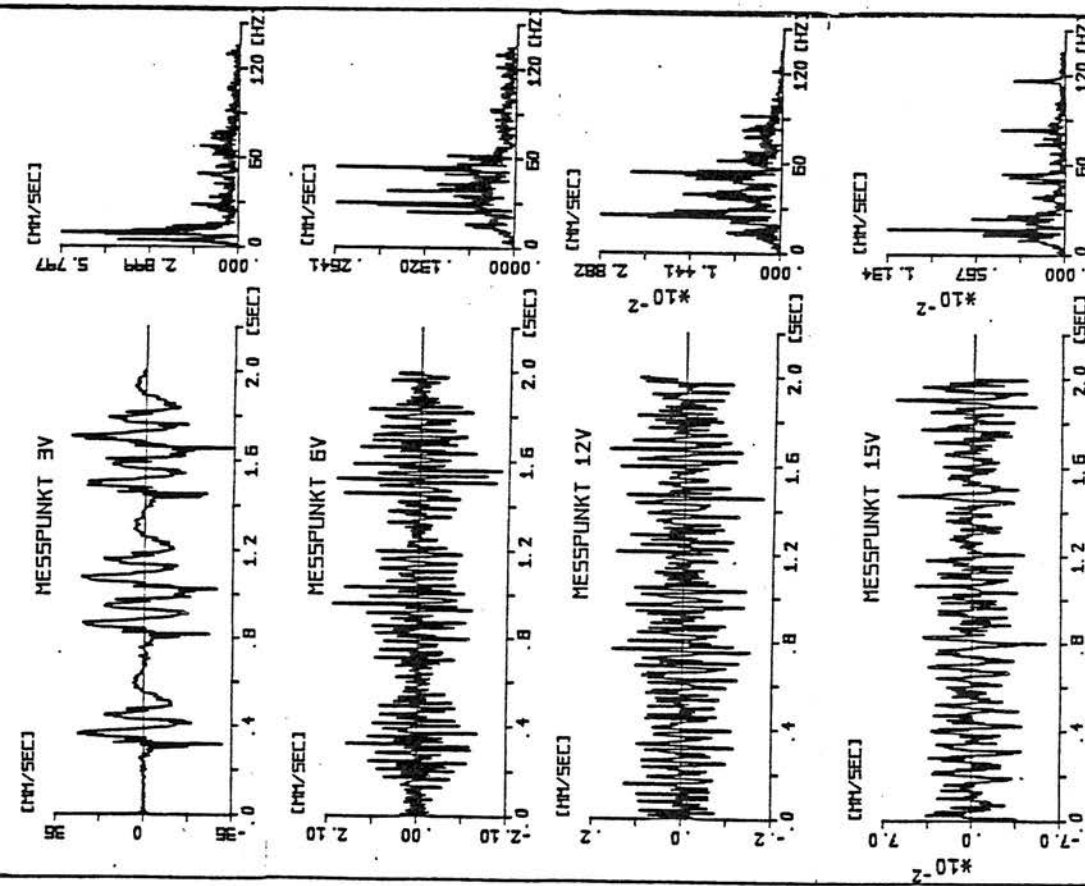


C1-18 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum



C1-19 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum

A N H A N G C 2

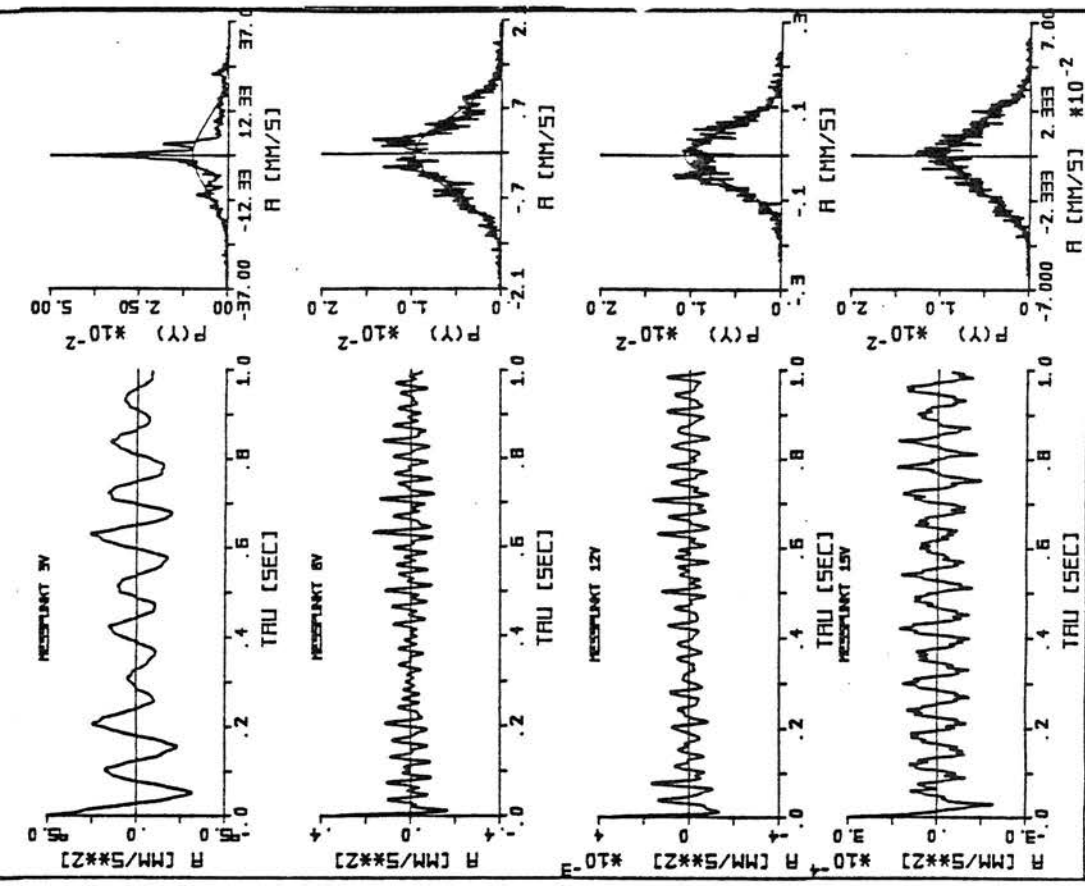


B A H BERLIN
LABOR 2.32
PFLUGHOFEN
ERSCHEINUNGSBLATT

DACHAU ZUGTYP: 5 V=121.5 KM/H
OBERBAU: SCHWELLEN/SCHOT

BLATT NR. 350

C2-1 Zeitverläufe/Frequenzspektren

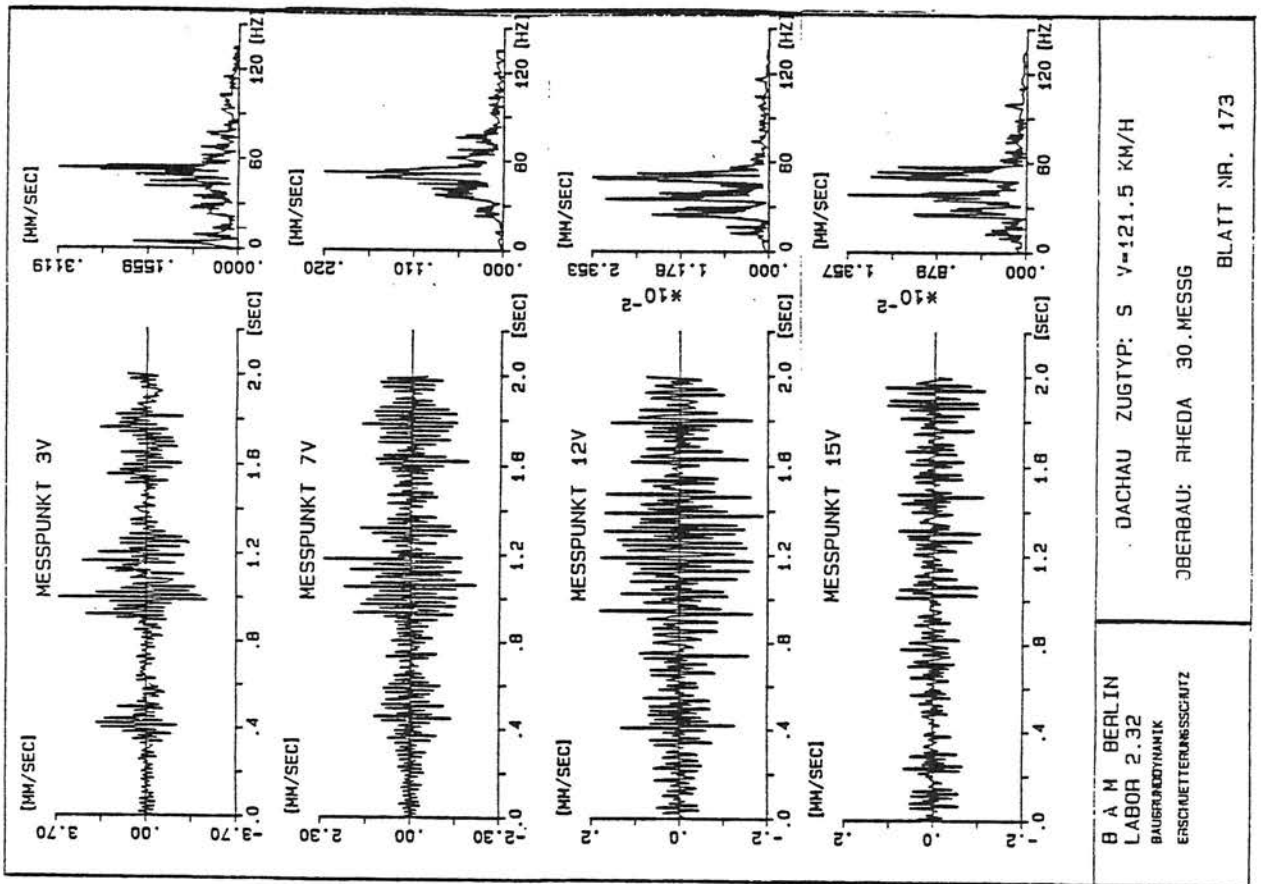


B A H BERLIN
LABOR 2.32
PFLUGHOFEN
ERSCHEINUNGSBLATT

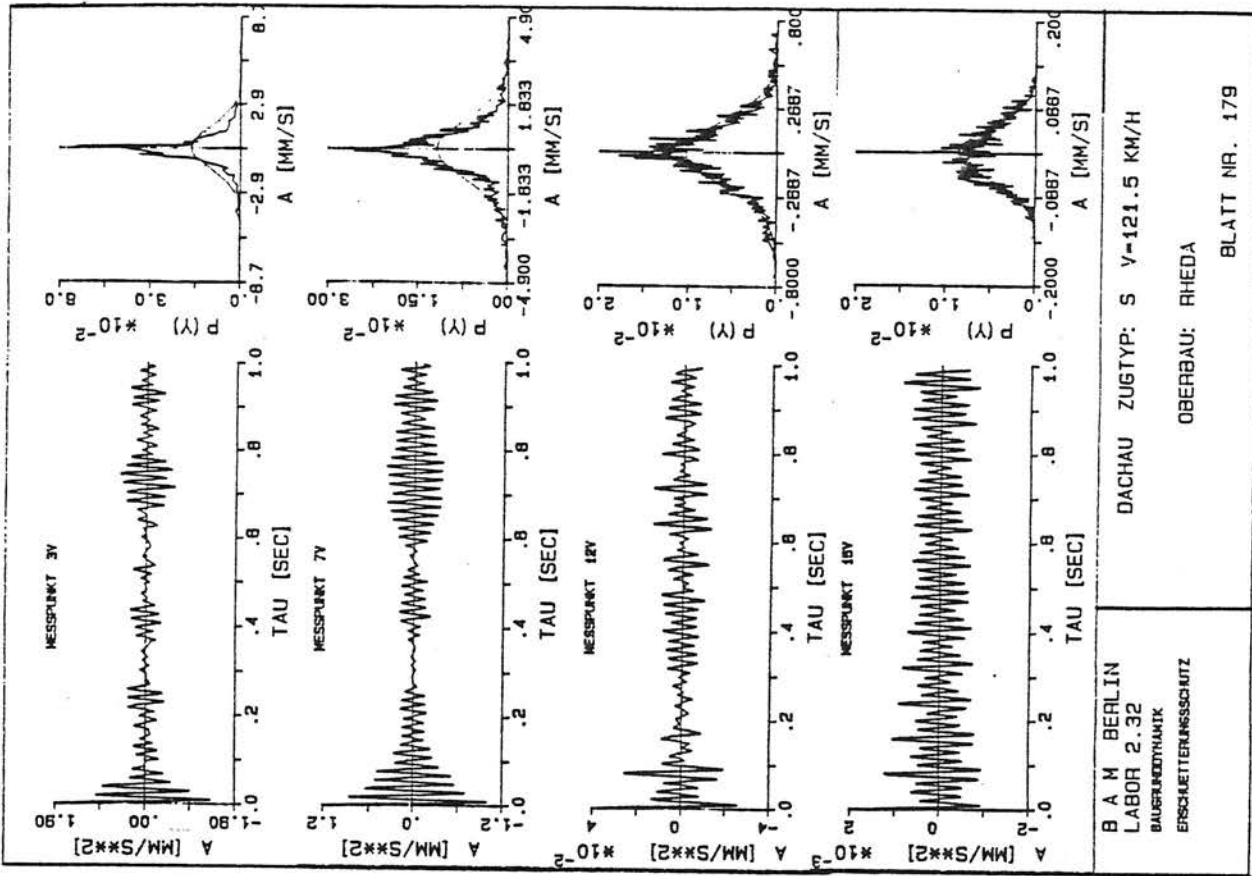
DACHAU ZUGTYP: 5 V=121.5 KM/H
OBERBAU: SCHWELLEN/SCHOTTER 95. MESSG

BLATT NR. 355

Autokorrelationsfunktion/Histogramm

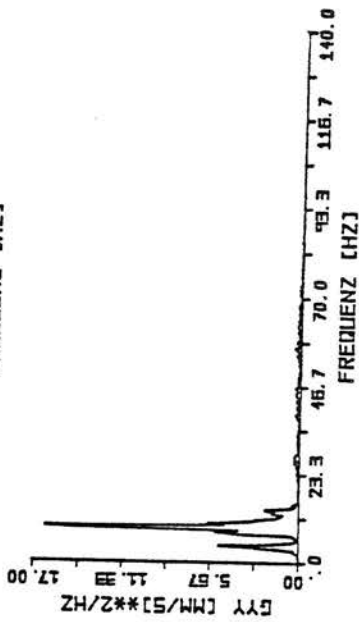
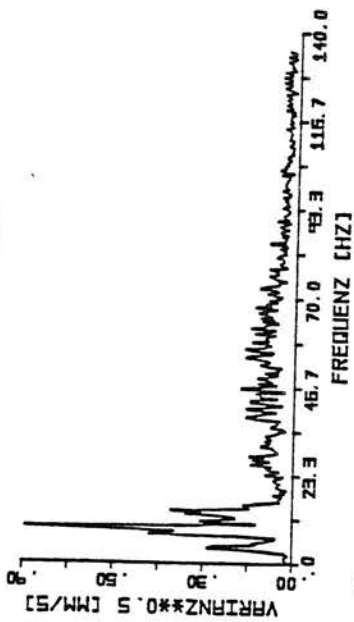
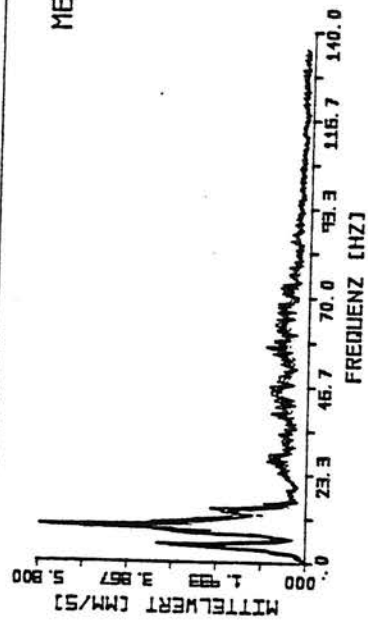


C2-2 Zeitverläufe/Frequenzspektren



Autokorrelationsfunktion/Histogramm

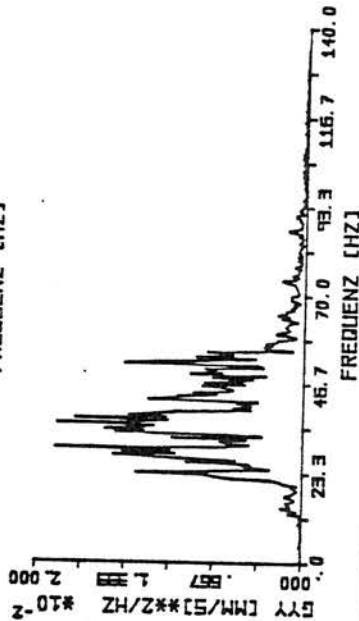
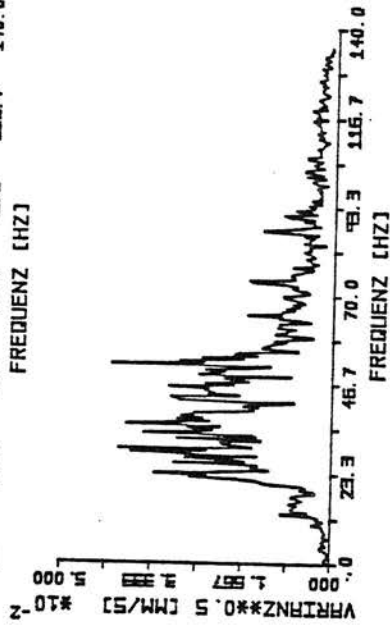
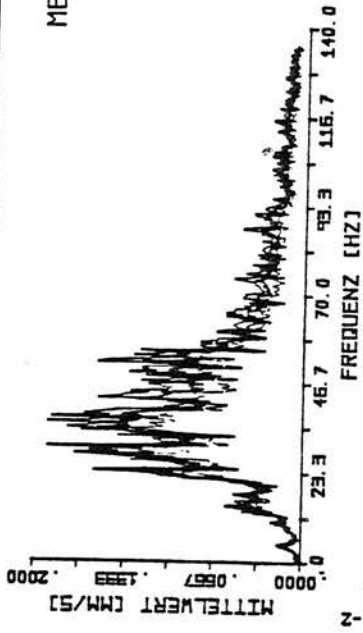
MESSPUNKT 3V



B R M BERLIN
LABOR 2.32
BRÜHLERHOFWEG
ERSCHEINUNGSSCHUTZ

DACHHAU ZUGTYP: 5 VM=116 KM/H
SCHWELLEN/SCHÖTTER 8 MESSUNGEN
BLATT NR. 37B

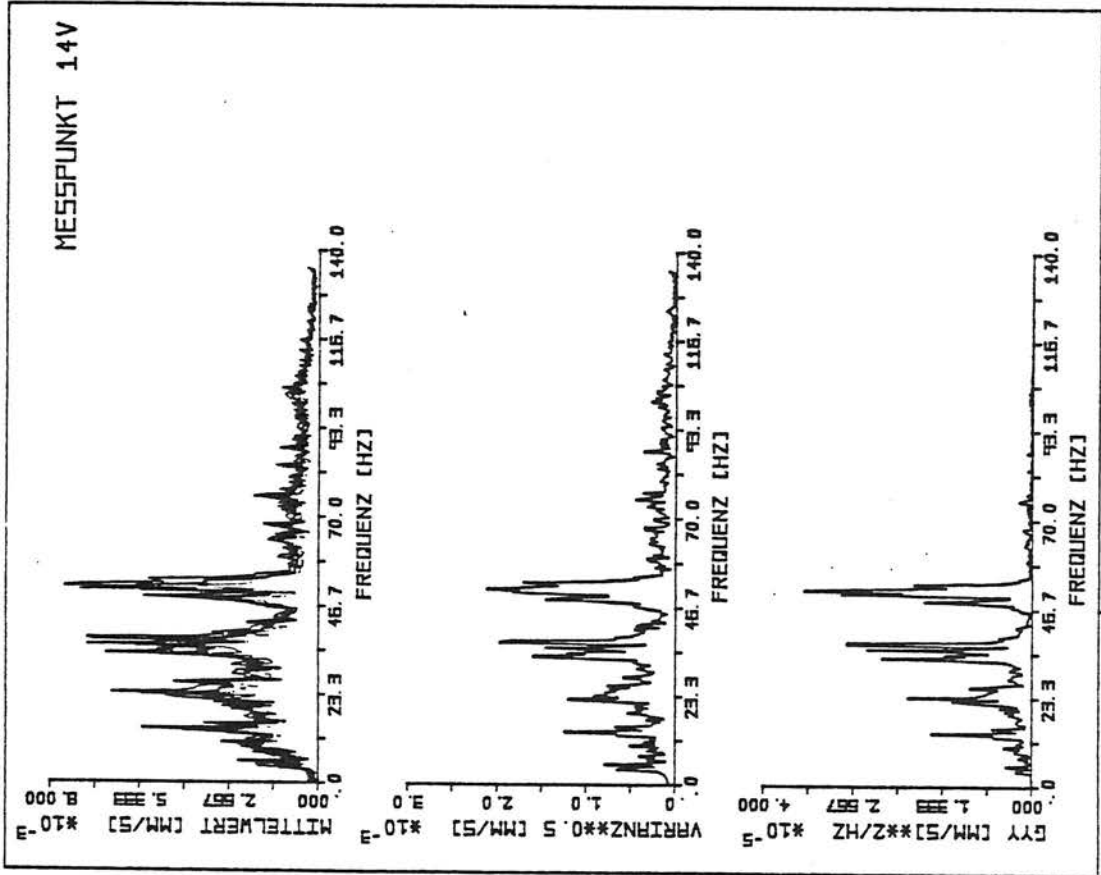
MESSPUNKT 6V



B R M BERLIN
LABOR 2.32
BRÜHLERHOFWEG
ERSCHEINUNGSSCHUTZ

DACHHAU ZUGTYP: 5 VM=116 KM/H
SCHWELLEN/SCHÖTTER 8 MESSUNGEN
BLATT NR. 380

C2-3 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
Standardabweichung
Mittelwert der spektralen Leistungsdichte

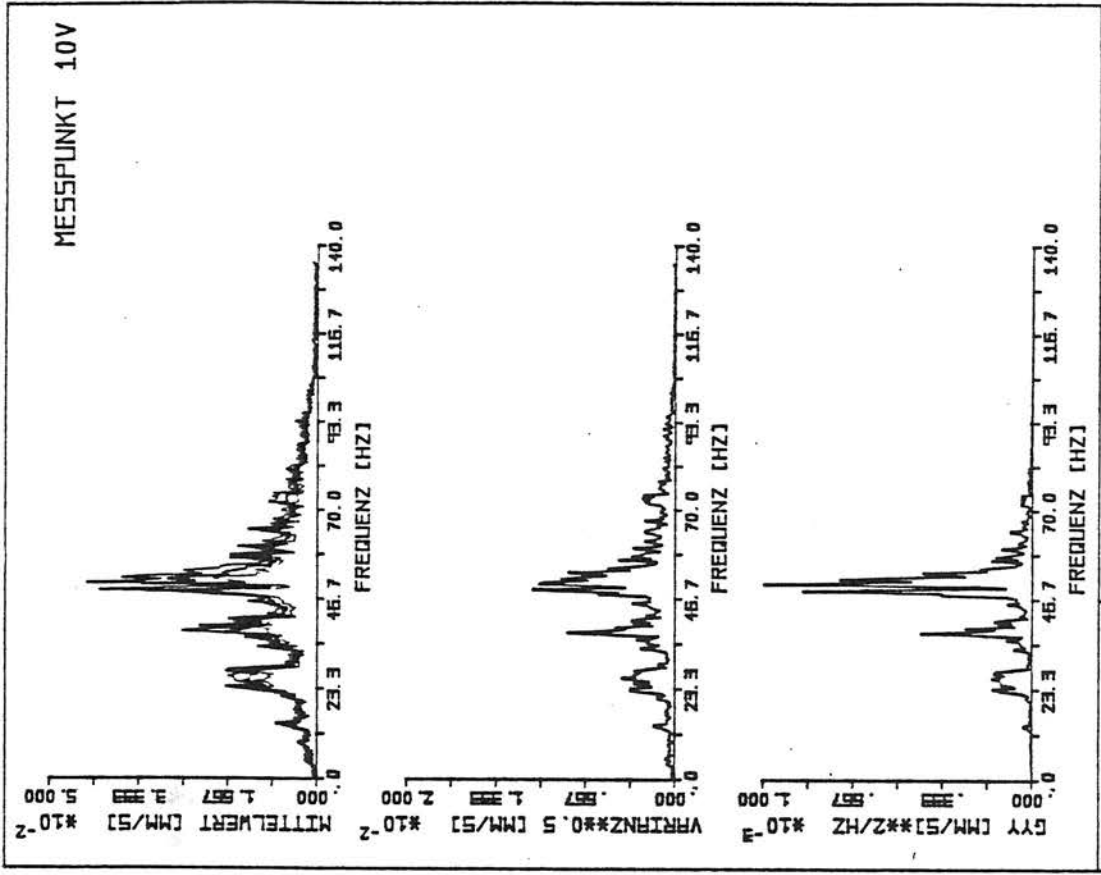


B A M BERLIN
LABOR 2.32
BILDFREDDIYPEROX
ERDSCHUTTLINGSCHUTZ

DACHAU ZUGTYP: 5 VM-116 KM/H

SCHWELLEN/SCHOTTER 8 MESSUNGEN

BLATT NR. 387



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BILDFREDDIYPEROX
ERDSCHUTTLINGSCHUTZ

DACHAU ZUGTYP: 5 VM-116 KM/H

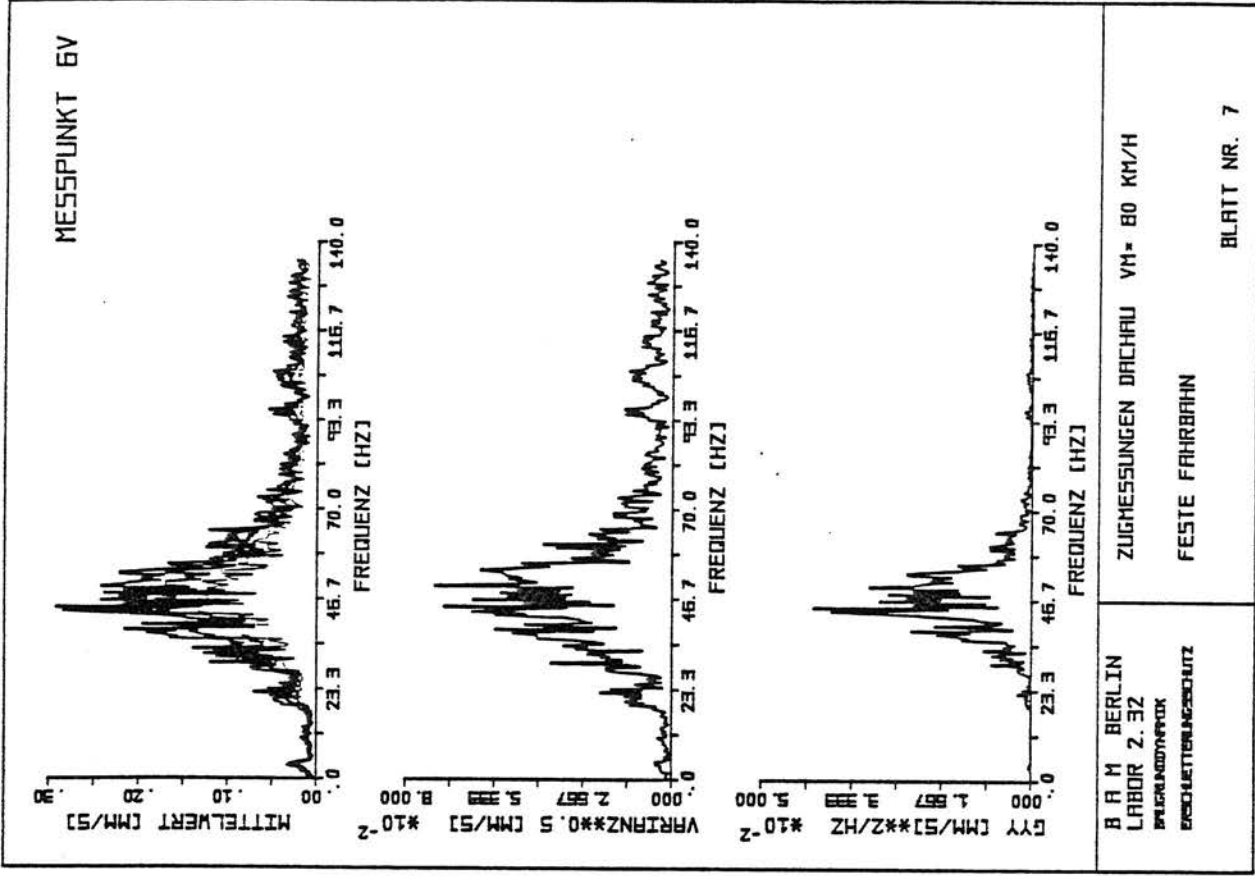
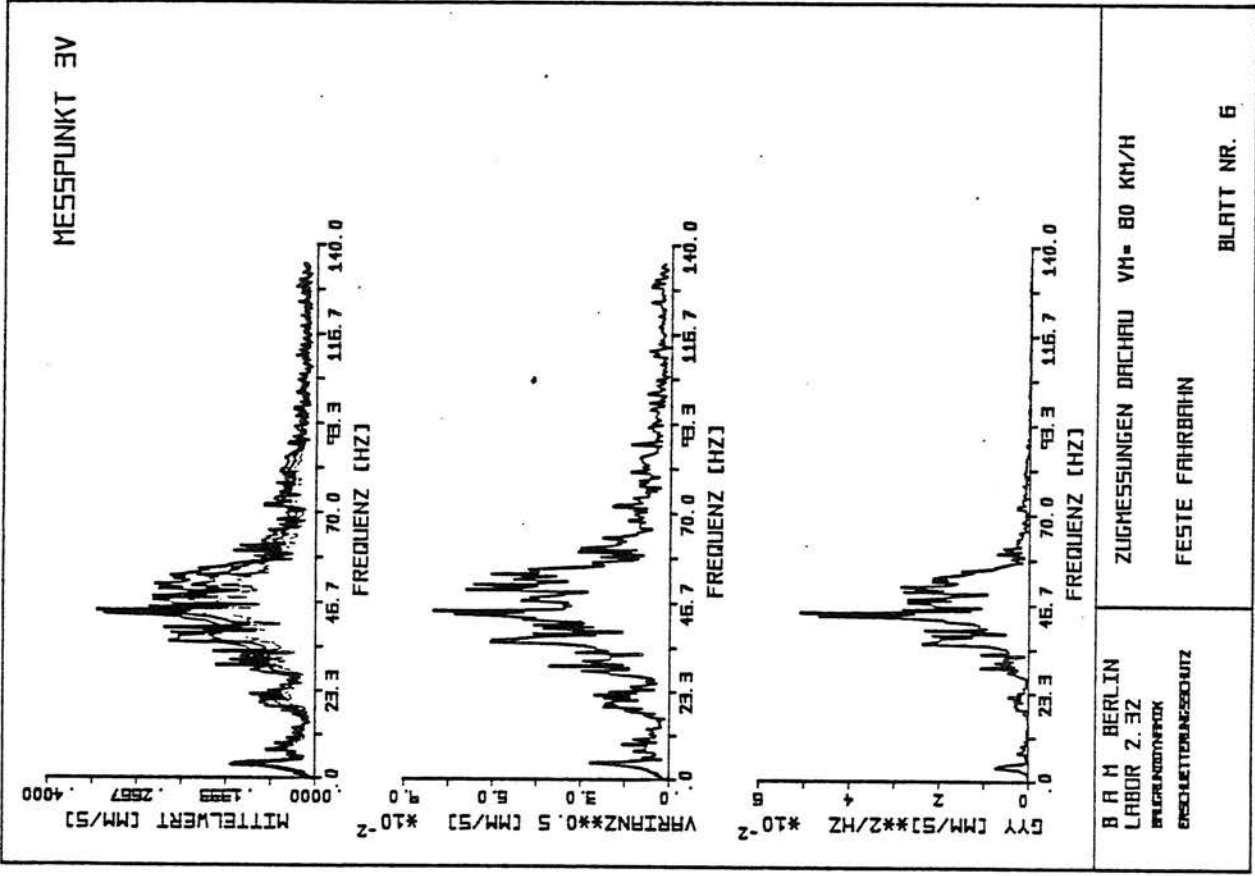
SCHWELLEN/SCHOTTER 8 MESSUNGEN

BLATT NR. 384

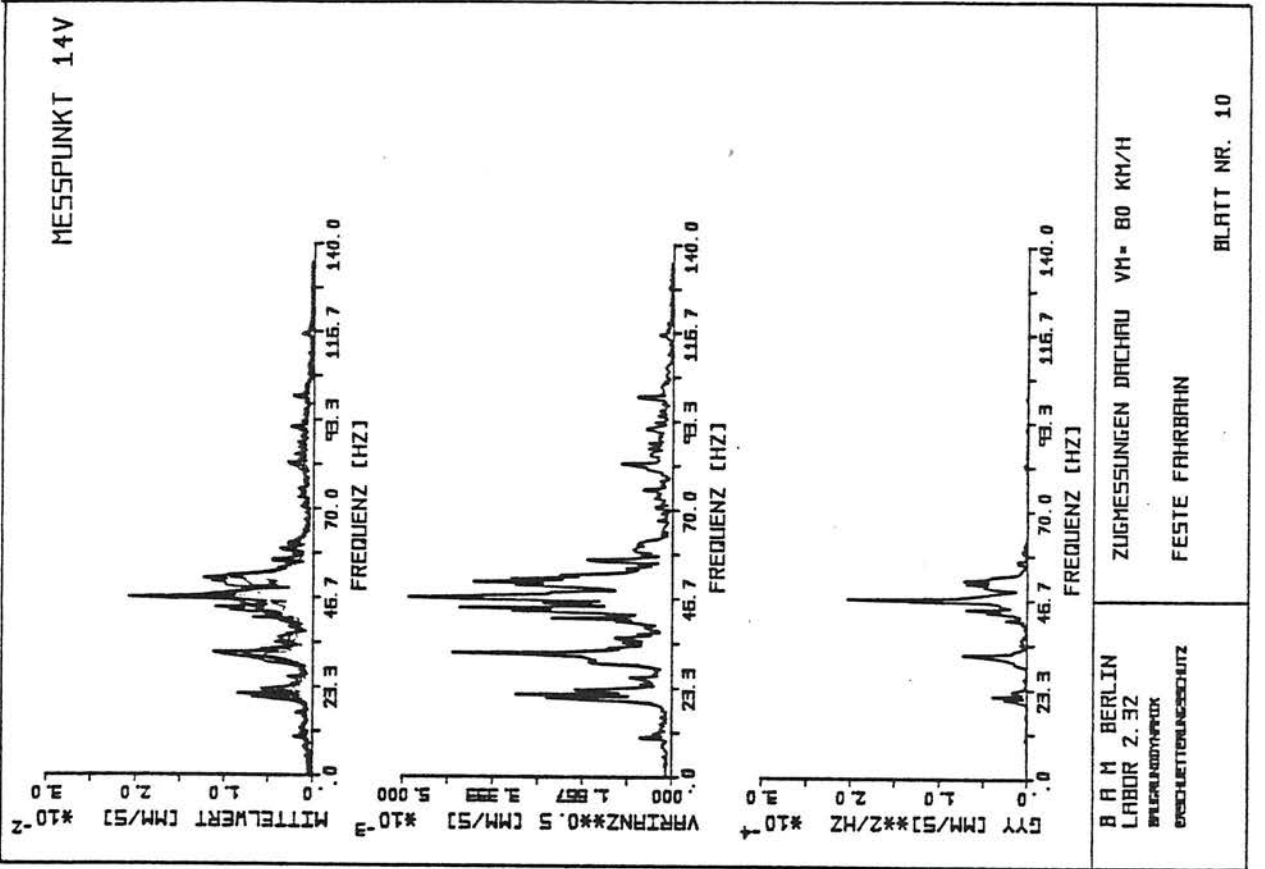
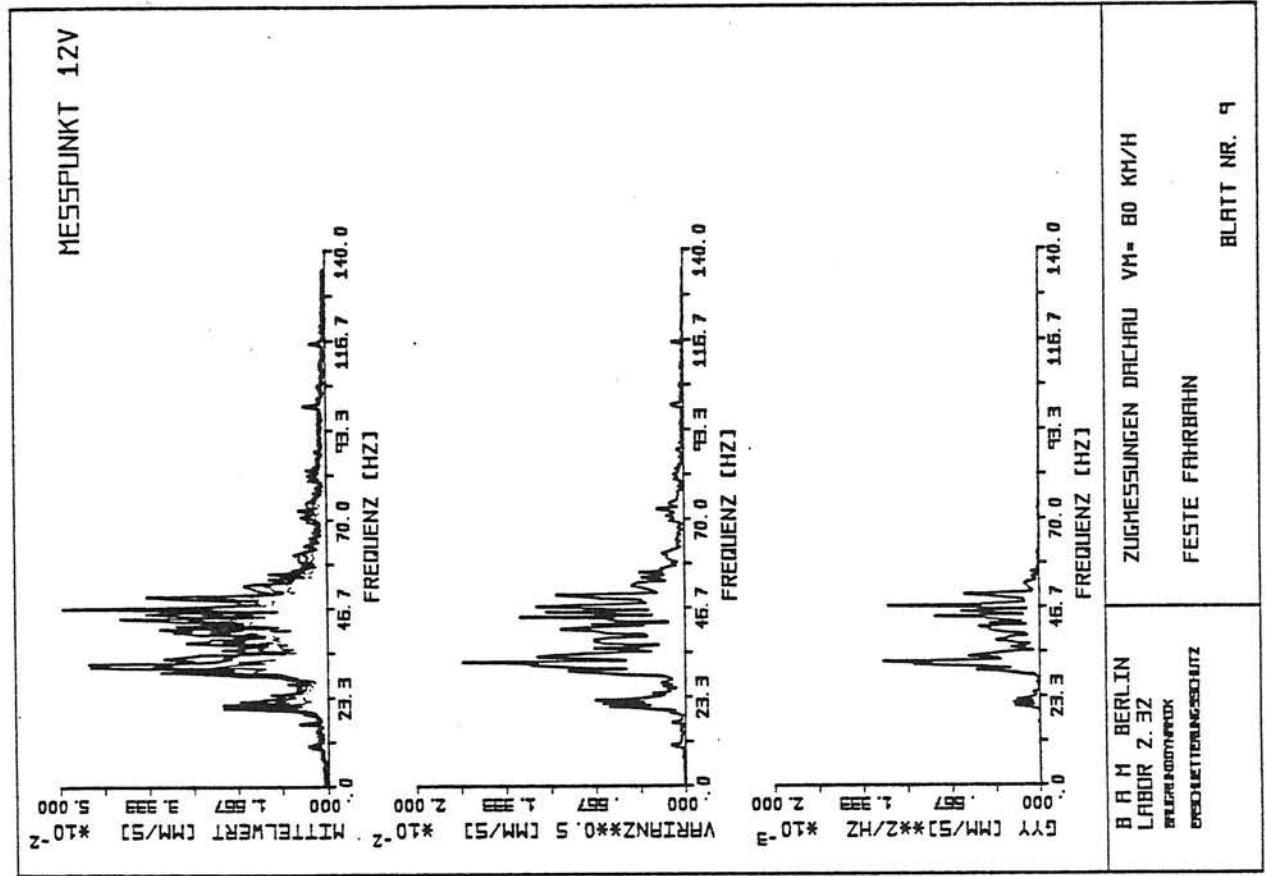
C2-4 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall

Standardabweichung

Mittelwert der spektralen Leistungsichte

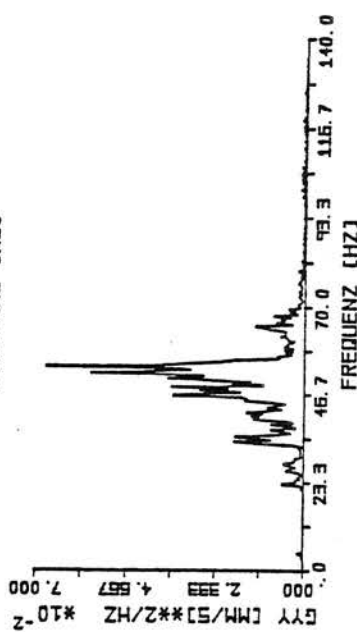
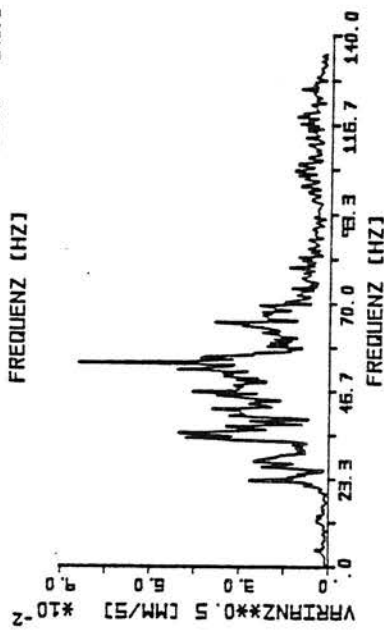
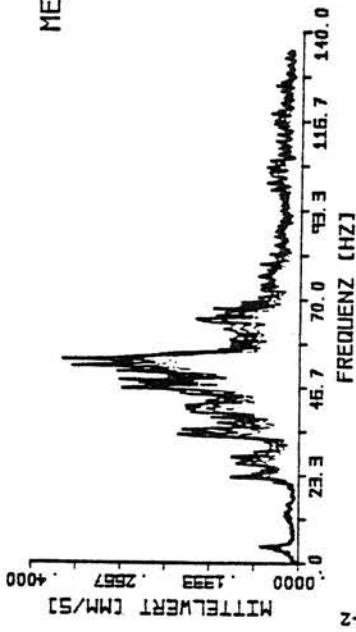


C2-5 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
 Standardabweichung
 Mittelwert der spektralen Leistungsdichte



C2-6 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
Standardabweichung

MESSPUNKT 6V

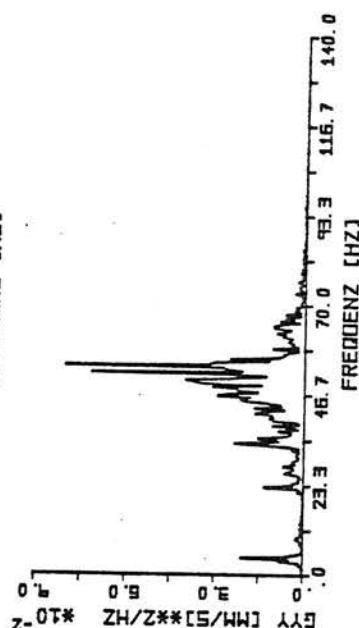
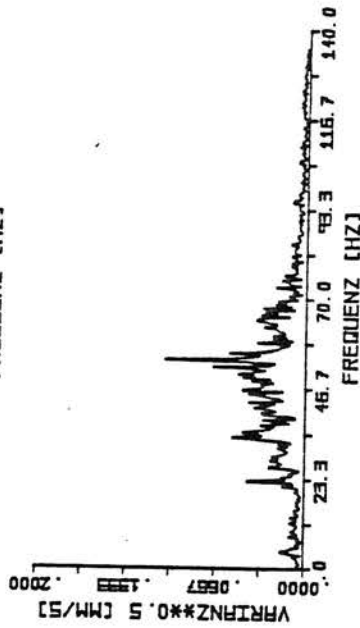
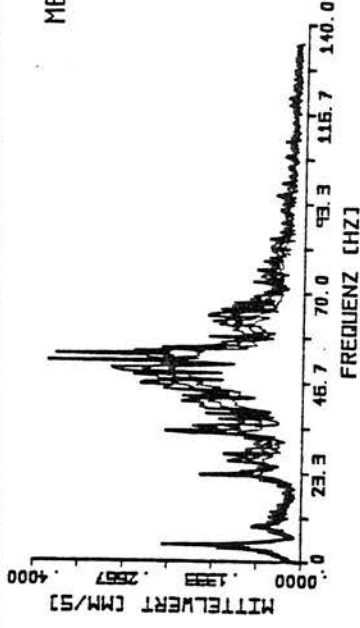


B A M BERLIN
LABOR 2.32
BILDAUSWERTUNG
ERDSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ZUGMESSUNGEN DACHAU VM=120 KM/H
FESTE FAHRBAHN

BLATT NR. 2

MESSPUNKT 3V

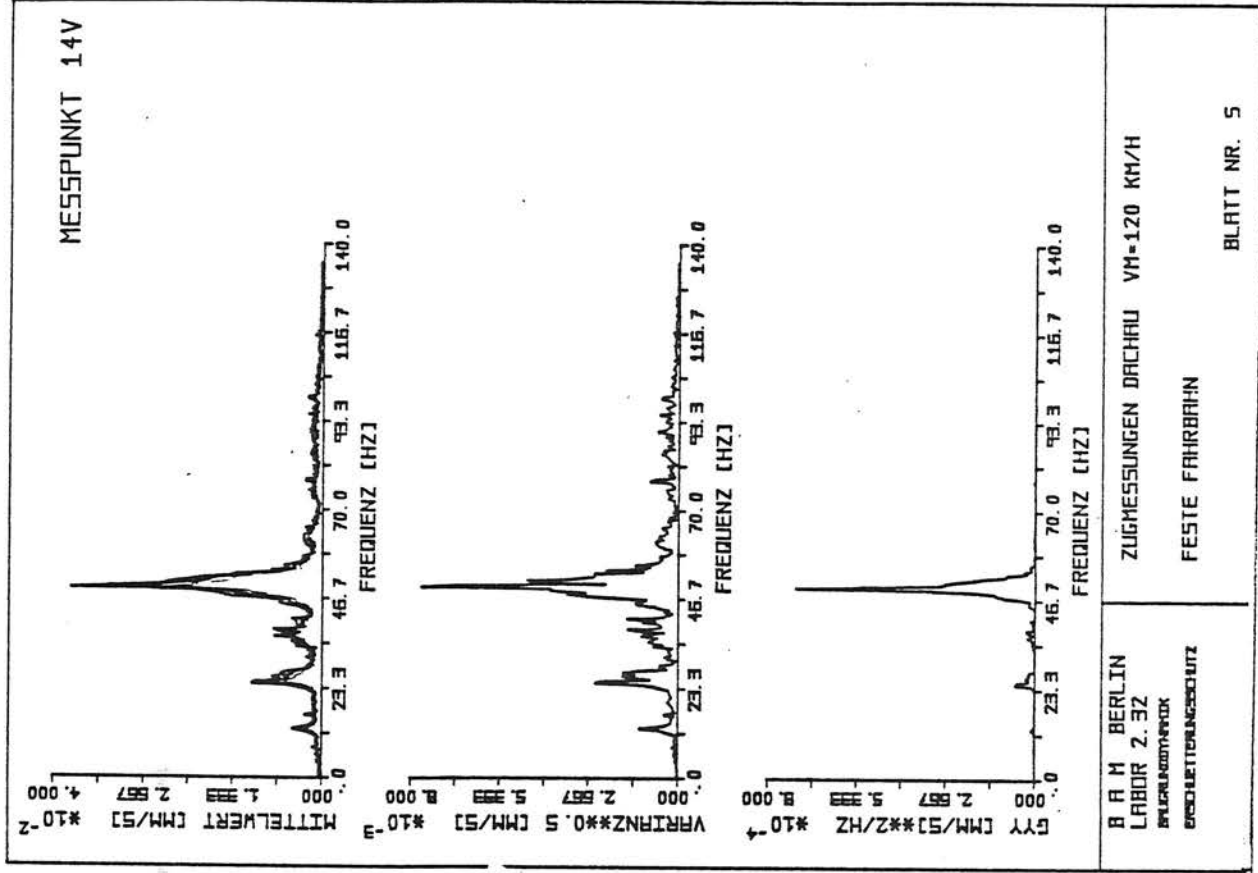
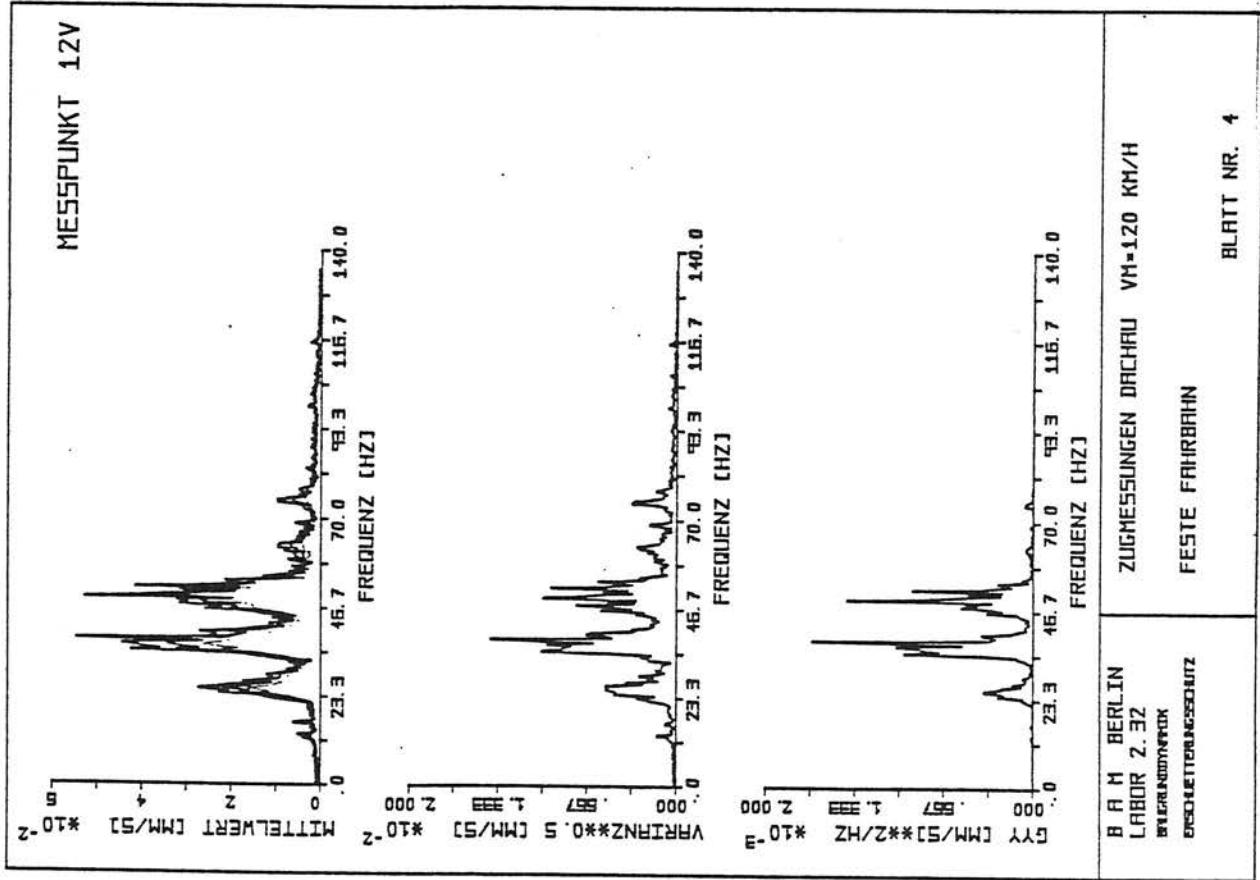


B A M BERLIN
LABOR 2.32
BILDAUSWERTUNG
ERDSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

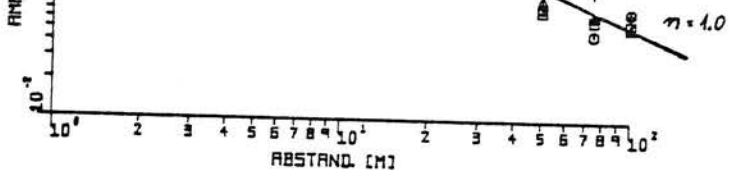
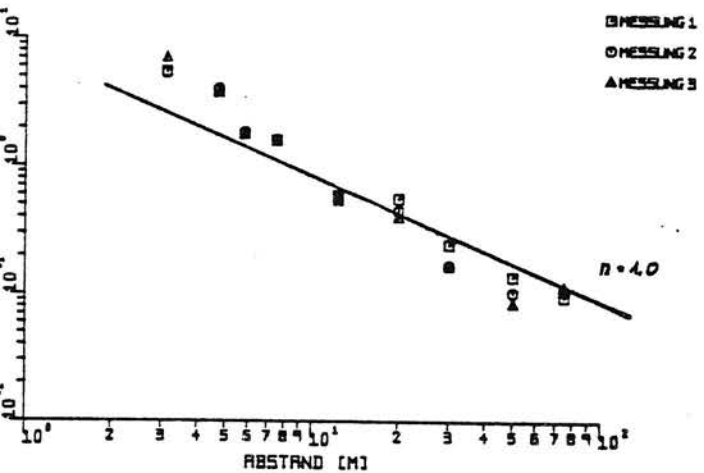
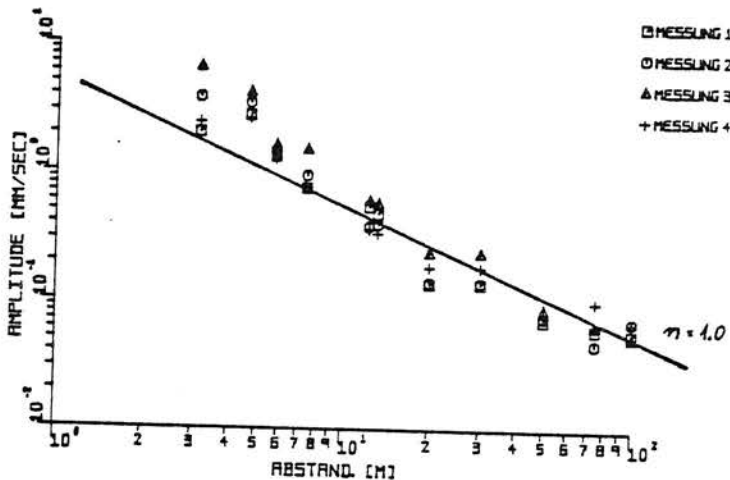
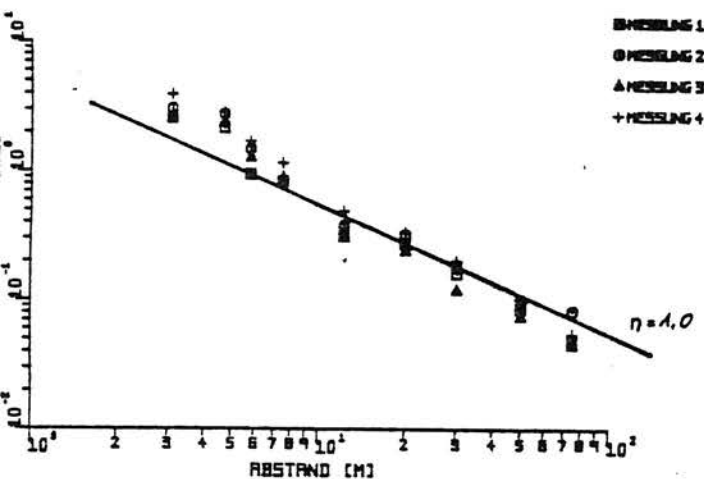
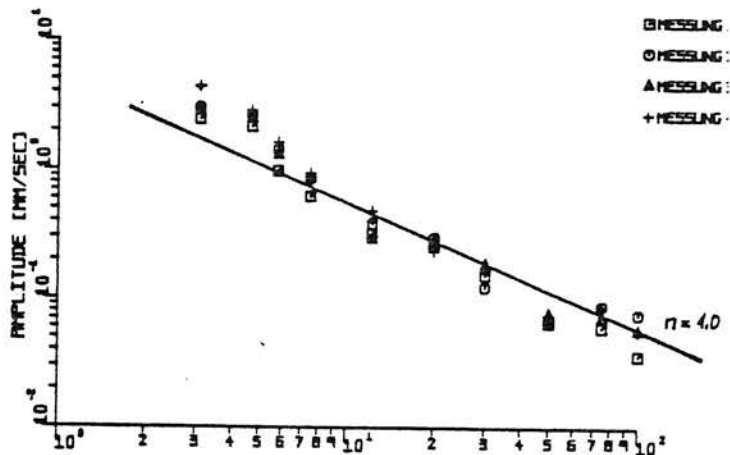
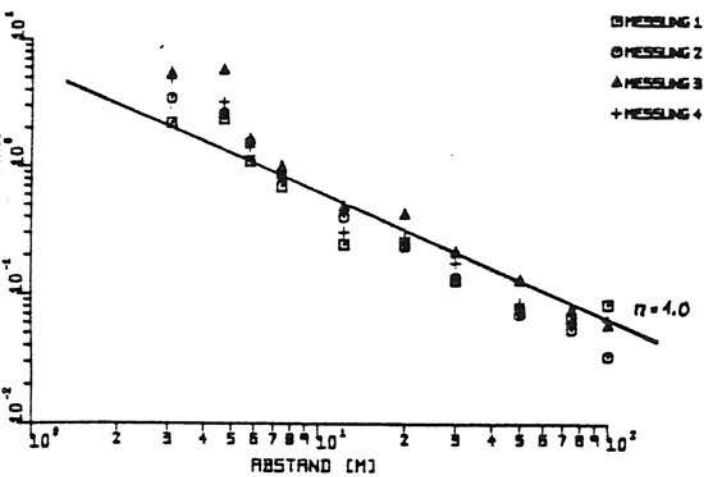
ZUGMESSUNGEN DACHAU VM=120 KM/H
FESTE FAHRBAHN

BLATT NR. 1

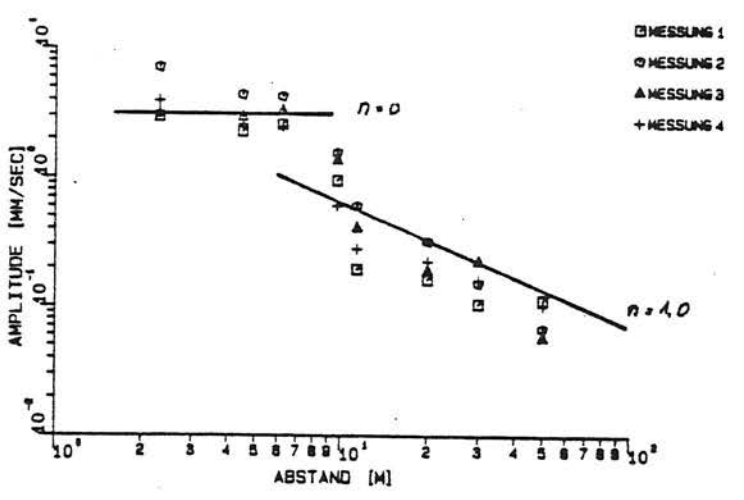
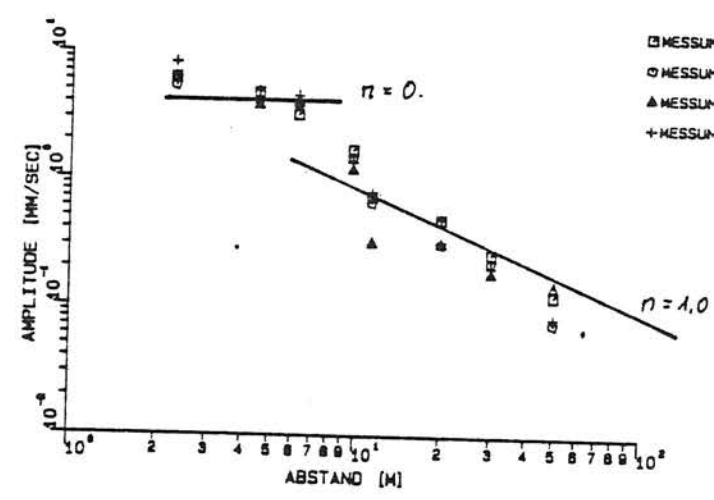
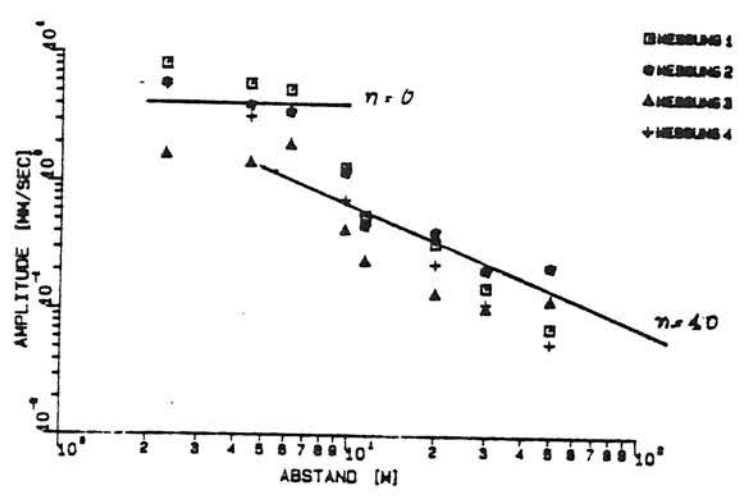
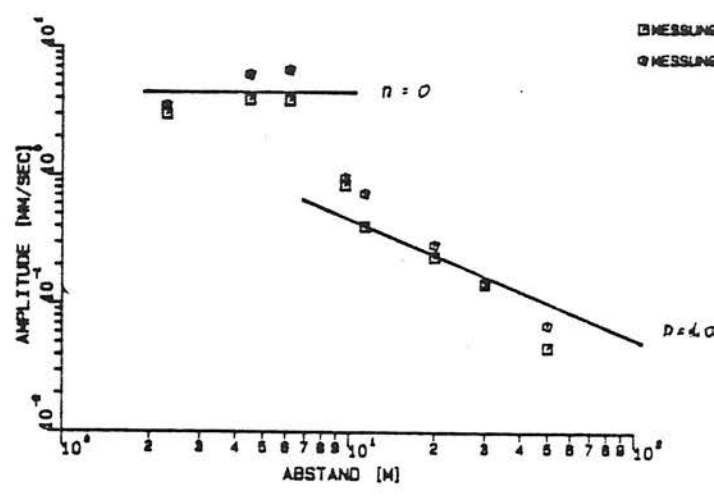
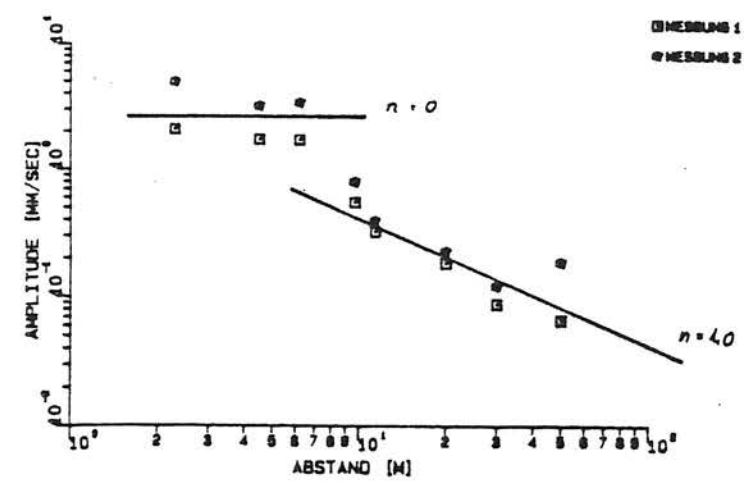
C2-7 Linearer Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
Standardabweichung
Mittelwert der spektralen Leistungsdichte



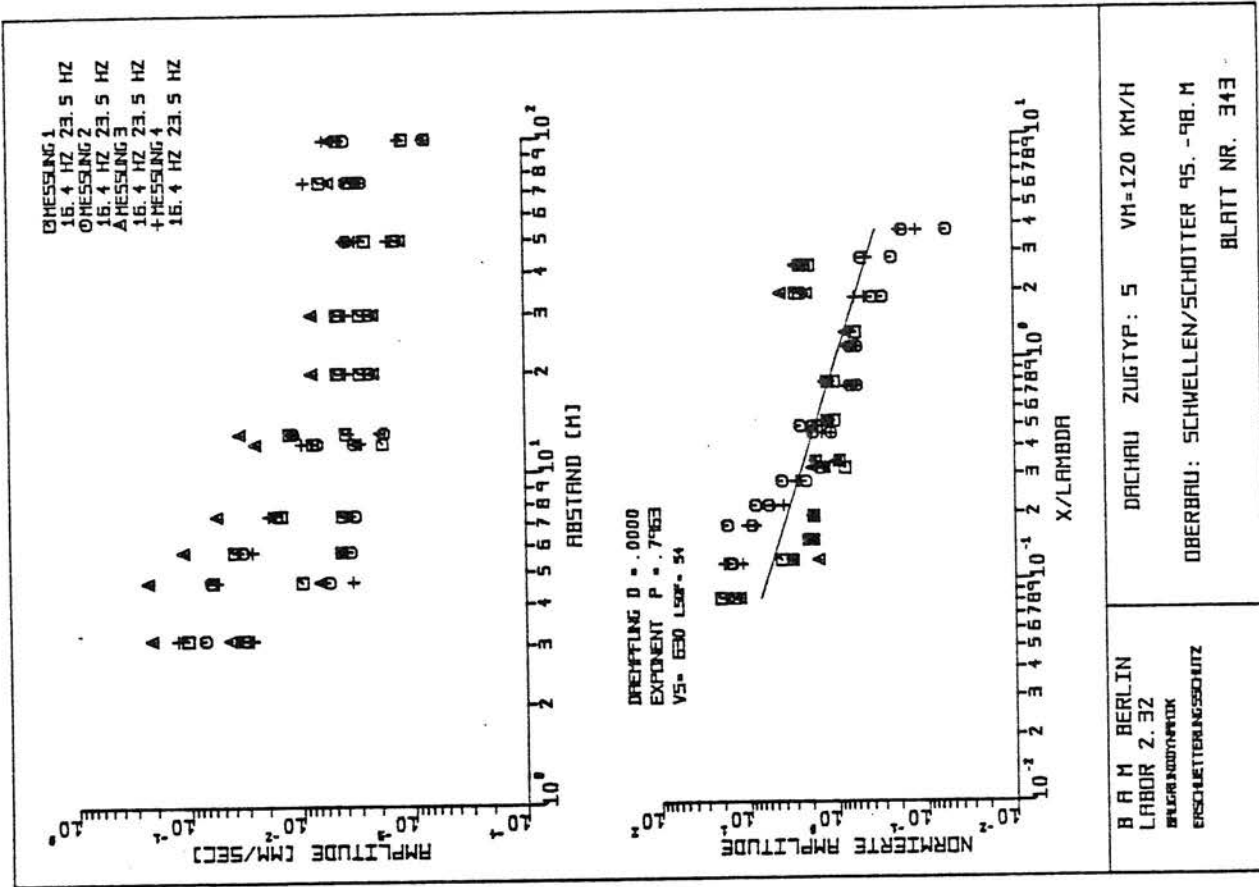
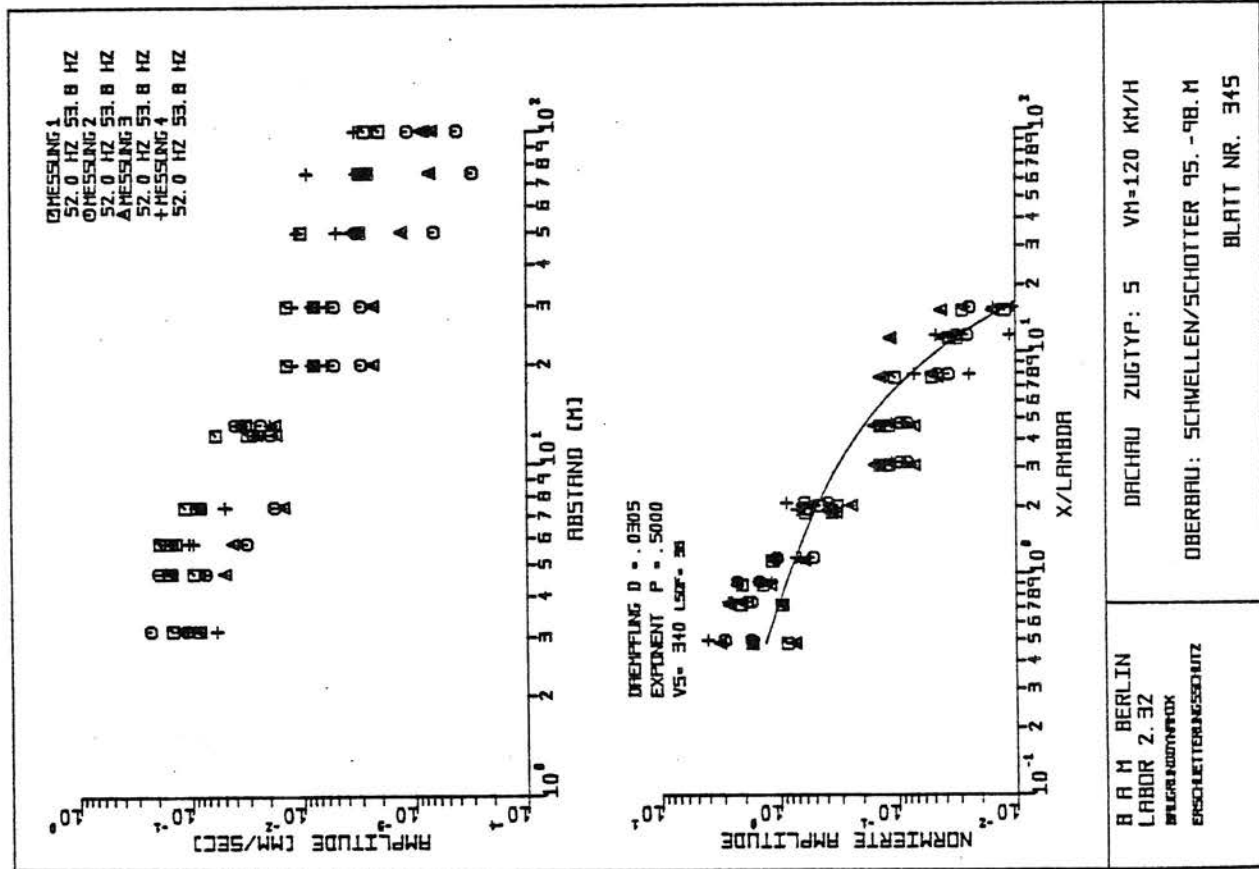
C2-8 Linear Mittelwert im 68 %igen Vertrauensintervall
 Standardabweichung
 Mittelwert der spektralen Leistungsdichte



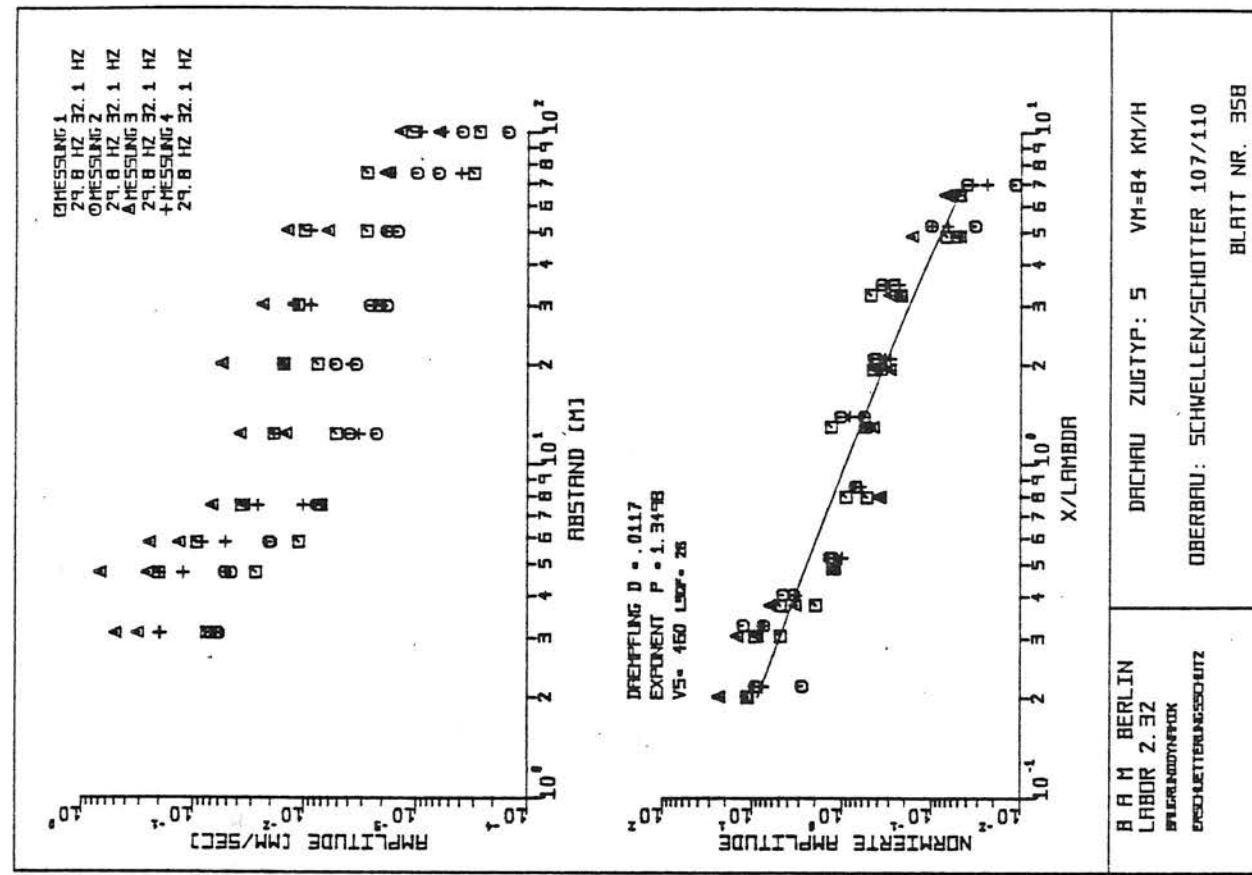
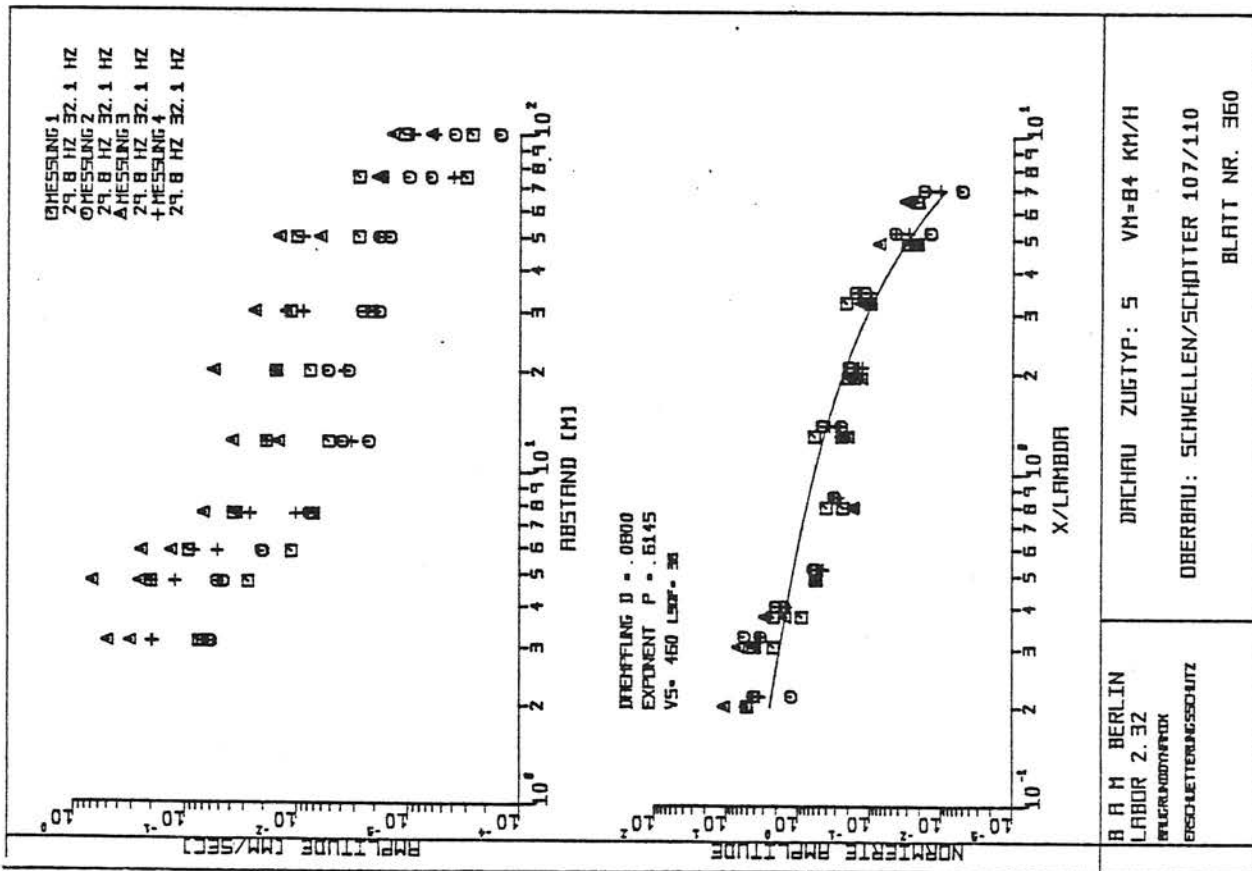
DACHAU ZUGTYP: 5
 OBERBAU: SCHWELLEN/SCHOTTER



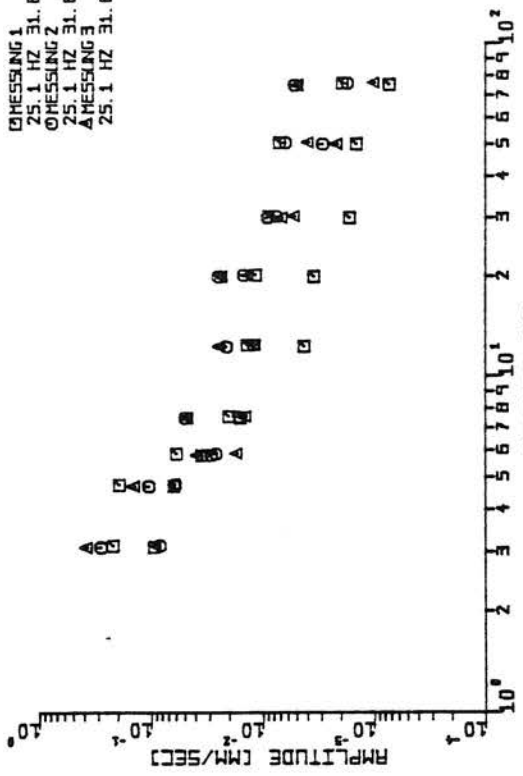
DACHAU ZUGTYP: S
 OBERBAU: RHEDA



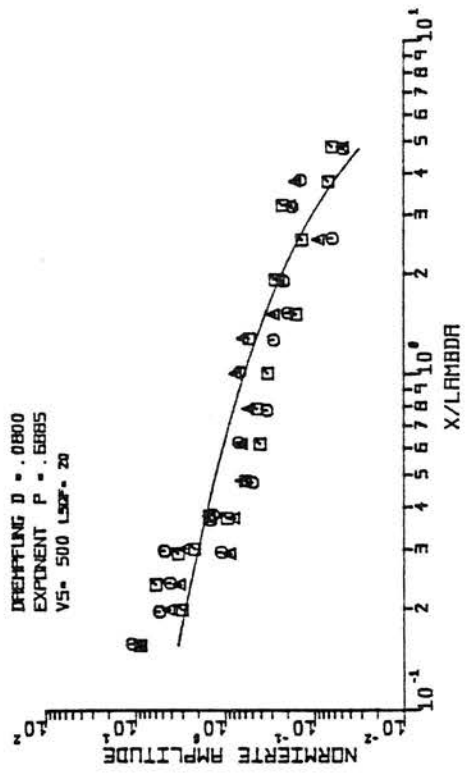
C2-11 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum



□ MESSUNG 1
 ○ MESSUNG 2
 △ MESSUNG 3



DREHPFUNG D = .0800
 EXPERIMENT F = .6885
 VS = 500 L50P = 20

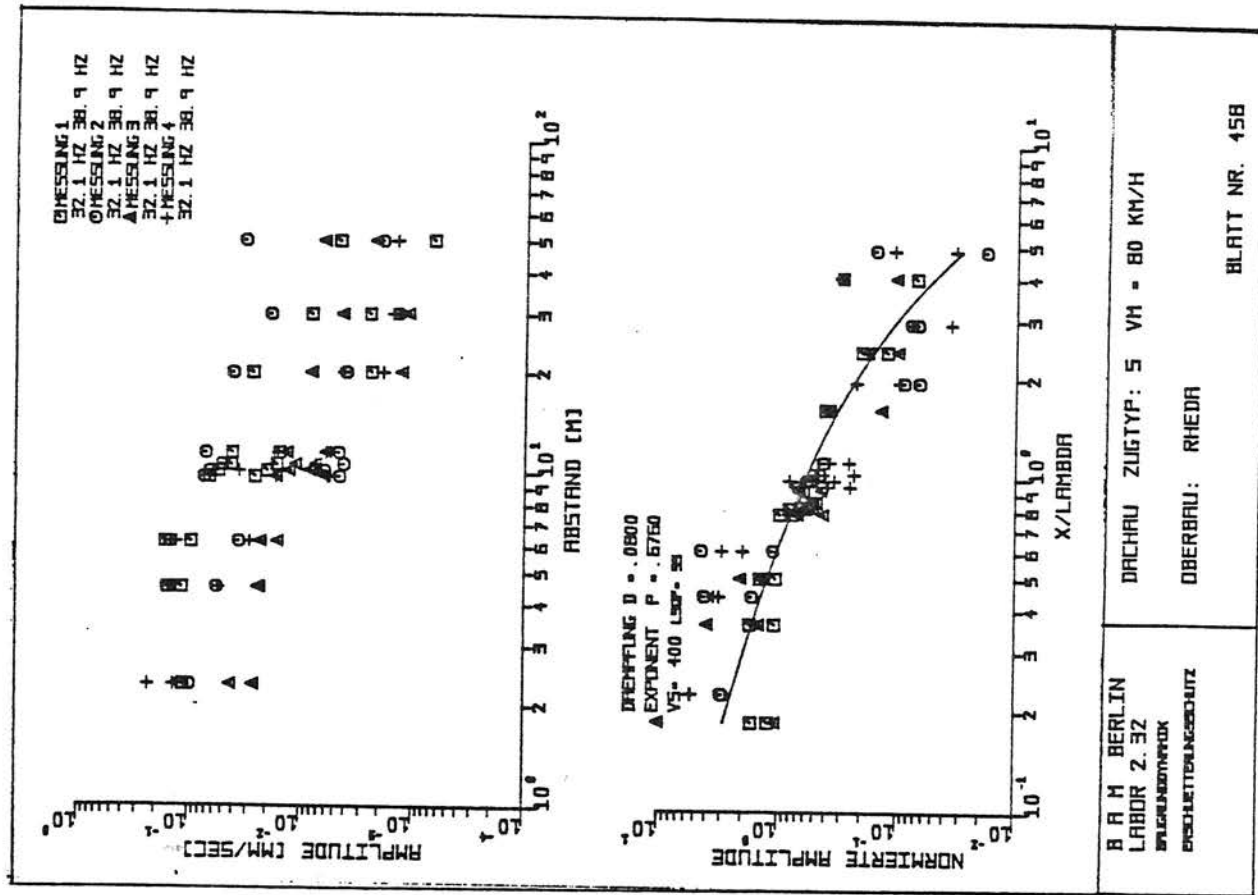


B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BRÜCKENSTRASSE
 ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

DACHAU ZUGTYP: IC VM=146 KM/H
 OBERBAU: SCHWELLEN/SCHOTTER 111/114

BLATT NR. 412

C2-13 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum



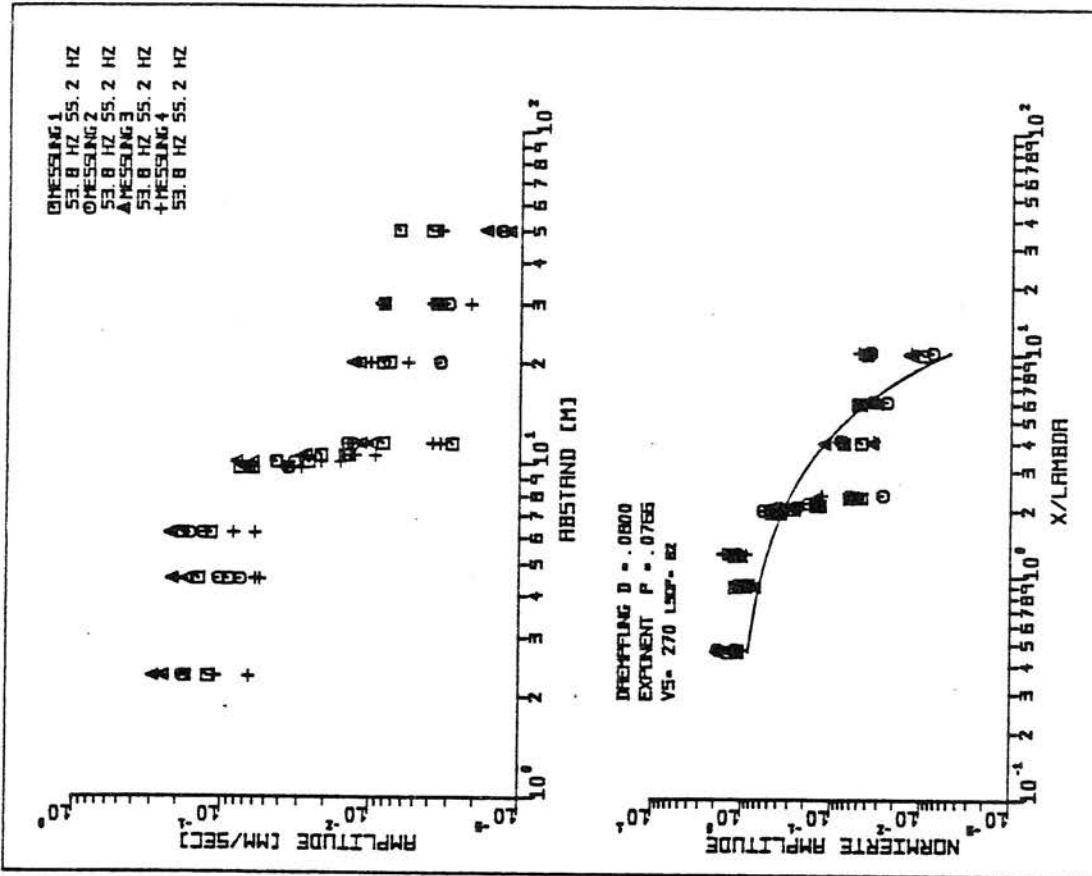
B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 ERLEBUNGSPUNKT
 ERSCHEINUNGSSCHUTZ

DACHAU ZUGTYP: 5
 VM = 80 KM/H

OBERBAU: RHEDA

BLATT NR. 158

C2-14 Ausbreitung von Amplituden signifikanter Frequenzen aus dem Fourierspektrum

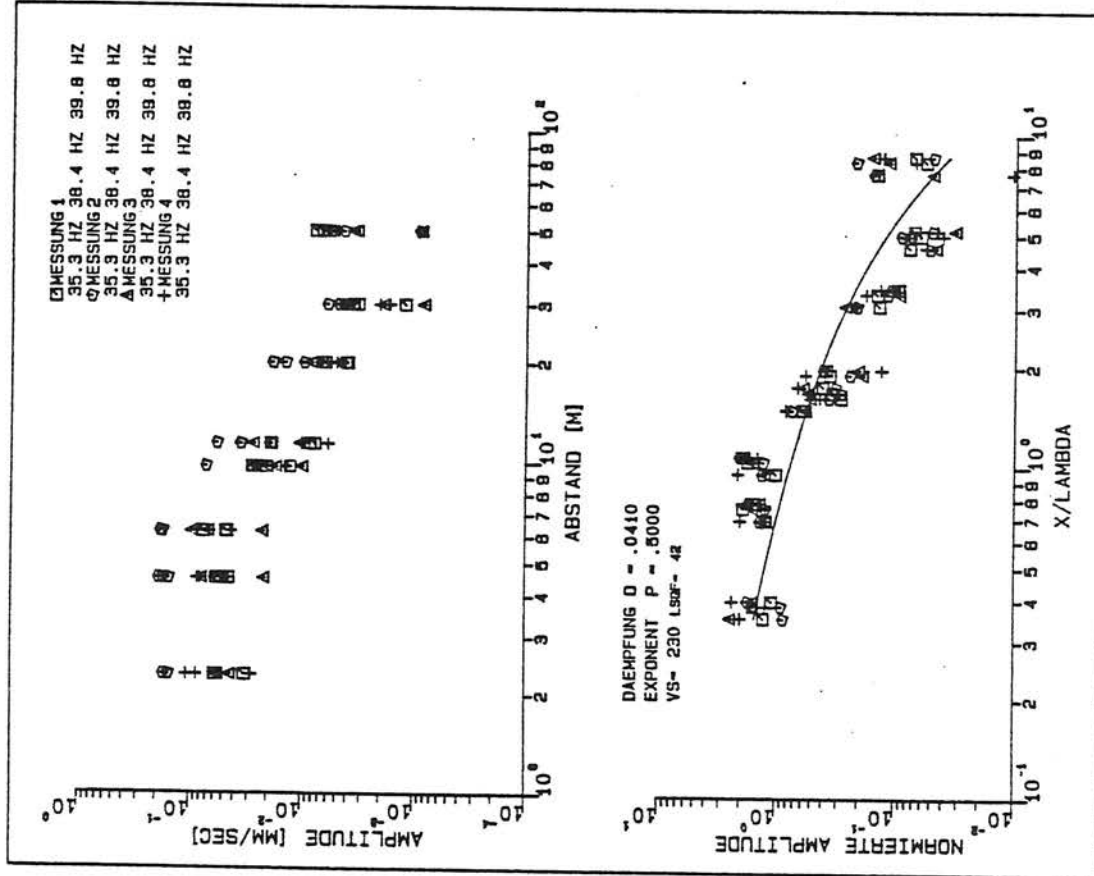


B R M BERLIN
 LABOR 2.32
 BRÜHLINGSTRASSE
 BERGHEIMSTRASSE 10

DACHAU ZUGTYP: 5 VH = 120 KM/H
 OBERBAU: RHEDA

BLATT NR. 449

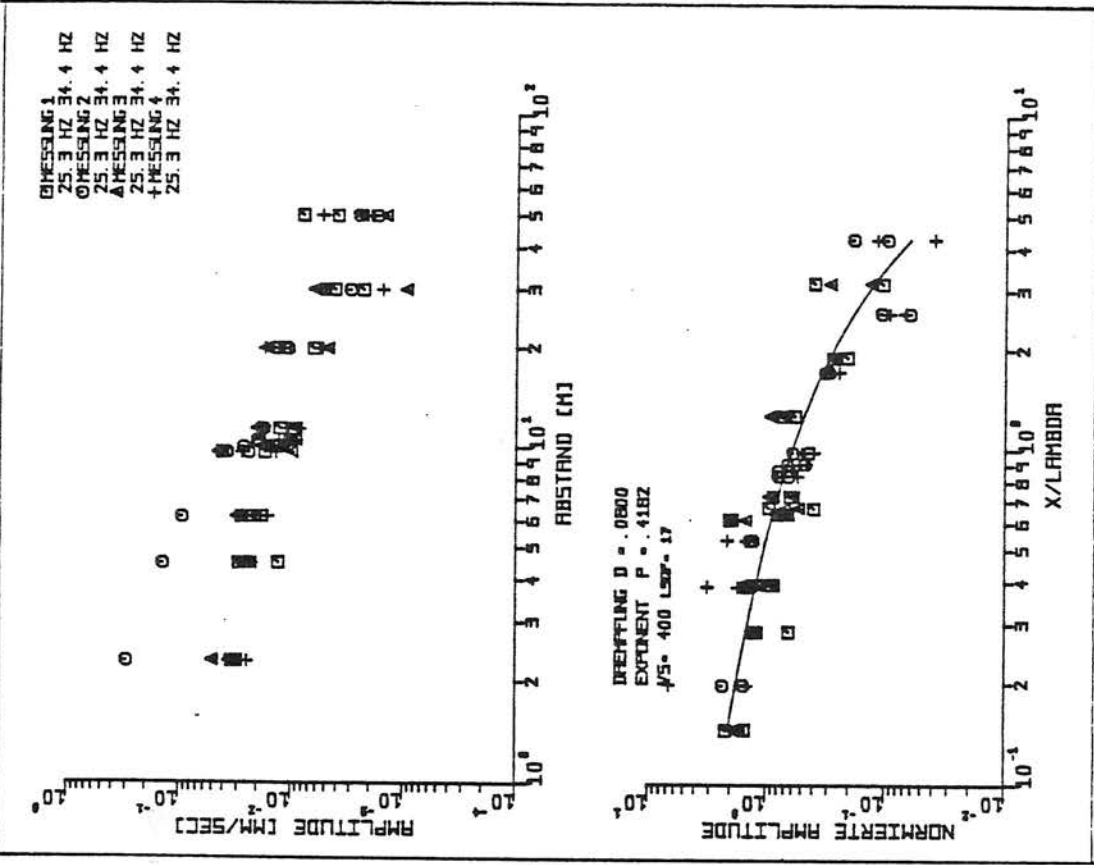
C2-15 Ausbreitung von Amplituden signifikanter
 Frequenzen aus dem Fourierspektrum



B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BAUERKINEMATIK
 ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

DACHAU ZUGTYP: S V = 120 KM/H
 OBERBAU: RHEDA 30.-33 MES

BLATT NR. 172



B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BAUERKINEMATIK
 ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

DACHAU ZUGTYP: S VM = 120 KM/H
 OBERBAU: RHEDA

BLATT NR. 446

Literatur

- [1] L. Auersch, F. Krüger
Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Stadtverkehrs in Geländeneiveau
Bericht 9 des BMFT-Vorhabens TV7954
- [2] W. Rücker
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
Technische Universität Berlin, 1979

Teil IV

Theorie der Immission

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil IV: Theorie der Immission</u>	
1. Ausgangslage und Zielsetzung	IV/1
2. Modellrechnungen zur Resonanzüberhöhung der Decken	IV/3
2.1 Der Einfluß von Deckenform und Auflagerbedingungen auf die Resonanzüberhöhung	IV/3
2.1.1 Vorgehensweise	IV/3
2.1.2 Ergebnisse	IV/3
2.2 Das Zusammenwirken von Deckenresonanz und Baugrund anhand einfacher Gebäudemodelle	IV/7
2.2.1 Eine Parameterstudie zur Deckenresonanz: Variation von Bauwerks- und Baugrundeigenschaften	IV/7
2.2.1.1 Das Schwingungsverhalten der Standardstruktur	IV/11
2.2.1.2 Überblick über die Deckenresonanzen	IV/11
2.2.2 Die Dämpfung der Deckenresonanz durch den Boden	IV/13
2.2.3 Interpretation der weiteren Parametereinflüsse	IV/16
2.3 Die Deckenresonanz bei breitbandiger, unkorrelierter und instationärer Anregung	IV/18
2.3.1 Rauschanregung	IV/19
2.3.2 Instationäre und Impulsanregung	IV/24
2.3.3 Unkorrelierte Anregung der Fundamente	IV/25
3. Die 3-dimensionale Bauwerk-Boden Wechselwirkung	IV/27
3.1 Das Rechenverfahren	IV/27
3.2 Steifigkeit und Dämpfung von Fundamentgruppen	IV/28
3.3 Ein Bauwerksbeispiel	IV/33
3.3.1 Schwingungsformen ausgewählter Frequenzen	IV/33
3.3.2 Das Übertragungsverhältnis Freifeld-Bauwerk	IV/37
4. Zusammenfassung	IV/40
Anhang A1-A16 - Modellrechnungen zur Resonanzüberhöhung der Decken	

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Die Problemstellung der Immission ist es, die Schwingantworten eines Bauwerks oder einzelner Bauwerksteile auf eine Anregung durch die Freifeldschwingungen des Bodens zu bestimmen. Im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] wurden Gebäudebeispiele als zweidimensionale Rahmen auf Bodenfedern und -dämpfern mit der Finiten-Element-Methode berechnet (s. Bild 1). Die Ergebnisse stimmten mit für eine Prognose ausreichender Genauigkeit mit dem Verhalten eines einfacheren Modells, einem Stab auf Bodenfeder und -dämpfer, überein, so daß dieses Stabmodell in das erstellte Prognoserechenprogramm eingebaut wurde. Lediglich das Gebäudeverhalten in der Nähe der Eigenfrequenz der Decken und die Deckenresonanz selbst werden in diesem Modell nicht erfaßt. Die bei einer Prognose noch zusätzlich zu berücksichtigende Resonanzüberhöhung der Decken konnte mit den damals durchgeführten Modellrechnungen nicht befriedigend eingegrenzt werden.

Das Ziel der theoretischen Arbeiten zur Erschütterungsübertragung in Gebäude besteht nun darin, einerseits die bisherigen Ergebnisse auch an einem dreidimensionalen Gebäudemodell zu überprüfen und andererseits die Resonanzüberhöhung der Decken realistisch einzugrenzen. Bei den Arbeiten zur Deckenresonanz werden zunächst (Abschnitt 2.1) dreidimensionale Modelle, das heißt Plattenschwingungen der Decke allein betrachtet und der Einfluß von Deckenform und Auflagerbedingungen auf die Resonanzüberhöhung der Decke untersucht. In Abschnitt 2.2 wird der Einfluß des Baugrundes auf die Deckenresonanz bei verschiedenen einfachen Gebäudemodellen untersucht, wobei sich die für die Prognose wichtige Eingrenzung der Resonanzstärke ergibt. In Abschnitt 2.3 werden schließlich einige Aussagen bereitgestellt, um diese Ergebnisse sinnvoll in das Prognoseverfahren einzubauen.

Zur Berechnung der "3-dimensionalen Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Boden" wurde ein Rechenverfahren entwickelt, das in Abschnitt 3.1 kurz beschrieben wird. Mit diesem Rechenverfahren wird zunächst die Steifigkeit und Dämpfung von für Gebäudegründungen typischen Fundamentgruppen berechnet (Abschnitt 3.2). In Abschnitt 3.3 wird schließlich ein Gebäudebeispiel, das auch unter gut kontrollierten Bedingungen gemessen wurde, vollständig dreidimensional durchgerechnet.

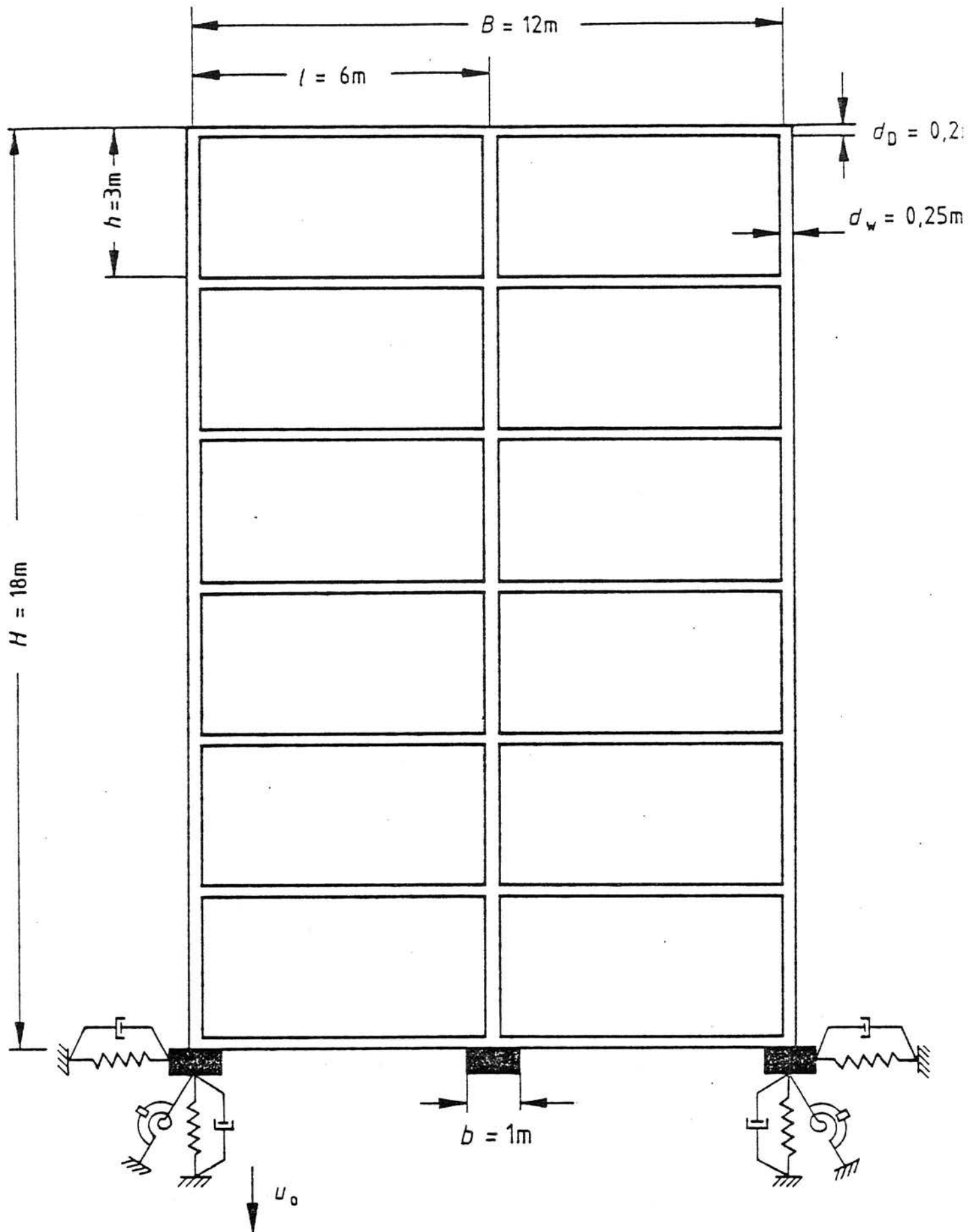


Bild 1 - Zweidimensionales Gebäudemodell aus [1]:
sechsgeschossiger Rahmen auf Bodenfedern und -dämpfern

2. Modellrechnungen zur Resonanzüberhöhung der Decken

2.1 Der Einfluß von Deckenform und Auflagerbedingungen auf die Resonanzüberhöhung

2.1.1 Vorgehensweise

Als Modell für die Decken werden Platten verschiedener Form und unter verschiedenen Auflagerbedingungen mit der Finite-Element-Methode berechnet. Dabei werden jeweils die gleichen Materialdaten (für Beton)

$$\begin{aligned} E &= 3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 && \text{(Elastizitätsmodul),} \\ \rho &= 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 && \text{(Dichte),} \\ \nu &= 0,15 && \text{(Querkontraktionszahl),} \\ D &= 0,01 && \text{(Materialdämpfung, } D = \text{Imag (E)/Real (E))} \end{aligned}$$

und die gleiche Deckendicke von

$$d_D = 0,2 \text{ m}$$

verwendet. Die Decken werden durch gleichzeitige vertikale Verschiebungen aller Auflager angeregt und die Schwingantworten der Deckenmitte werden über einen gewissen Frequenzbereich verfolgt. Als Ergebnis werden das maximale Amplitudenverhältnis von Deckenmitte zu Deckenaullager und die zugehörige Resonanzfrequenz festgehalten. Da die Eigenfrequenzen vorab nicht bekannt sind, erfordert dieses Vorgehen bei den scharfen Resonanzspitzen ein Abtasten des Frequenzbereichs in teilweise 1/100 Hz-Schritten.

2.1.2 Ergebnisse

Ausgangspunkt sind zunächst einmal analytische Ergebnisse für einen Balken, womit praktisch Decken erfaßt werden, die nur an zwei Seiten aufgelagert sind. In [1] sind die Ergebnisse für einen beidseitig eingespannten Balken etwas ausführlicher dargestellt. Die Resonanzüberhöhung des Balkens bei Auflageranregung hängt, wenn man symmetrische Anregung voraussetzt, nur von der Materialdämpfung, und zwar praktisch umgekehrt proportional ab. Bei 1 % Materialdämpfung beträgt die Resonanzüberhöhung der ersten Eigenfrequenz $V = 64$, höhere Eigenfrequenzen sind stärker gedämpft. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß bei diesem System die Abmessungen, die Steifigkeit und die Massenbelegung keinen Einfluß auf die Resonanzstärke haben. Das gilt prinzipiell auch für

- 1V/4 -

System	Maße 6m	Eigenfrequenz	Resonanz- überhöhung
Balken eingespannt		20Hz	67
Balken gelenkig		8,7Hz	67
Platte auf vier Stützen	ingespannt 	13,5 - 11,1Hz	67 - 73
	gelenkig 	7,5 - 6,6Hz	67
Platte allseitig eingespannt		26,5 - 33,3Hz	50 - 85
Platte allseitig gelenkig		17,2 - 17,9Hz	50 - 73
Rechteckplatte, Seitenverhältnis 1,5		12,5Hz	50
symmetrische L-Form		44,6Hz	64
Dreieckplatte auf drei Stützen		5,4Hz	66

Bild 2: Deckenresonanzen bei verschiedenen Deckenformen und Auflagebedingungen

die im folgenden untersuchten Platten, allerdings in dem Sinne, daß nur noch dimensionslose Größen, also etwa die Form der Platte und die Auflagerbedingungen, einen Einfluß haben können.

Es wurde nun zunächst die analytische Lösung auch für den beidseitig gelenkig gelagerten Balken aufgestellt, mit dem Ergebnis, daß die gleiche Resonanzüberhöhung $V = 64$ auftrat. Bei der vergleichsweisen Finite-Element-Berechnung der Balkensysteme ergab sich jeweils ein geringfügig größerer Wert von $V = 67$.

Zur weiteren Untersuchung der Auflagerbedingungen wurden nun neben den zwei-seitig gelenkig oder eingespannt gelagerten Decken auch auf vier Stützen und allseitig gelagerte quadratische Decken untersucht, jeweils gelenkig und eingespannt. Weiterhin wurden zur Erfassung des Formeinflusses eine dreieckige Decke auf Stützen (in Anlehnung an die Deckenfertigteilelemente im Meßobjekt TOP-Tegel), eine symmetrische L-Form und ein Rechteck jeweils bei gelenkiger Lagerung berechnet. Die Ergebnisse Resonanzfrequenz und Resonanzüberhöhung sind in Bild 2 zusammengestellt. Bei einigen Systemen sind mehrere Werte angegeben, die auf der Berechnung mit verschieden feiner Elementierung beruhen. Hinsichtlich der Resonanzstärke unterscheiden sich die Systeme kaum. Die Werte liegen zwischen $V = 50$ und $V = 85$, wobei der Wert 50 offensichtlich mit einer zu groben Elementierung zusammenhängt. Fazit dieser Studie ist also: Die Resonanzüberhöhung einer auflagererregten Decke hängt praktisch nicht von der Form und den Auflagerbedingungen ab.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen können zur Abschätzung von Deckeneigenfrequenzen benutzt werden. Darum sind die Ergebnisse in Bild 3 noch einmal im Hinblick auf aufsteigende Eigenfrequenzen umsortiert worden. Die angegebenen Werte gelten für die Abmessungen

Plattendicke $d_D = 0,2 \text{ m}$

Länge (=Breite) $l = 6 \text{ m}$

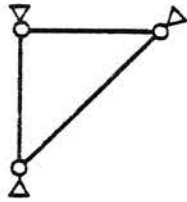
und die anfangs genannten Materialwerte von Beton. Eine Umrechnung auf andere Maße ist jedoch einfach, da für die Eigenfrequenz einer Platte/eines Balkens

$$f_0 \sim \frac{d_D}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

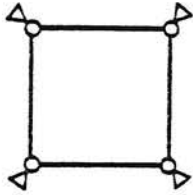
gilt.

gelenkig gelagert

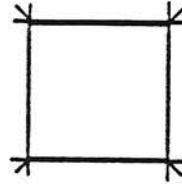
eingespannt



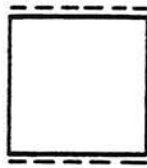
5,4Hz



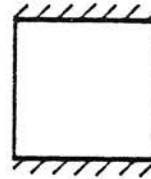
7Hz



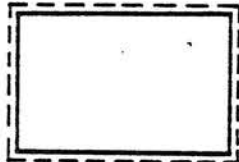
12Hz



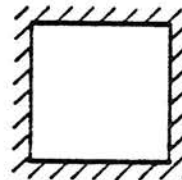
8,7Hz



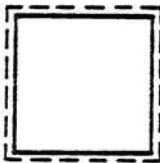
20Hz



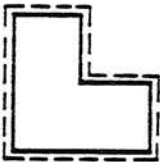
12,5Hz



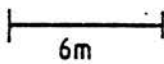
30Hz



17,5Hz



44,6Hz



6m

Längenmaßstab $l = 6\text{m}$

$d_D = 0,2\text{m}$ Deckendicke

$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

$\rho = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$f_0 \sim \frac{d_D}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Bild 3: Systematik der berechneten Deckeneigenfrequenzen

2.2 Das Zusammenwirken von Deckenresonanz und Baugrund anhand einfacher Gebäudemodelle

2.2.1 Eine Parameterstudie zur Deckenresonanz:

Variation von Bauwerks- und Baugrundeigenschaften

Die untersuchte Gebäudestruktur (Bild 4) besteht aus einem einfachen symmetrischen Rahmen aus Beton mit zwei parallel liegenden Wänden und den Fundamentfedern und -dämpfern. Die Abmessungen sind

Gebäudebreite zugleich Deckenspannweite	$B = l = 6 \text{ m,}$
Gebäuelänge	$L = 20 \text{ m,}$
Stockwerkshöhe	$h = 3 \text{ m,}$
Wandstärke	$d_W = 0,25 \text{ m,}$
Deckenstärke	$d_D = 0,2 \text{ m,}$
Fundamentbreite	$b = 1 \text{ m,}$

die Materialdaten des Betons sind

$$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2,$$
$$\rho = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3,$$
$$\nu = 0,16,$$
$$D = 0,01,$$

und die Materialdaten des Bodens sind

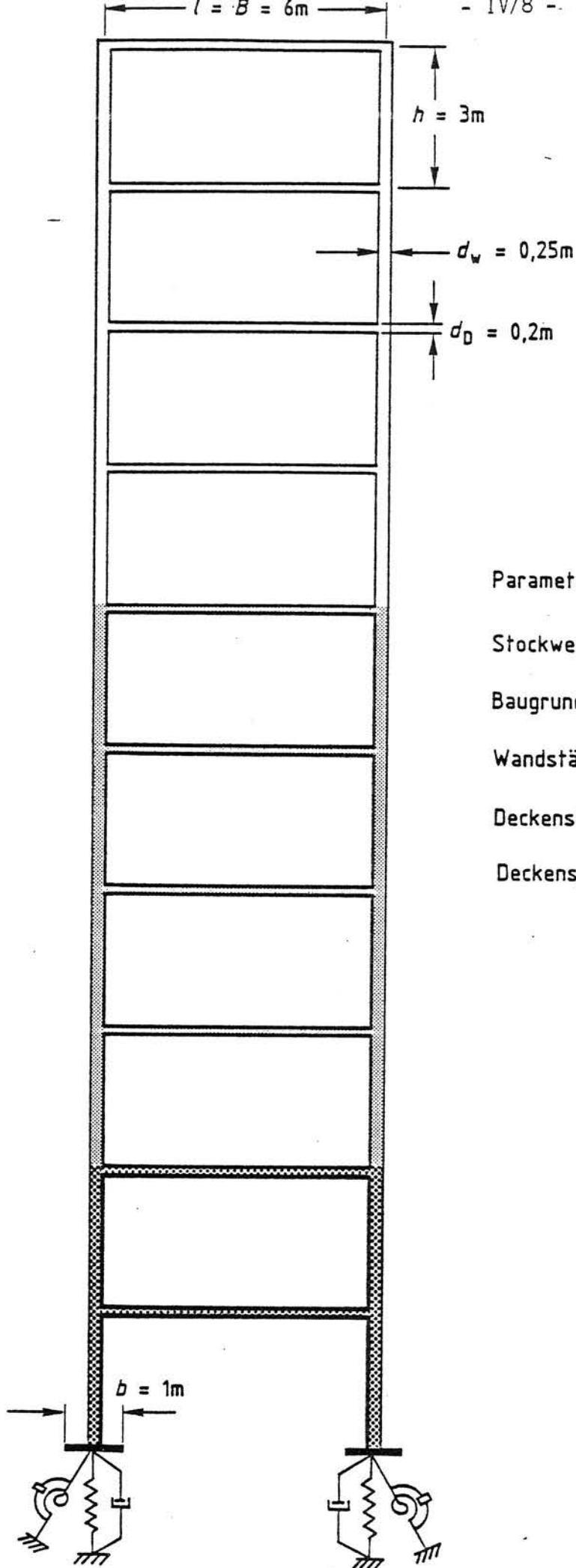
$$G = 8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2,$$
$$\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3,$$
$$\nu = 0,3$$

(das entspricht einem Lockerboden, $v_S = 200 \text{ m/s}$).

Diese Maße, die von dem im vorangegangenen Vorhaben berechneten Gebäude übernommen wurden, dienen als Ausgangspunkt für die Parametervariation und werden nachfolgend als Standardmaße bezeichnet.

Es werden nun folgende Größen variiert:

- die Stockwerkszahl $n = 2, 6, 10$
- die Baugrundsteifigkeit, so daß die Scherwellengeschwindigkeit $v_S = 200, 300, 500 \text{ m/s}$ beträgt,
- die Wandstärke $d_W = 0,15, 0,25 \text{ m}$,
- die Deckenstärke $d_D = 0,1, 0,2, 0,6 \text{ m}$
- und die Deckenspannweite $l = 4, 6 \text{ m}$.



Parametervariation:

Stockwerkszahl : $n = 2, 6, 10$

Baugrundsteifigkeit: $v_S = 200, 300, 500\text{m/s}$

Wandstärke : $d_w = 0,15\text{m}, 0,25\text{m}$

Deckenstärke : $d_D = 0,1\text{m}, 0,2\text{m}, 0,6\text{m}$

Deckenspannweite : $l = 4\text{m}, 6\text{m}$

Bild 4: Zwei- bis Zehngeschossiges Gebäudemodell mit Standardmaßen

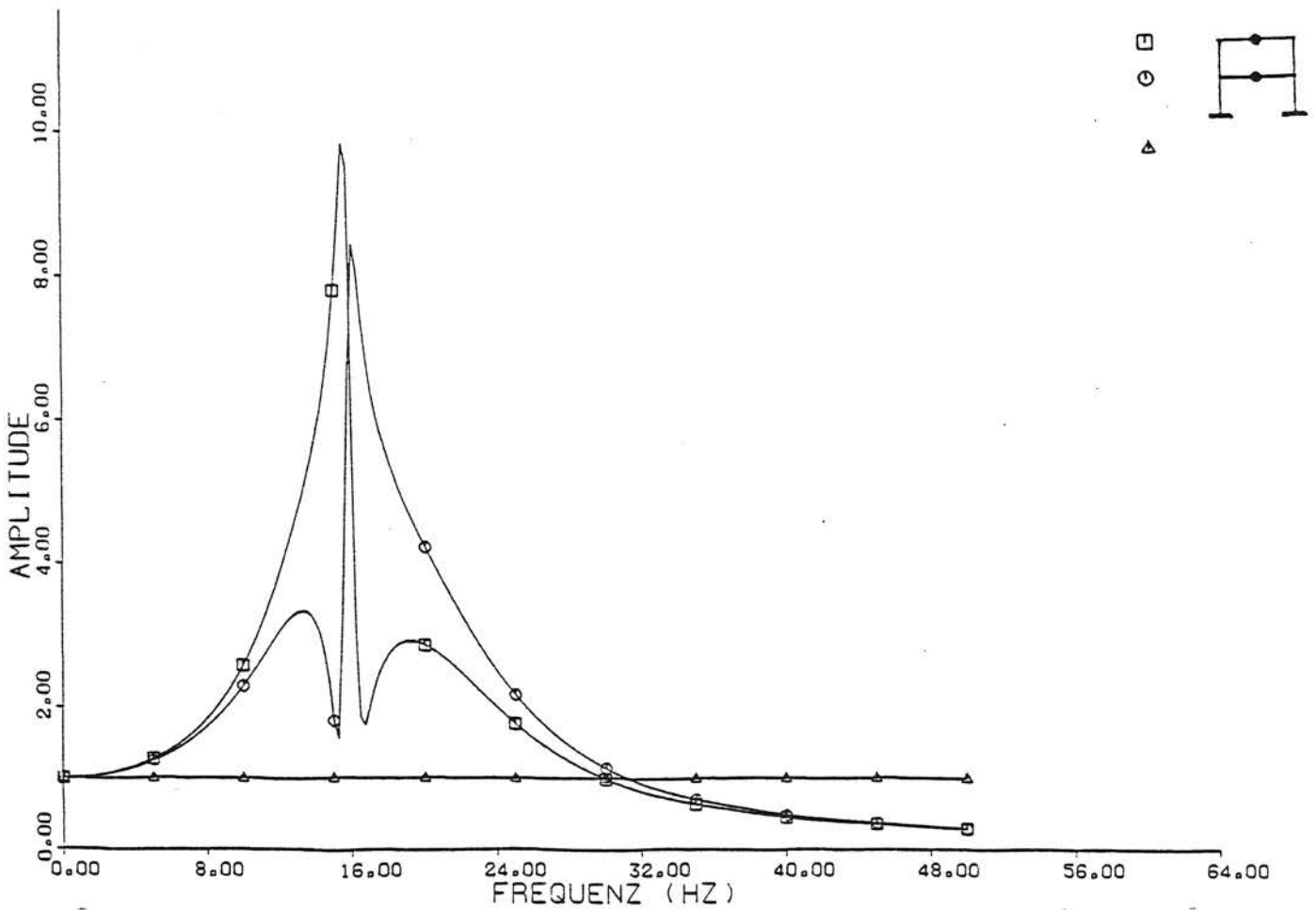
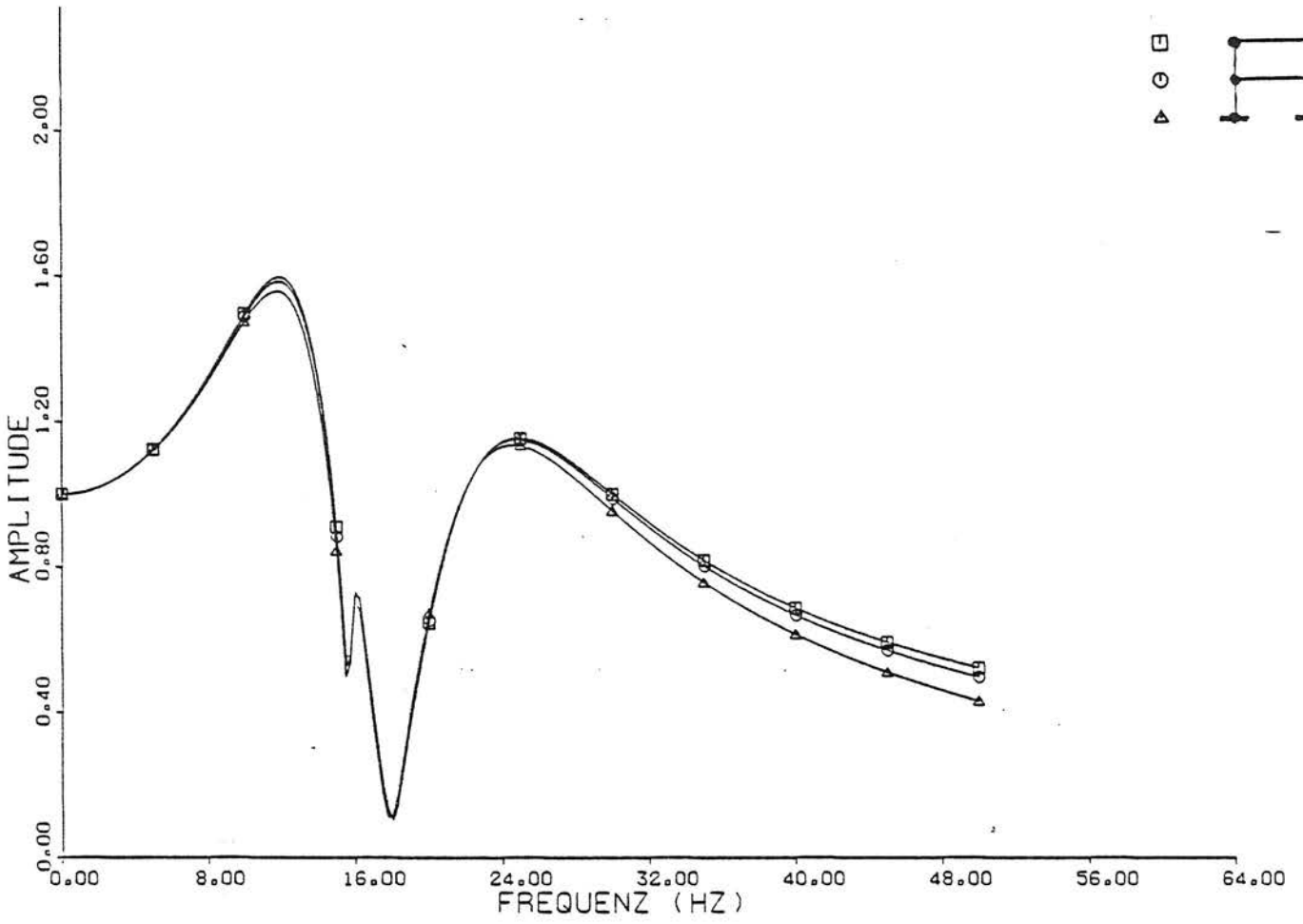


Bild 5 - Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
2 Stockwerke, $v_s = 200$ m/s, Standardmaße

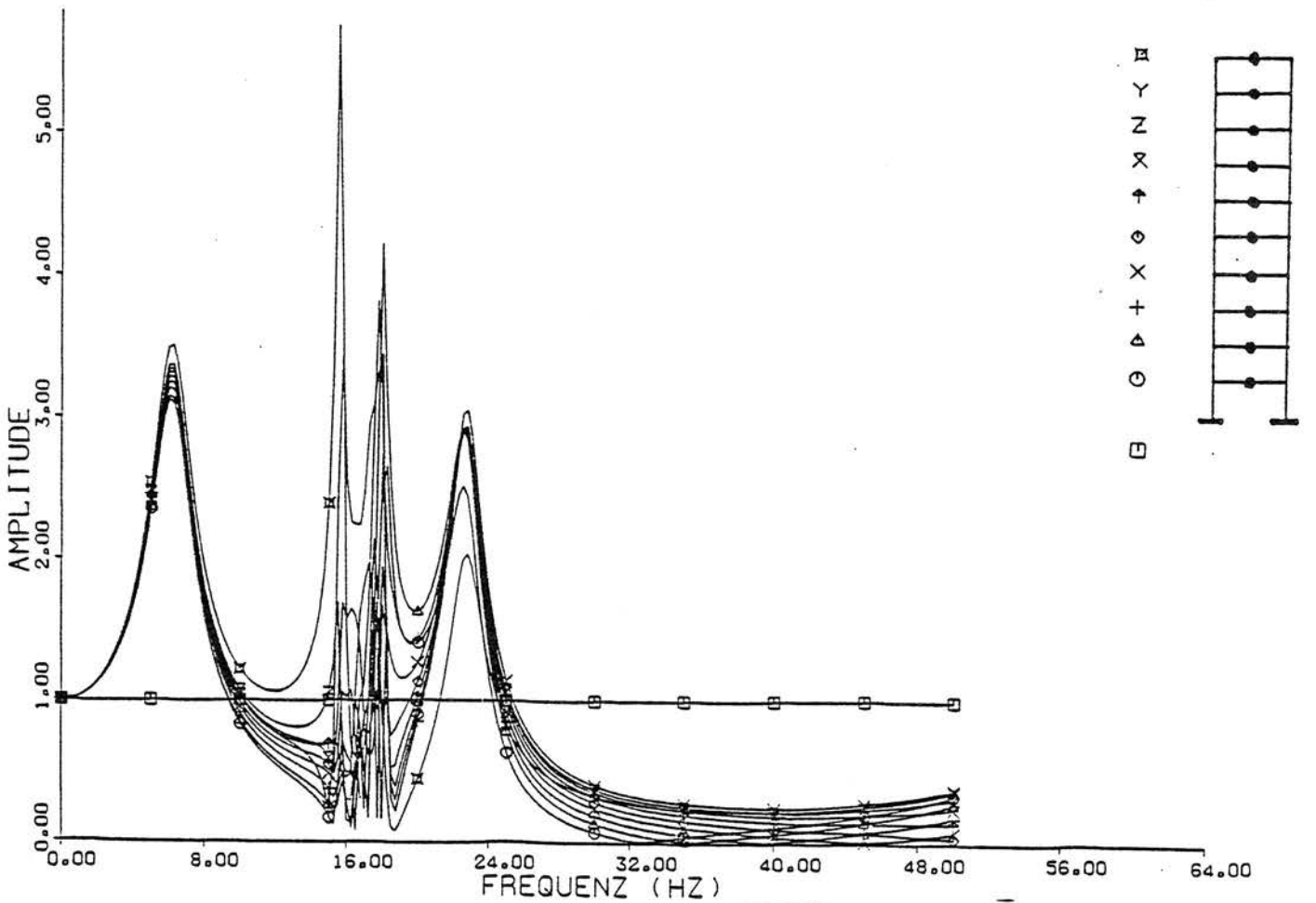
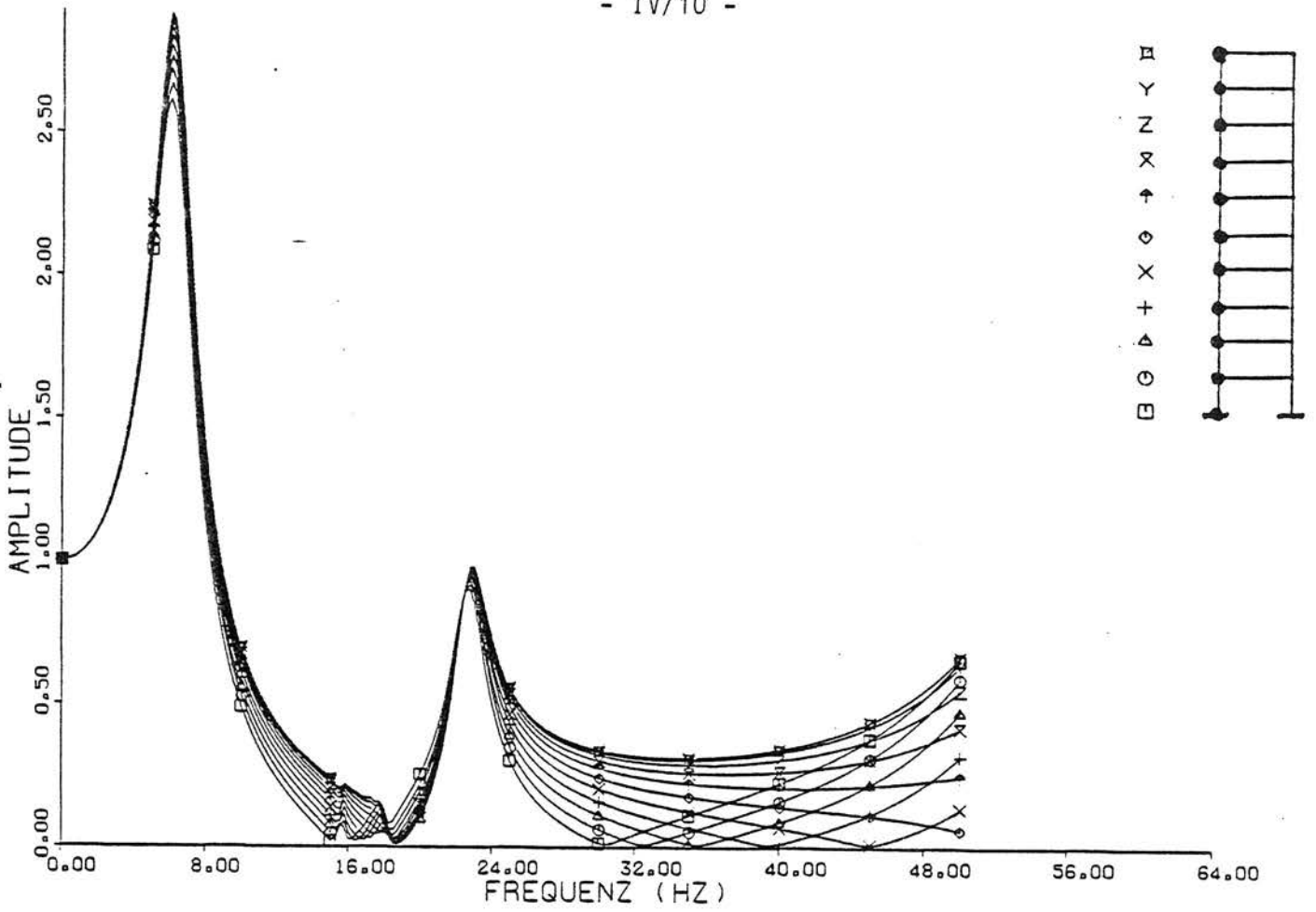


Bild 6 - Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
10 Stockwerke, $v_s = 200$ m/s, Standardmaße

2.2.1.1 Das Schwingungsverhalten der Standardstruktur

Zunächst wird ein zweigeschossiges Gebäude mit den Standardmaßen berechnet, wobei eine vertikale gleichphasige harmonische Einheitserregung am Fußpunkt der Bodenfedern wirkt. Als Ergebnis erhält man die Amplituden der Bauwerkspunkte bezogen auf die Freifelderregung des Bodens, die in Bild 5 über den Frequenzbereich von 0 bis 50 Hz ($\Delta f = 0,25$ Hz) aufgetragen sind. Der untere Teil des Bildes zeigt die Übertragungsfunktionen der beiden Deckenmitten mit den Resonanzspitzen bei ca. 16 Hz. Die Resonanzfrequenz der oberen Decke liegt etwas tiefer als die der unteren Decke, die Resonanzkurven der beiden Decken sind asymmetrisch und jeweils spiegelverkehrt, wobei die obere Decke auch ein etwas größeres Maximum aufweist. Die Resonanzüberhöhungen betragen 10,0 und 8,4. Im Frequenzbereich um die Deckenresonanz sind die in Bild 5 oben dargestellten Wand- und Fundamentamplituden stark abgemindert, und man kann analog zum 2-Massen-Schwinger von einer Schwingungstilgung sprechen.

Als zweites Beispiel soll das zehngeschossige Gebäude mit Standardmaßen eingehender untersucht werden. Zunächst die Gemeinsamkeiten mit dem zweigeschossigen Gebäude: Die Decken (Bild 6 unten) weisen zwischen 16 und 18 Hz Resonanzspitzen auf. Die größte Resonanzüberhöhung mit $V = 6,2$ und die tiefste Resonanzfrequenz hat dabei die oberste Decke. Die Resonanzspitzen der Decken werden von der Schwingungstilgung der Wand- und Fundamentpunkte (Bild 6 oben) begleitet. Es treten aber deutlicher als beim zweistöckigen Gebäude zwei Resonanzen des Gesamtbauwerks hervor, die bei den Deckenmitten eine Überhöhung von $V = 3$ erreichen. Die erste Resonanz bei 6,1 Hz beruht auf der Eigenfrequenz des nahezu starren Gesamtbauwerks auf dem Boden, die zweite Resonanz bei 23 Hz korrespondiert mit der gegenphasigen Eigenform eines 2-Massen-Schwingers, das heißt, die Deckenmitten schwingen zusammen mit dem Boden gegenphasig zur Wand.

2.2.1.2 Überblick über die Deckenresonanzen

Die weiteren Rechnungen sind im Anhang mit den Übertragungsfunktionen (A-1 bis A-12) und den Resonanzüberhöhungen (A-16) der einzelnen Decken dokumentiert. Hier soll nur noch jeweils die größte Resonanzüberhöhung aller Decken und der Mittelwert der Resonanzüberhöhungen aller Decken betrachtet werden. Diese Werte sind auf der folgenden Seite für alle durchgerechneten Beispiele der Parameterstudie zusammengefaßt worden.

Die Resonanzüberhöhung der Decken gegenüber der Freifelderregung
in Abhängigkeit einiger Bauwerks- und Baugrundeigenschaften

Baugrundsteifigkeit und Stockwerkszahl:

$n \cdot v_s$	200 m/s	300 m/s	500 m/s
2	10,0/9,2	20,9/18,6	36,5/32,9
6	7,8/3,9	13,1/ 7,2	33,6/20,0
10	6,2/3,7	-	-

Wandstärke:

$n \cdot d_w$	0,25 m	0,15 m
2	10,0/9,2	17,1/14,0
6	7,8/3,9	11,9/ 6,8

Deckeneigenfrequenz:

f_0	Maße	n	$V_{\max}/V_{\text{mittel}}$
9,5 Hz	$d_D=0,1\text{m}$	6	14,1/9,9
16 Hz	Standard	6	7,8/3,9
16 Hz	Standard	2	10,0/9,2
31 Hz	$l=4\text{m}$	2	3,9/3,8
57 Hz	$l=4\text{m}, d_D=0,6\text{m}$	2	1,2/1,1

- */*: 1. Zahl - maximale Resonanzüberhöhung
2. Zahl - mittlere Resonanzüberhöhung aller Decken

Es ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

- Die maximale und die mittlere Resonanzüberhöhung nehmen deutlich mit der Bodensteifigkeit zu. Ein weicher Boden trägt maßgeblich zur Bedämpfung der Deckenresonanz bei. Während ein steifer Baugrund mit $v_s = 500$ m/s (steifer Ton, verwitterter Fels) noch immerhin die Hälfte der bei völlig starrem Untergrund auftretenden Resonanzüberhöhung ($V = 65$ infolge 1 % Materialdämpfung) aufweist, ist die Resonanzhöhe beim Lockerboden mit $v_s = 200$ m/s (Sand, Lehm) schon mindestens auf ein Sechstel reduziert. Auf dieses wesentliche Ergebnis wird noch einmal im nächsten Abschnitt eingegangen. Die weitere Parametervariation beschränkt sich nun im wesentlichen auf den in der Regel anstehenden Lockerboden ($v_s = 200$ m/s).
- Die Resonanzhöhe nimmt mit zunehmender Stockwerkszahl ab. Beim zweistöckigen Gebäude sind die einzelnen Deckenresonanzen ungefähr gleich groß, während im 6- und 10-stöckigen Gebäude die oberste Decke mit ihrer Resonanz deutlich herausragt. Deshalb ist die mittlere Resonanz bei den hohen Gebäuden merklich kleiner als das Maximum, und die Abnahme der Resonanzstärke mit der Stockwerkszahl ist am Mittelwert deutlicher ablesbar.
- Die Resonanzhöhe nimmt mit der Wandstärke ab. Bei dünneren und damit nachgiebigeren Wänden ist die Resonanz stärker.
- Die Resonanzhöhe nimmt mit größer werdender Deckeneigenfrequenz ab. Es wurde ausgehend von der Standardstruktur mit der Deckeneigenfrequenz von 16 Hz einmal das 6-stöckige Gebäude mit dünneren Decken ($f_0 = 9,5$ Hz) berechnet, wobei sich die Resonanzüberhöhung in etwa verdoppelte. In der anderen Richtung wurden 2-stöckige Gebäude mit höheren Eigenfrequenzen (kürzere Spannweite, dickere Decken) mit dem Standardmodell verglichen. Bei der höchsten Deckeneigenfrequenz von 57 Hz ist dabei die Resonanzüberhöhung gegenüber dem anregenden Freifeld fast völlig verschwunden.

2.2.2 Die Dämpfung der Deckenresonanz durch den Boden

Die im vorigen Abschnitt zusammengefaßten Deckenresonanzstärken waren alle deutlich geringer als die Resonanz einer Decke allein. Es soll nun der Grund dieses für die Prognose sehr wesentlichen Ergebnisses näher untersucht werden.

Dazu wird das betrachtete Modell schrittweise vom reinen Deckenmodell bis zum Gebäude auf dem Baugrund erweitert. Die Stufen sind (Bild 7)

- Decke allein,
- 2-stöckige Gebäude auf starrem Untergrund,
- Gebäude auf steifem Baugrund,
- Gebäude auf mittelsteifem Baugrund,
- Gebäude auf weichem Baugrund (typischer Lockerboden).

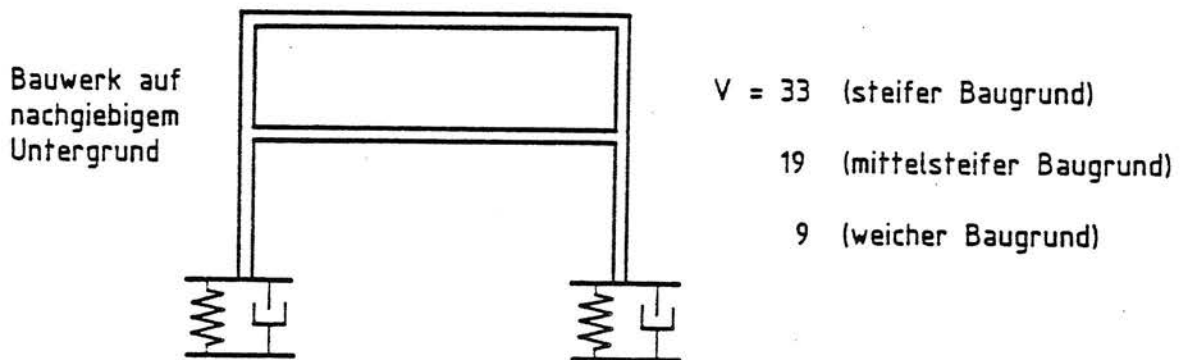
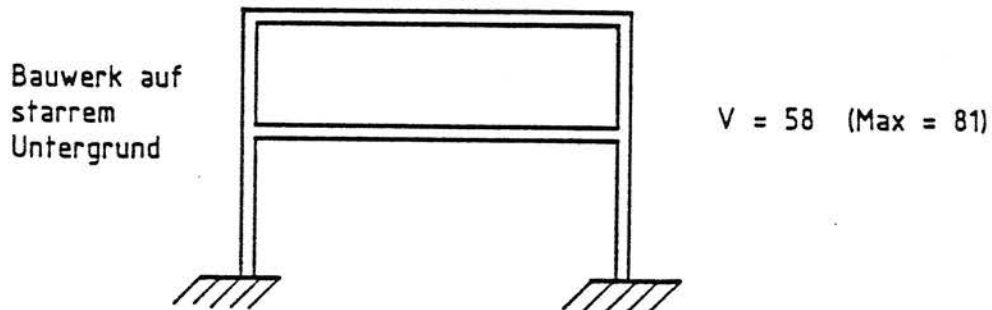
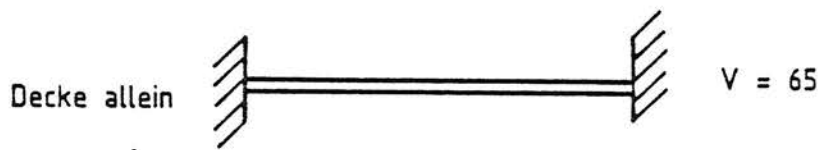


Bild 7: Resonanzüberhöhung der Decke bei unterschiedlichen Gebäudemodellen unter Fußpunktanregung

Die Resonanzüberhöhung der Decke allein ist aus 2.1.2 bekannt, sie beträgt etwa $V = 65$. Stellt man das zweistöckige Standardgebäude auf einen starren Untergrund, indem man die Antwort des Gebäudes auf eine Fußpunktanregung berechnet, so ergeben sich Resonanzstärken von $V = 81$ und 34 (s. Anhang Bild A-13). Das heißt, die Modellerweiterung auf ein Gebäude bringt nur eine geringfügig kleinere mittlere Resonanzüberhöhung von $V = 58$, andererseits sogar ein größeres Maximum. Erweitert man das Modell um Bodenfeder und -dämpfer für zunächst einen steifen Baugrund, so reduziert sich die Resonanzüberhöhung im Mittel auf 33 (s. Bild A-6). Je weicher der Baugrund ist, desto kleiner wird die Resonanzüberhöhung, sie reduziert sich von 33 ($v_s = 500$ m/s), über 19 ($v_s = 300$ m/s) auf 9 ($v_s = 200$ m/s) etwa in dem gleichen Verhältnis wie die Scherwellengeschwindigkeit v_s bzw. wie die Wurzel der Steifigkeit. Die Scherwellengeschwindigkeit v_s gibt auch das Verhältnis von Fundamentsteifigkeit zu Fundamentdämpfung an, so daß die Deckenresonanz hauptsächlich durch eine im Verhältnis zur Fundamentsteifigkeit große Fundamentdämpfung reduziert wird. Andererseits ist die Reduktion der Deckenresonanz auch ein Effekt der Schwingungstilgung, was an den kleinen Wandamplituden im Bereich der Deckenresonanz abgelesen werden kann. Die Schwingungstilgung ist allerdings, das zeigen auch Vergleichsrechnungen mit Fundamentfedern allein ohne Fundamentdämpfer, eine Folge der Nachgiebigkeit der Fundamente auf dem Boden.

Als Fazit dieser Betrachtung ist festzuhalten: Die Reduktion der Deckenresonanzen ist auf die Wirkung des Baugrundes zurückzuführen. Der Boden stellt einerseits eine Dämpfung durch die Möglichkeit der Energieabstrahlung zur Verfügung. Andererseits ermöglicht seine Nachgiebigkeit eine Schwingungstilgung im Bereich der Deckenresonanzen.

Ergänzend wurde auch der Einfluß des Bodens bei einer Krafterregung untersucht (Bilder A-14 und A-15). Diese Rechnungen korrespondieren mit den Messungen, bei denen die Decken in der Deckenmitte impulsartig angeregt werden und die Dämpfung aus dem Ausschwingverhalten ermittelt wird. Es wurden das 2- und das 6-stöckige Standardgebäude berechnet, wobei die Kraft jeweils auf einer Deckenmitte wirkte. Aus den Ergebnissen für den interessierenden Frequenzbereich von 0 bis 25 Hz wurden die maximale Verschiebung und der statische Wert abgelesen und aus deren Verhältnis die Resonanzüberhöhung V ermittelt. Als Dämpfung wird in der folgenden Tabelle der Wert $D = 1/2V$ angegeben.

6-stöckiges Standardgebäude

Anregung im	V	D
2. Stock	15,8	3,3 %
3. Stock	17,7	2,8 %
4. Stock	12,6	4,0 %
5. Stock	15,1	3,3 %

2-stöckiges Standardgebäude

Anregung im	V	D
1. Stock	10,3	4,8 %

2-stöckiges Standardgebäude auf starrem Untergrund

Anregung im	V	D
1. Stock	41,4	1,2 %

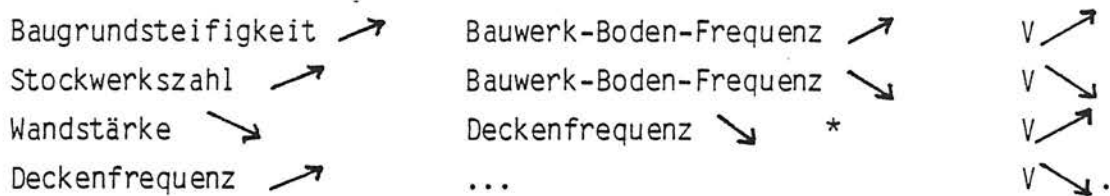
Deckenresonanz und Dämpfung bei Krafterregung der Deckenmitte

Bemerkenswert an den Ergebnissen ist einerseits, daß hier anders als bei der Freifeldanregung die Resonanz im 6-stöckigen Gebäude größer als beim 2-stöckigen Gebäude ist, und andererseits, daß auch bei direkter Anregung der Decke der Boden entscheidend für die Dämpfung der Deckeneigenfrequenz sorgt. Die möglicherweise naheliegende Vermutung, durch die Anregung der Decke - etwa durch einen Impuls - nur lokale Schwingungen der Decke zu erzeugen (und damit etwa die Materialdämpfung des Deckenmaterials zu bestimmen), ist demnach verkehrt. Dies wird auch durch die Auswertung der Schwingungsform in der Resonanz bestätigt: Beim 2-stöckigen Gebäude auf Lockerboden ist die Amplitude von Wand und Fundament noch immerhin 6 % des Maximums in der Deckenmitte.

2.2.3 Interpretation der weiteren Parametereinflüsse

In 2.2.1 sind das Schwingungsverhalten der Gebäudemodelle, die Resonanzüberhöhungen und die Parametereinflüsse zunächst nur beschrieben worden. Es soll nun versucht werden, eine Erklärung für die festgestellten Parametereinflüsse zu finden, um so die Ergebnisse für eine Prognose auf beliebige Gebäude- und Bodenverhältnisse verallgemeinern zu können.

Zunächst wurden die im Anhang zusammengestellten Übertragungsfunktionen etwas näher untersucht und die Lage zweier Eigenfrequenzen abgelesen: die Deckeneigenfrequenz einerseits und die Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz, bei der das Gebäude im wesentlichen starr gegen den Boden schwingt, andererseits. Es fällt dabei auf, daß die Resonanzüberhöhung einmal mit zunehmender Deckeneigenfrequenz abnimmt, dies war auch bei einer der Parametervariationen festgestellt worden, zum anderen aber auch bei abnehmender Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz. Dies gilt zum Beispiel bei der Variation der Stockwerkszahl: Mit zunehmender Stockwerkszahl nimmt die Gebäudemasse zu und verschiebt die Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz nach unten, gleichzeitig nimmt die Resonanzstärke ab. Das Verhältnis oder der Abstand der beiden Eigenfrequenzen scheint die Stärke der Resonanz zumindest der Tendenz nach zu bestimmen. Alle Rechenergebnisse unter 2.2.1.2 lassen sich unter diesem Aspekt erklären:



* Bei geringerer Wandstärke wird die Gesamtmasse etwas kleiner (um 25 %), so daß die Bauwerk-Boden-Frequenz größer wird, und die Einspannung der Decken ist geringer, was zu einer niedrigeren Deckeneigenfrequenz führt. Beide Tendenzen bewirken eine größere Deckenresonanz.

Um auch zu quantitativen Aussagen zu kommen, wurden einige der Gebäudebeispiele auch als 1-Massen-Schwinger, das heißt als vollkommen starres Gebäude auf Bodenfeder und -dämpfer berechnet. Es wurde die relative Resonanzstärke, das ist das Verhältnis der zuvor errechneten Deckenresonanzüberhöhung und dem Wert des 1-Massen-Frequenzganges an der Resonanzfrequenz der Decke, ausgewertet.

Relative und absolute Resonanzüberhöhung der Decken bei der Variation der Baugrundsteifigkeit und der Stockwerkszahl (die absolute Resonanzüberhöhung in Klammern)

n	v_s	200 m/s	300 m/s	500 m/s
2		6,8 (9,2)	13,0 (18,6)	27,4 (32,9)
6		7,8 (3,9)	5,5 (7,2)	11,1 (20,0)
10		13,7 (3,7)	-	-

Die Tendenzen sind uneinheitlich: Beim Übergang zu steifem Baugrund nehmen beim 2-stöckigen Gebäude (1. Zeile der Tabelle) die relativen ebenso wie die absoluten Resonanzstärken deutlich zu, beim 6-stöckigen Gebäude (2. Zeile) schwankt dagegen die relative Resonanzstärke nur etwas. Bei Variation der Stockwerkszahl (1. Spalte) zeigt die relative Resonanz die entgegengesetzte Tendenz wie die absolute, sie nimmt mit der Stockwerkszahl zu. Dies steht im Einklang zu den Ergebnissen bei Krafterregung der Decken, bei der die Deckenresonanzen im 6-stöckigen Gebäude größer sind als im 2-stöckigen. Das ist auch anschaulich leichter einsehbar: Die gleiche Dämpfung durch den Boden verteilt sich im 6-stöckigen Gebäude auf mehr Decken, so daß die Resonanzen stärker ausfallen. Die Tatsache, daß die absolute Resonanzstärke beim 6-stöckigen Gebäude kleiner ist als beim 2-stöckigen, beruht, wie sich mit diesen Berechnungen herausstellt, auf der stärkeren Abminderung der Gesamtbauwerksschwingungen gegenüber dem Freifeld.

Bei der Variation der Deckeneigenfrequenz wird dieser Zusammenhang ebenfalls deutlich. Jeweils bei einer Erhöhung der Deckeneigenfrequenz verschiebt sich die Resonanz in einen Bereich kleinerer Gesamtbauwerksamplituden. Die absolute Resonanzhöhe nimmt deshalb deutlich ab (von 9,9 auf 1,1), während die relative Resonanzhöhe gegenüber dem übrigen Gebäude nur wenig schwankt (Mittelwert 6,7).

Relative und absolute Resonanzüberhöhung der Decken bei Variation der Deckeneigenfrequenz

f_0	n	relative	absolute Resonanzüberhöhung
9,5 Hz	6	5,4	9,9
16 Hz	6	7,8	3,9
16 Hz	2	6,8	9,2
31 Hz	2	5,7	3,8
57 Hz	2	7,9	1,1

2.3 Die Deckenresonanz bei breitbandiger, unkorrelierter und instationärer Anregung

Die bisher in 2.1 und 2.2 berechneten Resonanzstärken sind maximale Überhöhungen, die bei gleichphasiger stationärer harmonischer Anregung aller Auflager bzw. Fundamente auftreten. Diese Art der Anregung dürfte in der Praxis

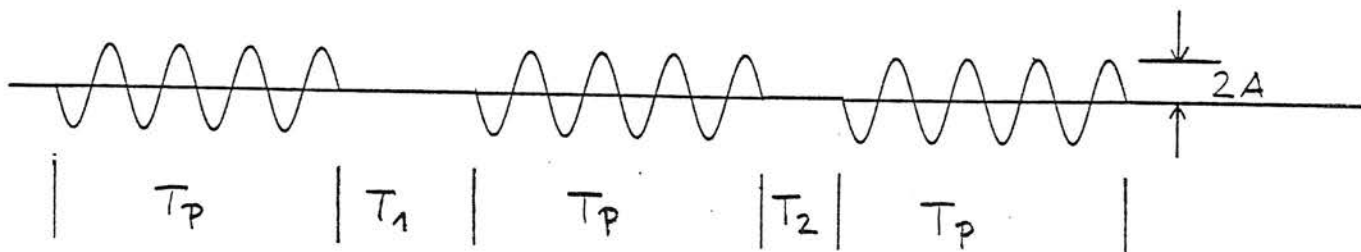
kaum anzutreffen sein. Bei Versuchen mit einem Schwinger ist zwar eine stationäre Anregung in der Resonanzfrequenz möglich, die Gleichphasigkeit an den Fundamenten kann jedoch nicht erzwungen werden. Die Anregung durch Schienenverkehr ist nun außerdem ganz sicher nicht monofrequent, sie kann vielmehr in der Regel als breitbandiges Rauschen angesehen werden. Weiterhin ist eine Zugvorbeifahrt prinzipiell instationär. Die Ergebnisse müssen noch an diese Gegebenheiten angepaßt werden.

2.3.1 Rauschanregung

Bei einer stationären Zufallserregung ist das Spektrum der Schwingantwort das Produkt des Anregungsspektrums mit der Übertragungsfunktion der Struktur. Dabei ist das "Spektrum" $U(f)$ folgendermaßen zu verstehen

$$U(f) = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_0^T u(t) e^{i2\pi ft} dt \right|^2}$$

Um Mißverständnissen vorzubeugen, soll dieser Begriff hier kurz veranschaulicht werden. Gewöhnlich wird das Quadrat $U(f)^2$ als spektrale Leistungsdichte bezeichnet und mit der oben angegebenen Definition an den Anfang der Theorie stochastischer Schwingungen gesetzt. Dabei wird leicht vergessen, daß in der Definition schon eine Aussage steckt, nämlich die Tatsache, daß der angegebene Grenzwert existiert.



Betrachtetes Beispiel einer Zufallsschwingung

Dazu soll ein Beispiel, das für die Deckenresonanz relevant ist, betrachtet werden: eine Zufallsschwingung, die aus zufällig einsetzenden kurzen Schwingungen einer (z. B. der Resonanz-) Frequenz besteht. Die einzelnen Pulse sollen einfachheitshalber alle die gleiche Dauer T_p und die gleiche Amplitude $2A$ haben. Das zugehörige "stochastische Spektrum" $U(f)$ wird dem deterministischen Spektrum des Pulses ähnlich sein, das heißt ein deutliches Maximum bei der Anregungsfrequenz aufweisen. Der Wert des Spektrums an dieser Stelle bestimmt sich nun folgendermaßen. Das Integral

$$\int_0^T u(t) e^{i2\pi ft} dt = \sum_{j=1}^n AT_p e^{i\varphi_j}$$

besteht aus der Summe der einzelnen Pulsanteile AT_p , die noch mit einer zufälligen Phasenlage φ_j behaftet sind. Beim Grenzübergang $T \rightarrow \infty$ werden immer mehr dieser Anteile berücksichtigt, das heißt der Grenzwert für $n \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} U(f) &= \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{n}{T} \left| \sum_{j=1}^n AT_p e^{i\varphi_j} \right|^2} \\ &= AT_p \sqrt{\frac{n}{T}} \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \left| \sum e^{i\varphi_j} \right|^2} \end{aligned}$$

gebildet. Der Grenzwert unter der Wurzel existiert (muß existieren, wenn die eingangs genannte Definition sinnvoll sein soll), er ist 1. Der spektrale Wert ist demnach

$$U(f) = A T_p \sqrt{\frac{n}{T}},$$

das heißt, er nimmt linear mit der Pulslänge T_p , aber nur mit der Wurzel der Pulshäufigkeit n/T zu. Verdoppelt man die Anzahl der Pulse, so hat man den $\sqrt{2}$ -fachen Wert, verdoppelt man die Impulslänge, so hat man den doppelten Wert.

Man könnte auch als Fazit dieses Beispiels oder als Konsequenz der erstgenannten Definition formulieren: Zufällige, das heißt unkorrelierte Schwingungsanteile überlagern sich im quadratischen Mittel.

Als Rauschanregung wird nun ein frequenzbegrenztetes Rauschen betrachtet, dessen Spektrum bis zu einer oberen Grenzfrequenz f_g konstant und darüber null ist. Der konstante Wert U_0 steht mit dem quadratischen Zeitmittelwert

$$M_2(u_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_0^2(t) dt}$$

der Anregung im Zusammenhang

$$M_2(u_0) = \sqrt{\int_0^{\infty} U_0^2(f) df} = \sqrt{U_0^2 \int_0^{f_g} df} = U_0 \sqrt{f_g} .$$

Das Antwortspektrum ist dann

$$|U(f)| = |H(f)| U_0$$

proportional zur Übertragungsfunktion $H(f)$ des Gebäudes. Für den Zeitmittelwert der Antwort gilt wiederum

$$\begin{aligned} M_2(u) &= \sqrt{\int_0^{\infty} U^2(f) df} = \sqrt{\int_0^{f_g} |H(f)|^2 df} U_0 \\ &= \sqrt{\frac{1}{f_g} \int_0^{f_g} |H(f)|^2 df} M_2(u_0) , \end{aligned}$$

das heißt, das Verhältnis der quadratischen Zeitmittelwerte von Gebäudeantwort und Freifeldanregung ist gleich dem quadratischen Mittelwert der Übertragungsfunktion im angeregten Frequenzbereich. Dieses Verhältnis $M_2(u)/M_2(u_0)$ wird im weiteren als Übertragungsverhältnis bei Rauschanregung betrachtet.

Für die in 2.2 berechneten Gebäudebeispiele sind die quadratischen Mittelwerte der Übertragungsfunktionen berechnet worden. Die daraus resultierenden Übertragungsverhältnisse bei Rauschanregung sind auf der folgenden Seite zusammengefaßt. Dabei erkennt man, daß die Überhöhung durch die Deckenresonanz nur noch gering im Vergleich zur harmonischen Resonanzanregung (Tabelle in 2.2.1.2) ist. Für den Lockerboden liegt die Überhöhung der Deckenschwingungen gegenüber der Freifeldanregung nur noch zwischen 1 und 3.

Übertragungsverhältnis Decke zu Freifeld bei Rauschanregung in Abhängigkeit einiger Bauwerks- und Baugrundeigenschaften

Baugrundsteifigkeit und Stockwerkszahl:

n	v_s	200 m/s	300 m/s	500 m/s
2		2,4/2,4	3,8/3,7	6,1/5,3
6		1,5/1,4	2,6/2,2	6,1/4,1
10		1,3/1,2	-	-

Wandstärke:

n	d_w	0,25 m	0,15 m
2		2,4/2,4	2,8/2,8
6		1,5/1,4	2,1/1,7

Deckeneigenfrequenz:

f_0	Maße	n	v_{max}/v_{mittel}
9,5 Hz	$d_D = 0,1$ m	6	2,7/2,5
16 Hz	Standard	6	1,5/1,4
16 Hz	Standard	2	2,4/2,4
31 Hz	$l = 4$ m	2	1,9/1,8
57 Hz	$l = 4$ m, $d_D = 0,6$ m	2	0,8/0,8

- */*: 1. Zahl - Maximum aller Decken
 2. Zahl - Mittelwert aller Decken

Für den Fall eines schwachgedämpften 1-Massen-Schwingers kann ein explizites Übertragungsverhältnis angegeben werden. Die Übertragungsfunktion ist

$$H(f) = \frac{f_0^2(1+iD)}{f_0^2+iD f_0^2-f^2}$$

bei einer hysteretischen Dämpfung $c = c_0(1+iD)$. Das Integral über die Übertragungsfunktion

$$\int_0^{f_g} |H(f)|^2 df = \int_0^{f_g} \frac{f_0^4(1+D^2)}{(f_0^2-f^2)^2+D^2 f_0^4} df$$

wird bei schwacher Dämpfung durch die Resonanzumgebung bestimmt. Hier kann

$$(f_0^2-f^2) = (f_0+f)(f_0-f) \approx 2f_0(f_0-f)$$

gesetzt

$$\dots \approx (1+D^2) f_0^2 \int_0^{f_g} \frac{1}{4(f_0-f)^2+D^2 f_0^2} df$$

und das Integral gelöst werden

$$\dots = \frac{(1+D^2) f_0^2}{2 D f_0} \operatorname{arctg} \frac{2(f-f_0)}{D f_0} \Big|_0^{f_g}$$

Das Ergebnis kann abgeschätzt werden, indem der arctg nicht an den Integrationsgrenzen ausgewertet, sondern mit seiner maximalen Spanne von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ benutzt wird, so daß man insgesamt

$$\int_0^{f_g} |H(f)|^2 df \approx \frac{(1+D^2) f_0}{2D} \pi \approx \frac{\pi f_0}{2D}$$

erhält. Für das Übertragungsverhältnis bei Rauschanregung heißt das

$$\frac{M_2(u)}{M_2(u_0)} = \sqrt{\frac{1}{f_g} \int_0^{f_g} |H(f)|^2 df}$$
$$\approx \sqrt{\frac{f_0 \pi}{f_g 2D}} .$$

Im Verhältnis zur maximalen Resonanzüberhöhung $V = 1/2D$ hat man bei Rauschanregung (mit etwa $f_g \approx 3f_0$ wie in 2.2)

$$V_{\text{Rauschen}} \approx \sqrt{V_{\text{Resonanz}}}$$

nur noch die Wurzel der Resonanzüberhöhung.

Wendet man dieses Ergebnis auf die Parameterstudie in 2.2 an, so stimmt es mit den Rechenergebnissen für das Standardgebäude auf steifem Baugrund ($v_s = 500 \text{ m/s}$) gut überein:

$$V_{\text{Resonanz}} = 36,5 ,$$
$$V_{\text{Rauschen}} = 6,1 ,$$
$$V_{\text{Rauschen}} \approx \sqrt{V_{\text{Resonanz}}} .$$

Für die anderen Gebäudebeispiele auf weicherem Baugrund, das heißt mit stärkerer Dämpfung durch den Boden, ist die Rauschantwort eher kleiner als $\sqrt{V_{\text{Resonanz}}}$.

2.3.2 Instationäre und Impulsanregung

Die Instationarität der Zusanregung besteht im wesentlichen aus dem einmaligen Auf- und Abklingen bei einer Vorbeifahrt und in der begrenzten Dauer. Einzelne Achsvorbeifahrten sind, wie in Teil I gezeigt wurde, in der Regel im Gebäude nicht mehr zu bemerken.

Die endliche Anregungsdauer könnte verhindern, daß die Resonanzhöhe überhaupt erreicht wird. Betrachtet man dazu eine plötzlich beginnende harmonische Resonanzanregung, so wächst die Amplitude mit der Zeit annähernd gemäß

$$u(t) = u_0 \pi f_0 t$$

an. Das bedeutet, die volle Resonanzüberhöhung ist nach

$$t = V/\pi f_0$$

bzw. nach V/π Schwingungen erreicht. Bei der in 2.1 berechneten Verstärkung $V = 65$ wären das immerhin 20 Schwingungen, das heißt, bei einer Deckeneigenfrequenz von 10 Hz sind rund 2 Sekunden zur Resonanzanregung nötig. Für die realistischeren Überhöhungen aus 2.2 sind es nur noch Zehntelsekunden. Die Anregungszeit durch eine Zugvorbeifahrt ist also in jedem Fall zur vollständigen Resonanzanregung ausreichend und die Instationarität kann für die Deckenresonanz unberücksichtigt bleiben.

Für den selteneren Fall, daß einzelne Achsvorbeifahrten aus der Anregung herausragen, soll hier gleich der Extremfall einer Impulsanregung betrachtet werden. Das Spektrum der Stoßanregung transformiert sich über die Übertragungsfunktion des Gebäudes zum Spektrum der Deckenantwort. Der Anteil der Deckenfrequenz ist dabei entsprechend der Resonanzüberhöhung verstärkt, der quadratische Zeitmittelwert erhöht sich weniger, nämlich um den Mittelwert der Übertragungsfunktion, so wie dies bereits bei der Rauschanregung beschrieben wurde. Die Überhöhung des zeitlichen Maximalwerts ist nochmals geringer, da sich der Anteil der Eigenfrequenz nicht im Maximalwert der Antwort, sondern im Nachschwingen niederschlägt. Für das Übertragungsverhältnis der zeitlichen Maximalwerte bei Impulsanregung spielt die Resonanz praktisch keine Rolle.

Für die Erschütterungsprognose bei Schienenverkehr scheint es allerdings unangemessen, die Erschütterungsstärke an einzelnen Impulsspitzen, die vermutlich auch nur sehr regellos auftreten, zu messen. Bei sehr dicht benachbartem Gleis und Gebäude mit möglicherweise mit den Achsvorbeifahrten schwankenden Amplituden ist es angebracht, von einer mittleren Anregungsamplitude auszugehen und ansonsten wie bei einer stationären Rauschanregung zu verfahren. Einer besonderen Berücksichtigung instationärer Effekte bedarf es nicht.

2.3.3 Unkorrelierte Anregung der Fundamente

Die Stärke der Deckenresonanz hängt stark von der Phasenlage an den Deckenauflagern bzw. an den Fundamenten ab. Die in 2.1 und 2.2 ermittelten Resonanz-

Überhöhungen gelten für gleichphasige Anregung und sind damit die maximal möglichen. Die Abhängigkeit von einer determinierten Phasenlage der Fundamente ist bereits im vorangegangenen Vorhaben [1] untersucht worden. Es sind sämtliche Resonanzüberhöhungen zwischen 0 (bei gegenphasiger Anregung) und der maximalen Überhöhung möglich, je nach Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Boden, Deckenspannweite und Deckeneigenfrequenz. Diese Zusammenhänge sind vermutlich für Prognosezwecke nicht ausreichend beherrschbar. Deshalb wird als Alternative die Resonanzanregung mit zufälliger Phasenlage der Fundamente bestimmt.

Angenommen, die Decke ist an n unabhängigen gleichberechtigten Stellen aufgelagert, so sind, wie schon bei der Rauschanregung erwähnt, die Antworten auf jede einzelne Anregung quadratisch zu überlagern. Ist die Antwort auf die Anregung eines Auflagers A , so ist die Gesamtantwort

\sqrt{n} A bei unkorrelierter Anregung und

n A bei gleichphasiger Anregung,

das heißt, bei zufälliger Phasenlage reduziert sich die Resonanzüberhöhung auf das $1/\sqrt{n}$ -fache der maximalen Überhöhung.

In der Regel wird man von 2 bis 4 unabhängigen Fundamentpunkten ausgehen können, so daß bei Berücksichtigung der unkorrelierten Anregung die maximale Resonanzstärke noch einmal halbiert werden kann.

3. Die 3-dimensionale Bauwerk-Boden Wechselwirkung

3.1 Das Rechenverfahren

Es wurde ein Rechenprogramm entwickelt, mit dem die dreidimensionale dynamische Berechnung von Bauwerken, die auf starren oder flexiblen Fundamenten gegründet sind, unter vollständiger Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Boden möglich ist. Das Verfahren beruht einerseits auf der Finite-Element-Methode für das Bauwerk und andererseits auf den Punktlastlösungen des elastischen bzw. hysteretisch gedämpften Halbraumes für den Boden. Letzteres kann auch der Randelementmethode zugeordnet werden.

Zum Aufbau des Rechenprogramms wurde zunächst ein vorhandenes Finite-Element-Programm (SAP IV) für die Berechnung im Frequenzraum umgearbeitet und auf hysteretische Dämpfung erweitert. Als Elementtypen stehen

- Stabelemente mit 1 Freiheitsgrad pro Knoten,
- Balkenelemente mit 6 Freiheitsgraden pro Knoten,
- viereckige Plattenelemente mit 5 Freiheitsgraden pro Knoten (die Steifigkeit der Drehung um die Plattenormalen ist nicht definiert) und
- Federelemente (zum direkten Einbau diskreter reeller Steifigkeiten oder zur Einprägung von Verschiebungen)

zur Verfügung [2]. Das Programm arbeitet mit konzentrierten Massen. Die Massenträgheit muß für jede berechnete Frequenz in die Steifigkeitsmatrix eingebaut werden.

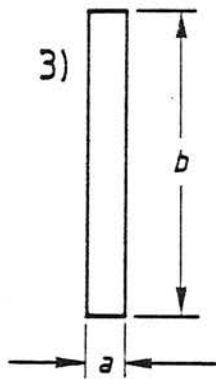
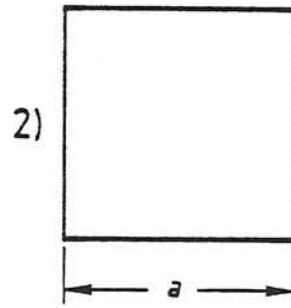
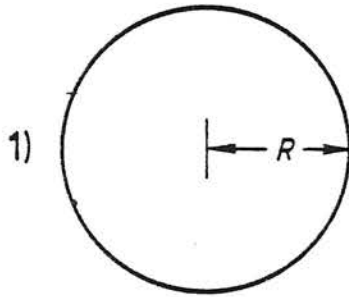
Rein formal wird zu den vorhandenen vier Elementtypen ein fünftes, das neu entwickelte Bodenelement hinzugefügt. Das Bodenelement unterscheidet sich aber wesentlich von den finiten Elementtypen: Die Elementsteifigkeitsmatrix ist frequenzabhängig, die Anzahl der Knoten ist variabel und die Steifigkeitsmatrix des Bodens ist vollbesetzt, während die des Gebäudes fast nur Nullen enthält. Die Berechnung des Bodens geschieht nun folgendermaßen: Die mit dem Bauwerk verbundenen Flächen des Bodens (die Fundamente) werden durch eine Anzahl von Bodenpunkten beschrieben. Für diese Bodenpunkte wird eine Nachgiebigkeitsmatrix aufgebaut, die den je drei Kräften an allen Knoten die je drei Verschiebungen aller Knoten zuordnet. Die Elemente dieser Nachgiebigkeitsmatrix, das ist jeweils eine Verschiebung eines Punktes infolge einer Belastung eines anderen Punktes, werden mit Hilfe der Punktlastlösungen des

elastischen (hysteretisch gedämpften) homogenen Halbraums berechnet, die zu diesem Zweck in geeigneter Weise explizit programmiert wurden. Die vollständige Nachgiebigkeitsmatrix wird invertiert zur Steifigkeitsmatrix. Es besteht dann die Möglichkeit, starre Fundamente auszuzeichnen, für die sich die Freiheitsgrade reduzieren. Die gesamte Steifigkeitsmatrix des Bodens wird dann dementsprechend mit Hilfe einer Transformationsmatrix konzentriert. Die fertige ("Element"-) Steifigkeitsmatrix des Bodens wird schließlich zur schon vorab frequenzunabhängig berechneten Steifigkeitsmatrix des Bauwerks addiert und das resultierende Gleichungssystem gelöst.

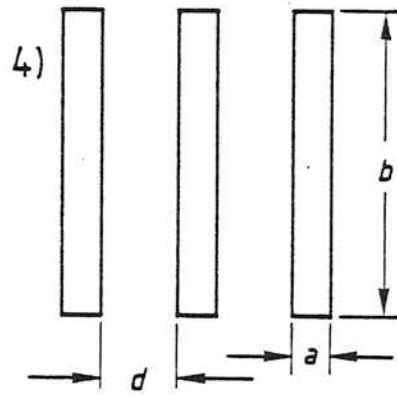
3.2 Steifigkeit und Dämpfung von Fundamentgruppen

Das in [1] vorgestellte Programm zur Erschütterungsprognose benutzt konstante (d.h. frequenzunabhängige) Feder- und Dämpferwerte für die einzelnen Gebäudefundamente. Das sind die Werte für ein flächengleiches Kreisfundament, dessen leichte Frequenzabhängigkeit dabei vernachlässigt wird. Dieselben Feder- und Dämpferwerte wurden auch bei den komplexeren Gebäudemodellen (den zweidimensionalen Stockwerkrahmen in [1] und in Abschnitt 2.2) verwendet. Das sieht zunächst nach einer sehr groben Modellierung aus: Tatsächlich hat man es weniger mit "kreisförmigen" Einzelfundamenten, sondern mit langen Streifenfundamenten, mit untereinander zu einem Fundamentrost verbundenen Fundamentstreifen zu tun, und selbst bei Einzelfundamenten (Stützenfundamenten) wäre prinzipiell auch deren Kopplung über den Boden zu berücksichtigen. Mit dem oben vorgestellten Rechenverfahren ist die Bauwerksberechnung mit der richtigen Fundamentwirkung möglich. Es ist darüber hinaus auch möglich, die geschilderten Einflüsse auf die Fundamentsteifigkeit und Dämpfung zu untersuchen. Bei dieser Untersuchung zeigt sich, um das Ergebnis gleich vorwegzunehmen, daß die grobe Modellierung mit flächengleichen Kreisfundamenten für Prognoserechnungen ausreicht, wenn man das gesamte Gebäudefundament sinnvoll in Teilfundamente zerlegt. Deshalb soll hier nicht weiter auf Einzelheiten eingegangen werden, sondern nur zusammenfassend über diese Untersuchung berichtet werden.

Bild 8 gibt einen Überblick über die behandelten Fundamentgeometrien. Es werden jeweils masselose starre Fundamente bzw. starr (durch das Gebäude) verbundene Fundamentgruppen bei der hauptsächlich interessierenden vertikalen Bewegung betrachtet. Ausgangs- (und End-)punkt ist das Kreisfundament mit dem



b/a variabel
(einschl. $b/a \rightarrow \infty$
Streifenfundament)



$d = a = b/10 = 0,3\text{m}$

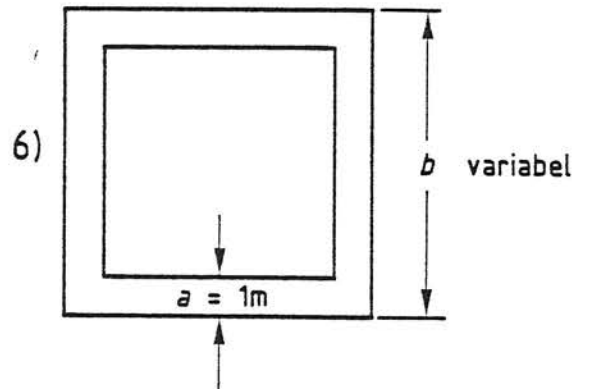
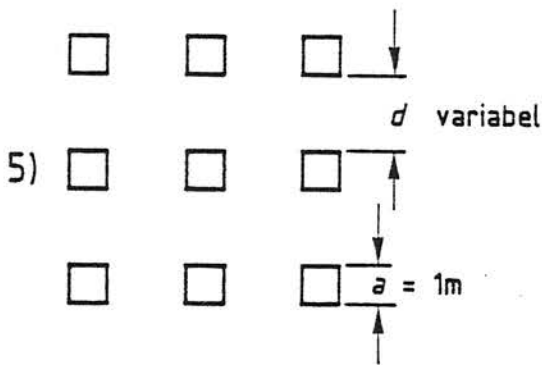


Bild 8: Überblick über die betrachteten Fundamentgeometrien

Radius R , dessen vertikale Federsteifigkeit c und Dämpfungskonstante r mit

$$c = \frac{4 G R}{1-\nu} \quad \text{und}$$

$$r = \frac{3,4 \sqrt{G_0} R^2}{1-\nu}$$

angenähert werden. G , ρ , ν sind die Materialwerte des Bodens und R der Fundamentradius. Man entnimmt den Formeln, daß (trivialerweise) die Fundamentsteifigkeit c der Bodensteifigkeit G proportional ist, die Dämpfung r dem sogenannten Wellenwiderstand $\sqrt{G_0}$ des Bodens. Weiterhin ist r der Fundamentfläche $F = \pi R^2$ proportional, c nur der Wurzel \sqrt{F} . Das ist insbesondere bei der Zerlegung des Gebäudefundaments in Teilflächen von Bedeutung. Bei der Addition der parallelliegenden Federn und Dämpfer ergeben die Teilflächen die gleiche Dämpfung, aber eine größere Steifigkeit als ein Kreisfundament mit der Gesamtfläche.

Die Berechnung von Quadrat- und Rechteckflächen bis zu einem Seitenverhältnis $b/a = 4$ zeigt eine ausreichende Übereinstimmung mit dem flächengleichen Kreisfundament. Die Dämpfung kann sogar für noch langgestrecktere Rechteckfundamente bis hin zum unendlich langen Streifenfundament gut mit einem flächengleichen Kreisfundament erfaßt werden. Dagegen wird die Federsteifigkeit c für langgestreckte Fundamente steifer als das c_0 des äquivalenten Kreisfundaments. Es zeigt sich, daß das Verhältnis der beiden Steifigkeiten

$$\frac{c}{c_0} = 0,45 \sqrt{\frac{b}{a}}$$

mit der Wurzel des Seitenverhältnisses ansteigt. Setzt man die Formel für das Kreisfundament ein, so ergibt sich ein einfacher Ausdruck für die Federsteifigkeit eines langen schlanken Fundaments

$$c = 0,45 \sqrt{\frac{b}{a}} \frac{4 G}{1-\nu} \sqrt{\frac{ab}{\pi}} = \frac{0,45 \cdot 4}{\sqrt{\pi}} \frac{G b}{1-\nu} = \frac{G b}{1-\nu},$$

die somit nur von der Bodensteifigkeit $G/1-\nu$ und von der Fundamentlänge b abhängt. Eine dritte Rechenvorschrift für die Steifigkeit langgestreckter Fundamente ergibt sich aus der Zerlegung in Teilflächen

$$c = \frac{G b}{1-\nu} \stackrel{!}{=} n \frac{4 G}{1-\nu} \sqrt{\frac{F/n}{\pi}}$$

$$n = 0,2 \frac{b}{a},$$

man zerlege den Fundamentstreifen in Teilstücke mit einem Seitenverhältnis 5:1 und addiere die Einzelsteifigkeiten.

Die Berechnung der starr gekoppelten Einzelfundamente (siehe 5 in Bild 8) zeigte folgende Ergebnisse: Die einzelnen Feder- und Dämpferwerte können zur Gesamtsteifigkeit addiert werden, wenn die Fundamente nicht sehr dicht liegen (Abstand größer als der doppelte Durchmesser). Die Wechselwirkung der Einzelfundamente untereinander macht sich an drei Stellen bemerkbar:

1. Die Feder- und Dämpferwerte schwanken um den Mittelwert (der Summe der Einzelwerte).
2. Für tiefe Frequenzen, wenn die Scherwellenlänge größer als der Durchmesser der Fundamentgruppe ist, ist die Steifigkeit kleiner als der Mittelwert. Je enger die Fundamente, desto deutlicher ist dieser Effekt.
3. Für tiefe Frequenzen (ebenfalls bei $\lambda > \emptyset$) ist die Dämpfung größer als der Mittelwert. Je weiter die Fundamente entfernt sind, desto größer wird die tieffrequente Dämpfung, desto kleiner ist aber auch der betroffene tieffrequente Bereich.

Die beiden tieffrequenten Effekte sind auch beim langgestreckten Fundament zu verzeichnen, am krassesten beim unendlich langen Streifenfundament: Die Steifigkeit geht gegen null, die Dämpfung gegen unendlich, wenn die Frequenz gegen null geht. Die Tendenz wird sichtbar, wenn die Wellenlänge größer als die zehnfache Fundamentbreite ist.

Für die Gruppe aus Streifenfundamenten (6 in Bild 8) ergeben sich die gleichen Tendenzen. Die Dämpfung ergibt sich bis auf die tieffrequenten Wechselwirkungseffekte allein aufgrund der Gesamtfläche

$$r = r_0 = \frac{3,4}{\pi} \frac{\sqrt{G\rho}}{1-\nu} F \approx \frac{\sqrt{G\rho}}{1-\nu} F$$

analog zum Kreisfundament. Der Mittelwert der Steifigkeit ergibt sich ebenso wie beim einzelnen langen Rechteck durch Zerlegen in Teilfundamente mit einem Seitenverhältnis 5:1. Die Gesamtsteifigkeit

$$c = n \frac{4 G}{1-\nu} \sqrt{\frac{F/n}{\pi}} = \sqrt{n} c_0$$

hängt nur von der Wurzel der Anzahl der Teilfundamente und von der Steifigkeit des äquivalenten Kreisfundaments ab.

Die Anwendung dieser scheinbar universellen Regel soll an dem Beispiel eines Gleisrostes demonstriert werden (4 in Bild 8). Die Schwellen stellen schlanke Rechteckfundamente mit einem Seitenverhältnis $b/a = 10$ dar, die eng benachbart sind (Abstand \approx doppelte Schwellenbreite). Die Steifigkeit c_1 einer einzelnen Schwelle ergibt sich aus der Zerlegung in zwei Teilfundamente mit $b/a = 5$

$$c_1 = \sqrt{2} \ c_{01}$$

(c_{01} ist die "Kreisfundamentsteifigkeit" einer Schwelle). Wird das Gleis durch eine Fahrzeugachse belastet, so kann man aus dem Verformungsbild der Schiene ablesen, daß etwa zwei Schwellen an der Lastaufnahme beteiligt sind. Als Steifigkeit unter der Fahrzeugachse kann man demnach die Gesamtsteifigkeit von zwei starr verbundenen Schwellen heranziehen. Da die Schwellen sehr eng benachbart sind, müssen die gegenseitigen Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Näherungsweise kann man dazu den Abstand vernachlässigen, so daß nur ein Fundament mit dem Seitenverhältnis 10:2 bzw. 5:1 übrigbleibt. Für dieses Fundament hat man unmittelbar

$$c_2 = c_{02} = \sqrt{2} \ c_{01}$$

die Steifigkeit c_{02} des flächengleichen Kreisfundaments, die wegen der doppelten Fläche den $\sqrt{2}$ -fachen Wert von c_{01} hat. Für dieses Beispiel erhält man einerseits den Federwert c_2 einer Fahrzeugachse auf dem Gleis, andererseits die zunächst überraschende Aussage, daß die Zusammenschaltung zweier Schwellen aufgrund der Wechselwirkung durch den Boden die Steifigkeit gegenüber einer einzelnen Schwelle nicht erhöht

$$c_2 = c_1 \ .$$

Dieses Ergebnis wurde auch bei vollständiger Berechnung im Zusammenhang mit der Rad/Schiene-Forschung [3] erhalten, wobei die hier getroffenen Vereinfachungen dazu führen, c_2 etwas zu unterschätzen, das heißt tatsächlich ist

$$c_2 \geq c_1 \ .$$

Fazit dieses Abschnitts ist: Die mittleren Feder- und Dämpferwerte einer Fundamentgruppe lassen sich aus den Werten c_0 , r_0 eines flächengleichen Kreisfundaments bestimmen

$$\begin{aligned} r &= r_0 \ , \\ c &= \sqrt{n} \ c_0 \ , \end{aligned}$$

wobei n die Anzahl der Teilfundamente ist, die sich bei einer Zerlegung in größtmögliche Streifen vom Seitenverhältnis 5:1 ergeben. Für eine starr gekoppelte Gruppe von Einzelfundamenten hat man bei nicht zu enger Anordnung

$$r = \sum r_i = \sum r_{oi} = r_o ,$$

$$c = \sum c_i .$$

Die eindeutigen Wechselwirkungseffekte bleiben auf einen tieffrequenten Bereich begrenzt.

3.3 Ein Bauwerksbeispiel

Es wird ein Bauwerksbeispiel, das auch bei Schwingungsanregung über den Boden gemessen wurde, vollständig dreidimensional berechnet. Es handelt sich um den einräumigen Modellschutzbau (s. Teil IV, Abschnitt 2.5), der in seiner Finite-Element-Idealisierung in Bild 9 dargestellt ist. Die im Bild angegebenen Abmessungen gelten für die Knotenpunktskoordinaten, für die Außenabmessungen sind noch die Elementdicken zu berücksichtigen

Länge (außen) 5,825 m ,

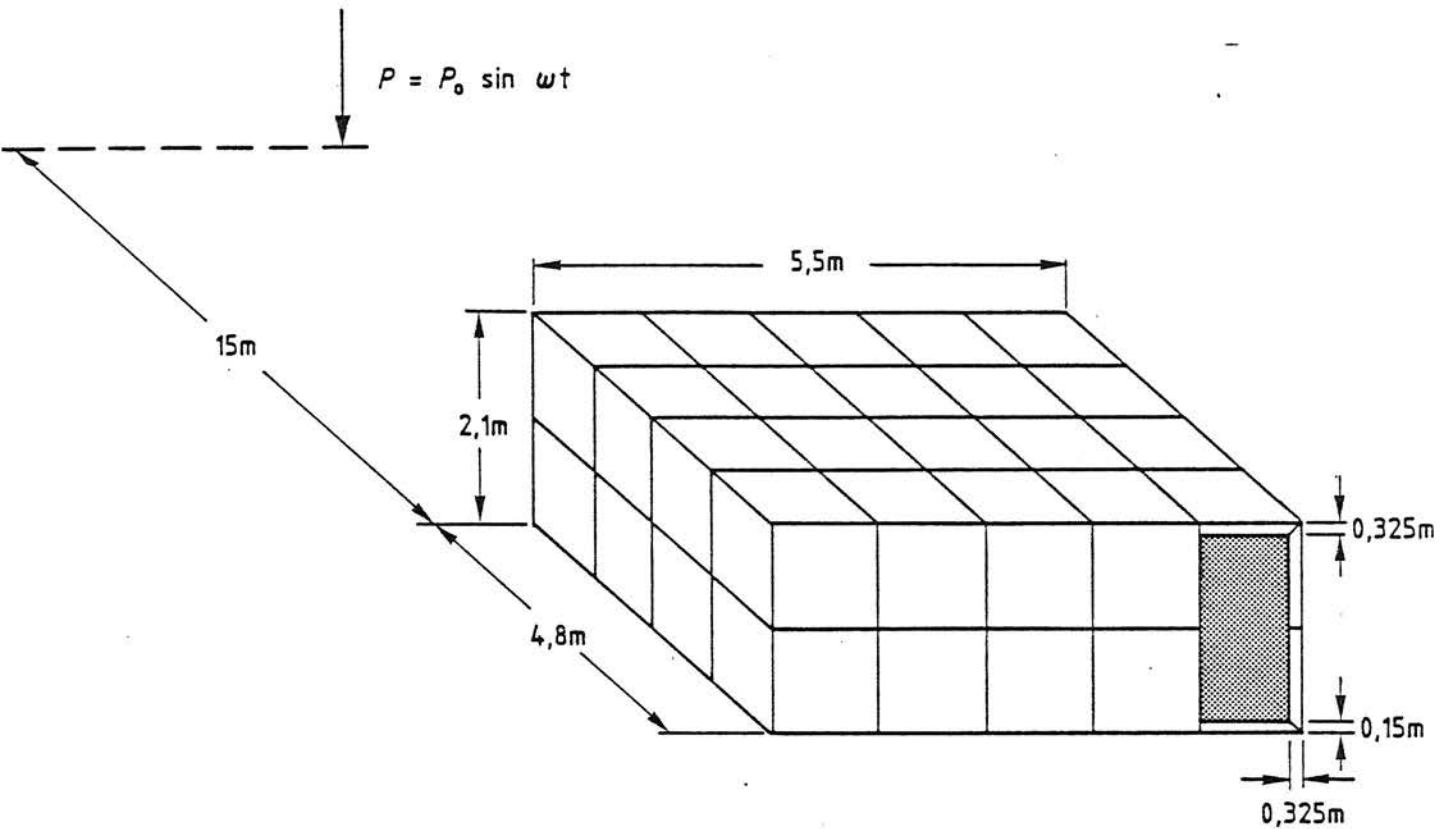
Breite (außen) 5,125 m ,

Höhe (einschließlich Fundament) 2,425 m .

Nicht dargestellt sind die Fundamentbalken unter den Außenwänden, die als zusätzliche Masse (gemäß der Querschnittsfläche $0,096 \text{ m}^2$) und zusätzliche Steifigkeit (gemäß den Flächenträgheitsmomenten vertikal $J_z = 0,0021 \text{ m}^4$ und horizontal $J_{x,y} = 0,0004 \text{ m}^4$) in das Rechenmodell eingehen. Bei der Kopplung mit dem Boden wurde eine Fundamentbreite von 0,5 m bzw. eine Fläche von $0,6 \text{ m}^2$ je Bodenknoten berücksichtigt. Das Bauwerk wird durch eine vertikale harmonische Einheitskraft, die in einer Entfernung von 15 m auf die Bodenoberfläche wirkt, angeregt. Neben der Gebäudeantwort wird auch die Freifeldbodenschwingung in 15 m Entfernung der Quelle berechnet, so daß das Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Boden gebildet werden kann.

3.3.1 Schwingungsformen ausgewählter Frequenzen

Um einen Einblick in die Schwingungsform des Bauwerks zu bekommen, sind die Amplituden der Fundamentpunkte ausgewertet worden. Bild 10 zeigt dazu Betrag und Phase für drei charakteristische Frequenzen, aufgetragen über den Gebäude-



Außenmaße	Rechenmodell	Meßobjekt
Höhe	2,425m	2,50m
Länge	5,825m	5,85m
Breite	5,125m	5,15m

Bild 9: Das berechnete Bauwerksbeispiel
Maße und Elementierung

umfang, das heißt bei $x = 0$ ist die von der Quelle aus gesehen rechte vordere Ecke, bei $x = 4,8$ m die rechte hintere Ecke, bei $x = 10,3$ m die linke hintere Ecke mit dem Eingang, und bei $x = 15,1$ m die linke vordere Ecke. Diese Punkte sind zur besseren Übersichtlichkeit auch markiert.

Schwingungsform bei 10 Hz:

Die Amplituden der einzelnen Fundamentpunkte differieren nur um $\pm 10\%$. Die kleinsten Werte gelten für die Seitenmitten, die Amplituden hinten sind etwas kleiner als vorne. Die maximale Phasendifferenz vorne zu hinten beträgt rund 70° . Das Bauwerk schwingt als starrer Körper hauptsächlich in einer vertikalen Schwingungsform. Der vertikalen Schwingung ist ein kleiner Kippanteil überlagert.

Schwingungsform bei 20 Hz:

Die Seitenmitten schwingen deutlich weniger als die Wände vorne und hinten ($1/3$ der Amplituden). Die Phasendifferenz vorne zu hinten beträgt 140° , das heißt, es liegt annähernd Gegenphasigkeit vor. In dieser Frequenz dominiert demnach die Kippschwingung. Der gekrümmte Verlauf der Phasen deutet auf eine leichte Verformung der Wände hin.

Schwingungsform bei 50 Hz:

Die Phase ist annähernd konstant ($\pm 20^\circ$). Lediglich an der hinteren Wand im Bereich des Eingangs treten große Abweichungen auf, allerdings bei nahezu verschwindenden Amplituden. Daher kann man den Verlauf des Betrages unmittelbar als Verformungsbild betrachten. Man erkennt sehr große Wandverformungen an den Seiten und an der hinteren Wand (insbesondere beim Eingang). Die Unregelmäßigkeiten infolge des Eingangs führen hier schon zu einem deutlich unsymmetrischen Schwingungsverhalten: Die von der Quelle aus gesehen rechte Wand weist größere Amplituden auf als die linke Wand. Im Gegensatz zum Kipp-schwingverhalten haben hier die Seitenmitten die größten und die Wände vorn und hinten die kleinsten Amplituden. Bei 50 Hz ist die Wellenlänge der anregenden Rayleighwelle gerade gleich der Bauwerksbreite, so daß die resultierende vertikale Anregung gerade verschwindet. Die Schwingantwort des Bauwerkes ist deshalb hier im wesentlichen nur durch Verformungen möglich.

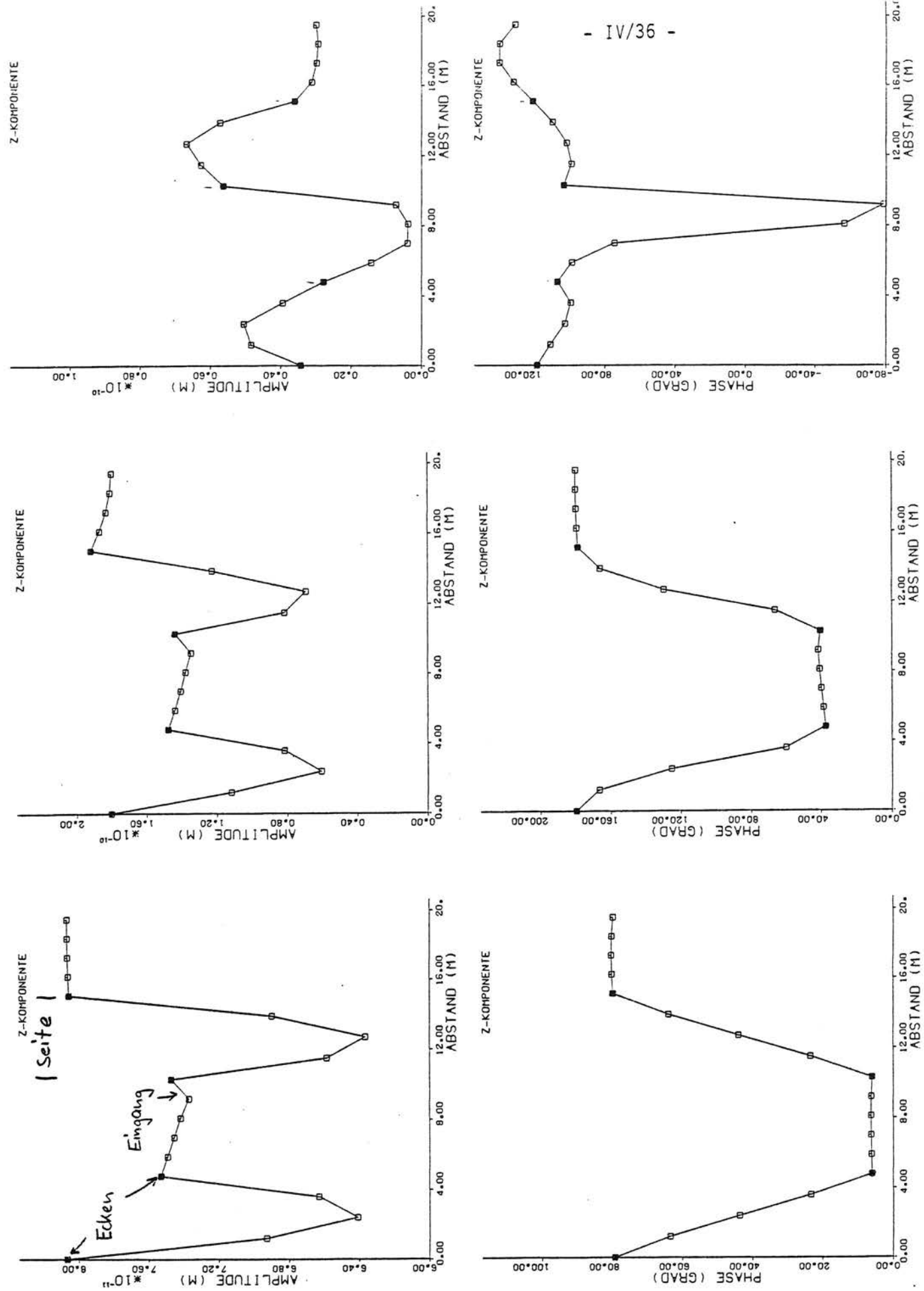


Bild 10 - Schwingungsformen des Bauwerks bei 10, 20 und 50 Hz: Betrag und Phase der Fundamentamplituden, aufgetragen über den Gebäudeumfang

Schwingungsformen bei höheren Frequenzen (ohne Bild):

Alle Schwingungsformen weisen große Verformungsanteile auf. Die Asymmetrie infolge des Eingangs nimmt mit wachsender Frequenz noch zu. Der Ort maximaler Amplitude wechselt.

Einen Überblick über die Schwingungsformen gibt nachfolgende Tabelle

Frequenz	Wellenlänge	Phasendifferenz	Schwingungsform
10 Hz	23,5 m	70°	vertikal starr
20 Hz	11,8 m	140°	Kippen starr
30 Hz	7,8 m	210°	Kippen starr
40 Hz	5,9 m	0°	Kippen um hinteres Fundament
50 Hz	4,7 m	40°	Wandverformungen, insbesondere Seiten
60 Hz	3,9 m	80°	Verformungen, asymmetrisch

3.3.2 Das Übertragungsverhältnis Freifeld - Bauwerk

Für einige ausgewählte Punkte (den Meßpunkten, s. Teil V Abschnitte 2.5 und 3.5) wurden die Amplituden auf die Freifeldamplituden in 15 m Entfernung der Quelle bezogen und über die Frequenz aufgetragen (Bild 11). Diese Ergebnisse werden in Teil VI zum Vergleich Theorie - Messung herangezogen. In Bild 12 sind zusätzlich die Amplituden aller Fundamentpunkte gemittelt worden, wobei die Frequenzen zwischen 0 und 30 Hz feiner aufgelöst wurden.

Es zeigt sich folgendes Übertragungsverhalten:

Für tiefe Frequenzen (etwa bis 10 Hz) werden die Bodenschwingungen direkt im Verhältnis 1:1 übertragen. Zwischen 10 und knapp 30 Hz werden die Bodenschwingungen im Bauwerk verstärkt. Es gibt zwei Resonanzspitzen bei 20 und 25 Hz mit einer leichten Überhöhung von 1,4 im Mittel und maximal 1,8 an der vorderen Wand. Die erste Resonanz ist dabei die Kippresonanz des starren Bauwerks, die zweite die Vertikalresonanz. Ab 30 Hz nimmt das Übertragungsverhältnis ab, bei 50 Hz ist ein Minimum von 0,2 erreicht. Für höhere Frequenzen bis 100 Hz bleibt das Übertragungsverhältnis bei etwa 0,3. Die Schwingungsform bei 50 Hz war im vorangegangenen Abschnitt durch überwiegende Wandverformungen gekennzeichnet worden, Wellenlänge und Bauwerksbreite stimmen gerade überein.

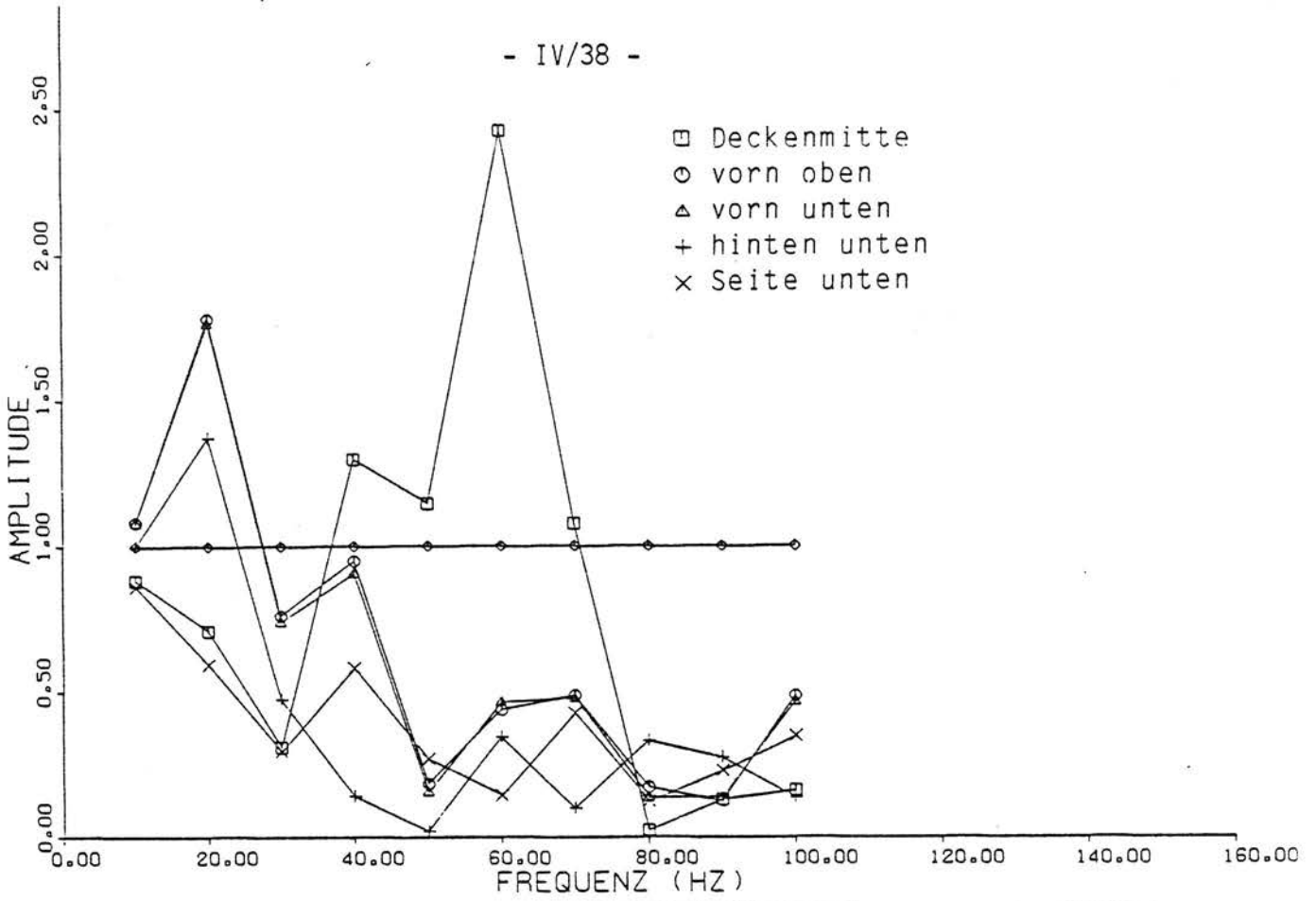


Bild 11 - Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld, Rechenergebnisse für die Meßpunkte des Modellschutzbaus

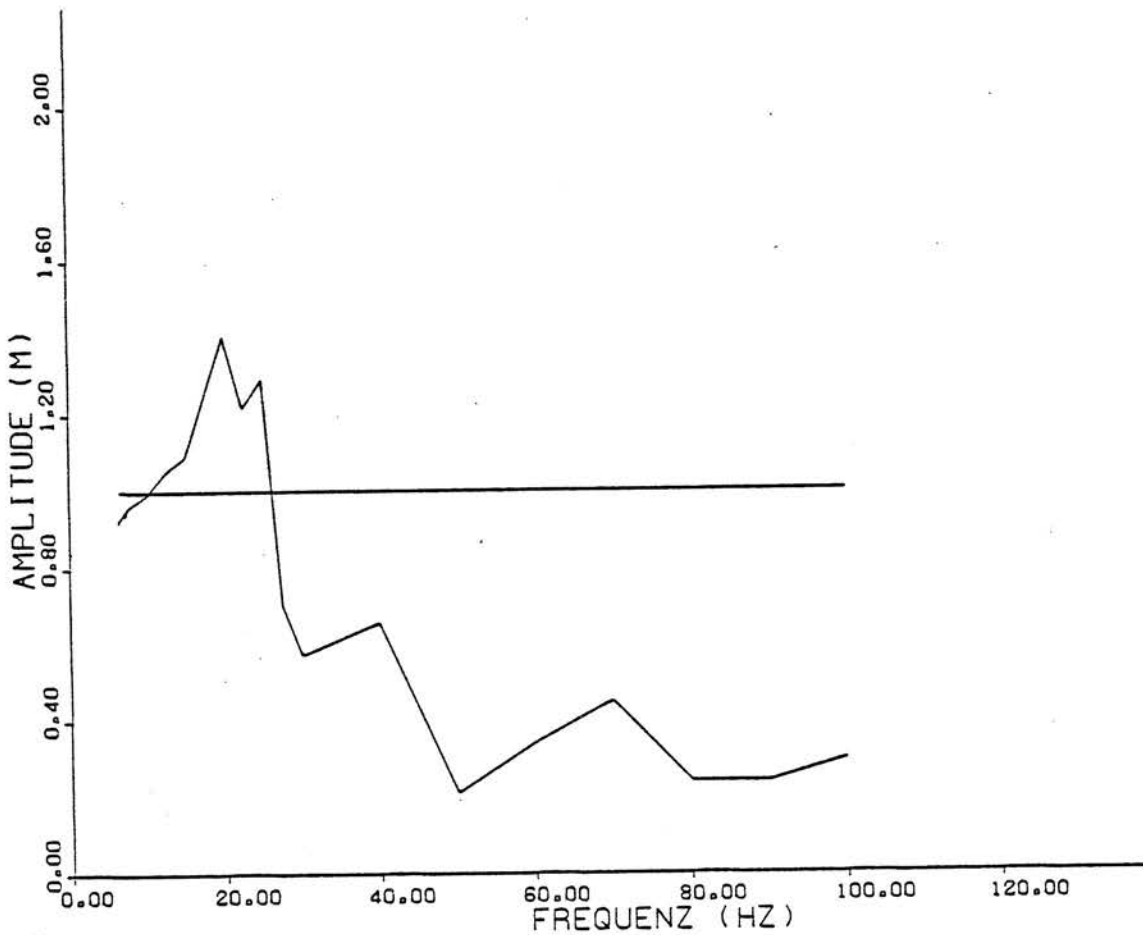


Bild 12 - Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld, Mittelwert aller Fundamentpunkte

Die Schwingungsformen spiegeln sich auch in den Übertragungsverhältnissen der Meßpunkte (Bild 11) wider:

Frequenz	Schwingungsform	Übertragungsverhältnis
10 Hz	vertikal	gleichmäßig $V = 1$
20 Hz	Kippen	Resonanz, Bauwerksmitte kleinste Amplituden
30 Hz	Kippen	Bauwerksmitte kleinste Amplitude
40 Hz	Kippen um hinteres Fundament	hinten kleinste Amplitude
50 Hz	Wandverformungen	V minimal, Seitenmitte größte Amplitude

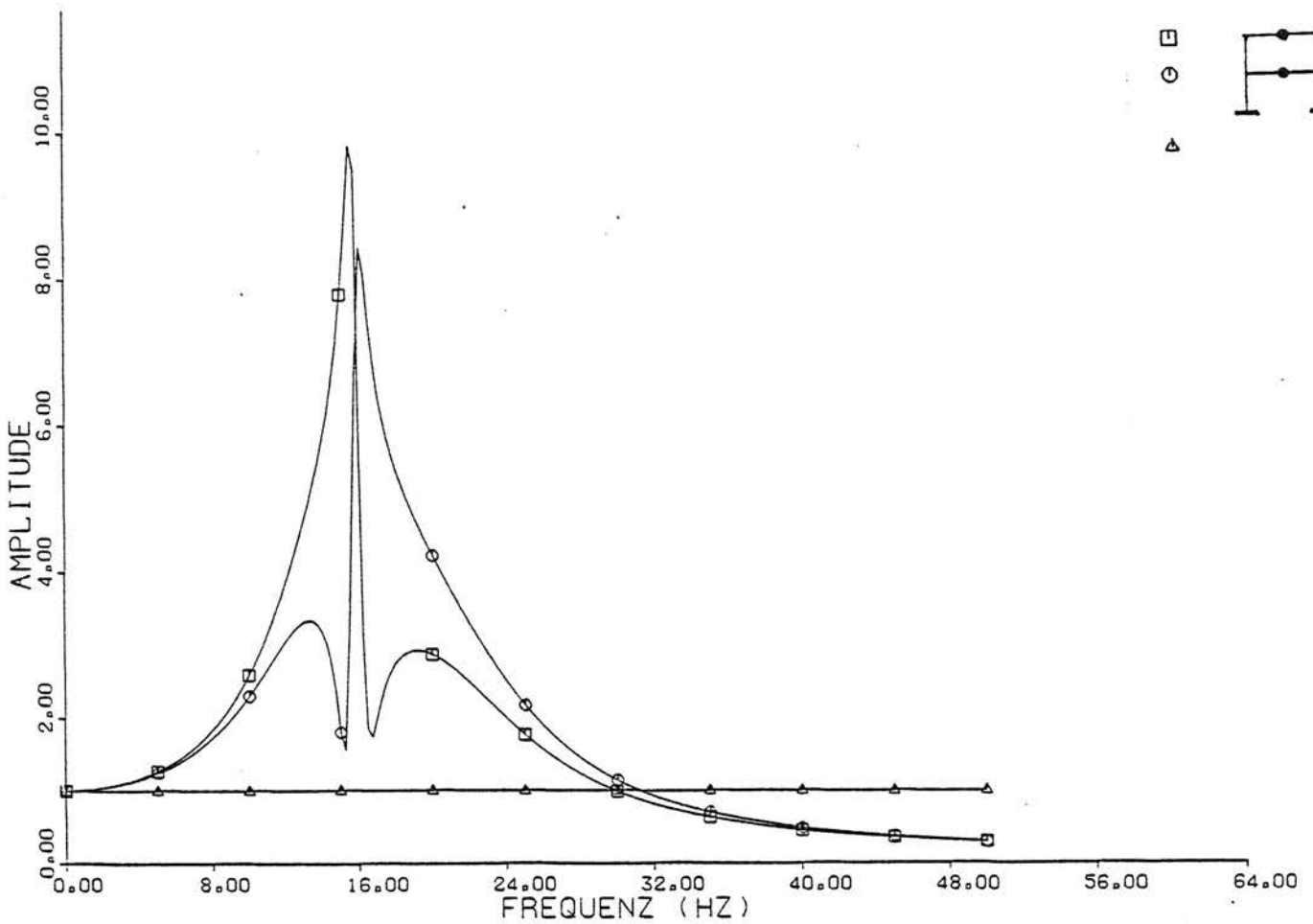
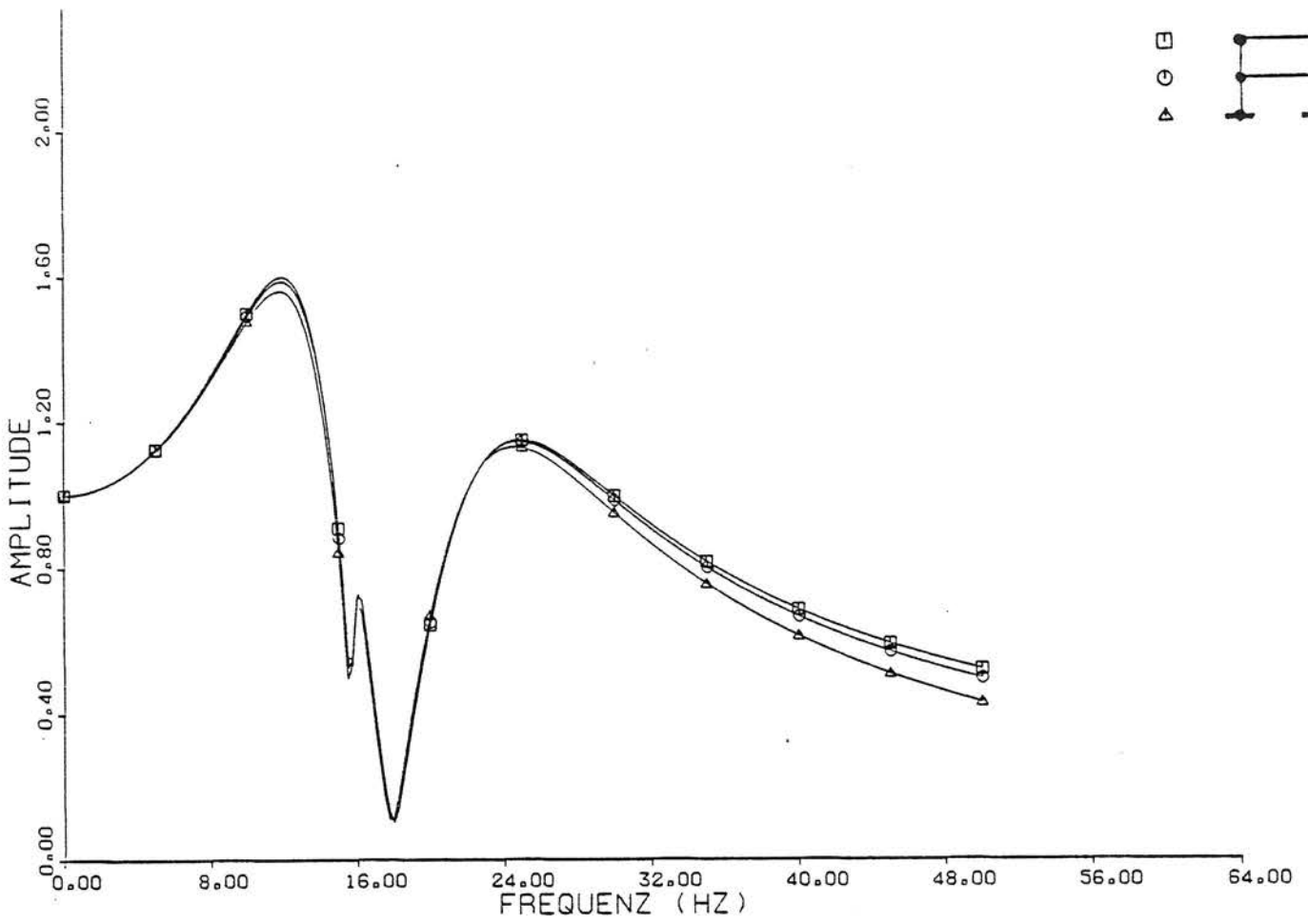
Zwischen 40 und 70 Hz dominieren die Deckenamplituden, mit einer Resonanzüberhöhung von 2,5 bei 60 Hz.

4. Zusammenfassung

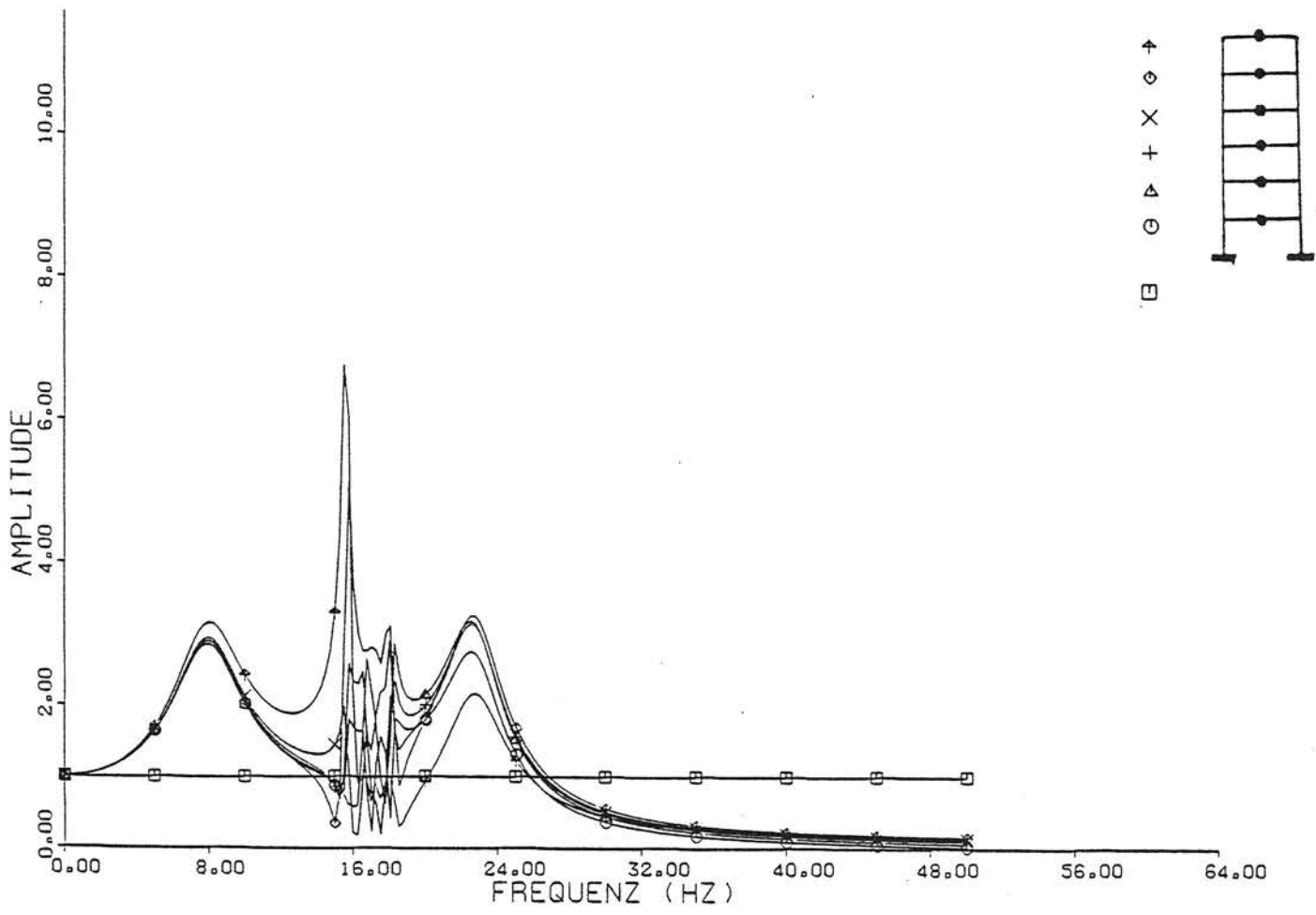
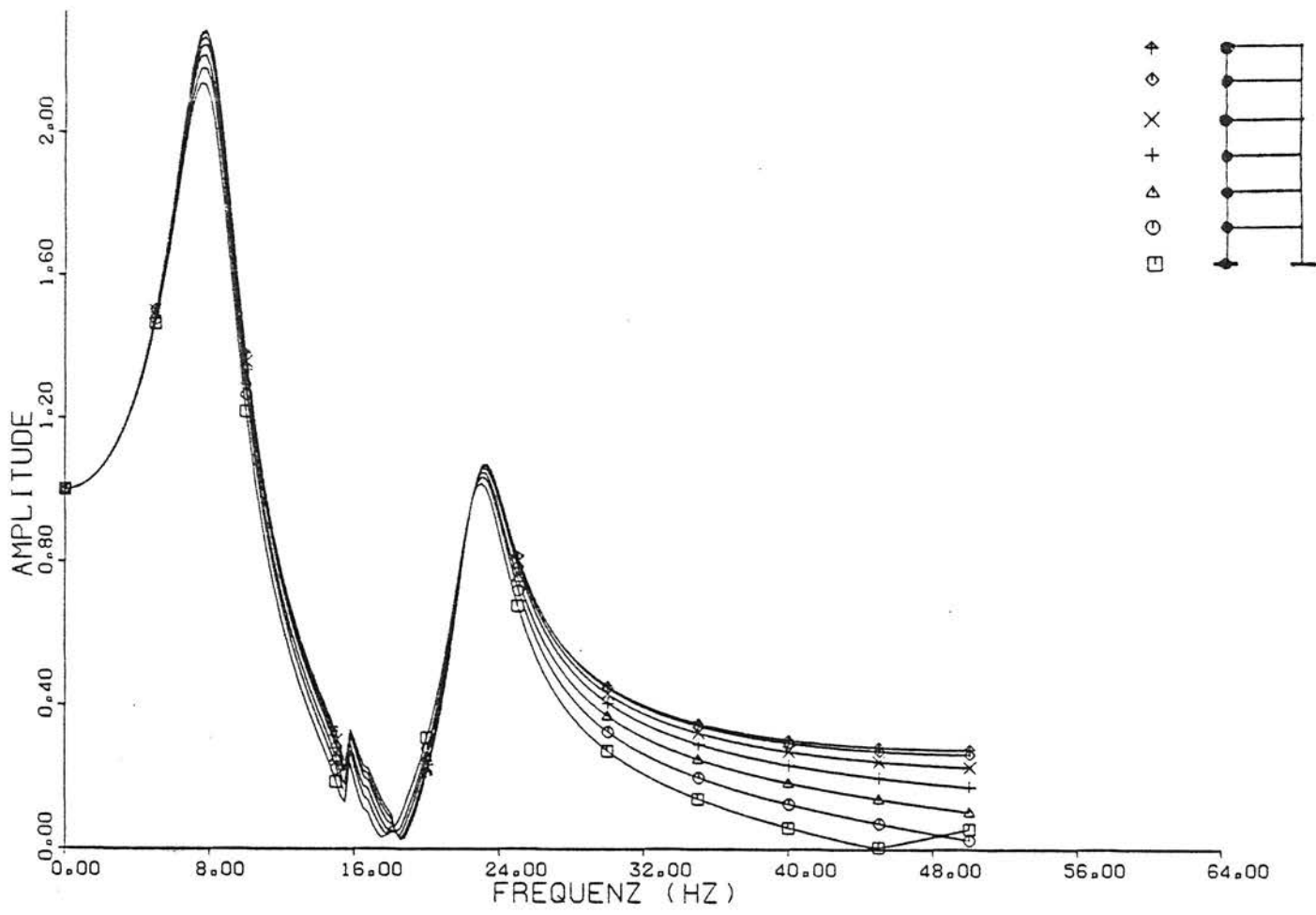
Das Gesamtbauwerksverhalten ohne Bauteilresonanzen ist im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1], Teil III ausführlich an zweidimensionalen Modellen untersucht worden. Die hier durchgeführte Kontrolle mit einem dreidimensionalen Modell führt zu keinen prinzipiellen Änderungen. Die dreidimensionale Berechnung von Fundamentgruppen (Abschnitt 3.2) zeigt, daß die näherungsweise Erfassung durch mehrere flächengleiche Kreisfundamente und deren Steifigkeit und Dämpfung ausreichend genau ist, wenn die Aufteilung des gesamten Gebäudefundaments in Teilfundamente sinnvoll vorgenommen wird. Die dreidimensionale Berechnung verschiedener Decken (Abschnitt 2.1) zeigt, daß die Geometrie und die Auflagerbedingungen der Decke zwar einen Einfluß auf die Deckeneigenfrequenz, aber nicht auf die für die Prognose wichtige Resonanzüberhöhung der Decke hat.

Bei der näheren Untersuchung der Deckenresonanz wird der wichtige Einfluß des Baugrundes deutlich (Abschnitt 2.2). Die geringe Materialdämpfung der Decke bzw. des Bauwerks würde eine sehr große Resonanzüberhöhung der Decke zulassen. Erst die Dämpfung der Fundamente durch die Energieabstrahlung in den Boden und die Nachgiebigkeit des Baugrundes (mit der Möglichkeit der Schwingungstilgung) führen zu einer deutlichen Begrenzung der Deckenresonanz (2.2.2). Abschnitt 2.2.1.2 enthält eine Zusammenfassung der Resonanzüberhöhungen bei verschiedenen Baugrund- und Bauwerksverhältnissen. Zur Anwendung der Ergebnisse auf die eher breitbandige Anregung durch Schienenverkehr sind in Abschnitt 2.3.1 auch die entsprechenden Überhöhungen bei Rauschanregung angegeben. Die Überhöhungen der Deckenamplituden gegenüber dem Freifeld verringern sich dabei nochmals erheblich. Für den häufig anzutreffenden Lockerboden wird das Dreifache des Freifeldes bei allen berechneten Gebäuden nicht überschritten. Wegen der eher zufälligen Phasenlage der Fundamentanregungen können die angegebenen Werte noch einmal halbiert werden (2.3.3). Eine eventuell vorhandene Instationarität der Zugerregung (2.3.2) hat dagegen kaum einen Einfluß.

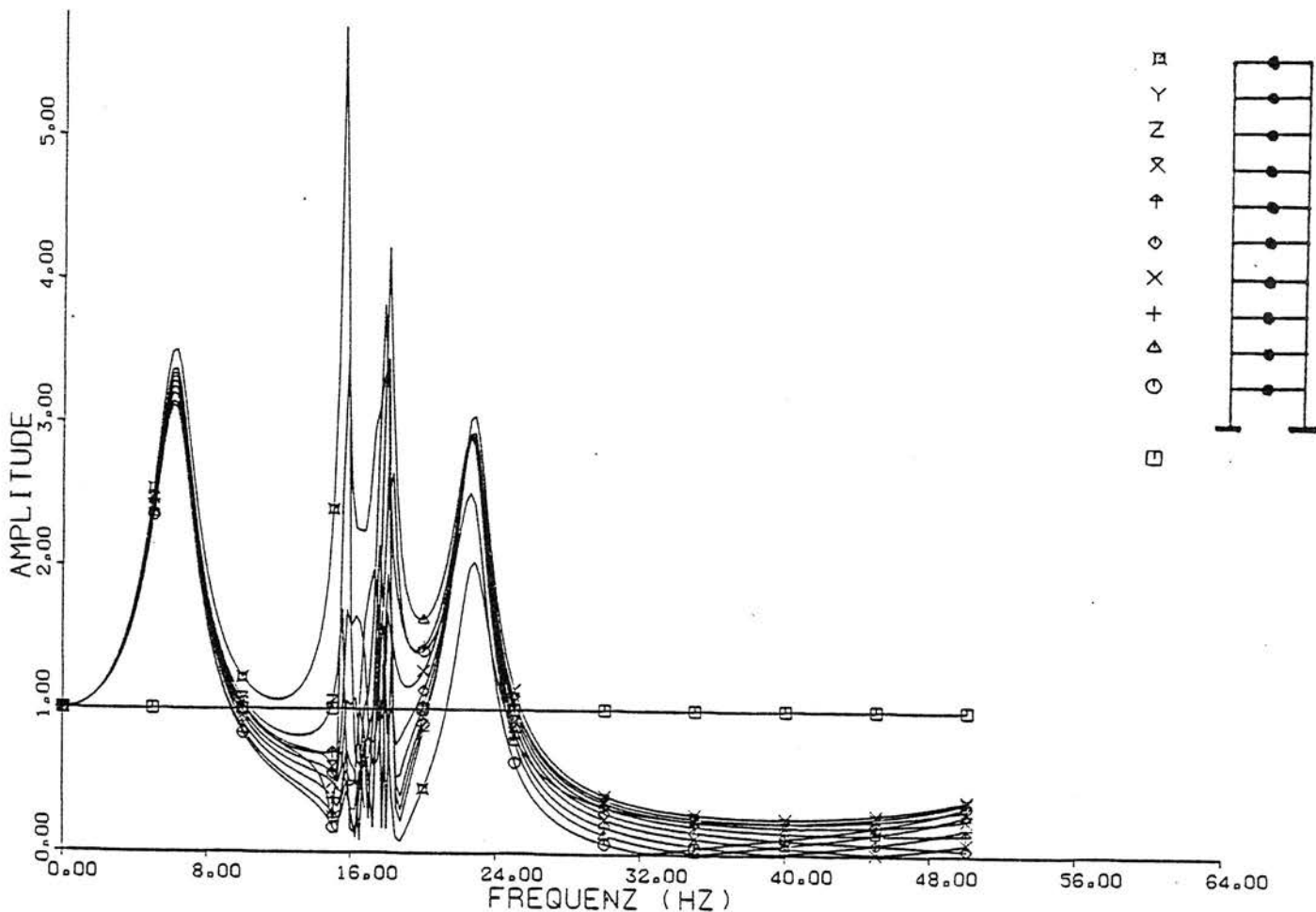
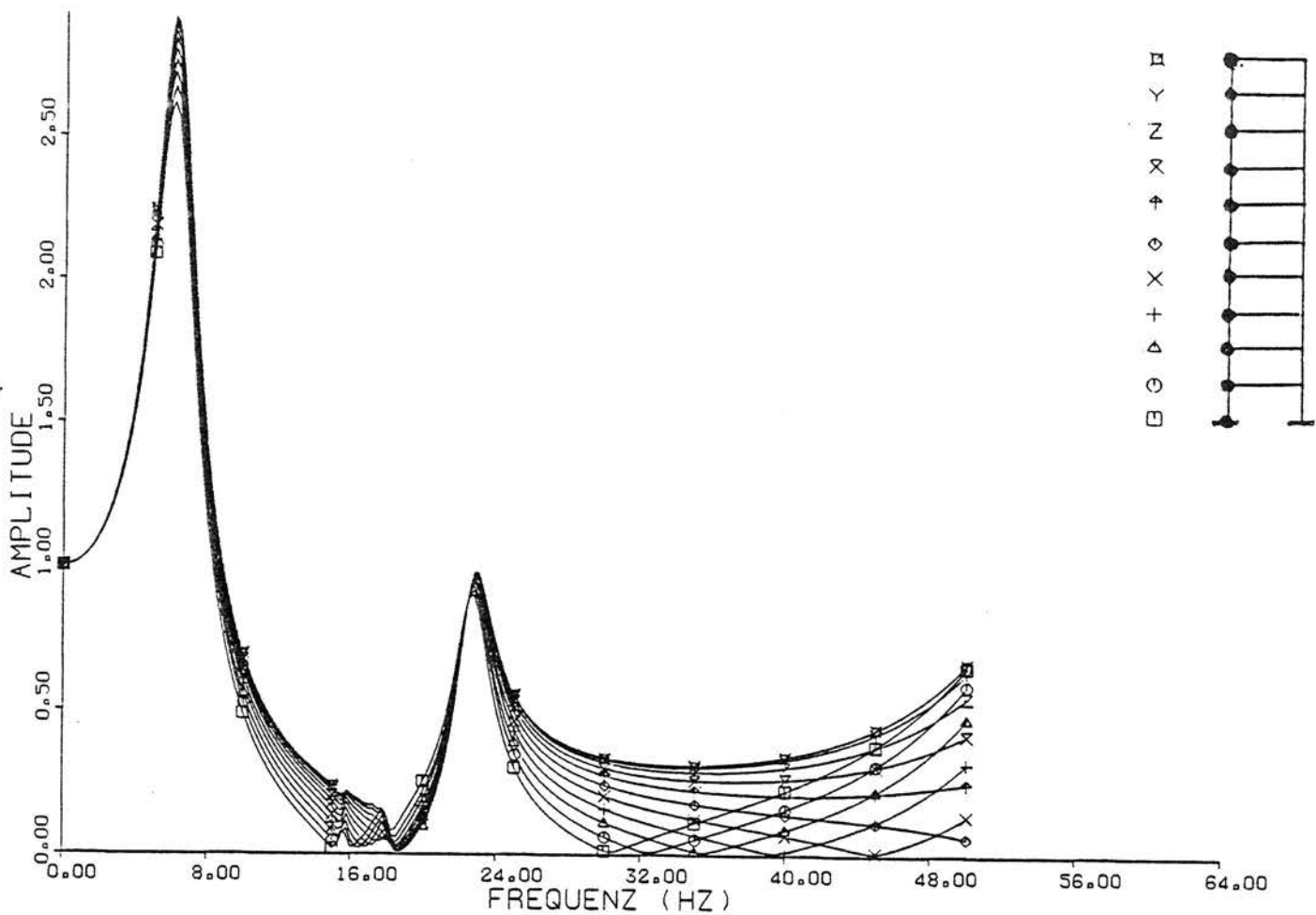
ANHANG A1-A16



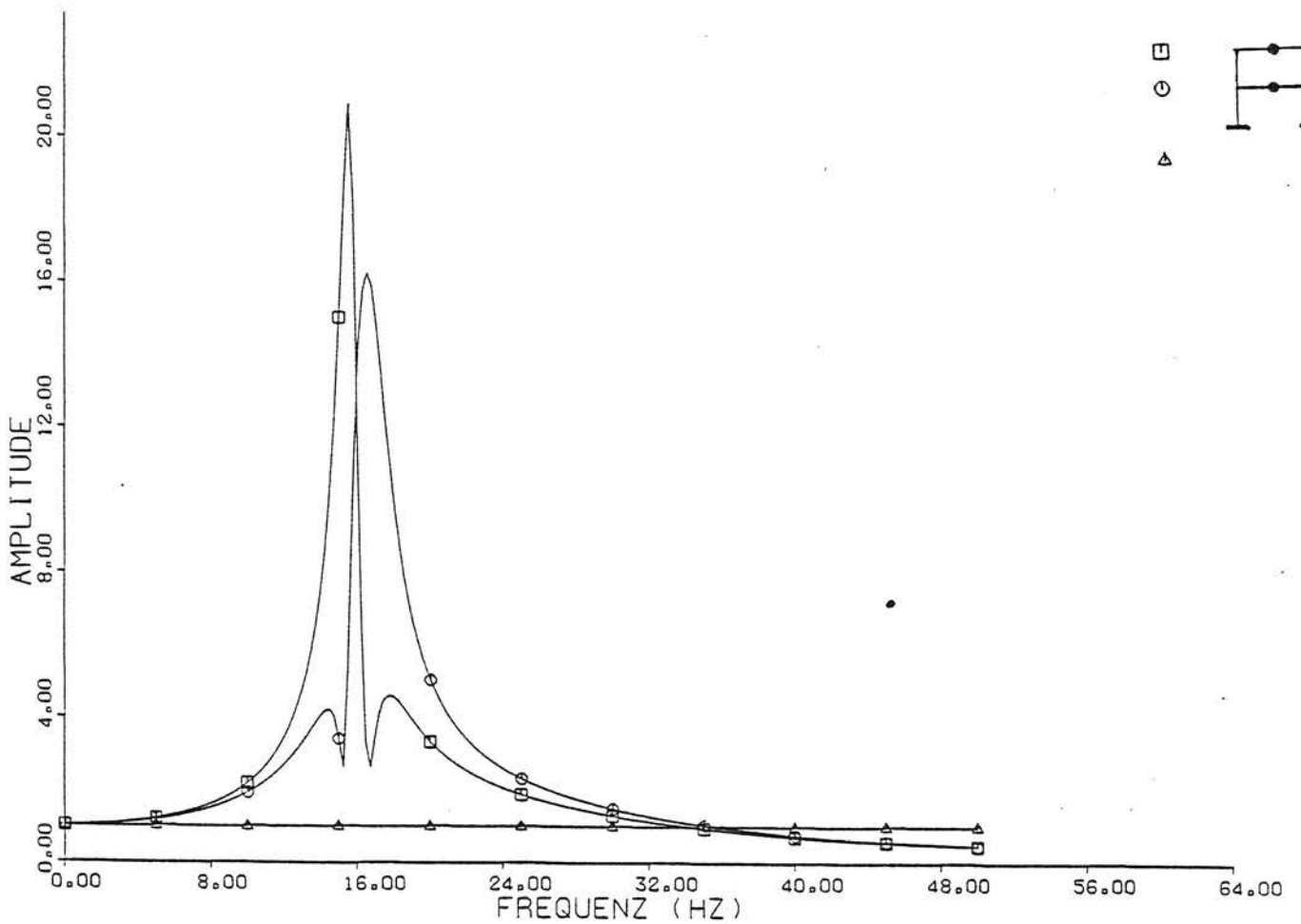
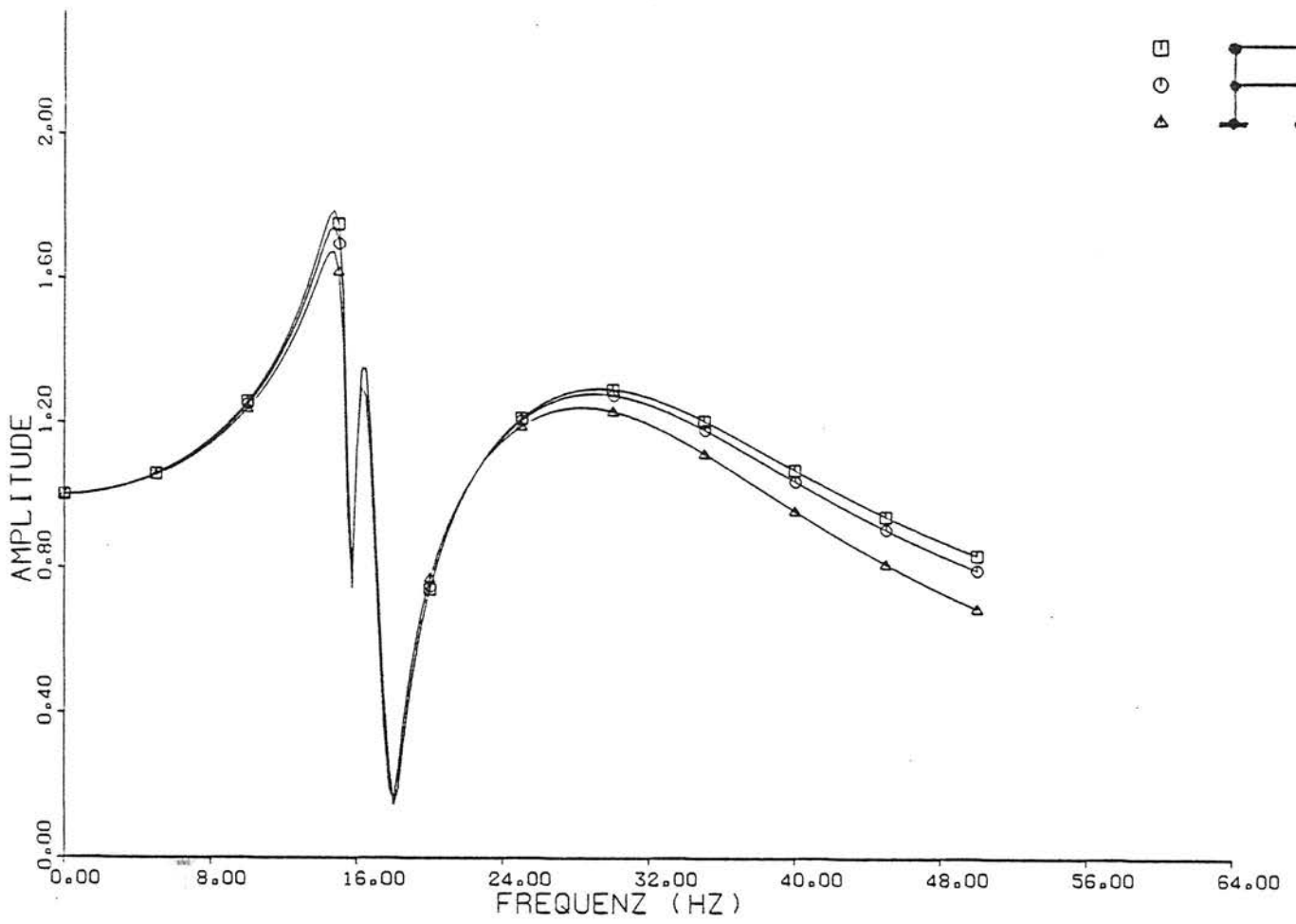
A-1: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 2 Stockwerke, $v_s = 200$ m/s, Standardmaße



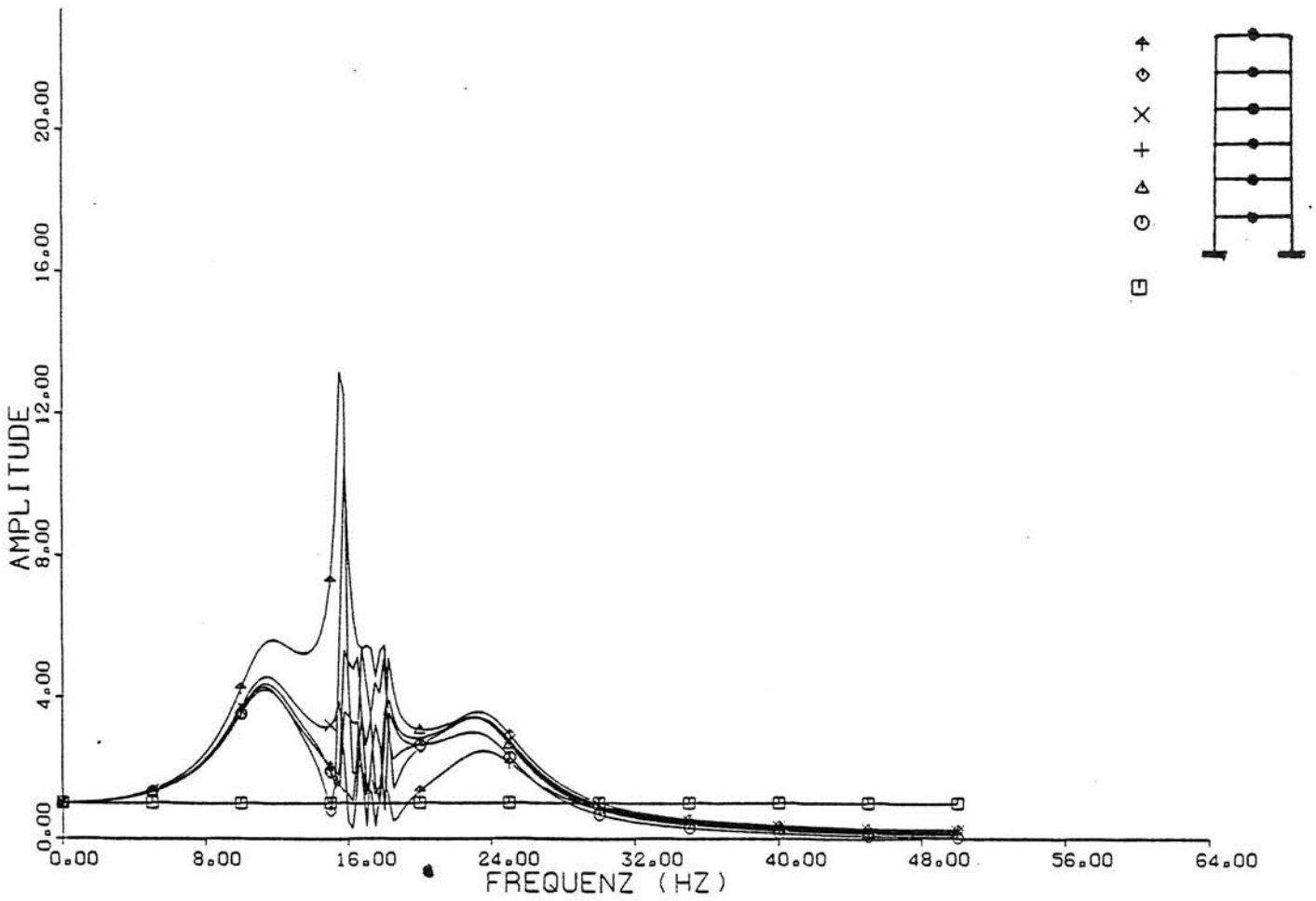
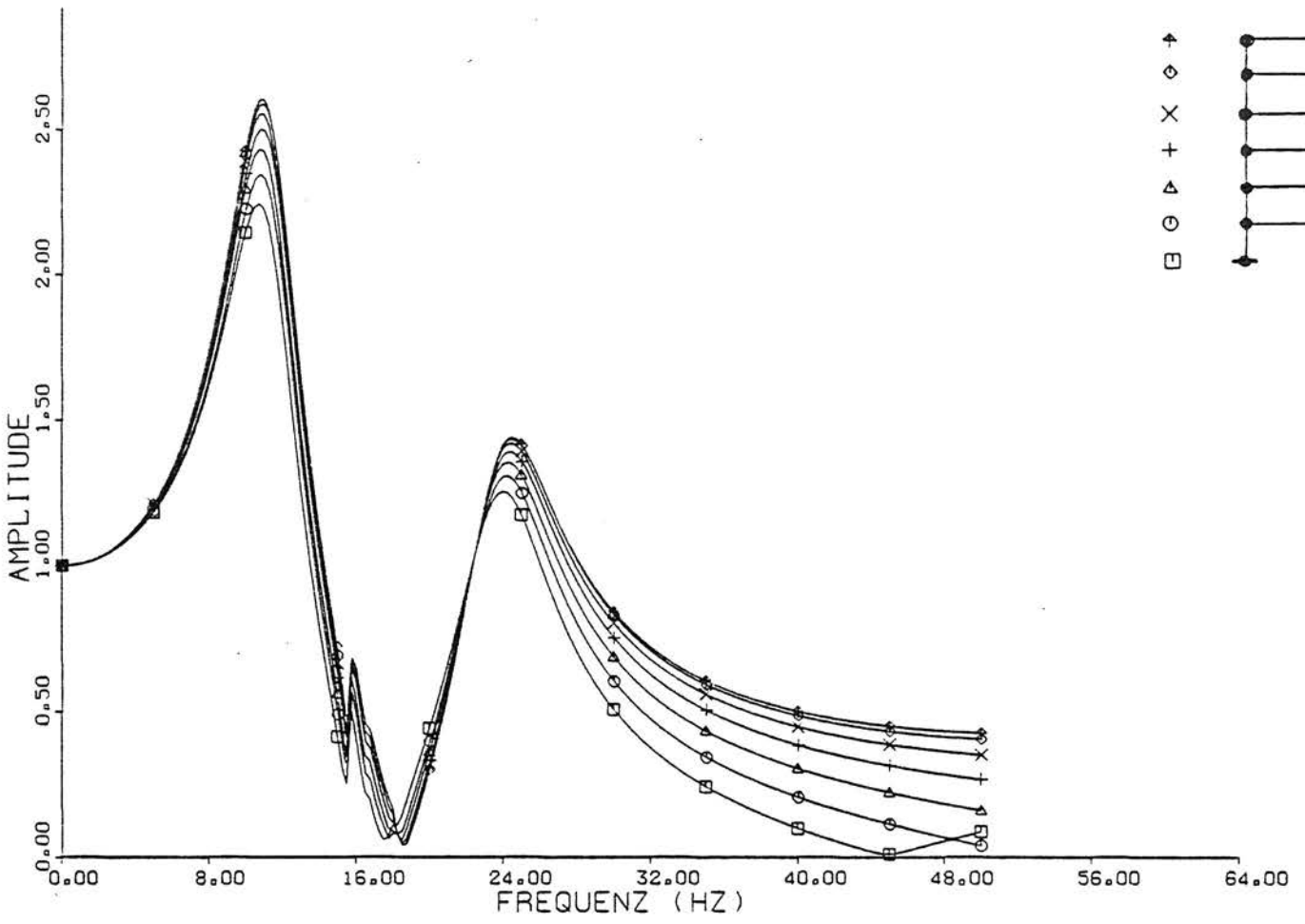
A-2: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 5 Stockwerke, $v_s = 200$ m/s, Standardmaße



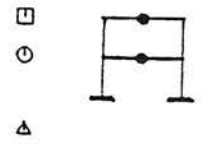
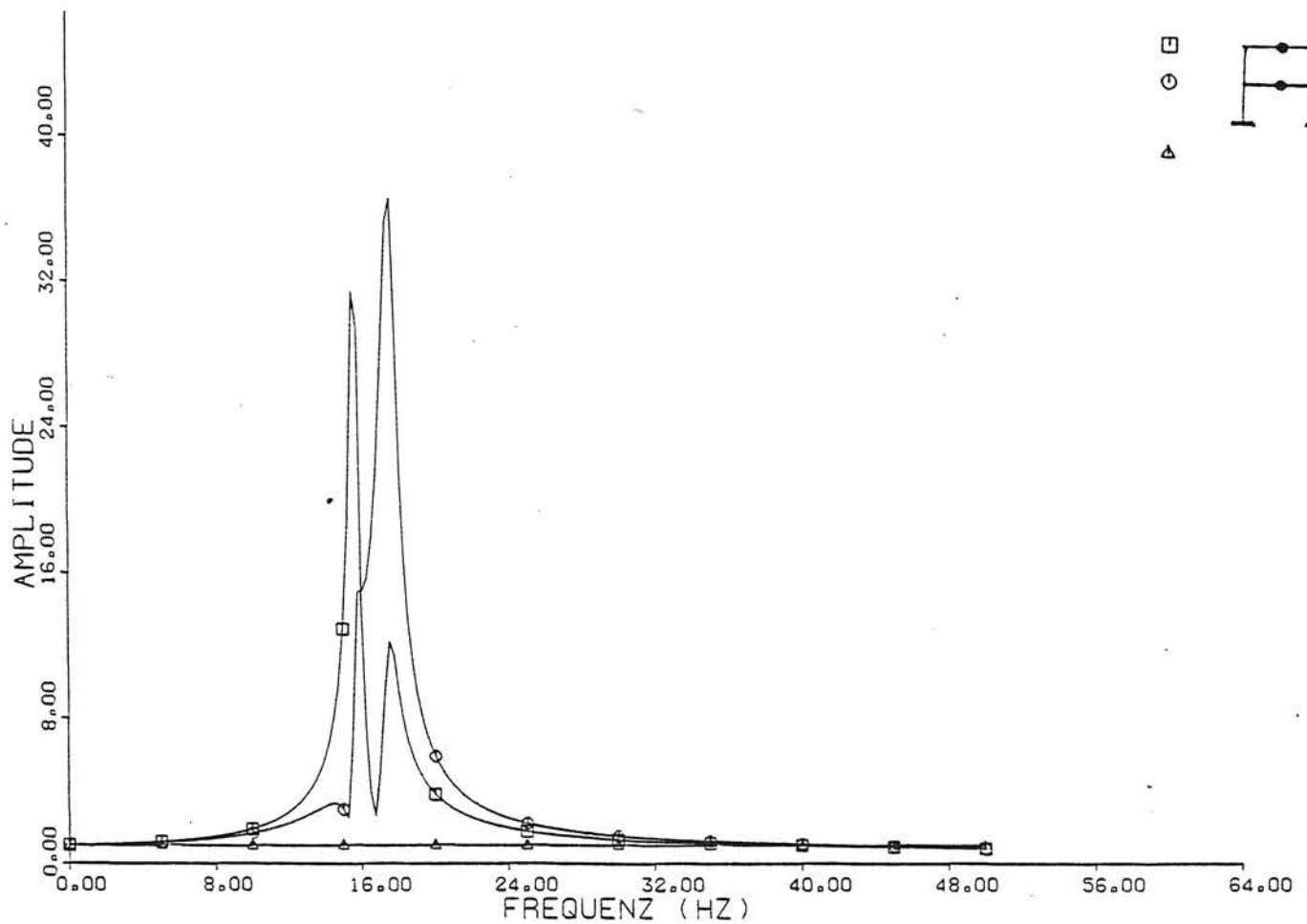
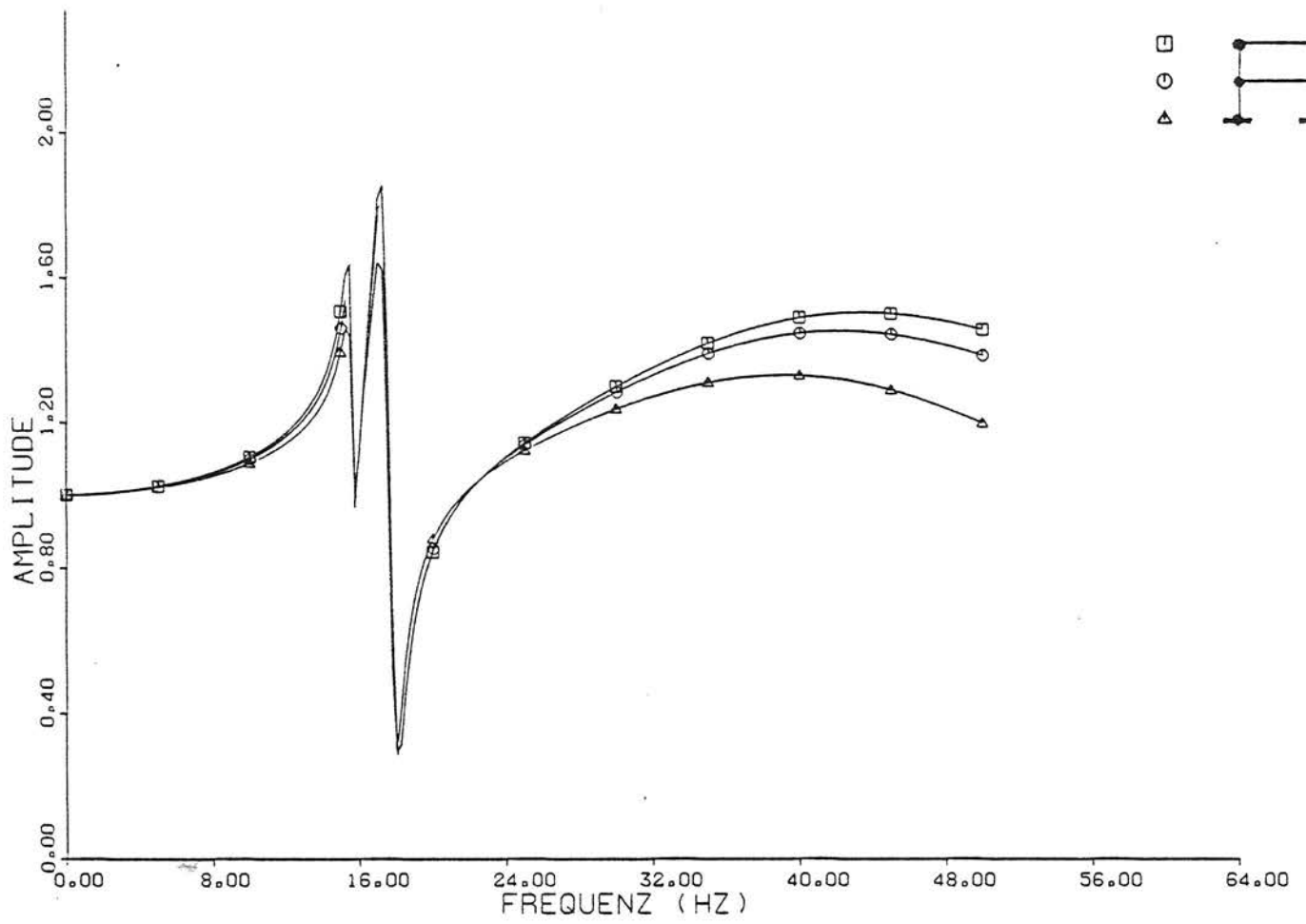
A-3: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 10 Stockwerke, $v_s = 200$ m/s, Standardmaße



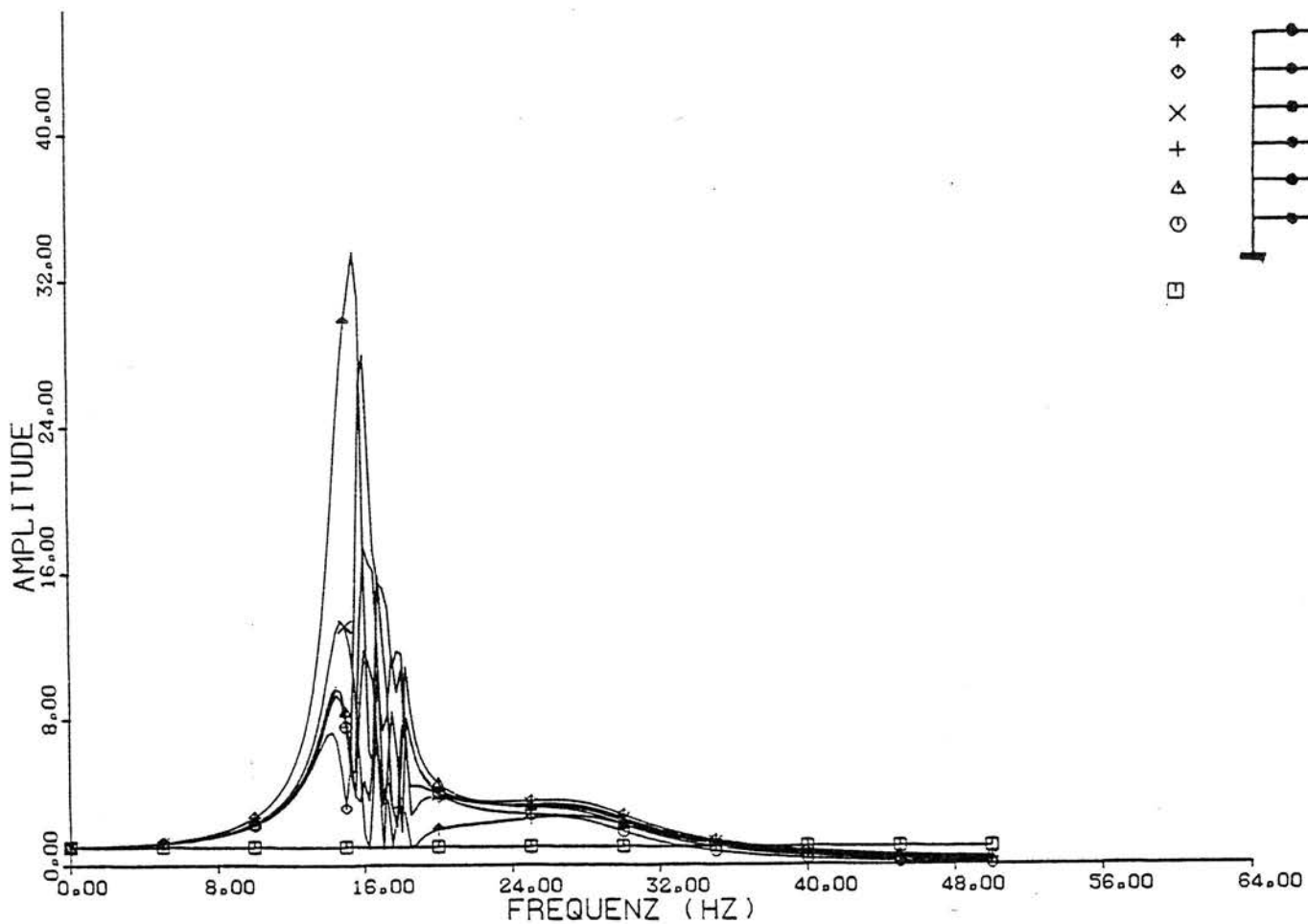
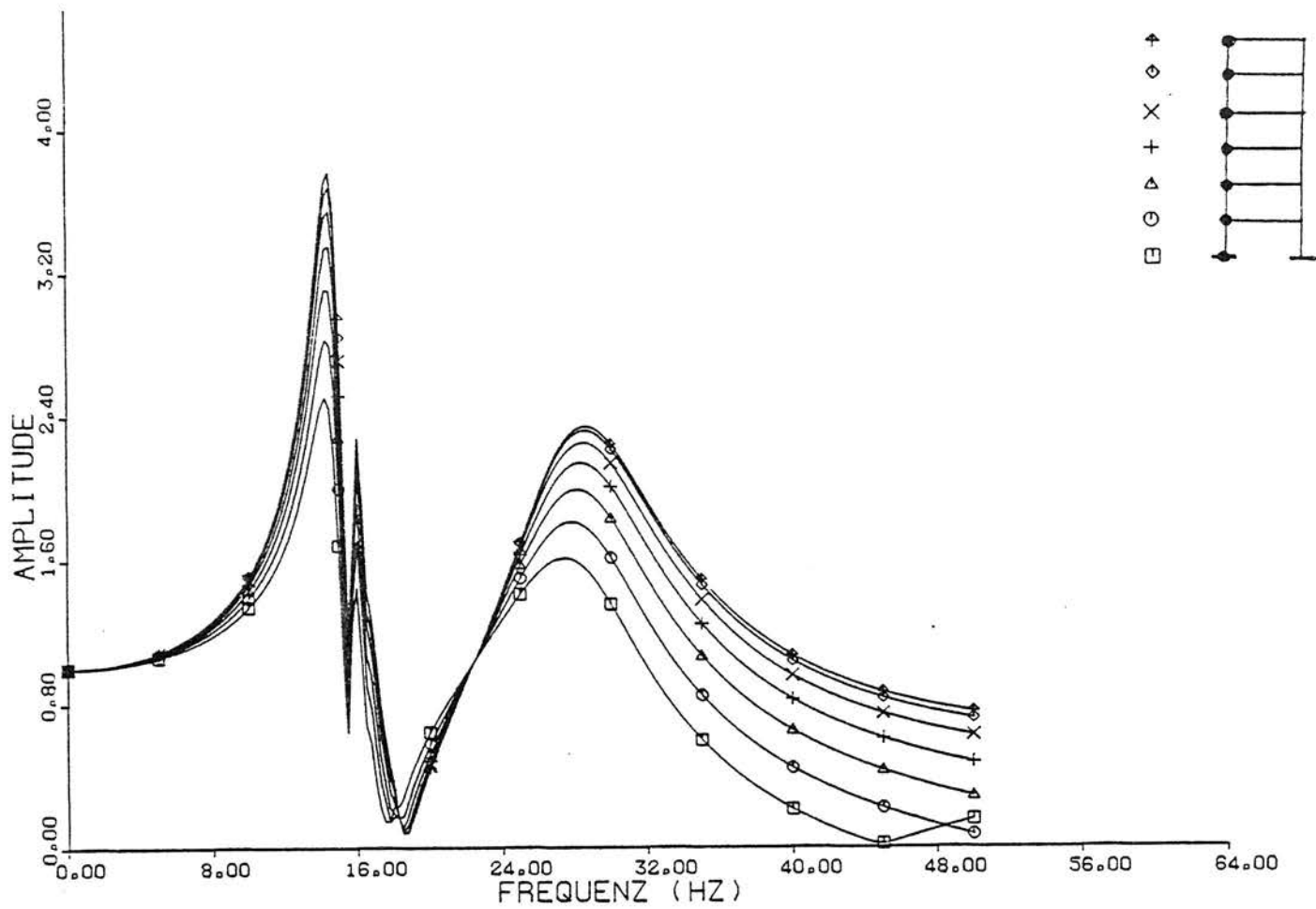
A-4: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 2 Stockwerke, $v_s = 300$ m/s, Standardmaße



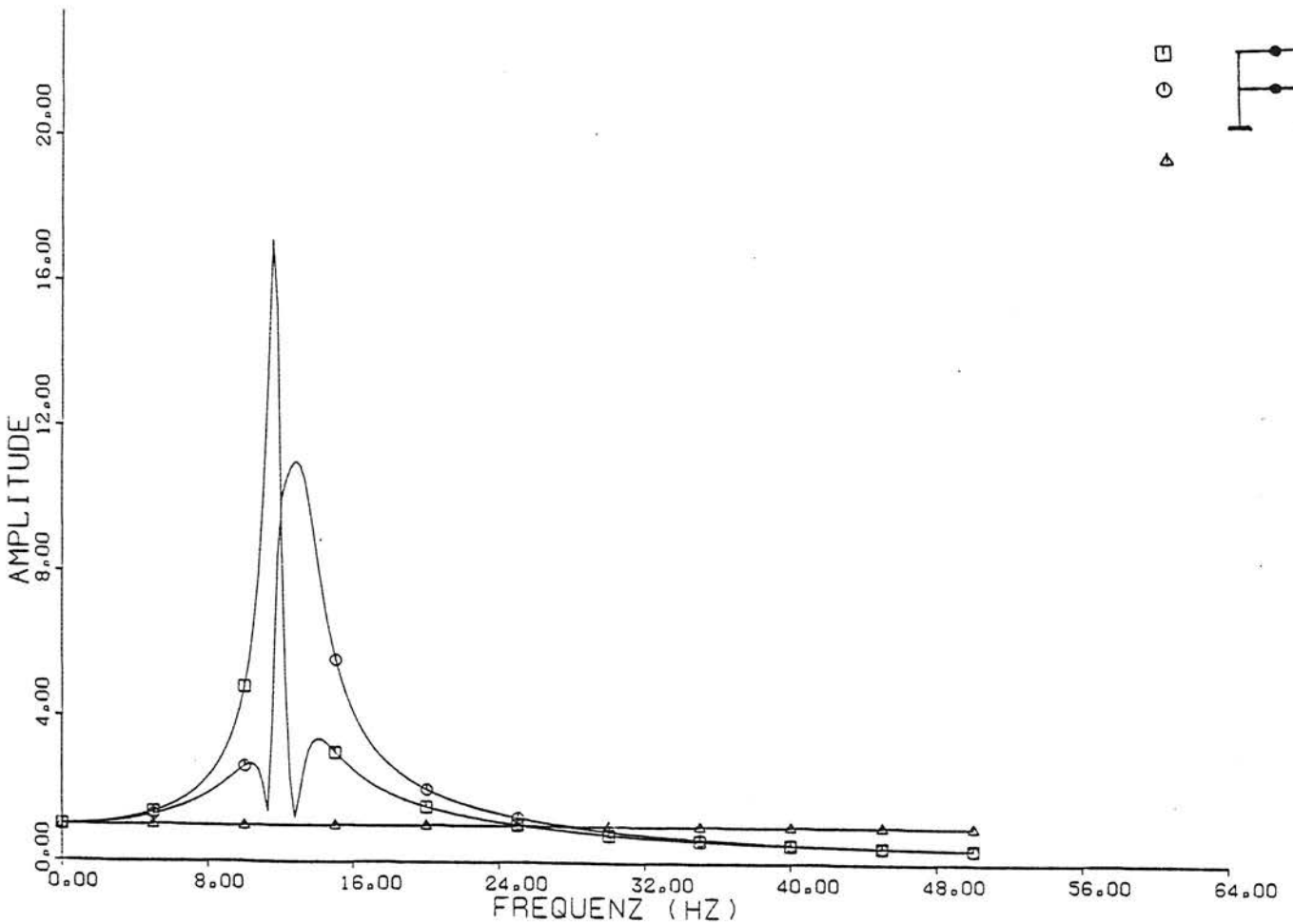
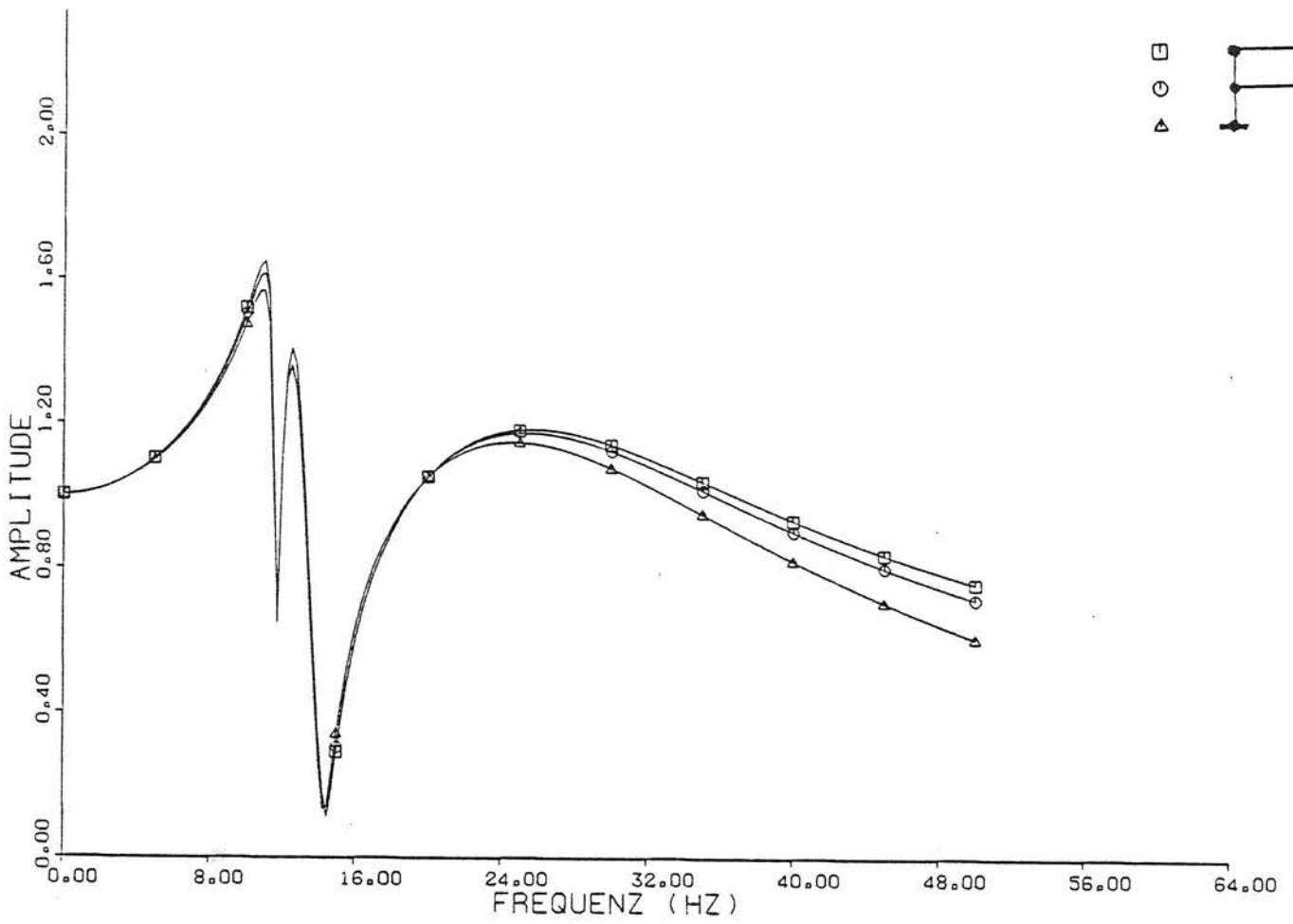
A-5: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
6 Stockwerke, $v_s = 300$ m/s, Standardmaße



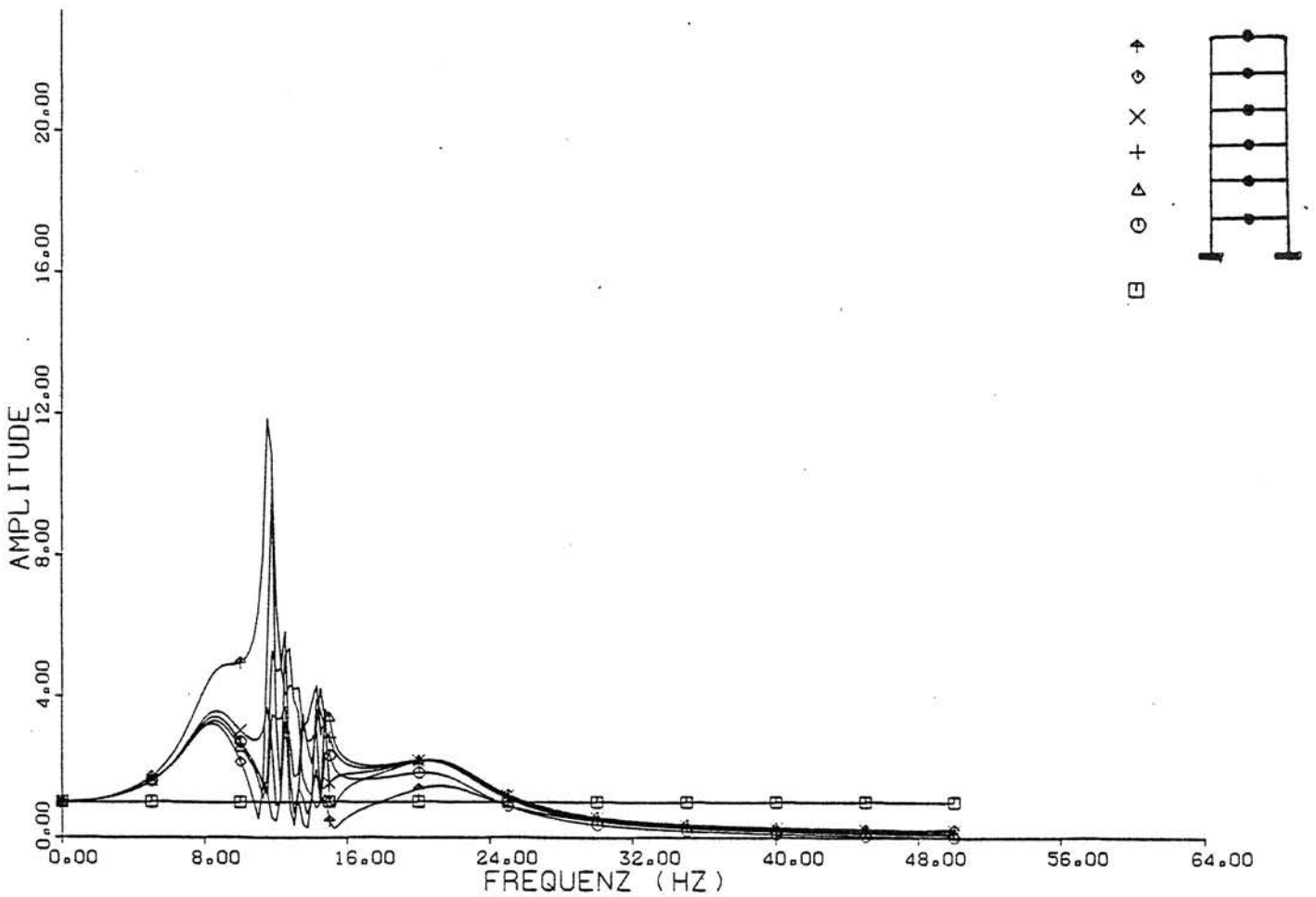
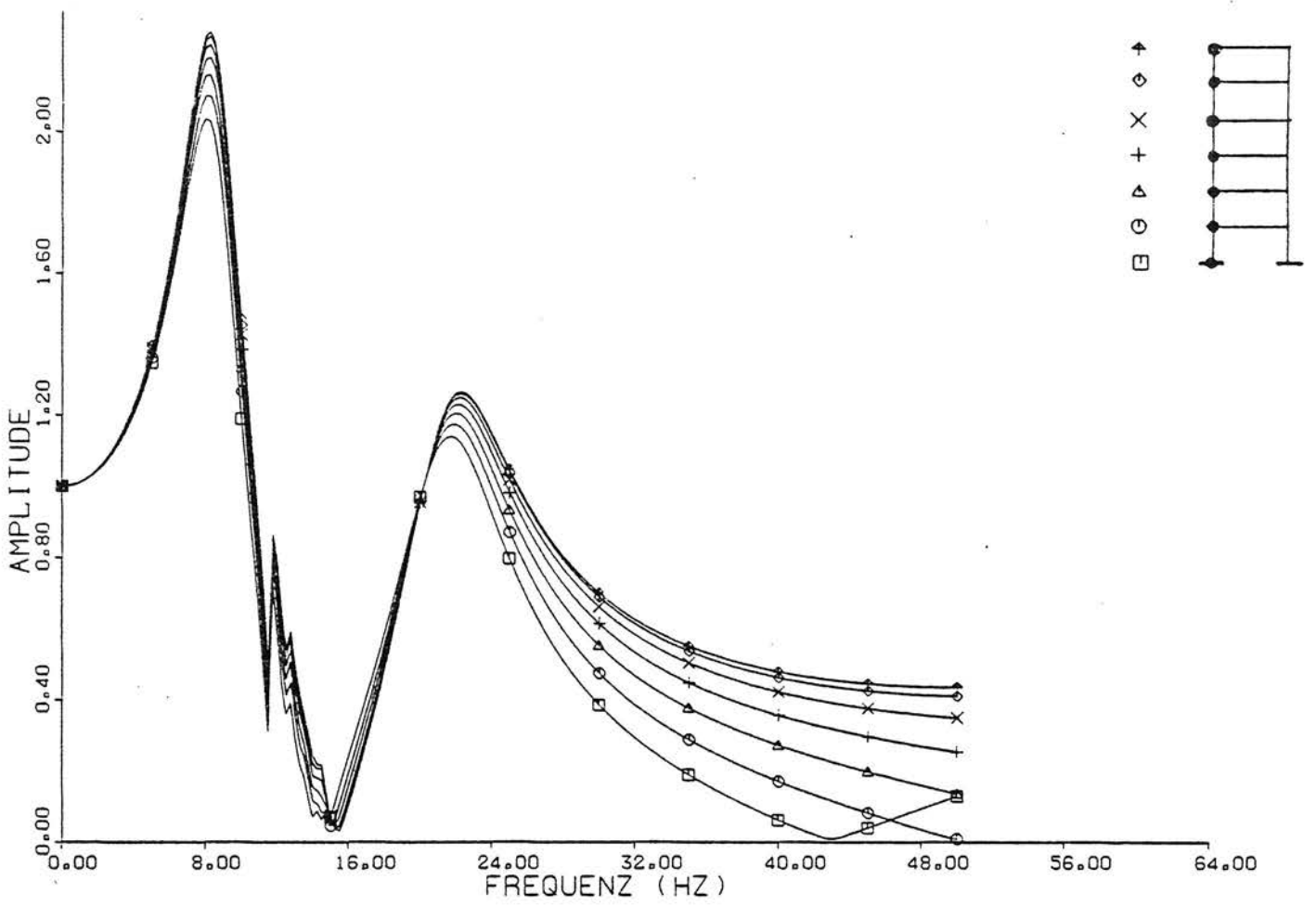
A-6: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 2 Stockwerke, $v_s = 500$ m/s, Standardmaße



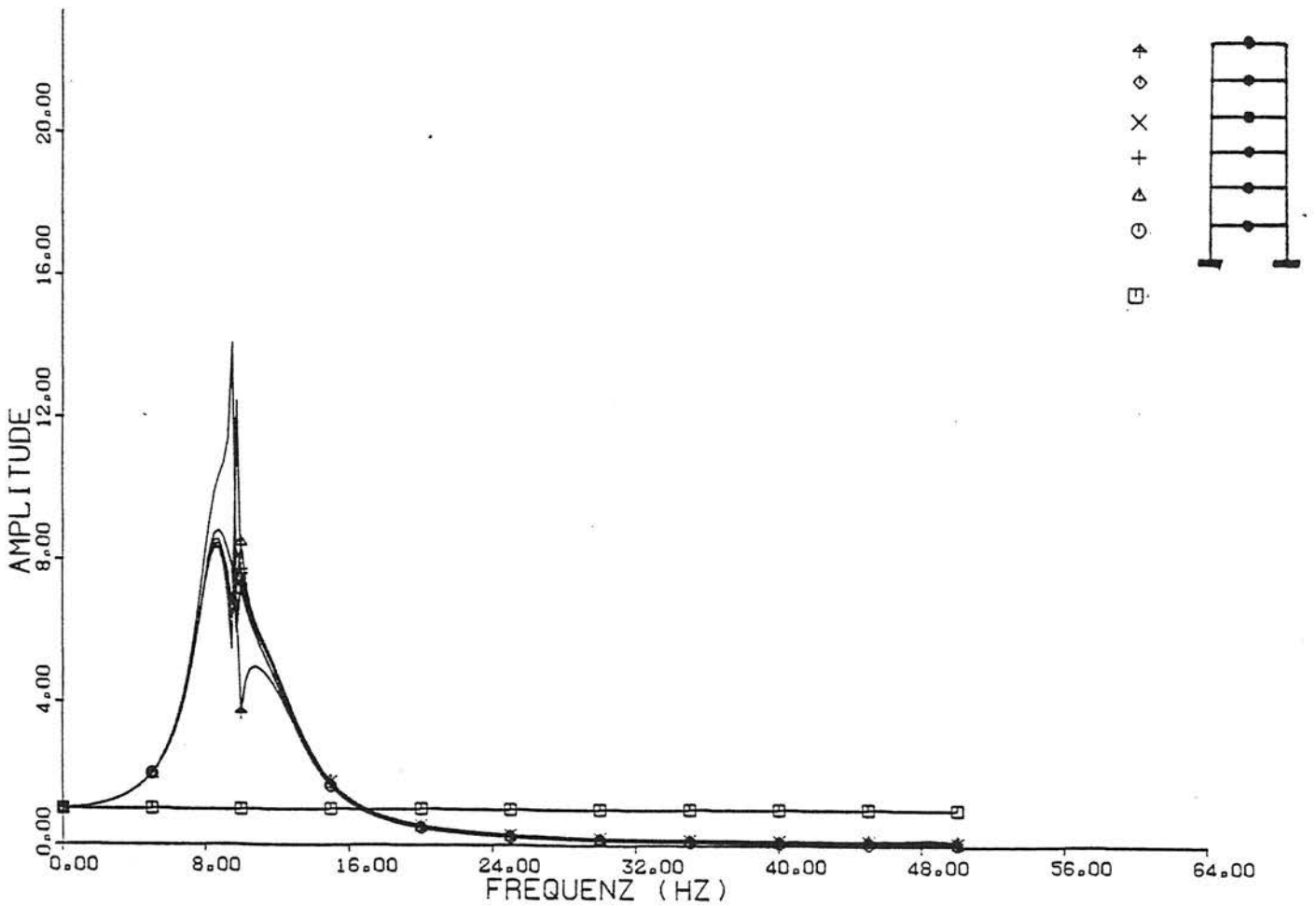
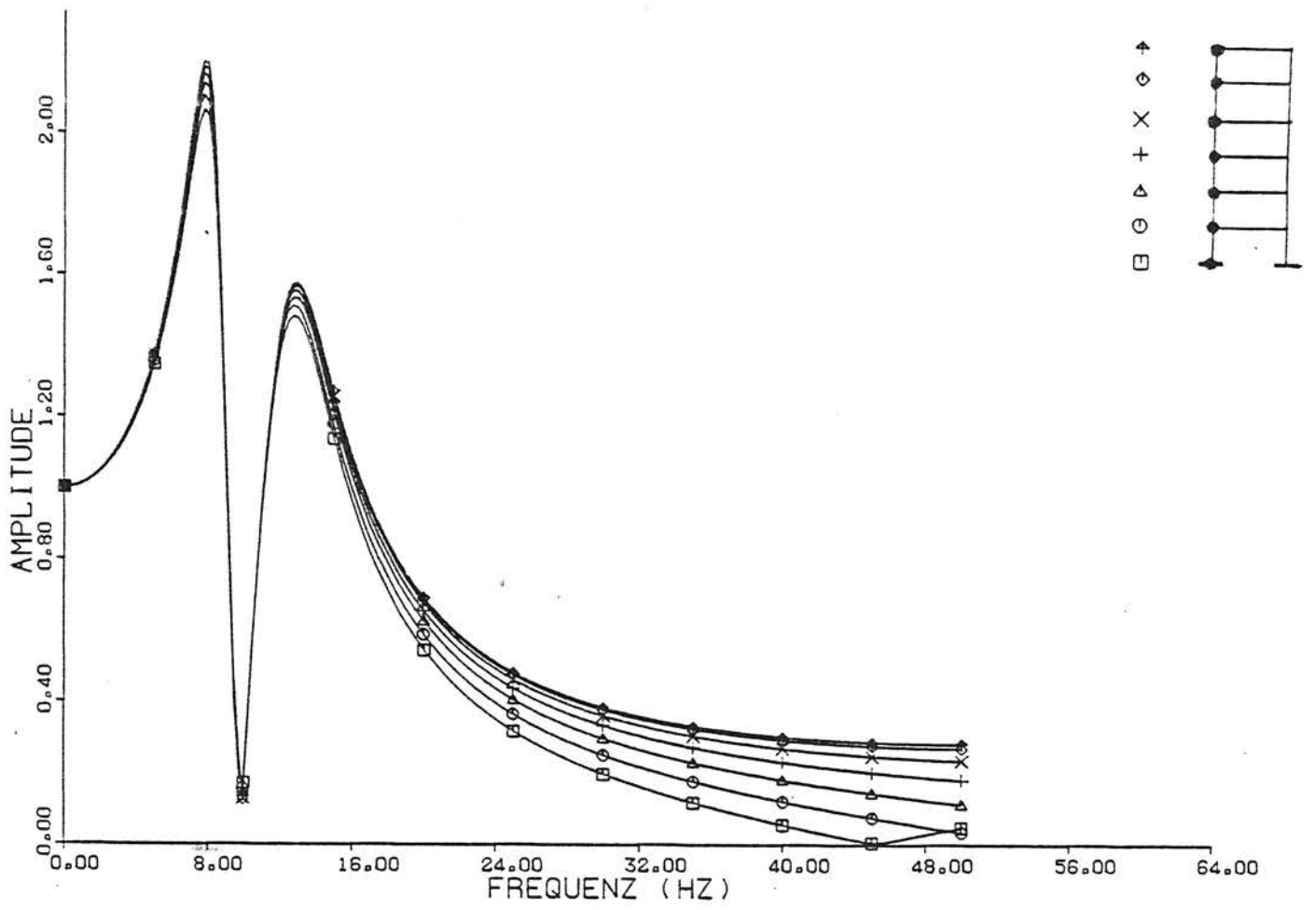
A-7: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
6 Stockwerke, $v_s = 500$ m/s, Standardmaße



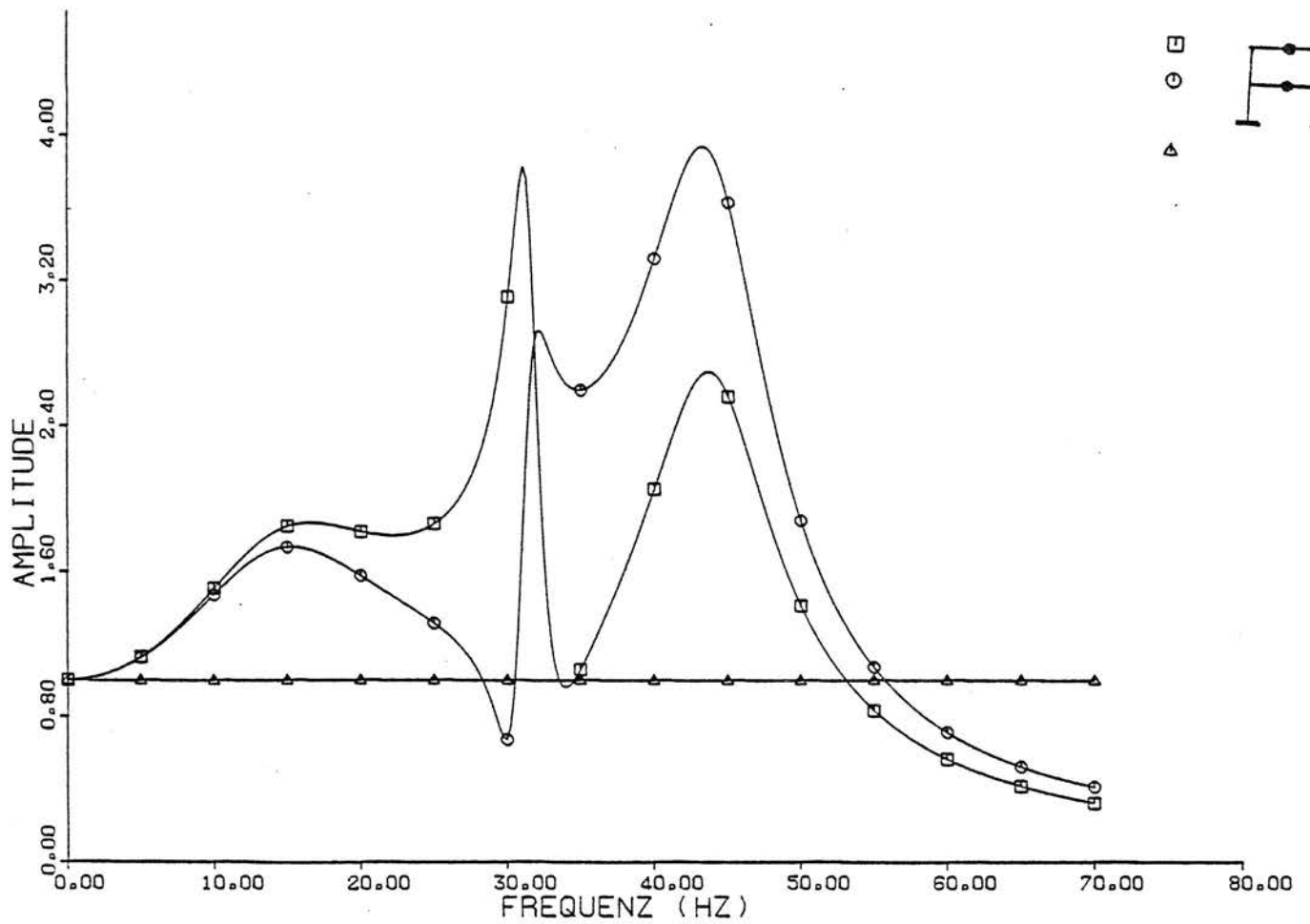
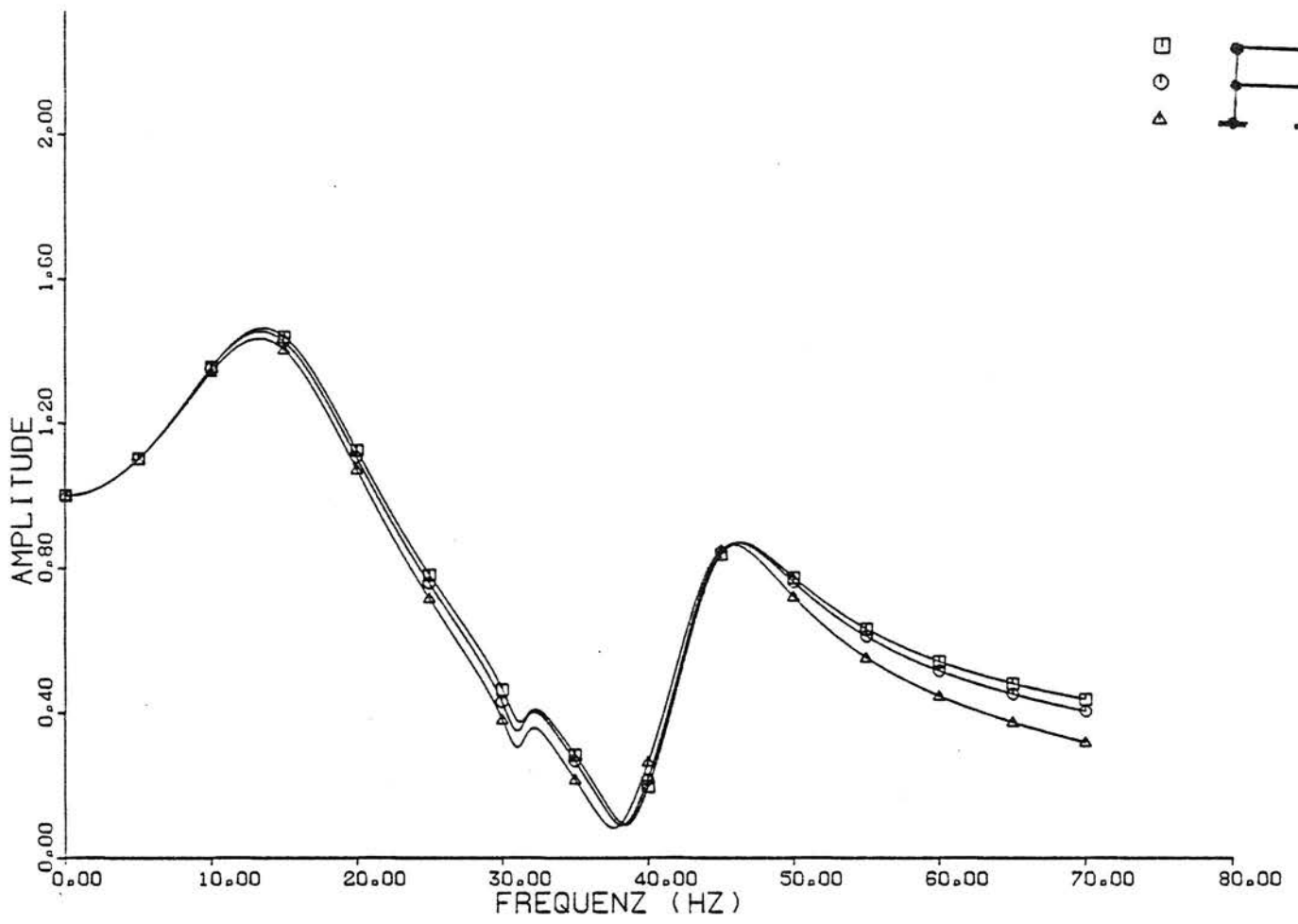
A-8: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 2 Stockwerke, Standardmaße außer $d_w = 0,15$ m



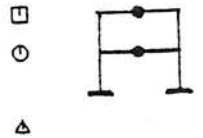
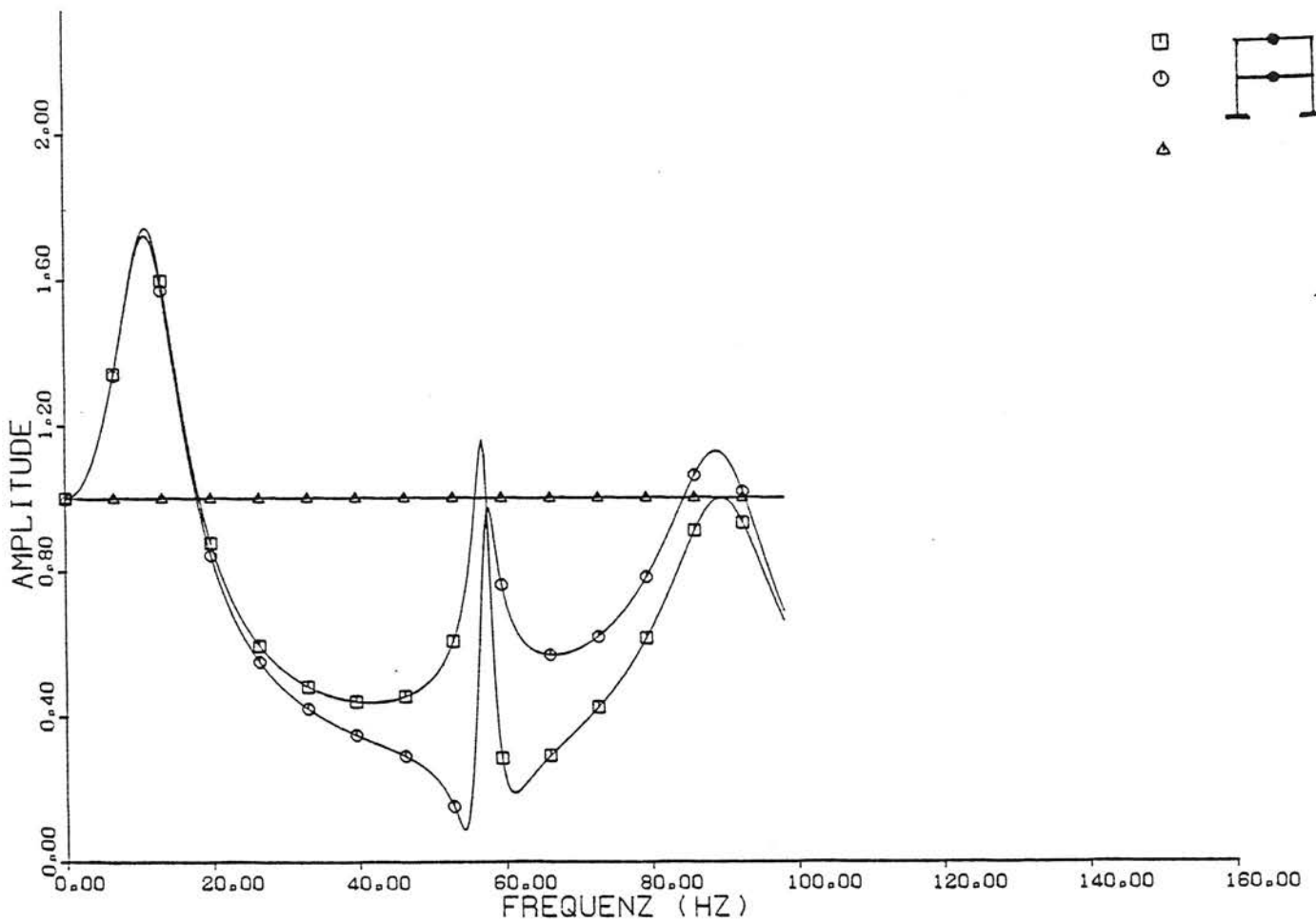
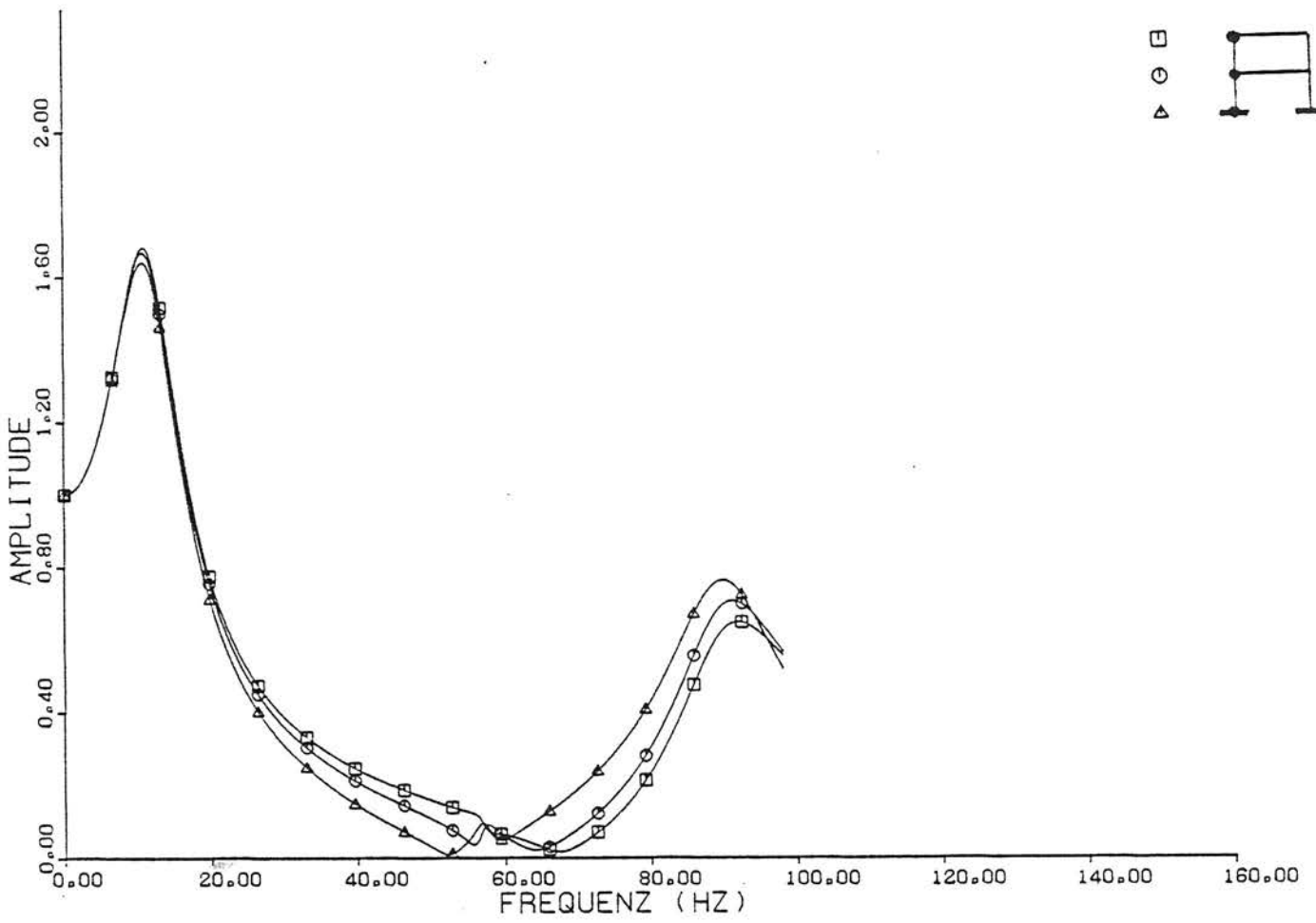
A-9: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 6 Stockwerke, Standardmaße außer $d_w = 0,15$ m



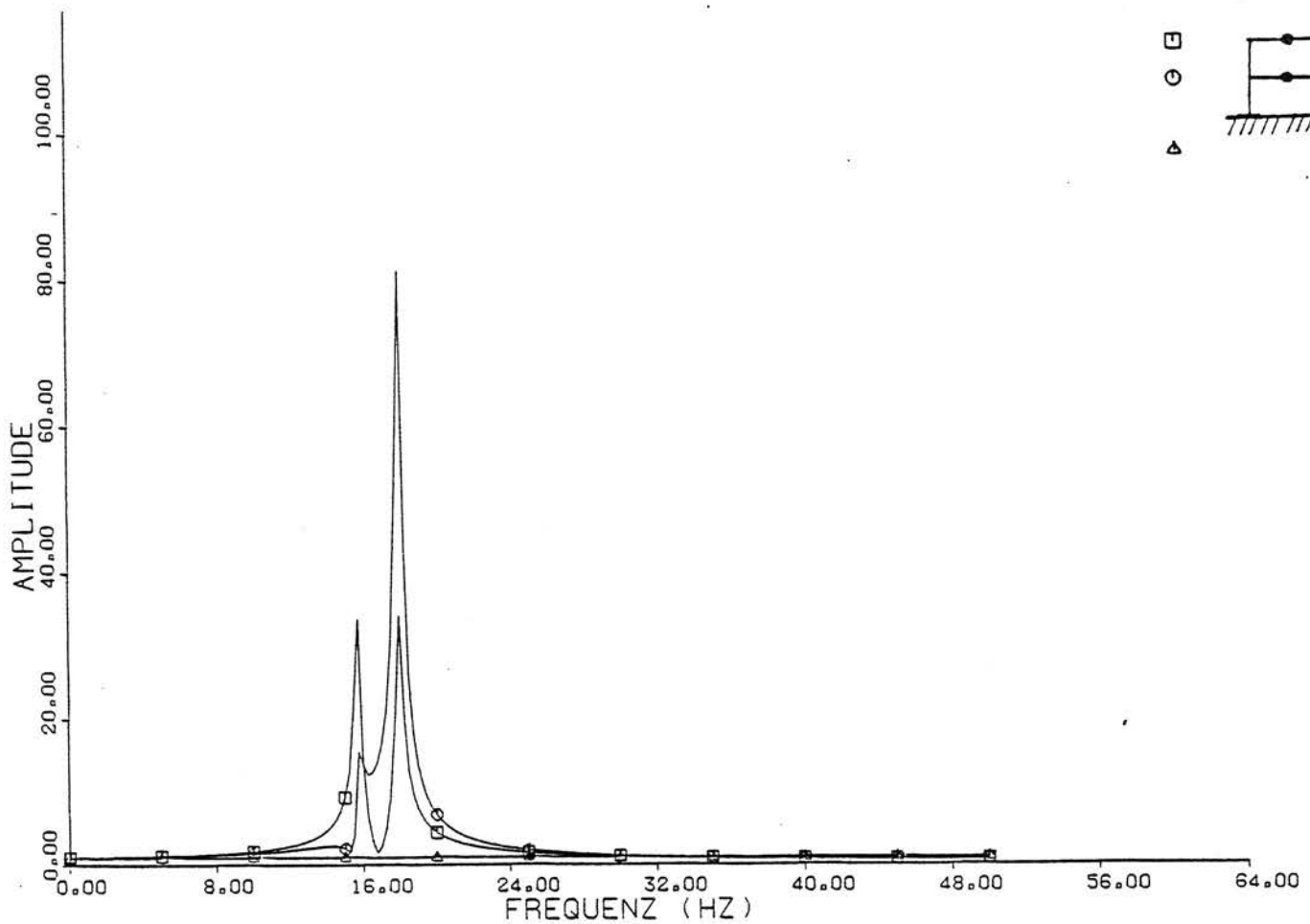
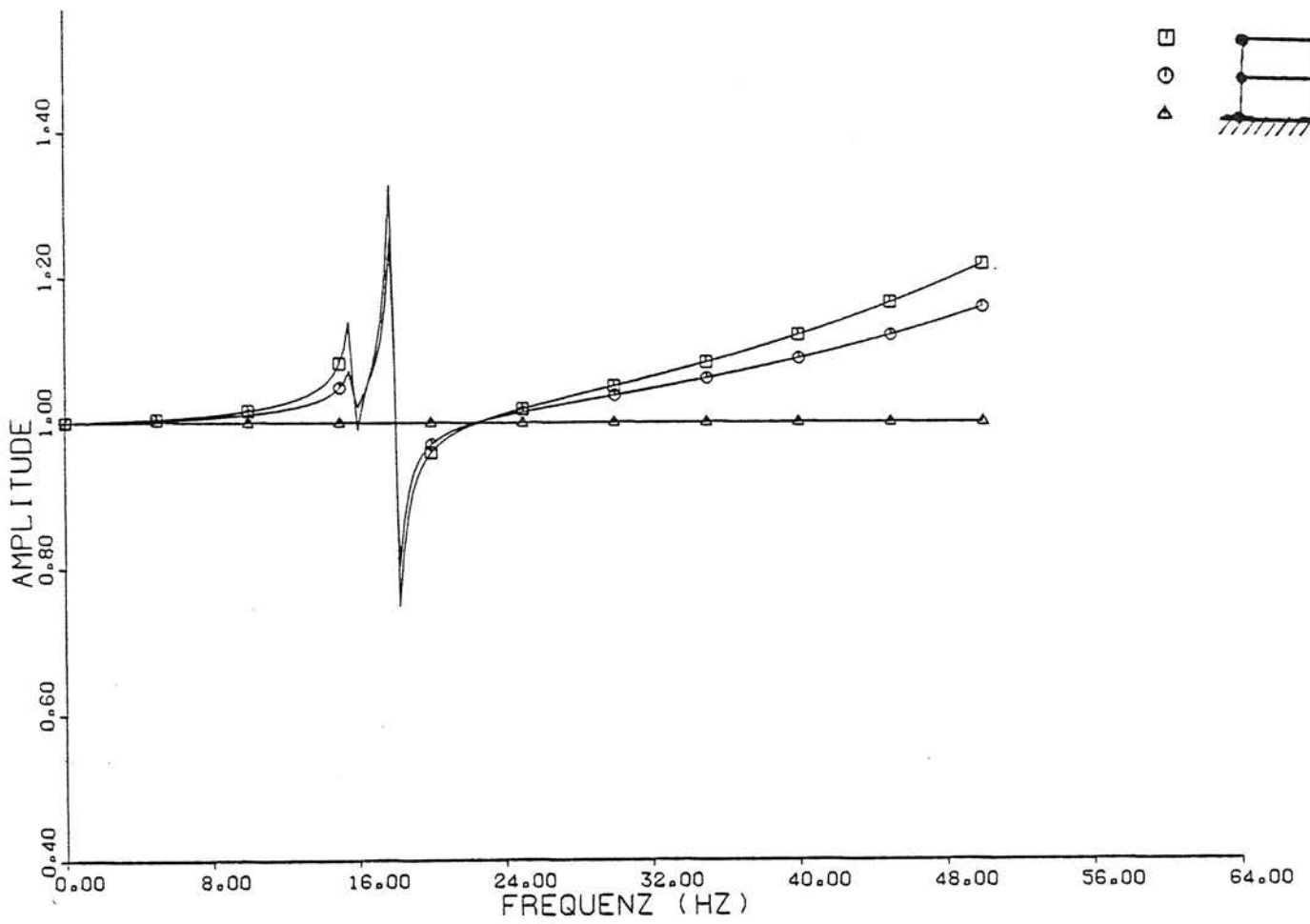
A-10: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
6 Stockwerke, Standardmaße außer $d_0 = 0,1 \text{ m}$



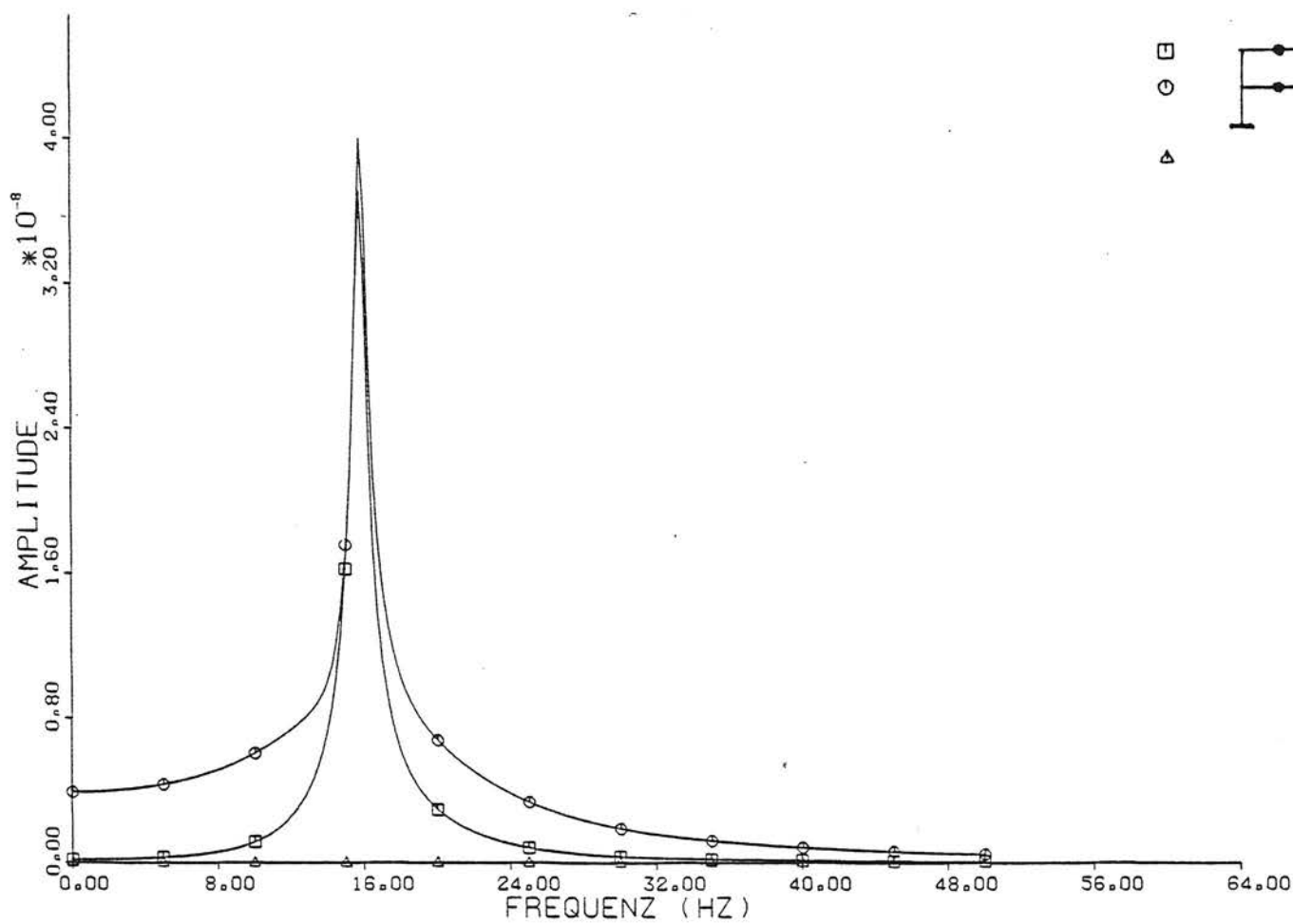
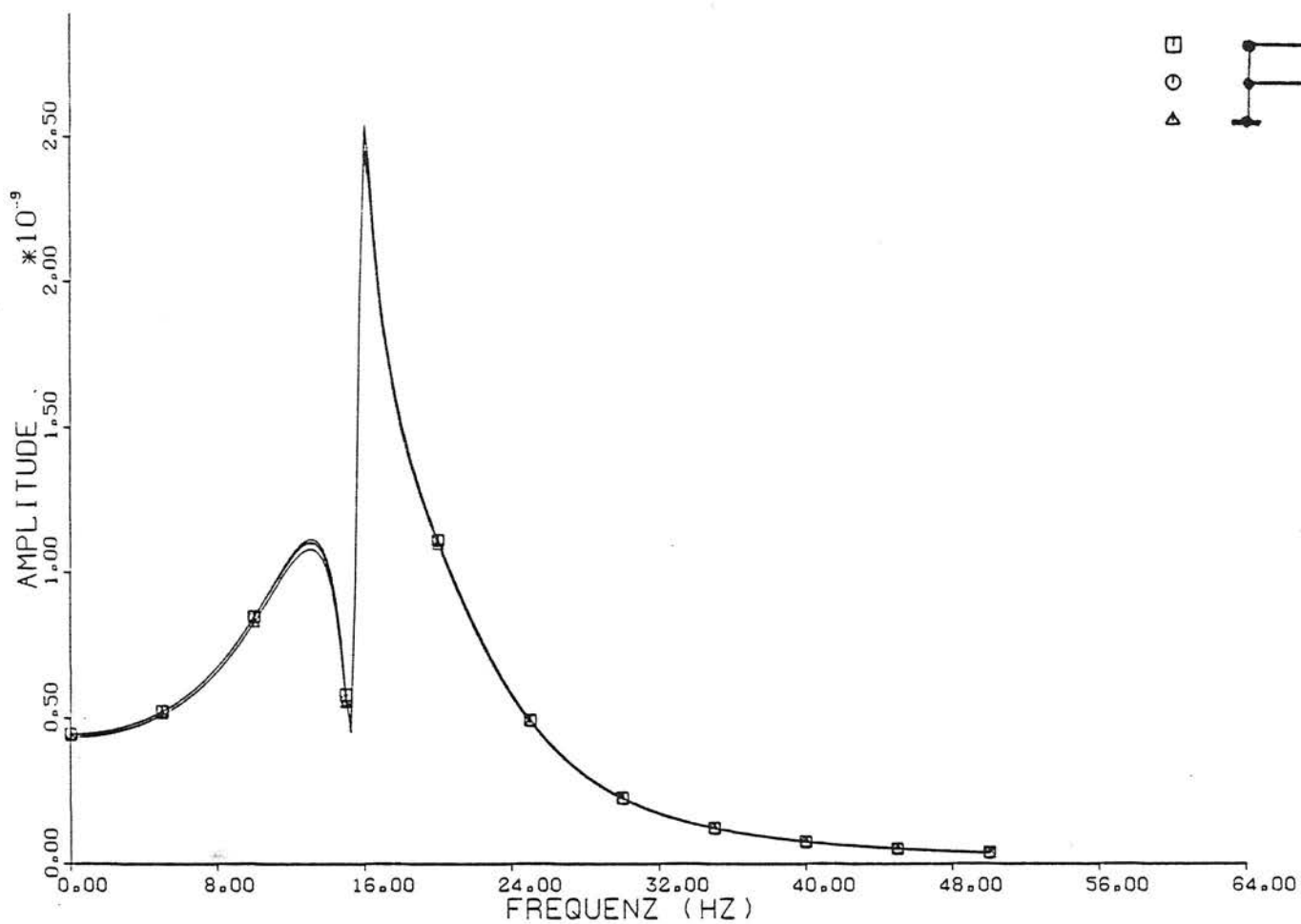
A-11: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
2 Stockwerke, Standardmaße außer $l = 4 \text{ m}$



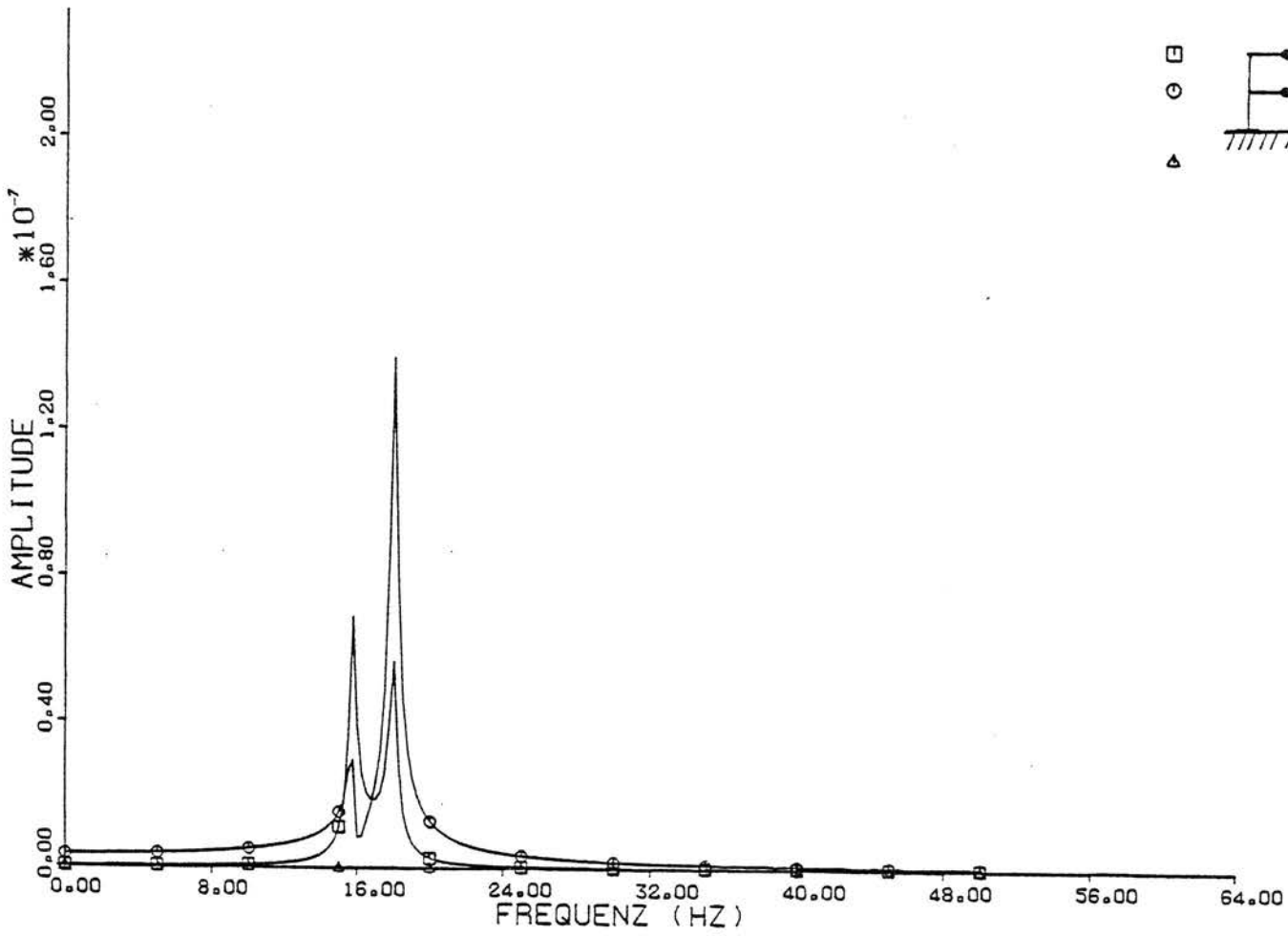
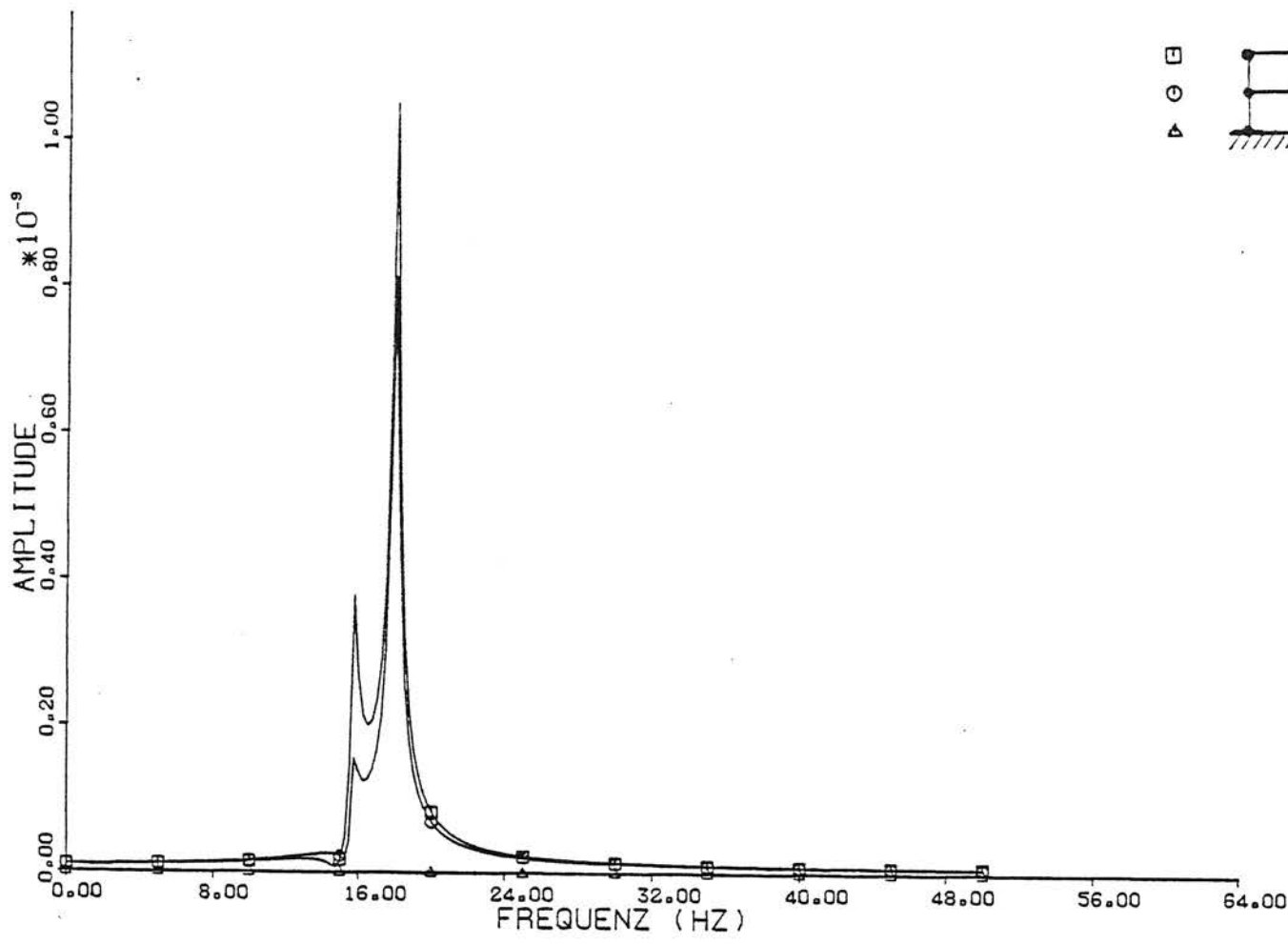
A-12: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
 2 Stockwerke, $l = 4 \text{ m}$, $d_D = 0,6 \text{ m}$



A-13: Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld
2 Stockwerke, Standardmaße, starrer Untergrund



A-14: Wegamplituden bei Krafterregung in Deckenmitte
2 Stockwerke, Standardmaße



A-15: Wegamplituden bei Kräfteerregung in Deckenmitte
2 Stockwerke, Standardmaße, starrer Untergrund

A-16: Resonanzüberhöhungen und -frequenzen der einzelnen Decken

zu Bild A-1	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	8,4	16,0 Hz
2. Stock (Mitte)	10,0	15,6 Hz

2 Stockwerke, $v_S = 200$ m/s, Standardmaße

zu Bild A-2	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	< 3	16-18 Hz
2. Stock (Mitte)	< 3	16-18 Hz
3. Stock (Mitte)	< 3	16-18 Hz
4. Stock (Mitte)	2,9	18 Hz
5. Stock (Mitte)	5,2	15,7 Hz
6. Stock (Mitte)	7,8	15,6 Hz

6 Stockwerke, $v_S = 200$ m/s, Standardmaße

zu Bild A-3	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	< 3	16-18 Hz
2. Stock (Mitte)	4,2	18 Hz
3. Stock (Mitte)	< 3	16-18 Hz
4. Stock (Mitte)	< 3	16-18 Hz
5. Stock (Mitte)	< 3	16-18 Hz
6. Stock (Mitte)	3,3	17,8 Hz
7. Stock (Mitte)	3,3	17,8 Hz
8. Stock (Mitte)	4,0	17,8 Hz
9. Stock (Mitte)	3,6	15,6+17,8 Hz
10. Stock (Mitte)	6,2	15,6 Hz

10 Stockwerke, $v_S = 200$ m/s, Standardmaße

zu Bild A-4	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	16,2	16,5 Hz
2. Stock (Mitte)	20,9	15,5 Hz

2 Stockwerke, $v_s = 300$ m/s, Standardmaße

zu Bild A-5	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	3,6	15,75 Hz
2. Stock (Mitte)	5,4	16,75 Hz
3. Stock (Mitte)	5,3	15,75 Hz
4. Stock (Mitte)	5,1	18,0 Hz
5. Stock (Mitte)	10,6	15,75 Hz
6. Stock (Mitte)	13,1	15,5 Hz

6 Stockwerke, $v_s = 300$ m/s, Standardmaße

zu Bild A-6	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	36,5	17,5 Hz
2. Stock (Mitte)	29,2	15,75 Hz

2 Stockwerke, $v_s = 500$ m/s, Standardmaße

zu Bild A-7	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	11,8	16,0 Hz
2. Stock (Mitte)	15,9	16,75 Hz
3. Stock (Mitte)	17,4	16,0 Hz
4. Stock (Mitte)	13,4	16,0 Hz
5. Stock (Mitte)	27,9	16,0 Hz
6. Stock (Mitte)	33,6	15,5 Hz

6 Stockwerke, $v_s = 500$ m/s, Standardmaße

zu Bild A-8	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	11,0	12,75 Hz
2. Stock (Mitte)	17,1	11,5 Hz

2 Stockwerke, $v_S = 200$ m/s, Standardmaße außer $d_W = 0,15$ m

zu Bild A-9	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	3,7	12,5 Hz
2. Stock (Mitte)	5,3	12,75 Hz
3. Stock (Mitte)	5,8	12,5 Hz
4. Stock (Mitte)	4,2	14,25 Hz
5. Stock (Mitte)	10,0	11,75 Hz
6. Stock (Mitte)	11,9	11,5 Hz

6 Stockwerke, $v_S = 200$ m/s, Standardmaße außer $d_W = 0,15$ m

zu Bild A-10	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	7,6	9,0 Hz
2. Stock (Mitte)	8,5	9,75 Hz
3. Stock (Mitte)	8,2	9,5 Hz
4. Stock (Mitte)	8,2	9,0 Hz
5. Stock (Mitte)	12,5	9,5 Hz
6. Stock (Mitte)	14,1	9,25 Hz

6 Stockwerke, $v_S = 200$ m/s, Standardmaße außer $d_D = 0,1$ m

zu Bild A-11	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	3,9	43,25 Hz
2. Stock (Mitte)	3,8	31,0 Hz

2 Stockwerke, $v_S = 200$ m/s, Standardmaße außer $l = 4$ m

zu Bild A-12	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	0,97	57,76 Hz
2. Stock (Mitte)	1,2	56,75 Hz

2 Stockwerke, $v_s = 200 \text{ m/s}$, $l = 4 \text{ m}$, $d_D = 0,6 \text{ m}$

zu Bild A-13	Resonanzüberhöhung	Resonanzfrequenz
1. Stock (Mitte)	81,3	18,0 Hz
2. Stock (Mitte)	34,1	18,0 Hz

2 Stockwerke, Standardmaße, starrer Untergrund

Teil V

Messungen zur Immission

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil V: Messungen zur Immission</u>	
1. Einleitung	V/1
2. Beschreibung der Gebäude, der Meßpunkte und des Meß-/Versuchsprogramms	V/2
2.1 Hochhaus TOP-Tegel, Berlin	V/3
2.2 TETRAPAK Berlin-Heiligensee	V/4
2.3 Schaltwarte der GASAG, Berlin-Mariendorf	V/5
2.4 BAM Berlin, Haus 88	V/5
2.5 Modellschutzbau Meppen	V/6
3. Darstellung der einzelnen Meßergebnisse	V/13
3.1 Hochhaus TOP-Tegel, Berlin	V/13
3.1.1 Messungen in der Baugrube: Freifeld und Wellengeschwindigkeit	V/13
3.1.2 Messungen im Rohbau: Anregung der Fundamente, Verteilung über die Gebäudehöhe und Deckenresonanz	V/13
3.1.3 Verhältnis Freifeld - Bauwerk	V/20
3.2 TETRAPAK Berlin-Heiligensee	V/25
3.2.1 Deckeneigenfrequenz und Dämpfung	V/25
3.2.2 Erschütterungsübertragung ins Gebäude	V/29
3.3 Schaltwarte der GASAG, Berlin-Mariendorf	V/29
3.3.1 Verteilung über die Gebäudehöhe	V/29
3.3.2 Verhältnis Freifeld - Bauwerk	V/30
3.4 BAM Berlin, Haus 88	V/30
3.4.1 Deckeneigenfrequenz, Dämpfung und Deckenresonanz	V/30
3.4.2 Verhältnis Freifeld - Bauwerk	V/34
3.4.3 Vergleich der Ergebnisse bei Impuls- und Schwingeranregung	V/34
3.5 Modellschutzbau Meppen	V/36
3.5.1 Verhältnis Freifeld - Bauwerk und Wellengeschwindigkeit	V/36
3.5.2 Deckeneigenfrequenz und -resonanz	V/38
4. Zusammenfassung der Meßergebnisse	V/41
 Anhang A	
Impulsanregung BAM Berlin, Haus 88	

1. Einleitung

Die Messungen zur Immission, das heißt zur Erschütterungsübertragung vom Boden ins Gebäude dienen zur stichprobenartigen Kontrolle der theoretischen Ergebnisse, die im vorausgegangenen Forschungsvorhaben [1] und in diesem Forschungsvorhaben (s. Berichtsteil IV) gefunden wurden. Es wurden Messungen an sehr verschiedenen Gebäuden von einem eingeschossigen verkleinerten Modellbau bis zum 10-geschossigen Hochhaus durchgeführt. Dementsprechend wurde auch das Meßprogramm jeweils an das Gebäude angepaßt. Dabei wurde insbesondere folgenden Fragen nachgegangen:

- Wie korreliert bzw. unkorreliert werden die einzelnen Fundamente durch den Zugverkehr angeregt?
- Wie ist das Verhältnis zwischen den Gebäudeschwingungen und den Freifeldschwingungen?
- Wie ist die Amplitudenverteilung über die Gebäudehöhe?
- Wie stark werden Deckenresonanzen angeregt?

In diesem Berichtsteil werden zunächst in Abschnitt 2 die Gebäude beschrieben, in denen gemessen wurde. Hinsichtlich der Meßausrüstung und der rechnergestützten Auswertemöglichkeiten wird auf die Abschnitte III.2 und III.3 verwiesen. In Abschnitt 3 werden die Meßergebnisse für die einzelnen Gebäude dargestellt und hinsichtlich der oben aufgeführten Fragestellungen untersucht. Im vierten Abschnitt werden die Einzelergebnisse zusammengefaßt und Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede beleuchtet. Der Vergleich mit Messungen geschieht in Teil VI des Berichtes, in dem auch Konsequenzen für die Prognose gezogen werden.

2. Beschreibung der Gebäude, der Meßpunkte und des Meß-/Versuchsprogramms

Einen Überblick über die durchgeführten Messungen gibt die Tabelle 1.

Bezeichnung und Ort	Stockwerke	Grundfläche	Gründung	Bauart/Zustand	Anregung
Hochhaus TOP-Tegel, Berlin	10	30 m x 24 m	Einzelfundamente Kellergeschoß	Stahlbetonfertigteile Rohbau	U-Bahn
TETRAPAK Berlin-Heiligensee	2	12 m x 12 m	2 Fundamente ebenerdig	Stahlbeton Rohbau	Straßenverkehr
Schaltwarte GASAG, Berlin-Mariendorf	2	20 m x 15 m	Einzelfundamente fast ebenerdig	Stahlbetonrahmen	Unwuchtschwinger
BAM, Berlin, Haus 88	2	24 m x 18 m	Streifenfundamente ebenerdig	alter Mauerwerksbau	ED-Schwinger Impuls
Modellschutzbau, Meppen	1	5 m x 6 m	Streifenfundamente ebenerdig	Stahlbeton massiv	ED-Schwinger Impuls

Tabelle 1: Messungen zur Erschütterungsimmission in Gebäuden

2.1 Hochhaus TOP-Tegel, Berlin

Gebäudebeschreibung:

Es handelt sich um ein 10-geschossiges Gebäude aus Stahlbetonfertigteilen. Die Grundfläche beträgt 30 m x 24 m und ist in ein gleichmäßiges Raster eingeteilt (s. Bild 1). In jeweils 6 m Abstand befinden sich Einzelfundamente (ca. 2 - 3 m Seitenlänge, 2 m Einbindetiefe), auf denen Stützen 0,6 m x 0,6 m stehen. Auf dem Zentralfundament (15,5 m x 11 m) ist der massive Stahlbetonkern (Treppenhaus und Fahrstuhlschacht) errichtet. Die Decken bestehen aus jeweils 2 dreieckigen Stahlbetonfertigteilen (Deckendicke 0,14 m, Unterzüge 0,4 m x 0,4 m). Das Gebäude verjüngt sich ab dem 4. Geschoß bis auf etwa die halbe Grundfläche im 8. bis 10. Geschoß. Es wurde im Rohbau gemessen. Vom geplanten 11. Geschoß waren nur die Stützen vorhanden. Außerdem waren nur vereinzelt Zwischenwände im Keller- und im Erdgeschoß eingezogen.

Lage der Meßpunkte (siehe auch Bild 1):

Tabelle 2: Meßpunkte im Gebäude

Meßpunkt	Stockwerk	Koordinate	Komponente
1	2. OG	C2	V
2	2. OG	B2	V
3	2. OG	B3	V
4	2. OG	C2/B2	V
5	2. OG	C2/B3	V
6	2. OG	C2/B2/B3	V
7	2. OG	C2/B2/B3	H
8	4. OG	B2	V
9	1. OG	B2	V
10	Keller	C2	V
11	Keller	B2	V
12	Keller	B3	V
13	Keller	D4	V
14	Keller	D4	V
15	Keller	B2	H
16	Tunneldecke 6,5 m von A3 entfernt, V		

V = vertikal

H = horizontal, in Ausbreitungsrichtung

Außerdem wurden vor Errichtung des Gebäudes nach Aushub der Baugrube die Freifeldschwingungen des Bodens bei Zugverkehr gemessen. Die Meßpunkte sind ebenfalls in Bild 1 mit der Kennzeichnung F eingezeichnet. An 6 der 7 Freifeldmeßpunkte wurden auch horizontale Schwingungskomponenten gemessen. Der Meßpunkt oberhalb des U-Bahntunnels wurde bei beiden Messungen - Freifeld in der Baugrube und Gebäudemessung - benutzt, um einen Vergleich beider Messungen zu ermöglichen. Ein sinnvoller Freifeldmeßpunkt ließ sich nach Errichtung des Gebäudes leider nicht finden.

Meß-/Versuchsprogramm:

- ca. 20 U-Bahn-Vorbeifahrten zur Freifeldmessung,
- Wellengeschwindigkeitsmessungen in der Baugrube mittels Impulsanregung,
- ca. 15 U-Bahn-Vorbeifahrten zur Gebäudemessung,
- Impulsanregung der Decke B2/B3/C3/C2 zur Bestimmung der Eigenfrequenz.

2.2 TETRAPAK Berlin-Heiligensee

Gebäudebeschreibung:

Es wurde im Rohbau eines 2-geschossigen Bürogebäudes gemessen. Die Grundfläche ist ein unregelmäßiges Achteck (siehe Bild 2), an das sich ein Rechteck als Verbindung zu einem schon bestehenden Gebäude anschließt. Der achteckige Gebäudeteil hat einen einfachen Aufbau, wenn man von der genauen geometrischen Beschreibung absieht: Es gibt zwei deutlich getrennte Wandgruppen, die jeweils auf wiederum getrennten Streifenfundamenten an der Bodenoberfläche gegründet sind (kein Kellergeschoß, kein Fußboden im Erdgeschoß zur Zeit der Messung). Das Obergeschoß besteht nur aus einem Raum.

Lage der Meßpunkte (siehe Bild 2):

4 vertikale Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer

D1, D2 - auf der Decke über EG,

FU - auf fester Bodenschicht direkt am Fundament,

B0 - auf dem Boden in 5 m Abstand vom Gebäude.

Es wurde für D1 der Ort gewählt, an dem sich die Deckeneigenschwingung am leichtesten anregen ließ. Dort müßte auch die maximale Resonanzüberhöhung zu messen sein.

Meß-/Versuchsprogramm:

- Impulsanregung einzelner Decken,
- Verkehrserschütterungen durch einzelne vorbeifahrende LKW's und Busse.

2.3 Schaltwarte der GASAG, Berlin-Mariendorf

Gebäudebeschreibung:

2-geschossiges Gebäude in Stahlbetonskelettbauweise, Grundfläche 20 m x 16 m, Höhe 10 m, 4 x 3 Stützenfundamente 1,2 m unter Geländeoberkante. Das Erdgeschoß beginnt mit der Geländeoberkante, unter dem Erdgeschoßfußboden befinden sich einige Kabelkanäle. In dem Gebäudebereich, in dem gemessen wurde, sind die Deckenspannweiten ca. 5 m, zusätzlich unterbrochen durch Zwischenwände.

Meßpunkte (siehe Bild 3):

11 Meßpunkte im Freifeld vor dem Gebäude

(in einer 2,75 m tiefen Baugrube),

3 Meßpunkte am Gebäude an der dem Schwinger nächstgelegenen Eckstütze in 0, 4,5 und 8,5 m Höhe über Geländeoberkante.

Meß-/Versuchsprogramm:

Anregung des Gebäudes mit Hilfe des Unwuchtschwingers mit Frequenzen zwischen 5 und 70 Hz, Entfernung zum Gebäude 37,5 m.

2.4 BAM Berlin, Haus 88

Gebäudebeschreibung (Bild 4):

2-geschossiger Mauerwerksbau, ehemaliges Krankenhausgebäude jetzt zum Laborgebäude umgebaut. Es werden die Deckenschwingungen in zwei Räumen des Obergeschosses untersucht, die jeweils über einer Versuchshalle liegen. Die Decken sind jeweils an drei Seiten auf den Wänden und an einer Seite auf einem Unterzug aufgelagert.

Lage der Meßpunkte (Bild 4):

- 6 Meßpunkte auf dem Boden,
- 5 Meßpunkte am Fundament, d.h. auf dem Hallenfußboden direkt neben der Wand,

- 6 Meßpunkte auf den Decken über Erdgeschoß, jeweils direkt neben den Wänden, oberhalb der Fundamentmeßpunkte,
- 2 Meßpunkte jeweils in Deckenmitte.

Meß-/Versuchsprogramm:

- Impulsanregung der Decken zur Bestimmung der Eigenfrequenz und Dämpfung,
- Anregung des Gebäudes mit Hilfe des elektrodynamischen Schwingers mit Frequenzen zwischen 5 und 200 Hz, feine Frequenzunterteilung zwischen 5 und 15 Hz, dem Eigenfrequenzbereich der Decken, Entfernung zum Gebäude 6,5 m,
- Anregung des Gebäudes durch einen Impuls, der am Standort des Schwingers mit einem Fallgewicht von 50 kg (Fallhöhe 1 m) in den Boden eingeleitet wird.

2.5 Modellschutzbau Meppen

Gebäudebeschreibung:

Es handelt sich um ein einräumiges, eingeschossiges, an der Bodenoberfläche gegründetes Stahlbetonbauwerk mit folgenden Abmessungen:

Länge (außen) 5,85 m,

Breite (außen) 5,15 m

Höhe (einschließlich Fundament) 2,50 m,

Fundamentbreite 0,50 m,

Fundamenttiefe 0,325 m,

Wand- und Deckenstärke 0,325 m,

Dicke der Grundplatte 0,15 m.

Das Bauwerk ist völlig regelmäßig bis auf den Eingang und eine durch eine Sprengung beschädigte Wand.

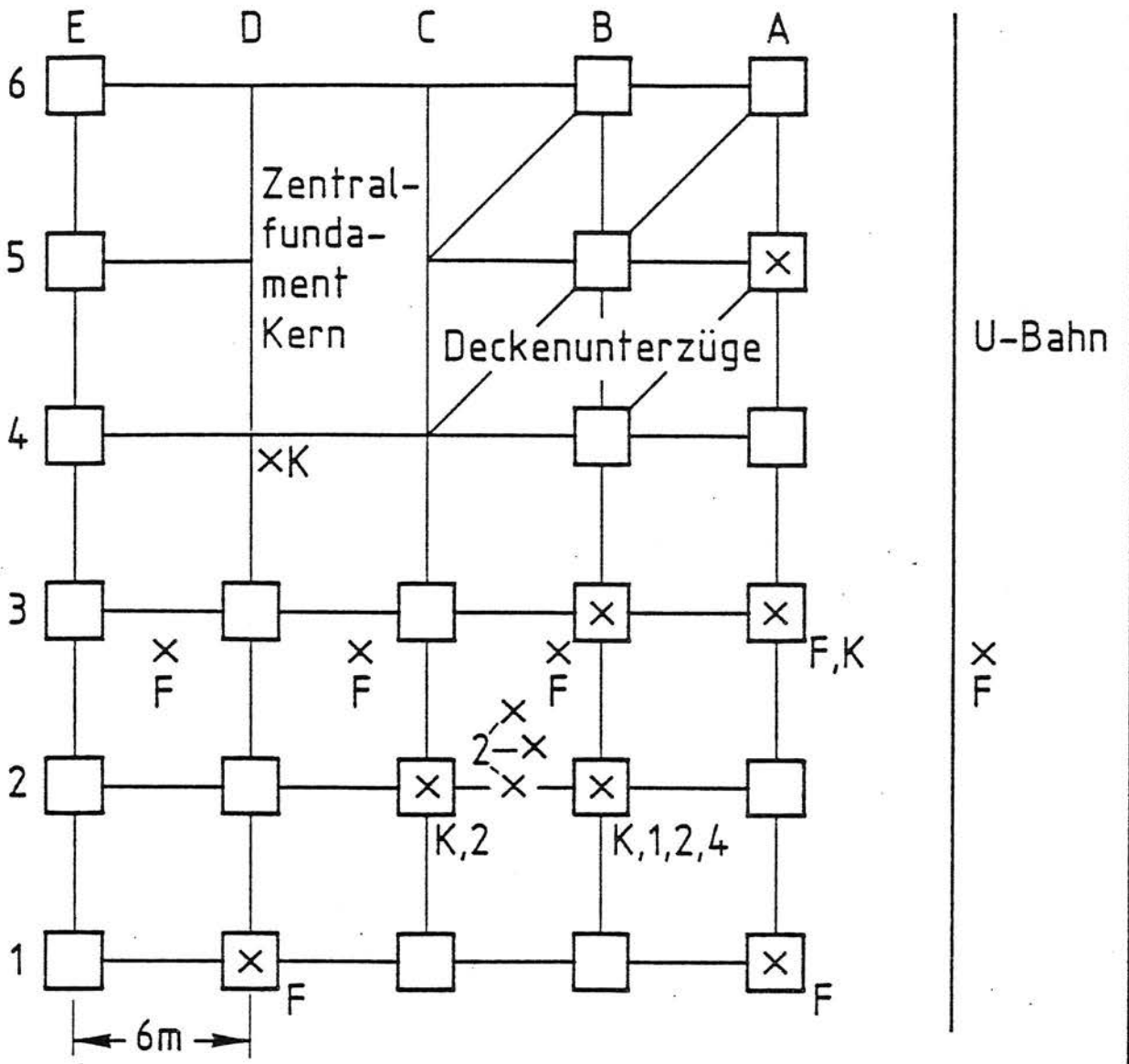
Lage der Meßpunkte (Bild 5):

- 7 Meßpunkte auf dem Boden,
- 3 Meßpunkte am Fundament, d.h. auf der Grundplatte direkt neben der Wand,
- 2 Meßpunkte auf der Decke (Deckenmitte und Deckenaufleger vorn),
- bei der Messung der Deckenresonanz zusätzlich 6 Meßpunkte am Deckenrand.

Meß-/Versuchsprogramm:

- Ermittlung der Wellengeschwindigkeit des Bodens,
- Anregung des Gebäudes mit Hilfe des elektrodynamischen Schwingers mit Frequenzen zwischen 5 und 400 Hz, Entfernung zum Gebäude 15 m,

- Anregung des Gebäudes durch einen Impuls, der am Standort des Schwingers mit einem Fallgewicht von 50 kg (Fallhöhe 1 m) in den Boden eingeleitet wird,
- Impulsanregung der Decke zur Ermittlung der Eigenfrequenz,
- Ermittlung der Deckeneigenfrequenz bei Anregung durch den Schwinger mit Frequenzen zwischen 55 und 65 Hz, Auflösung 1 Hz,
- Ermittlung der Eigenschwingform der Decke, d.h. Anregung mit der Eigenfrequenz 60 Hz und Abtasten einer Vielzahl von Deckenpunkten mit einem Meßaufnehmer.

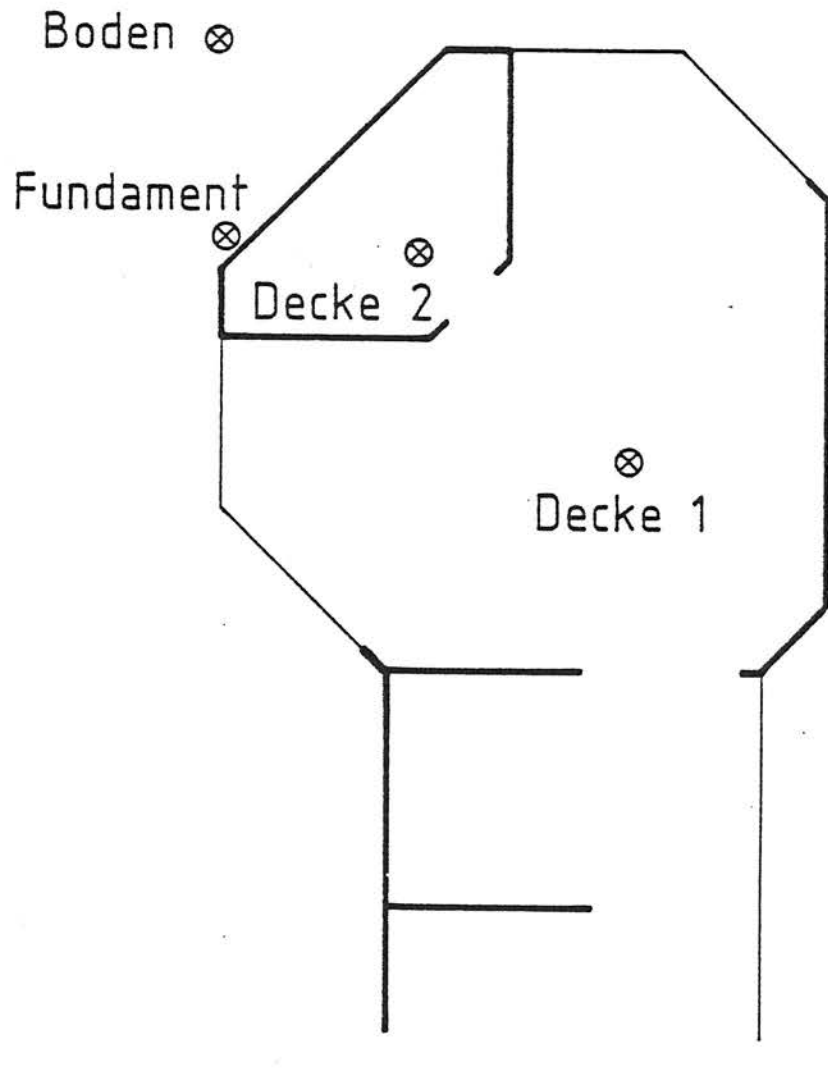


Meßpunkte: F-im Freifeld 1-im 1.Obergeschoß
K-im Keller 2-im 2.Obergeschoß

Bild 1 - Hochhaus TOP-Tegel, Berlin:
Grundriß und Lage der Meßpunkte

Hennigsdorfer Strasse

Werksstrasse



- Grundriß
- == Wand
- ⊗ Meßpunkt

Bild 2 - TETRPAK, Berlin-Heiligensee:
Grundriß und Lage der Meßpunkte

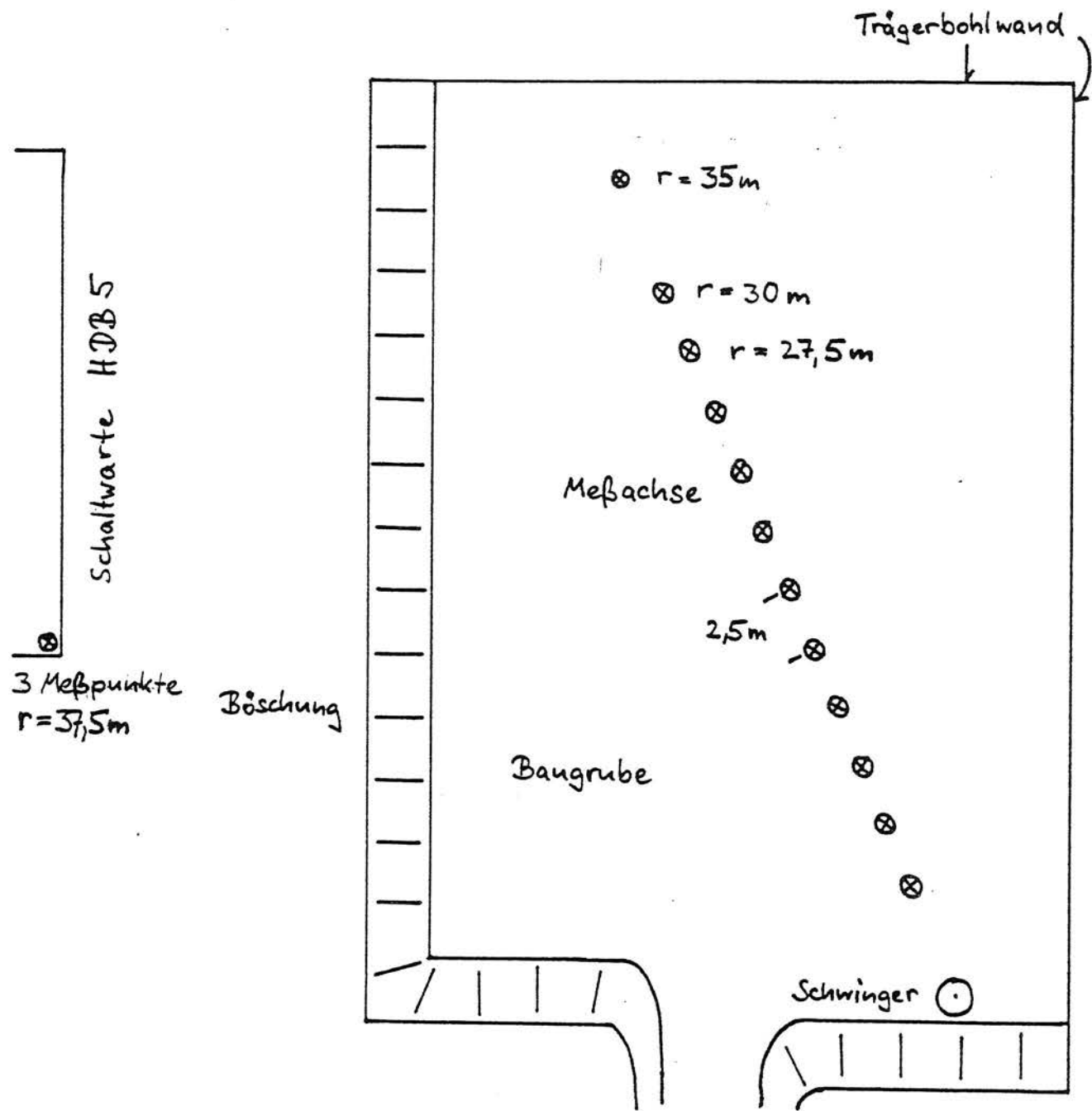


Bild 3 - Schaltwarte der GASAG, Berlin-Mariendorf:
Versuchsaufbau und Lage der Meßpunkte

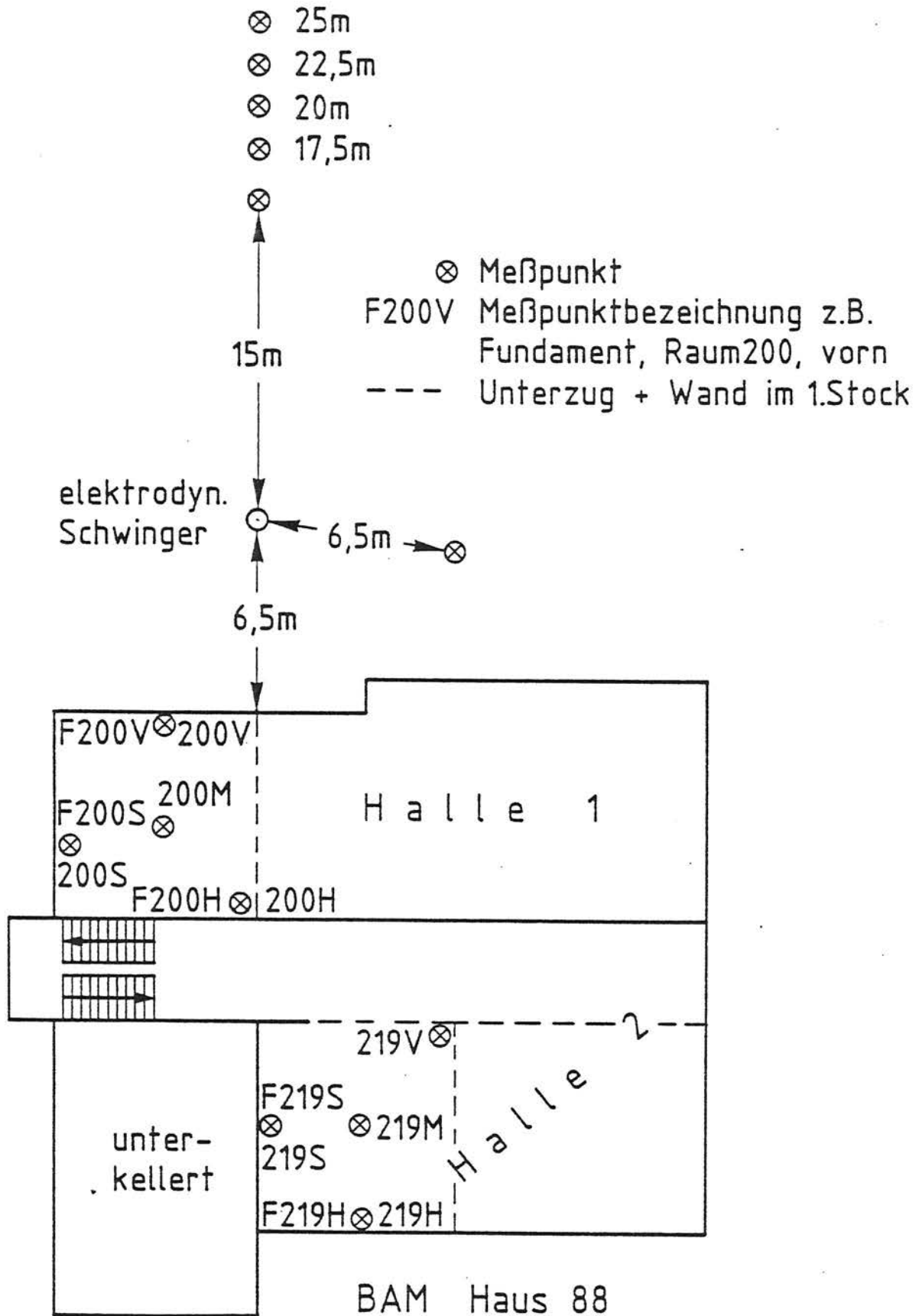


Bild 4 - BAM Berlin, Haus 88:
Grundriß und Lage der Meßpunkte

3. Darstellung der einzelnen Meßergebnisse

3.1 Hochhaus TOP-Tegel, Berlin

3.1.1 Messungen in der Baugrube:

Freifeld und Wellengeschwindigkeit

Zur Charakterisierung der Freifeldbodenschwingungen werden die vertikalen Schwinggeschwindigkeiten herangezogen. Ein Beispiel eines Zeitverlaufs ist in Bild 6 dargestellt. Die Maximalamplituden liegen je nach Meßpunkt zwischen 0,15 und 0,45 mm/s. Bild 7 zeigt die Frequenzspektren eines Meßpunktes bei verschiedenen Vorbeifahrten. Wegen des Zufallscharakters der Zugerregung sind die einzelnen Spektren recht unterschiedlich. Um die wesentlichen Merkmale der Zugerregung zu erhalten, wurden jeweils 8 Vorbeifahrten in jeder Fahrtrichtung gemittelt (Bild 8 und 9). Es gibt zwei dominierende Anregungsfrequenzbereiche, einen zwischen 10 und 25 Hz und einen zwischen 70 und 90 Hz.

Mit Hilfe der Impulserregung wurde eine Scherwellengeschwindigkeit des Bodens von

$$v_s = 115 \text{ m/s} \quad (105-128 \text{ m/s})$$

ermittelt.

3.1.2 Messungen im Rohbau: Anregung der Fundamente,

Verteilung über die Gebäudehöhe und Deckenresonanz

3.1.2.1 Anregung der Fundamente

Die Meßpunkte an den Fundamenten sind so gewählt, daß mit ihnen geprüft werden kann, ob die Anregung einem ebenen Wellenfeld entspricht. Vom U-Bahntunnel aus gesehen, sind 2 x 2 Meßpunkte an hintereinanderliegenden Fundamenten (A3-B3 und B2-C2), und 2 Meßpunkte sind auf nebeneinanderliegenden Fundamenten (B3 und B2) angeordnet. Bei einem ebenen Wellenfeld müßten an den nebeneinanderliegenden Fundamenten ähnliche Schwingungen gemessen werden, bei den hintereinanderliegenden Fundamenten müßten die Schwingungen zeitlich um die Laufzeit der Welle versetzt auftreten.

Bild 6 - TOP-Tegel, Freifeldschwingungen:
Zeitverlauf und Frequenzspektrum des
Meßpunktes neben Fundament B3

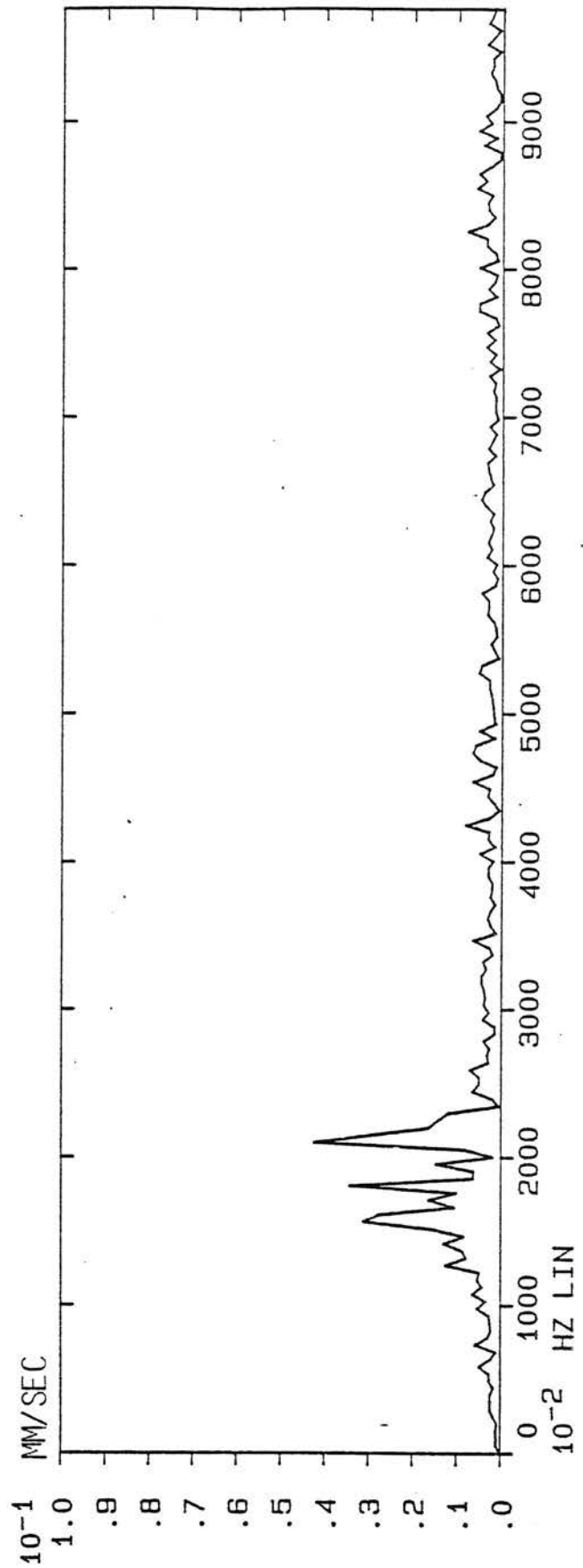
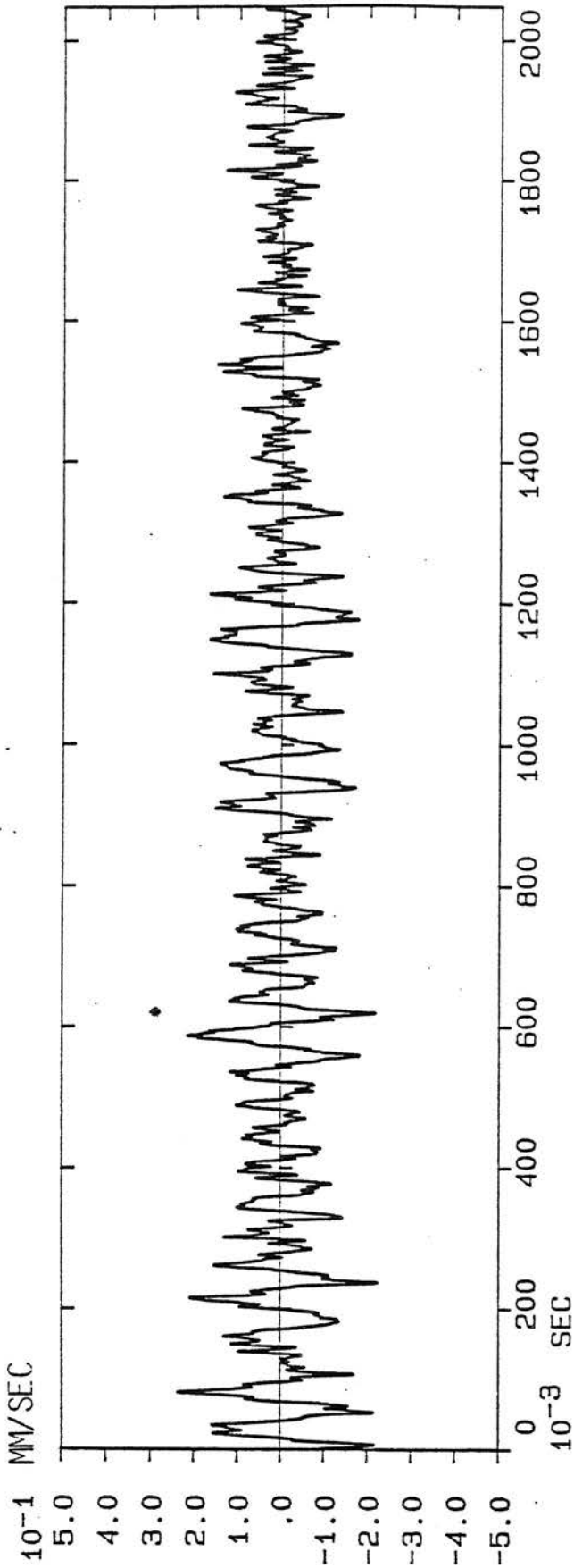
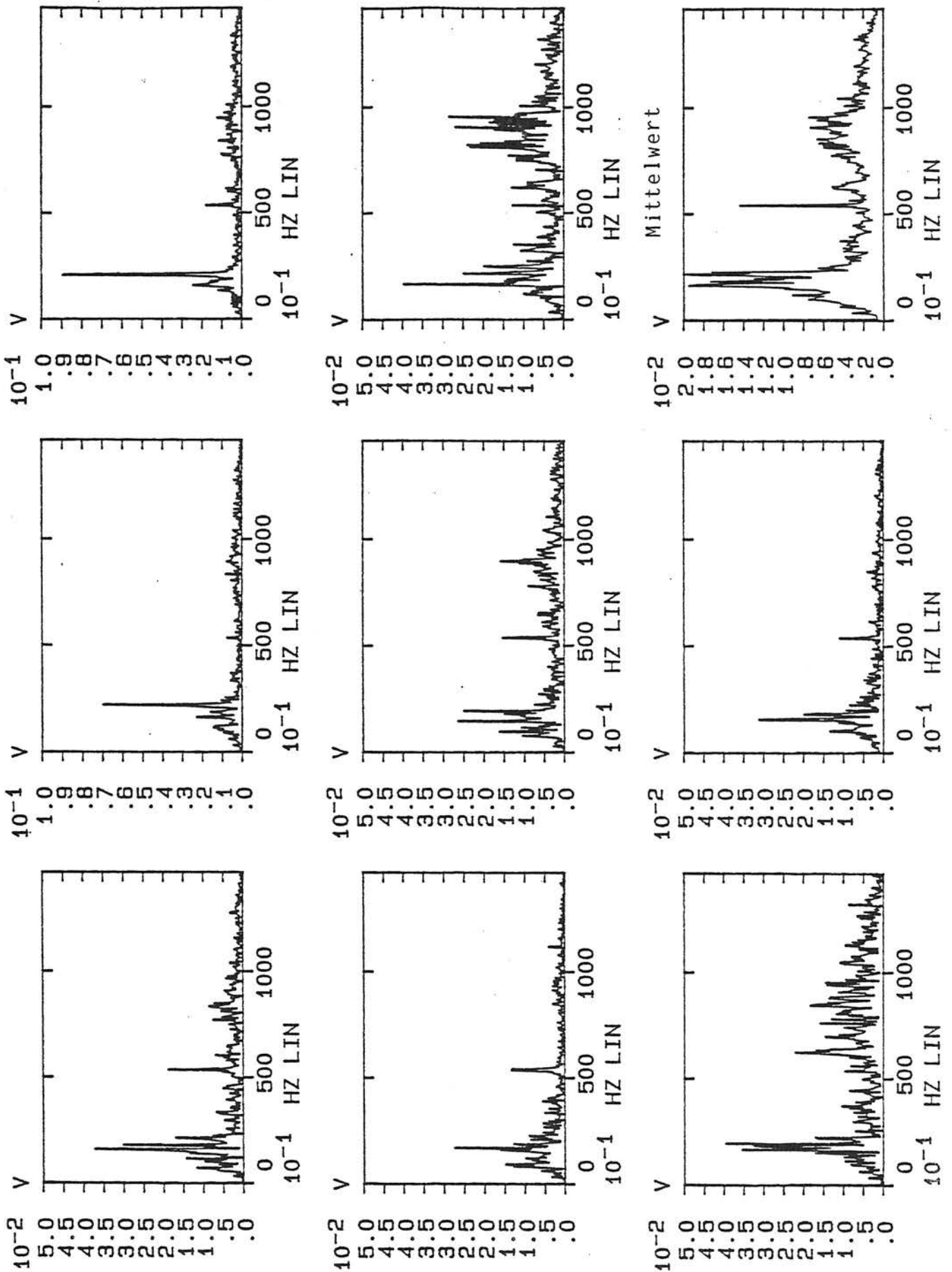


Bild 7 - Frequenzspektren bei 8 Vorbeifahrten und das daraus gemittelte Spektrum (unten rechts), Meßpunkt D1



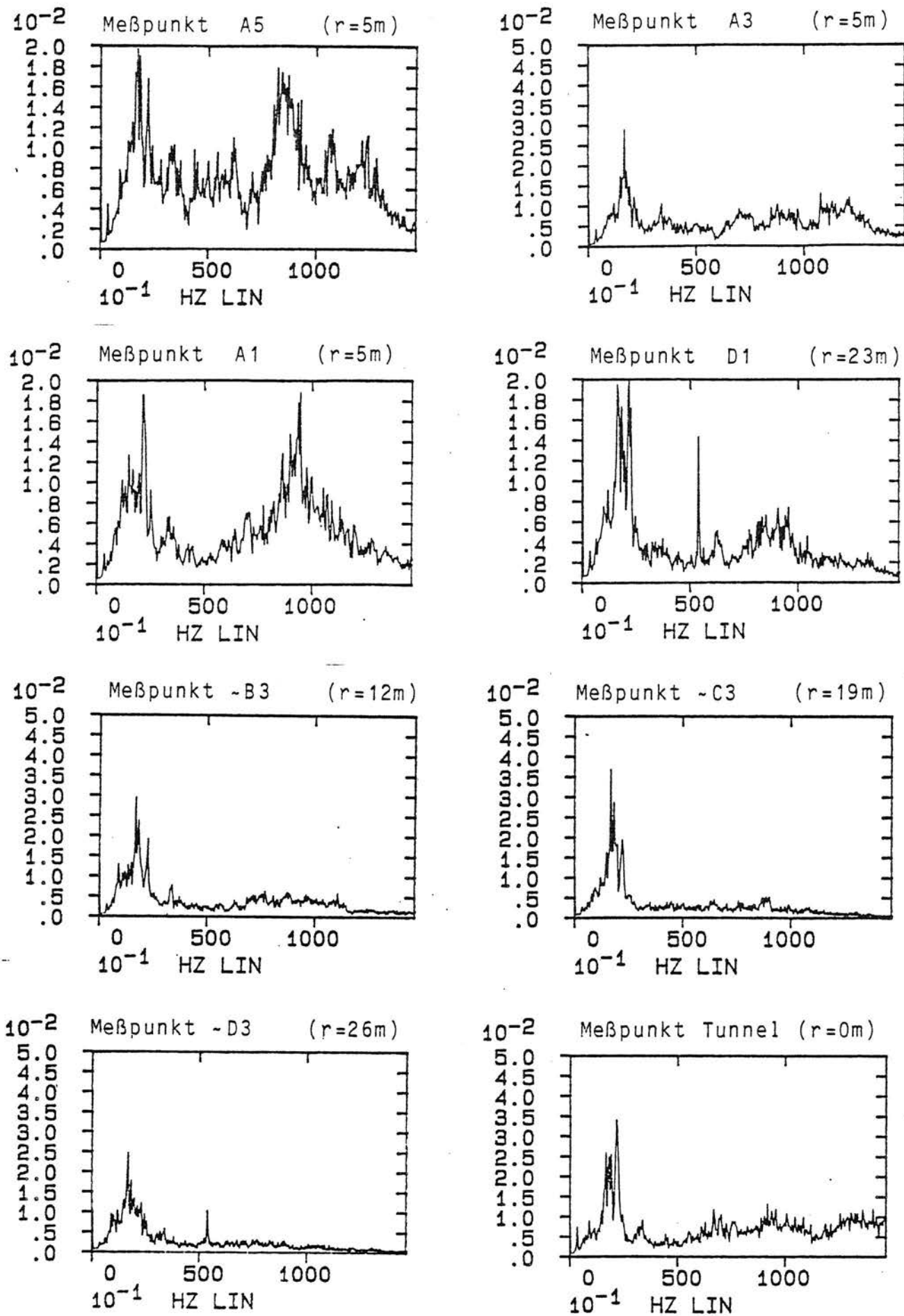


Bild 8 - Gemittelte Spektren der Freifeldmeßpunkte
(8 Vorbeifahrten Richtung Tegel)

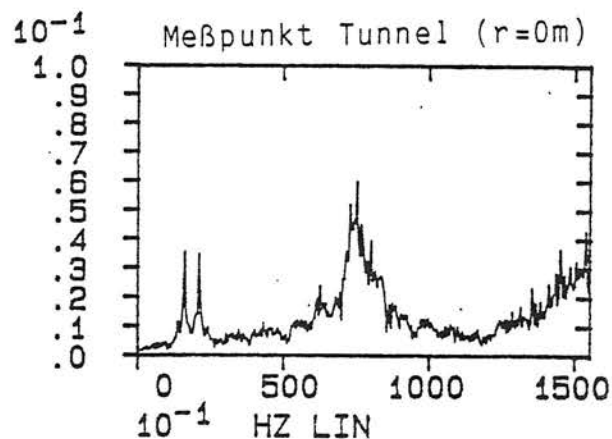
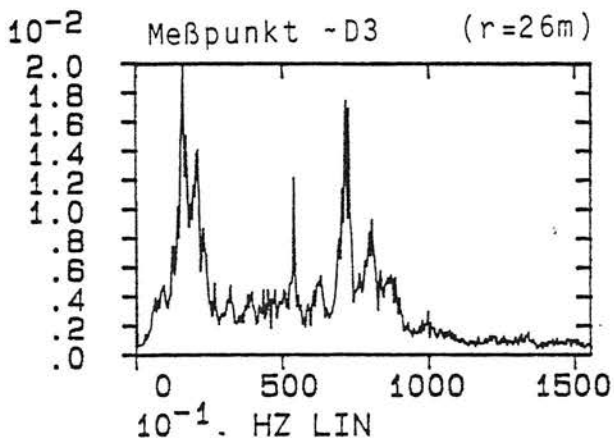
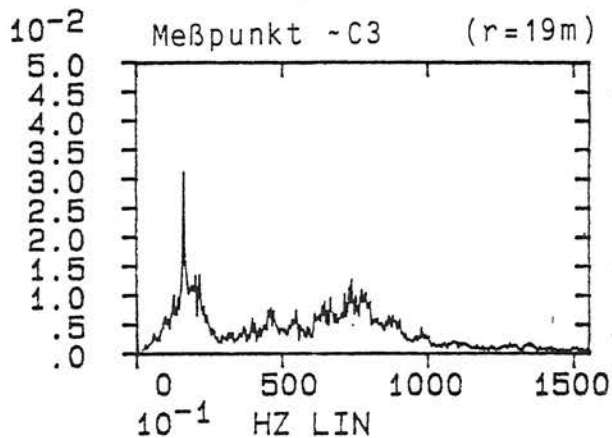
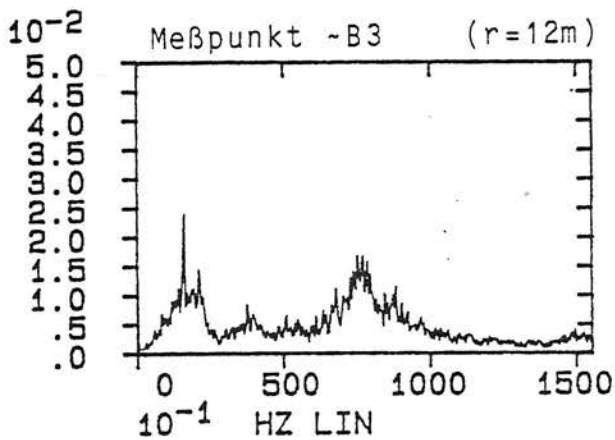
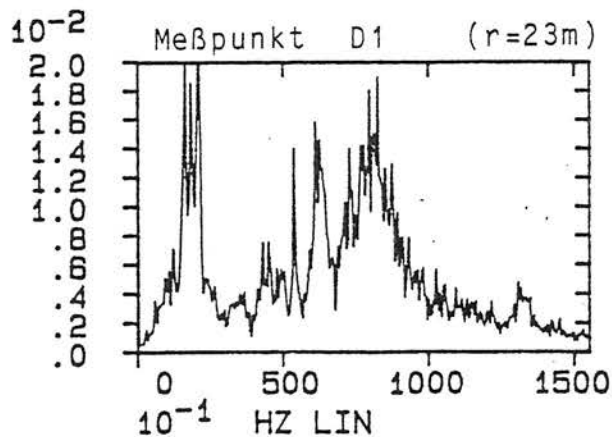
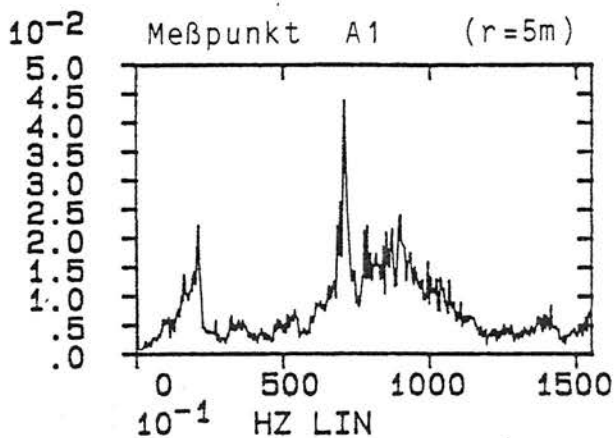
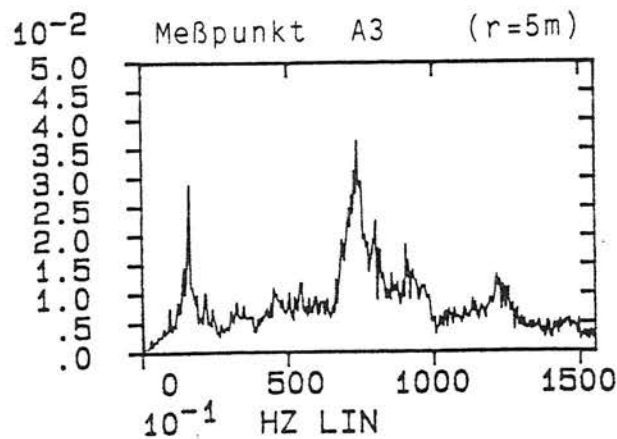
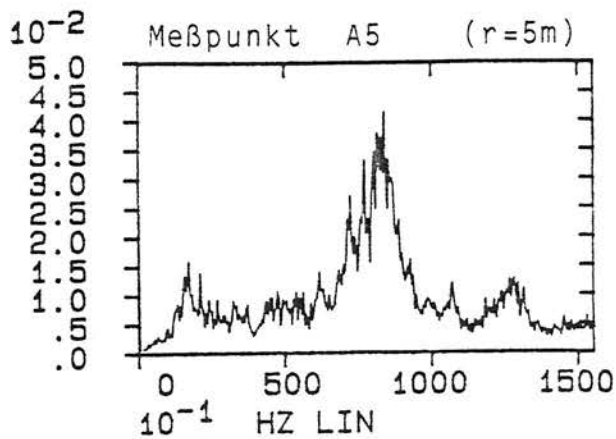


Bild 9 - Gemittelte Spektren der Freifeldmeßpunkte
(8 Vorbeifahrten Richtung Mariendorf)

Um dies zu kontrollieren, wurden die Zeitverläufe der vier Fundamentpunkte zum direkten Vergleich übereinander geplottet und jeweils die Korrelationsfunktionen berechnet. Für 2 Messungen ist dies in Bild 10 dargestellt. Teilweise ist die Ähnlichkeit der Signale schon in den Zeitverläufen zu erkennen. Aus den Maxima der Korrelationsfunktionen lassen sich Laufzeiten ablesen. Die nebeneinanderliegenden Fundamentmeßpunkte ergeben ein eindeutiges Maximum mit einer Verzögerungszeit annähernd gleich null. Die Maxima für die jeweils hintereinanderliegenden Fundamente sind nicht so deutlich. Aus der Lage der Maxima erhält man die Laufzeit und mit dem Fundamentabstand von 6 m auch die Geschwindigkeit der Wellen:

von A3 nach B3 $v \approx 250$ m/s,

von B2 nach C2 $v \approx 300$ m/s.

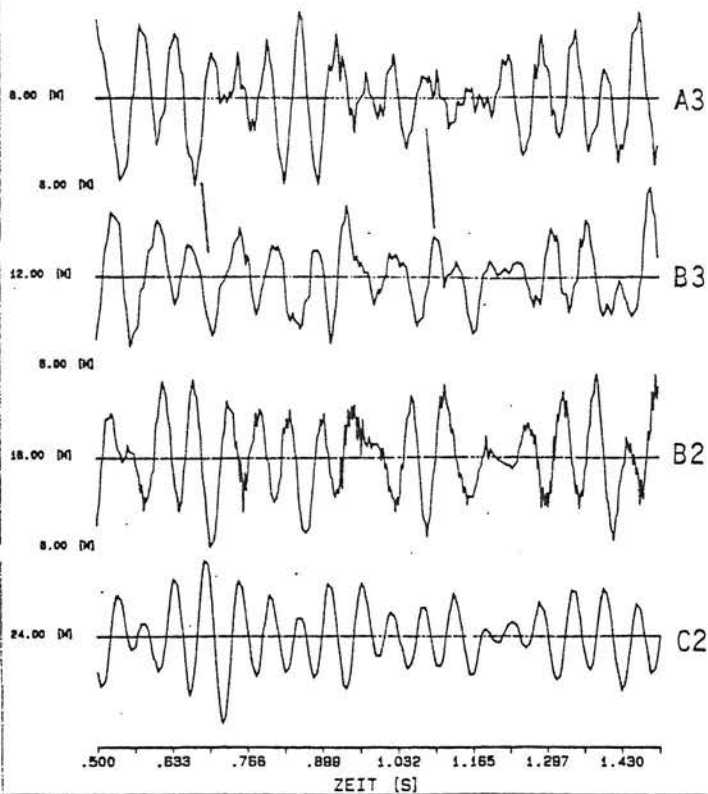
Diese Wellengeschwindigkeiten sind mehr als doppelt so groß wie die in der Baugrube gemessene Rayleighwellengeschwindigkeit des Bodens. Der Unterschied ließe sich von der Tendenz her mit der Versteifung des Bodens durch die statische Last des Gebäudes erklären.

Faßt man die entsprechenden Auswertungen mehrerer Messungen zusammen, so ergibt sich, daß die nebeneinanderliegenden Fundamente gut korreliert sind (ähnlich und gleichzeitig schwingen), während sich bei den hintereinanderliegenden Fundamenten Laufzeiten von Wellen im Baugrund kaum bestätigen lassen.

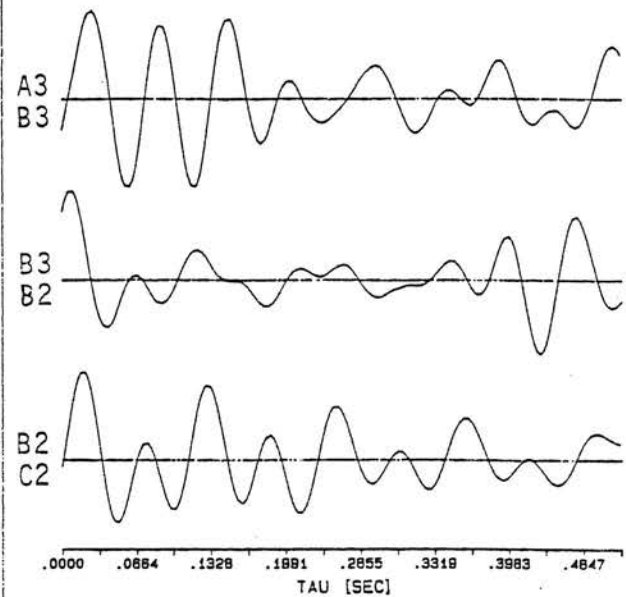
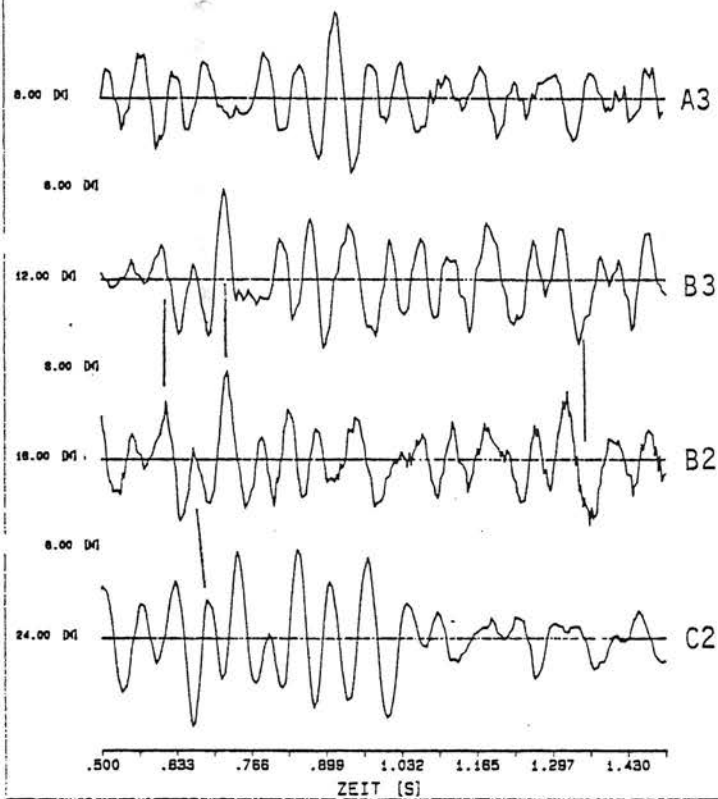
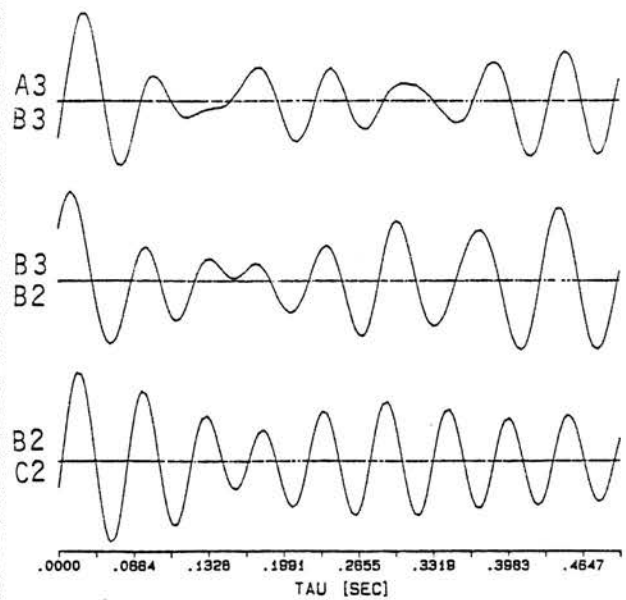
3.1.2.2 Verteilung über die Gebäudehöhe

An der Stütze B2 ist in vier verschiedenen Stockwerken gemessen worden. Bild 11 zeigt dazu als Beispiel die Zeitverläufe und Spektren einer Messung. Man erkennt zunächst die große Ähnlichkeit der Schwingungen in den einzelnen Stockwerken. Aus der Korrelationsanalyse ergibt sich die Geschwindigkeit von Longitudinalwellen im Beton von ungefähr 3500 m/s. Das bedeutet, daß die Stütze an allen gemessenen Punkten nahezu gleich und nur geringfügig nach oben hin verzögert schwingt. Am höchsten Meßpunkt sind die tieffrequenten Anteile etwas stärker.

Zeitverlauf



Korrelationsfunktion



C2
 B2 B3
 A3

TUNNEL

B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BAUGRUNDTECHNIK
 ERSCUTTERUNGSSCHUTZ

GEBAEUEMESSUNGEN, TEGEL,

Bild 10 - TOP-Tegel, Anregung der Fundamente:
 Zeitverläufe und Korrelationsfunktionen
 von benachbarten Fundamenten (zwei Messungen)

Die Unterschiede gehen auch aus den gemittelten Spektren (Bild 12) hervor. Es wurden die Spektren von 6 Vorbeifahrten gemittelt, außerdem wurden die Werte von benachbarten Frequenzen zur besseren Übersichtlichkeit zusammengefaßt. Im unteren Teil des Bildes sind die Spektren auf das Spektrum des Fundamentmeßpunktes bezogen. Man erkennt, daß die tiefen Frequenzen um 9 Hz in den oberen Stockwerken gegenüber dem Fundament verstärkt werden.

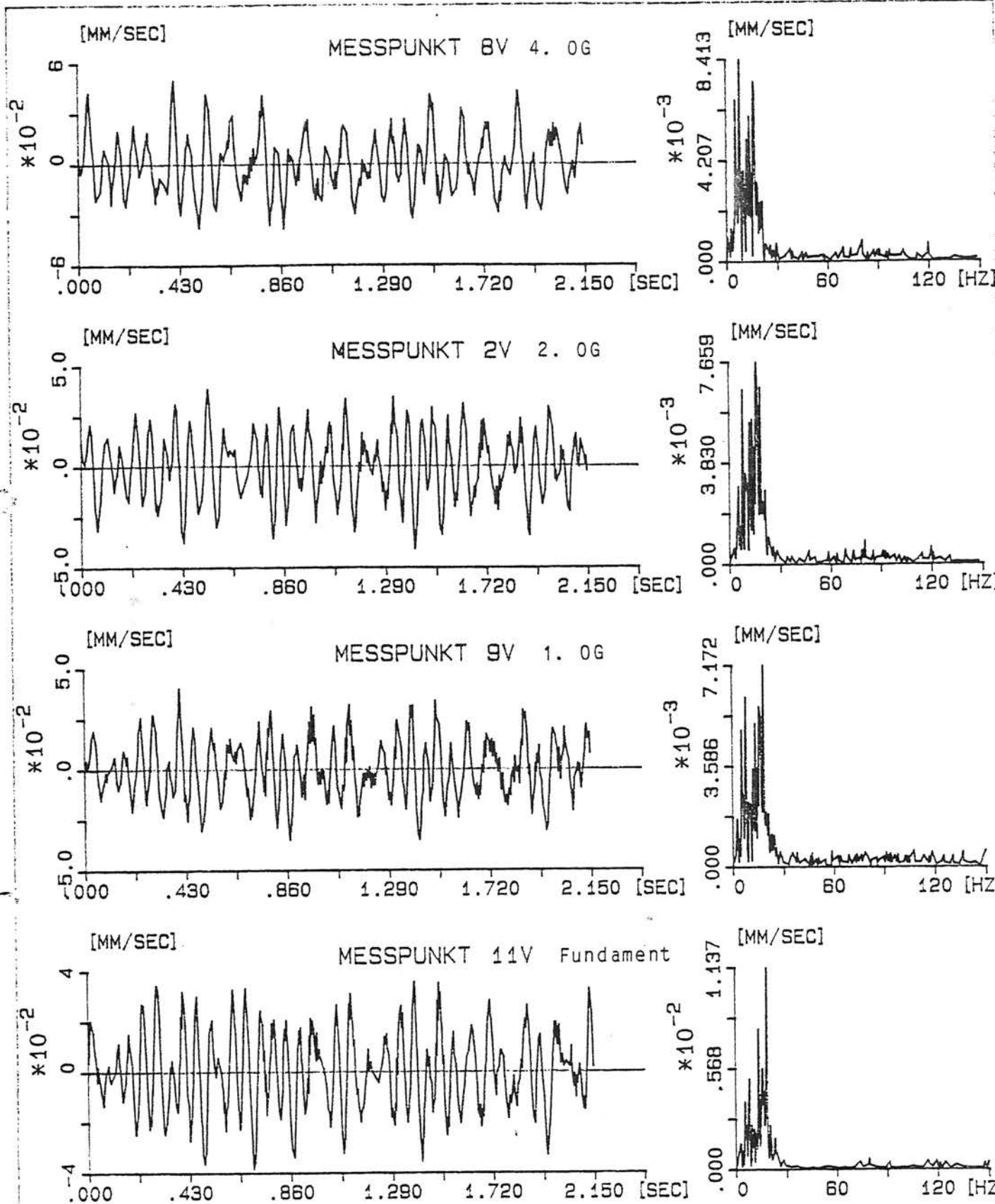
3.1.2.3 Deckenresonanz

Auf dem Deckenfeld C2-B2-B3 im 2. Obergeschoß sind mehrere Meßpunkte zur Beobachtung der Deckenresonanz angeordnet. Bild 13 zeigt Zeitverlauf und Spektrum der Deckenmitte bei einer Zugvorbeifahrt. Im Vergleich zur Stütze (Bild 11) hat man hier eine deutlich herausragende Frequenz bei etwa 20 Hz. Bild 15 zeigt die gemittelten Spektren von 6 Messungen, oben absolut, unten auf das Spektrum einer Stütze bezogen. Dabei ergibt sich eine Resonanzüberhöhung der Deckenmitte auf das knapp 8-fache des Deckenauflegers bei 20 Hz.

Die Eigenfrequenz der Decke wurde mittels Impulsanregung (Bild 14) gemessen. Eine genaue Eigenfrequenz läßt sich aus dem Spektrum nicht angeben, da es einen Größtwertbereich zwischen 19 und 22 Hz mit 3 Einzelspitzen gibt. Die größte Spitze liegt bei 19 Hz. Die Nachbarfrequenzen ergeben zusammen Schwebungen, wie im Zeitverlauf ersichtlich, so daß sich auch kein Dämpfungsmaß angeben läßt.

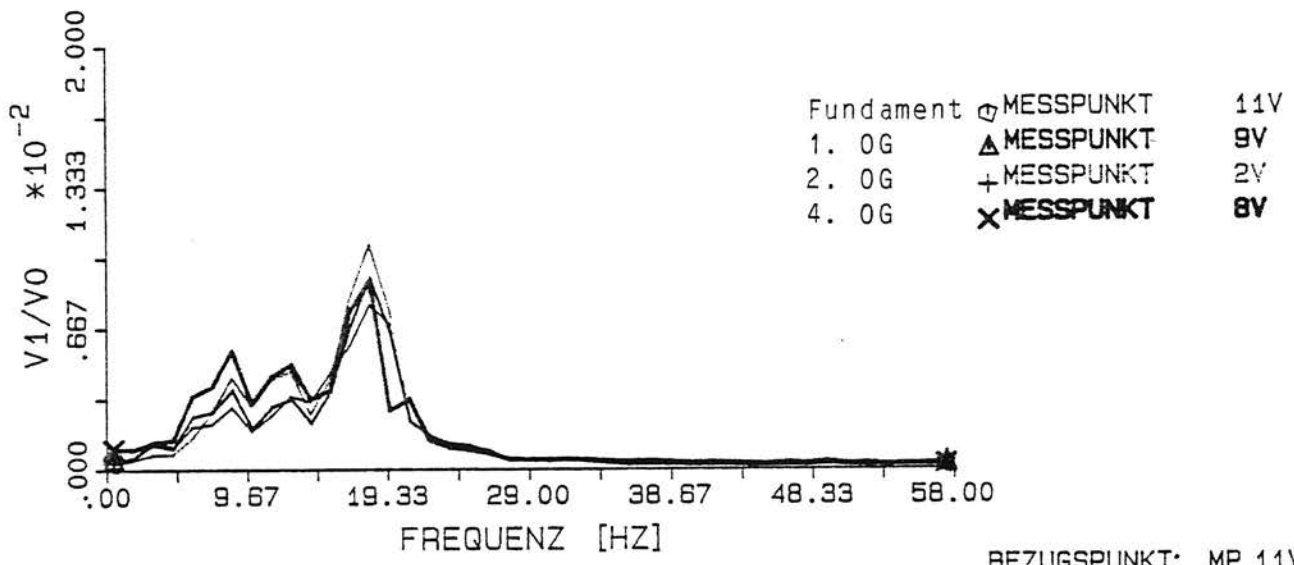
3.1.3 Verhältnis Freifeld - Bauwerk

Die Messung der Freifeldschwingungen an den Fundamentpunkten vor Errichtung des Gebäudes hat den Vorteil, daß auf jeden Fall tatsächlich die Freifeldschwingungen gemessen werden, die als Anregung des Gebäudes wirken. Es wird am richtigen Ort und ohne Beeinflussung durch das Gebäude gemessen. Auf der anderen Seite steht der Nachteil, daß bei den späteren Messungen im Gebäude die Anregung durch die Züge anders als während der Freifeldmessungen sein kann. Um dies zu kontrollieren, wurde bei beiden Messungen ein Meßpunkt über der Tunneldecke gewählt. Der Vergleich der Schwingungen an diesem Punkt weist darauf hin, daß bei den Gebäudemessungen die Zuanregung eher kleiner (eventuell sogar nur halb so groß) als bei den Freifeldmessungen war.



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BAUGRUNDYNAMIK
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

Bild 11 - TOP-Tegel, Verteilung über die Gebäudehöhe
Zeitverläufe und Spektren der Meßpunkte
an Stütze B2



BEZUGSPUNKT: MP 11V

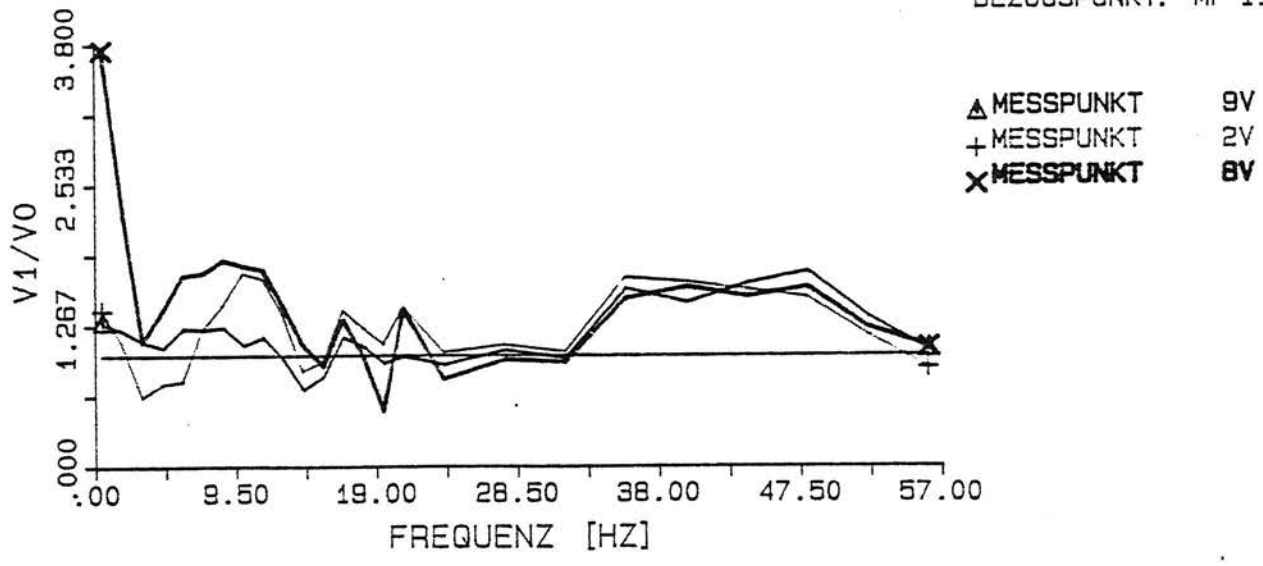


Bild 12 - Aus 6 Vorbeifahrten gemittelte Spektren der Meßpunkte an Stütze B2 (oben), Verhältnswerte gegenüber dem Fundament B2 (unten)

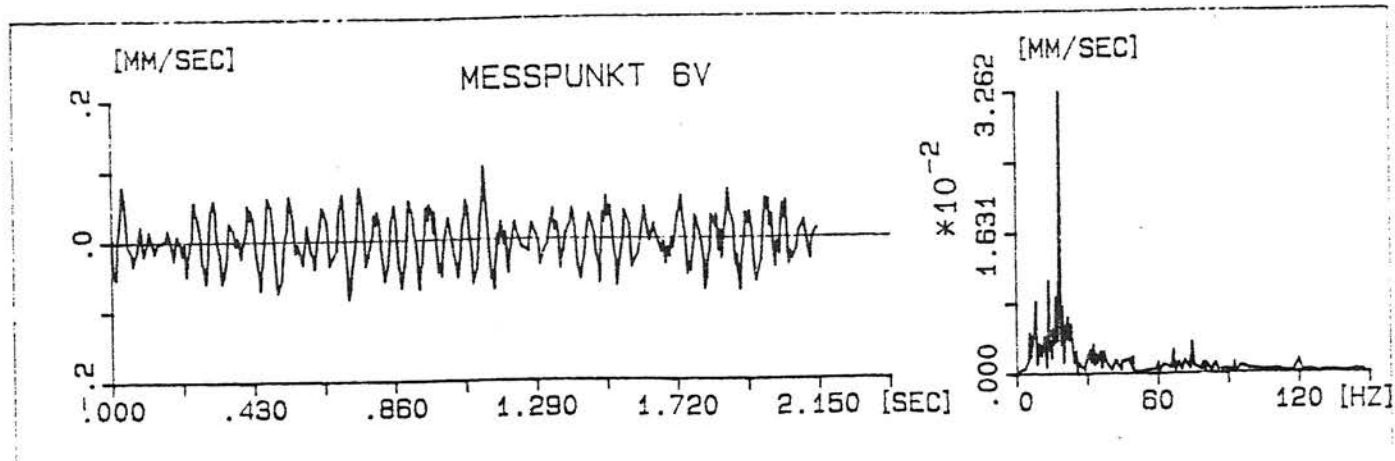


Bild 13 - TOP-Tegel, Deckenresonanz:
Zeitverlauf und Spektrum der Deckenfeldmitte

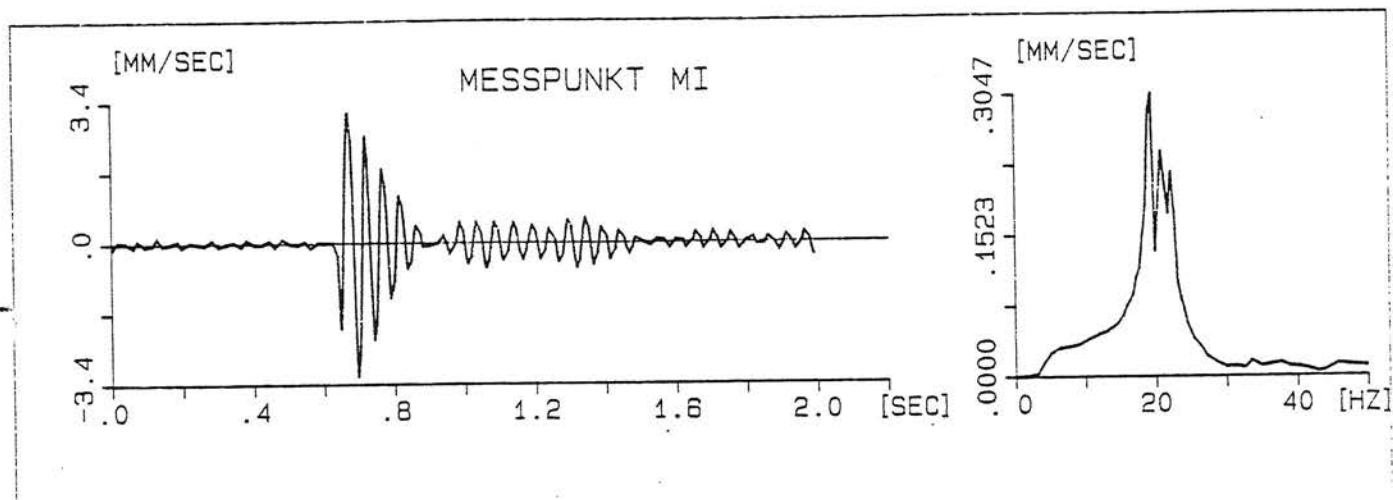


Bild 14 - Zeitverlauf und Spektrum der Deckenfeldmitte
bei Impulsanregung der Decke

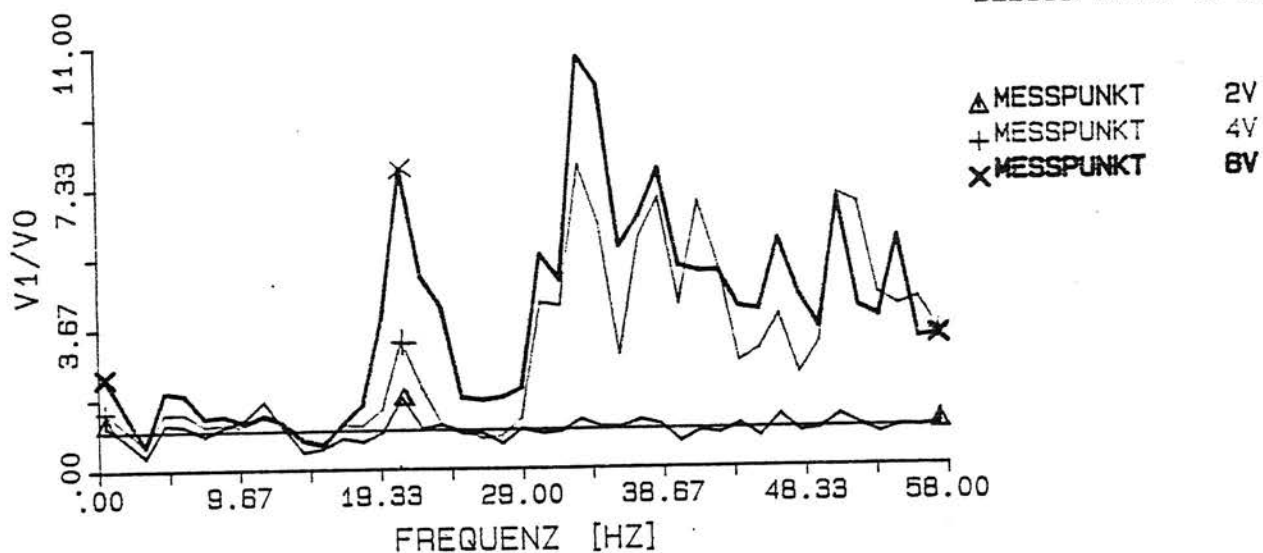
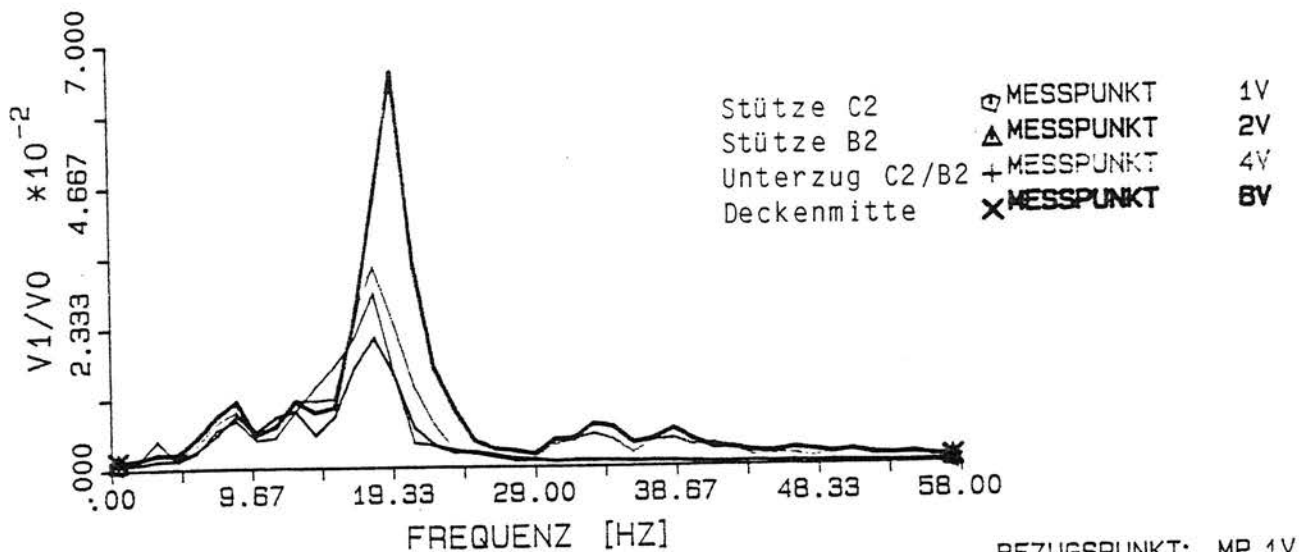


Bild 15 - Aus 6 Vorbeifahrten gemittelte Spektren
der Deckenmeßpunkte im 2. Obergeschoß (oben),
Verhältnisswerte gegenüber dem Deckenaufleger (unten)

B A M BERLIN
LABOR 2.32
BAUGRUNDYNAMIK
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Es lassen sich folgende Verhältniswerte Gebäudeschwingung zu Freifeldschwingung ermitteln:

Amplituden im Zeitverlauf

Freifeld (B2)	0,2 - 0,25 mm/s	≈ 1	,
Stütze B2	0,03 - 0,05 mm/s	≈ 0,18,	
Deckenmitte	0,08 - 0,1 mm/s	≈ 0,4.	

Aus den gemittelten Spektren (Bild 8 und Bild 12) werden Amplituden wesentlicher Anregungsfrequenzbereiche herangezogen

	10 Hz	20 Hz	70-90 Hz	
Freifeld (B2)	1,0	2,0	0,4	• 10 ⁻² mm/s
Stütze B2	0,4	1,0	0,05	• 10 ⁻² mm/s
Verhältnis	0,4	0,5	0,12	

3.2 TETRAPAK Berlin-Heiligensee

3.2.1 Deckeneigenfrequenz und Dämpfung

Die Schwingantwort des Gebäudes bei Impulsanregung der Decke zeigt Bild 16. Der unmittelbar neben der Anregungsstelle liegende Meßpunkt D1 zeigt eine gleichmäßige Abklingkurve, aus der sich Eigenfrequenz und Dämpfung eindeutig bestimmen lassen:

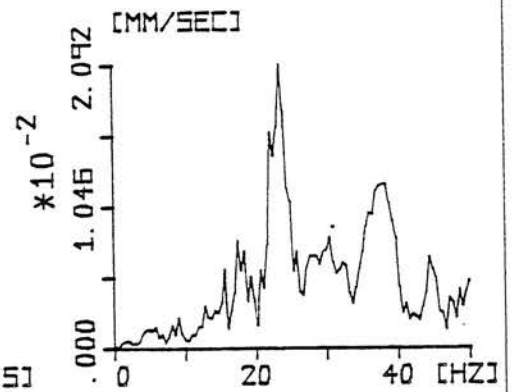
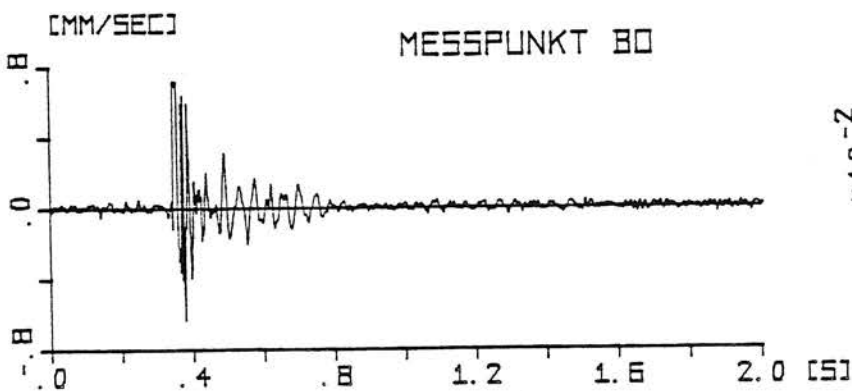
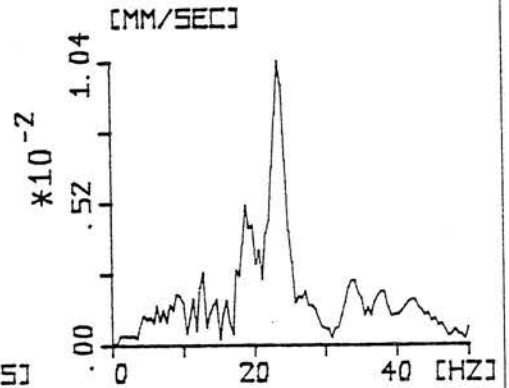
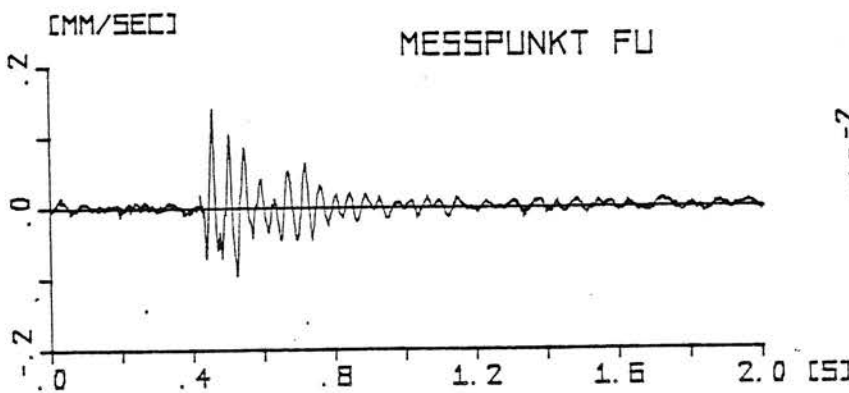
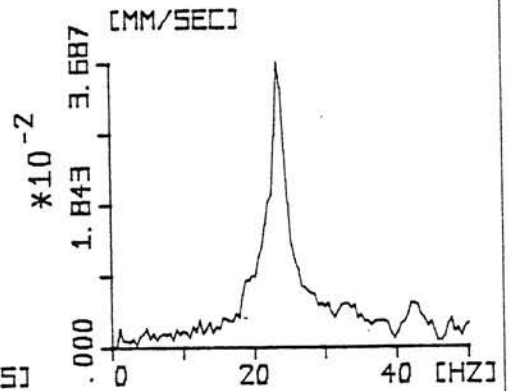
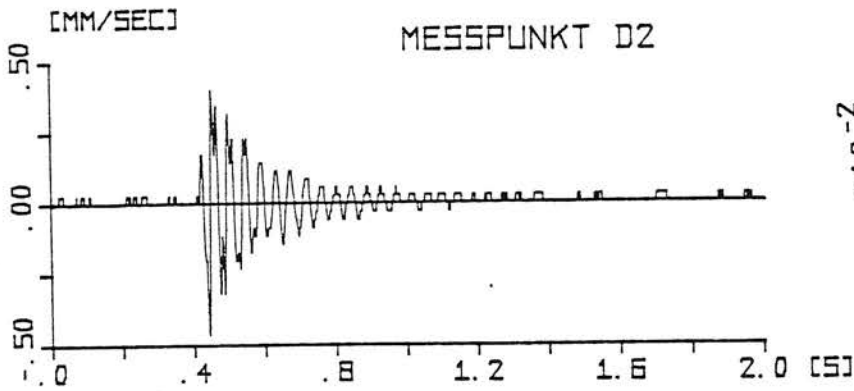
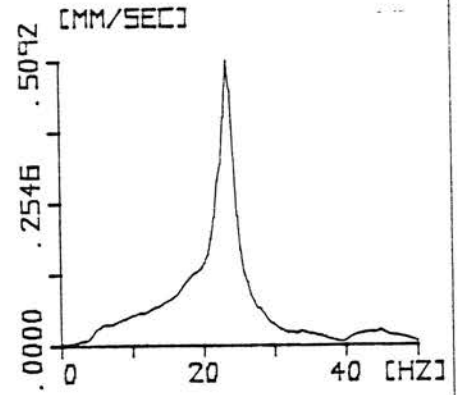
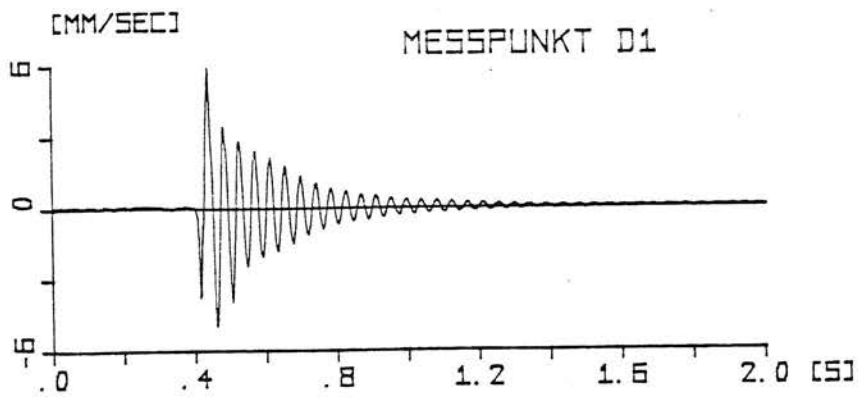
Deckeneigenfrequenz - 23 Hz (aus dem Spektrum),

Dämpfung - 3,2 % (aus der Abnahme der Schwingungen Bild 16 oben

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{n} \ln\left(\frac{x_i}{x_{i+n}}\right) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{7} \ln \frac{2}{0,5} = 3,2 \%$$

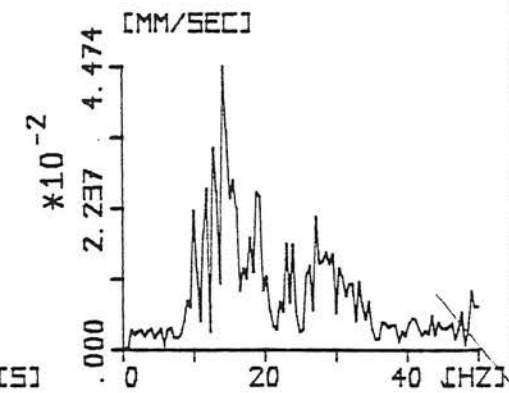
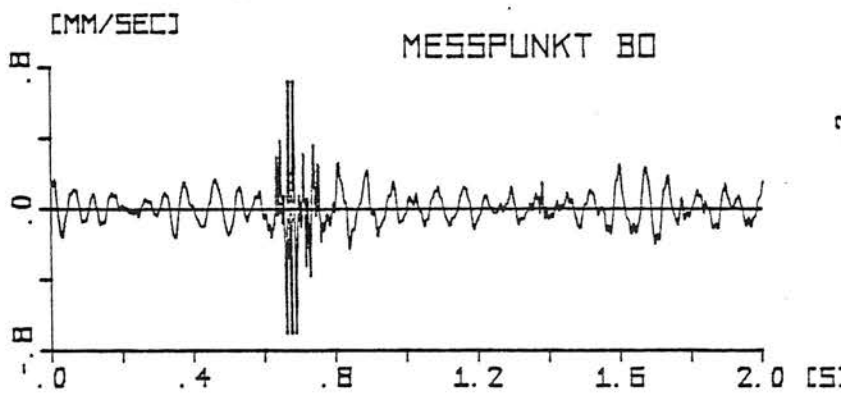
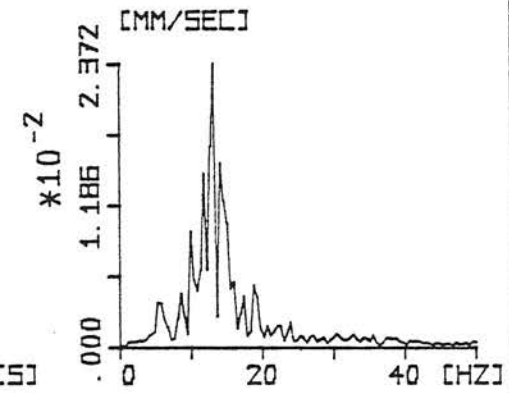
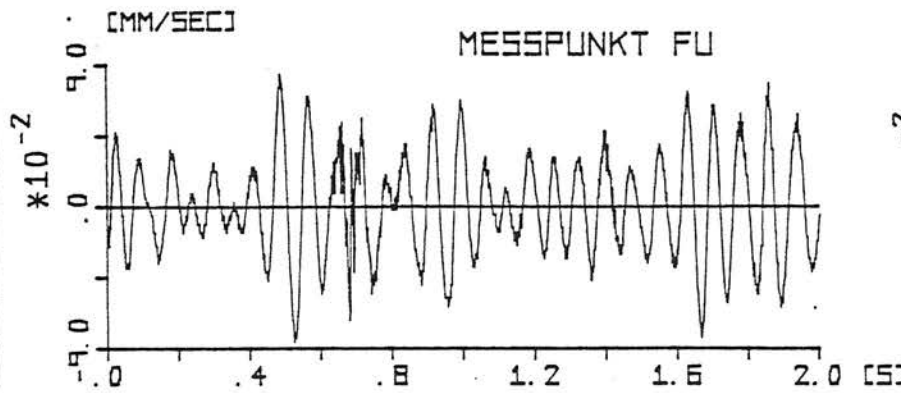
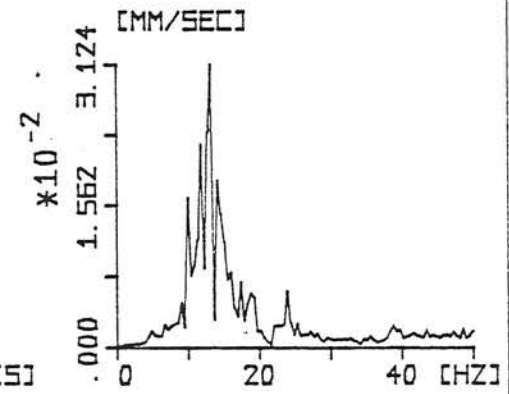
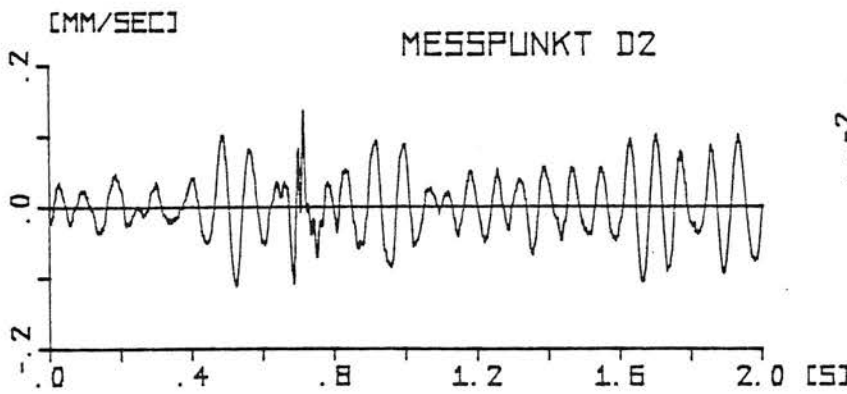
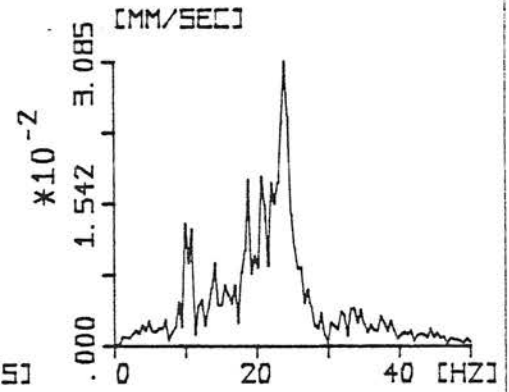
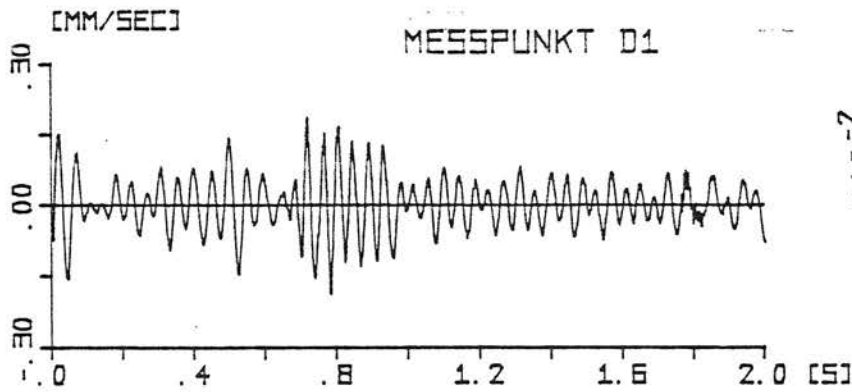
Die Dämpfung stellt nicht die Materialdämpfung des Betons dar. Vielmehr ist die Dämpfung, wie die Berechnungen in Berichtsteil IV zeigten, im wesentlichen eine Folge der Abstrahlung in den Baugrund.

Bei entsprechender Anregung der Decke 2 ergab sich eine Eigenfrequenz von 68 Hz. Bemerkenswert ist außerdem, daß die Deckenschwingungen auch an den weiteren Meßpunkten am Fundament und im Boden festzustellen sind.



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BAUGRUNDYDYNAMIK
ERSCHUETTERUNGSSCHUTZ

Bild 16 - TETRAPAK, Deckeigenfrequenz und Dämpfung:
Zeitverlauf und Spektren aller Meßpunkte
bei Impulsanregung der Decke 1



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BAUGRUNDYNAMIK
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

Bild 17 - TETRAPAK, Deckenresonanz:
Zeitverlauf und Spektren aller Meßpunkte
bei Anregung durch Straßenverkehr

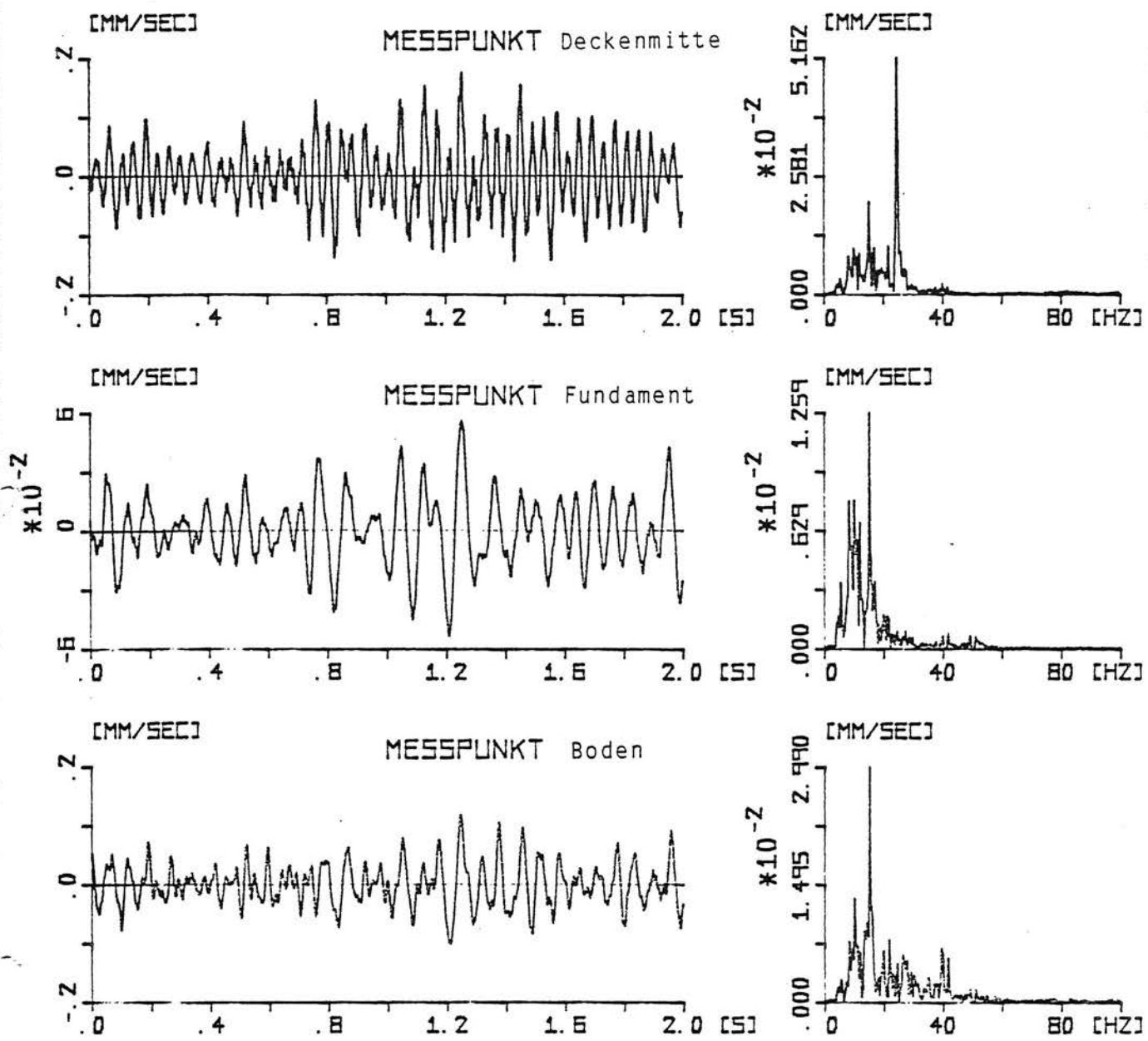


Bild 18 - TETRPAK, Vergleichsmessung in einem benachbarten Altbau: Zeitverlauf und Spektren von Freifeld, Fundament und Decke bei Anregung durch Straßenverkehr

3.2.2 Erschütterungsübertragung ins Gebäude

Bild 17 zeigt den Schwingungsverlauf und die Spektren bei der Vorbeifahrt eines Busses. Die Anregungsfrequenzen liegen hauptsächlich zwischen 10 und 20 Hz, etwas schwächer auch noch bis 35 Hz. Fundament und Decke 2 schwingen ähnlich, fast wie ein starrer Block. Gegenüber dem Boden (dem Freifeld) fehlen die höheren Frequenzanteile über 20 Hz. Die wesentlichen Anregungsanteile zwischen 10 und 20 Hz sind um den Faktor 0,5 bis 0,7 abgemindert.

Die Decke 1 schwingt im wesentlichen in ihrer Eigenfrequenz. Hier treten die größten Amplituden im Gebäude auf. Es lassen sich folgende Übertragungsverhältnisse gegenüber dem Freifeld ermitteln:

	10-20 Hz	23 Hz	25-35 Hz	Zeitbereich
Fundament	0,5-0,7	0,1	< 0,1	0,3
Decke	0,3	3	0,25	0,75

Die gleichen Tendenzen im Übertragungsverhalten wurden auch bei Messungen im benachbarten ebenfalls zweigeschossigen Gebäude gemessen (Bild 18): Während im Freifeld ein relativ breiter Frequenzbereich vorhanden ist, dominieren am Fundament die tiefen Frequenzen, und die Decke schwingt hauptsächlich in ihrer Eigenfrequenz. Die Verhältnisse gegenüber dem Freifeld sind für das Fundament 0,5 und für die Decke 1,5.

3.3 Schaltwarte der GASAG, Berlin-Mariendorf

3.3.1 Verteilung über die Gebäudehöhe

An der dem Schwinganreger am nächsten gelegenen Stütze ist an 3 Punkten über die gesamte Höhe von 10 m gemessen worden. Es sollte kontrolliert werden, ob alle Meßpunkte in dem gemessenen Frequenzbereich von 5 bis 70 Hz annähernd gleiche Amplituden aufweisen. Nach den theoretischen Ergebnissen dürften größere Unterschiede erst ab 100 Hz auftreten.

Als Ergebnis der Schwingeranregung wurden jeweils die Amplituden der Anregungsfrequenz aus dem Spektrum abgelesen. Die folgende Tabelle enthält die Schwinggeschwindigkeiten des unteren Meßpunktes, für den mittleren und oberen Meßpunkt sind die Verhältniszahlen gegenüber dem unteren Meßpunkt angegeben:

Frequenz in Hz	v-unten in 10^{-3} mm/s	<u>Mitte</u> unten	<u>oben</u> unten
10	8,6	1,05	0,91
15	26,6	1,05	1,16
25	15,4	1,12	1,24
30	23,4	1,53	2,07
35	23,0	1,11	1,19
45	10,1	0,77	1,02
50	9,6	1,63	2,20
60	7,3	0,97	1,12

Die Amplituden sind über die Gebäudehöhe annähernd gleich (Extremwerte 0,77 und 2,20), wobei größere Amplituden eher oben auftreten.

3.3.2 Verhältnis Freifeld - Bauwerk

Das Übertragungsverhältnis Freifeld - Bauwerk wurde folgendermaßen bestimmt: Für die Bauwerksamplitude wurden die Werte der drei Meßpunkte gemittelt. Für die Freifeldamplitude wurden die Amplituden in 27,5, 30 und 35 m Entfernung vom Schwinger gemittelt und auf die Entfernung der Gebäudemesspunkte von 37,5 m umgerechnet (-10 %). Das Verhältnis von Bauwerksamplitude zu Freifeldamplitude ist in nachfolgender Tabelle aufgetragen. Es liegt zwischen 0,3 und 0,05 und nimmt für höhere Frequenzen ab:

Frequenz	12,5	15	25	30	35	45	50	60	Hz
u_m/u_0	0,31	0,30	0,184	0,144	0,135	0,046	0,047	0,048	

3.4 BAM Berlin, Haus 88

3.4.1 Deckeneigenfrequenz, Dämpfung und Deckenresonanz

Bei den Messungen in Haus 88 der BAM stand das Verhalten von zwei weit gespannten Decken (ca. 7 m x 7 m) im Mittelpunkt. Zunächst wurden Eigenfrequenz und Dämpfung aus der Impulsanregung der Decken bestimmt:

Raum 200: $f_0 = 11,6 \text{ Hz}$, $D = 4,2 \%$,
Raum 219: $f_0 = 11,0 \text{ Hz}$, $D = 3,9 \%$.

Bei den Versuchen mit dem elektrodynamischen Schwinger wurde dann der Frequenzbereich um diese Eigenfrequenzen genauer untersucht. Bei der Auswertung dieser Messungen werden die Amplituden der Anregungsfrequenz aus dem Spektrum abgelesen. Diese Amplituden sind in den Bildern 19, 20 und 21 über die Frequenzen von 5 bis 20 Hz aufgetragen. Dabei wurden alle Meßpunkte an der Bodenoberfläche (Freifeld) und jeweils die Meßpunkte, die zu einer Decke gehören (Fundament, Deckenaufleger, Deckenmitte), zusammengefaßt. Jeweils im unteren Teil des Bildes sind die Amplituden im Gebäude auf die Amplituden des Bodens bezogen. Als Bodenamplitude wurde der quadratische Mittelwert der Bodenmeßpunkte benutzt, wobei für den hinteren Raum (Raum 219) der vorderste Meßpunkt des Bodens herausgelassen wurde.

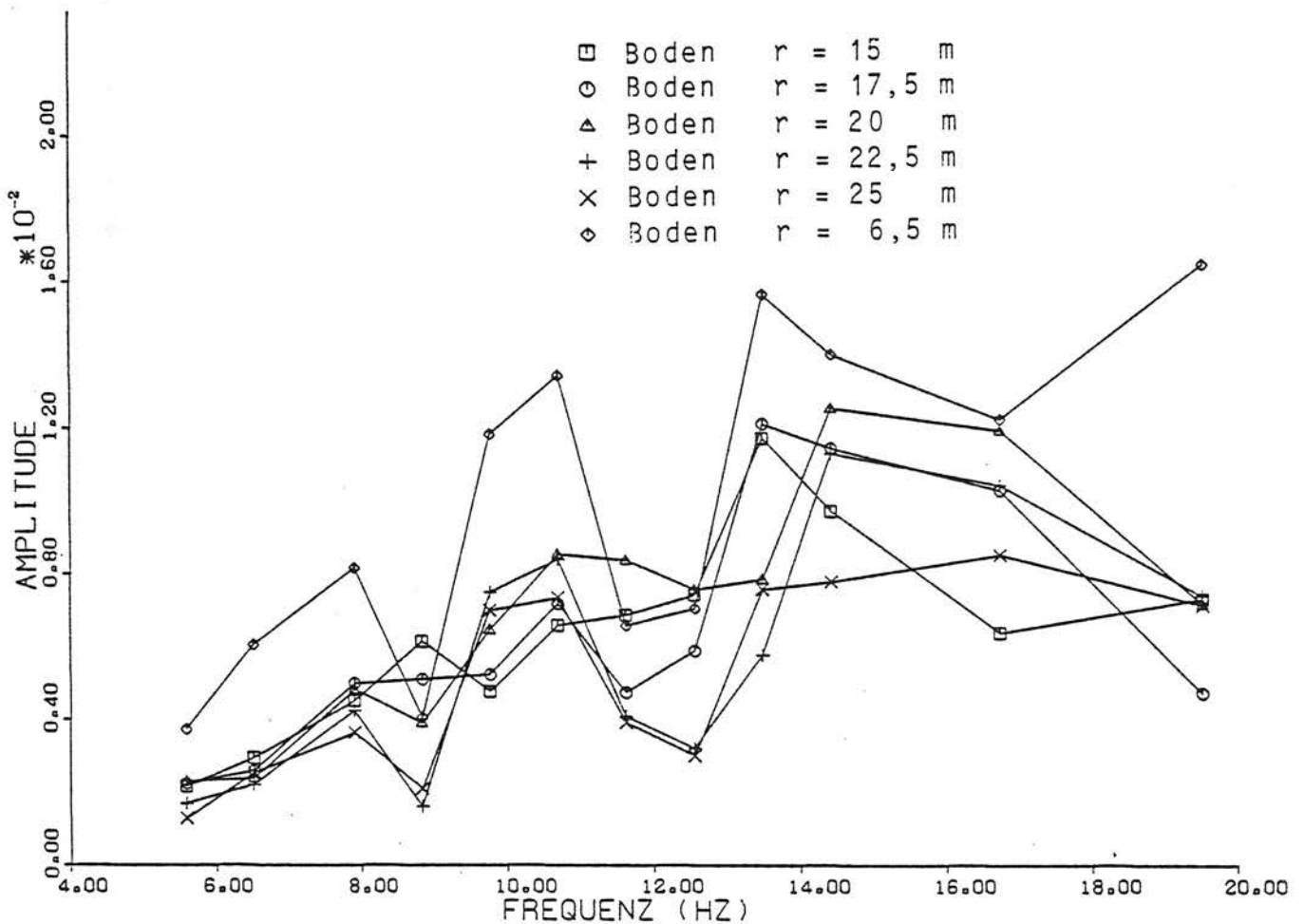


Bild 19 - BAM Haus 88: Amplituden der Bodenmeßpunkte in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz des elektrodynamischen Schwingers

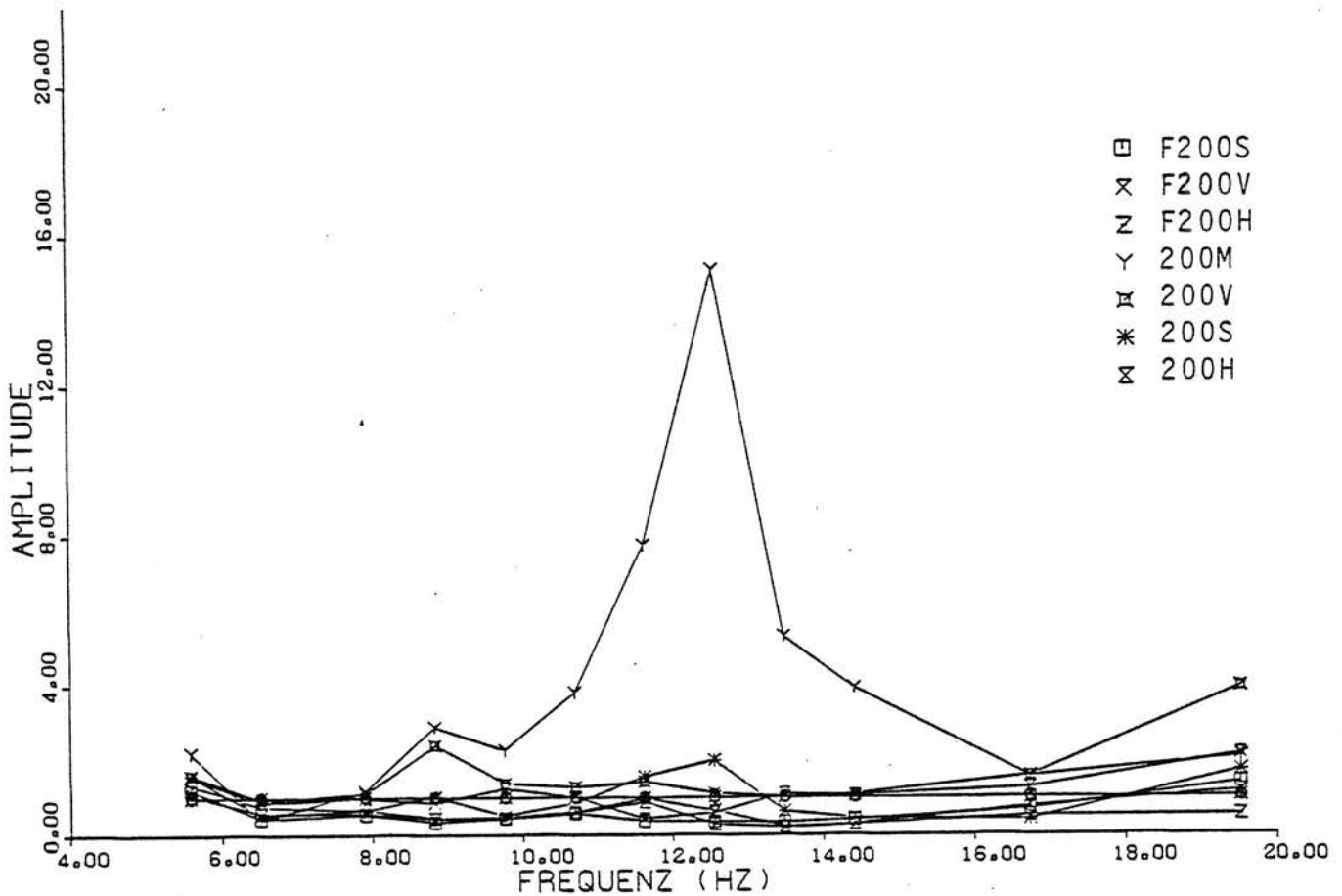
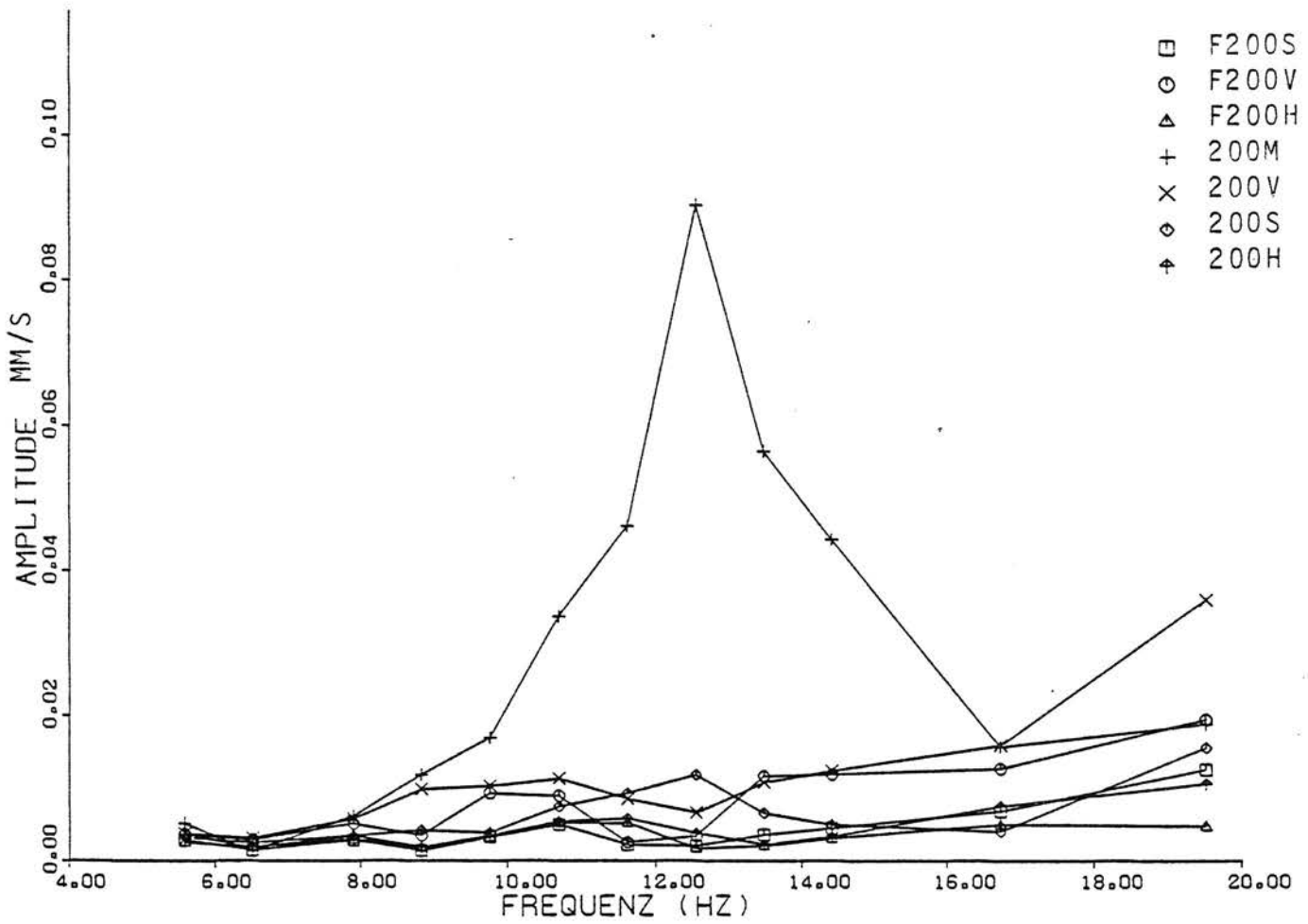


Bild 20 - Amplituden der Meßpunkte in und unter Raum 200 (oben), Verhältniswerte gegenüber dem Mittelwert der Bodenmeßpunkte (unten)

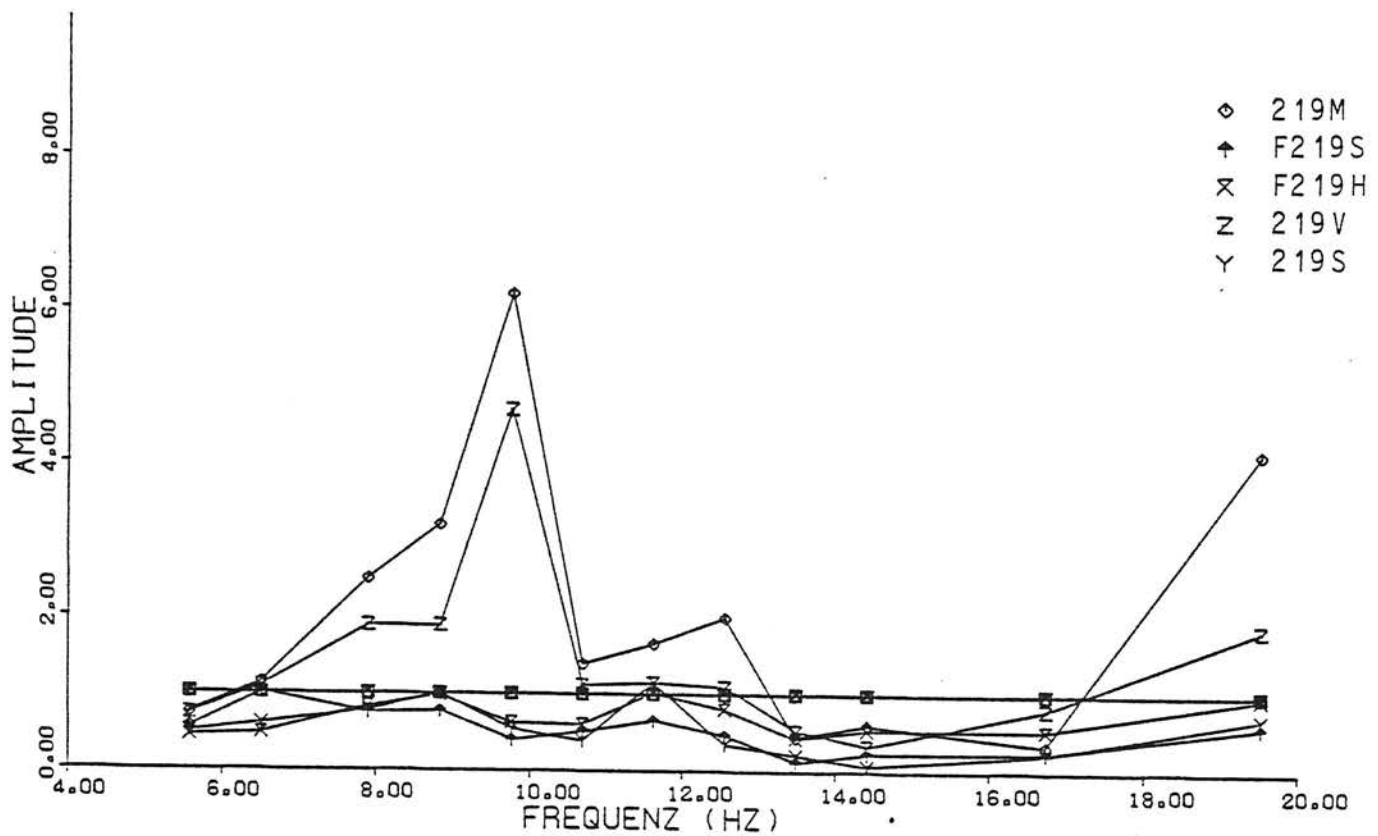
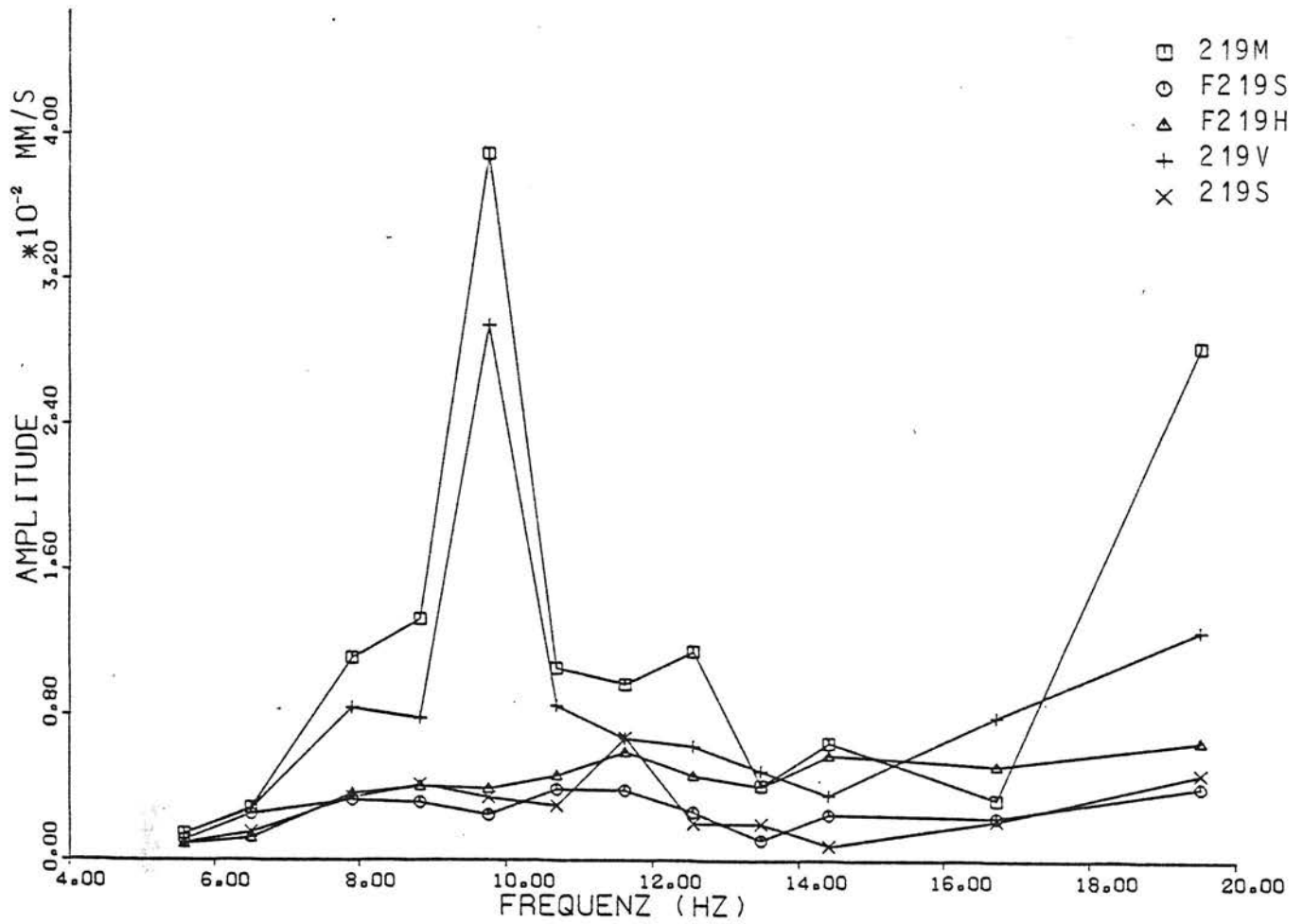


Bild 21 - Amplituden der Meßpunkte in und unter Raum 219 (oben), Verhältniswerte gegenüber dem Mittelwert der Bodenmeßpunkte (unten)

Die Bilder zeigen deutlich die Resonanz der Decken. Während die Fundamentpunkte ziemlich gleichbleibend halb- bis gleichgroße Amplituden wie das Freifeld aufweisen, steigen die Amplituden der Deckenmitte bis auf das 6- (Raum 219) bzw. das 15-fache (Raum 200) der Bodenamplituden.

3.4.2 Verhältnis Freifeld - Bauwerk

Das Übertragungsverhältnis Freifeld - Bauwerk läßt sich für die tiefen Frequenzen aus den Bildern 20 und 21 unten ablesen. Es wurden außerdem die Versuche mit 30, 40, 70 und 100 Hz ausgewertet:

Frequenz	5-10 Hz	10-20 Hz	30-40 Hz	70-100 Hz
Verhältnis Bauwerk-Freifeld	0,8	0,6	0,3-0,6	0,2-0,4

Die Werte für 30 bis 100 Hz mußten mehrfach gemittelt werden, da die Amplituden verschiedener Meßpunkte und die Verhältnisse benachbarter Frequenzen sehr stark streuten.

3.4.3 Vergleich der Ergebnisse bei Impuls- und Schwingeranregung

Das Gebäude wurde mit zwei verschiedenen Methoden zu Schwingungen angeregt: harmonisch-stationär mit einem elektrodynamischen Schwinger und impulsartig mit einem Fallgewicht. Anregungsort war in beiden Fällen die Bodenoberfläche in 6,5 m Entfernung vom Gebäude. Die durch den Impuls angeregten Schwingungen im Boden und im Gebäude sind im Anhang A dokumentiert, eine Auswahl zeigt Bild 22.

Bei der Impulsanregung wird ein breites Spektrum von Frequenzen zwischen 10 und 100 Hz angeregt, das läßt sich aus dem Spektrum des erregernächsten Bodenpunktes B06 ablesen. Aus den Impulsspektren lassen sich grobe Mittelwerte für die Übertragungsverhältnisse ablesen (in Klammern die Werte bei Schwingeranregung):

Deckenresonanz	Raum 200	8-16	(15),
	Raum 219	2,5- 5	(6),

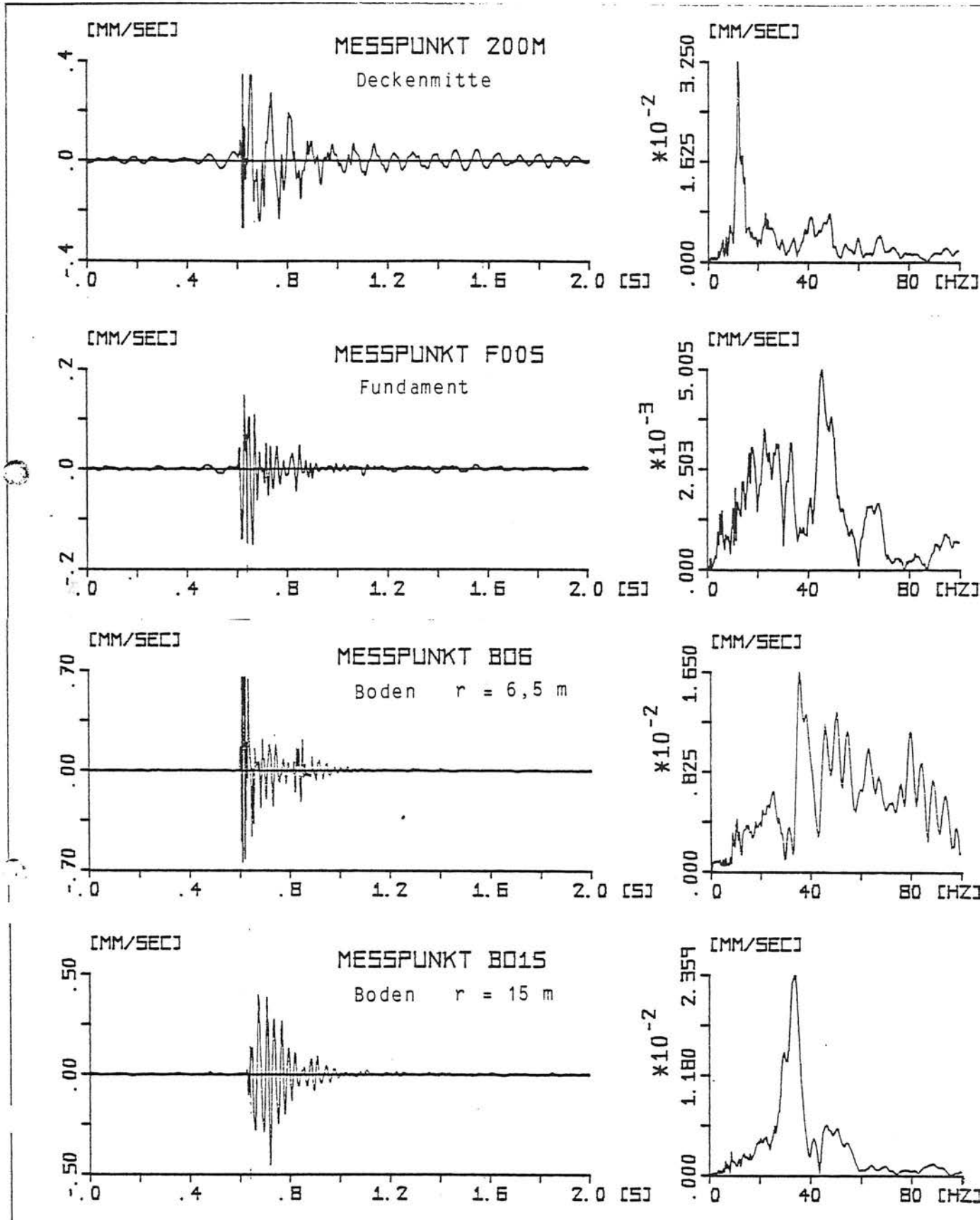


Bild 22 - BAM Haus 88, Impulsanregung des Bodens:
Zeitverlauf und Spektren ausgewählter Meßpunkte

Bauwerk/Freifeld 10- 20 Hz	0,7	(0,6),
30- 50 Hz	0,25-0,5	(0,3-0,6),
60-100 Hz	0,25-0,5	(0,2-0,4).

Bemerkenswert ist, daß die Resonanzüberhöhung der Decke Raum 200 sehr deutlich und in guter Übereinstimmung mit dem Wert bei harmonischer Anregung abgelesen werden kann. Die Übertragungsverhältnisse Bauwerk zu Freifeld sind dagegen nur vage Anhaltspunkte, da über teilweise sehr unterschiedliche Spektren gemittelt wurde. Insbesondere die hohen Frequenzanteile über 50 Hz sind schon in kurzer Entfernung von der Quelle herausgefiltert. Das gilt sowohl für Punkte im Freifeld (B06 - B015) als auch für Gebäudepunkte. Infolge dieser Filterwirkung dominieren im Boden (B015 - B020) auffällig die Frequenzen zwischen 30 und 35 Hz.

Für die Maximalamplituden im Zeitverlauf hat man folgende Verhältnisse

$$\frac{\text{Gebäude vorn}}{\text{Boden vorn}} = \frac{0,09 \dots 0,41 \text{ mm/s}}{0,46 \dots 0,66 \text{ mm/s}} \approx \frac{0,25}{0,5} = 0,5 \quad ,$$

$$\frac{\text{Gebäude hinten}}{\text{Boden hinten}} = \frac{0,06 \dots 0,13 \text{ mm/s}}{0,17 \dots 0,24 \text{ mm/s}} \approx \frac{0,1}{0,2} = 0,5 \quad ,$$

$$\frac{\text{Decke vorn}}{\text{Boden vorn}} = \frac{0,34 \text{ mm/s}}{0,5 \text{ mm/s}} = 0,7 \quad ,$$

$$\frac{\text{Decke hinten}}{\text{Boden hinten}} = \frac{0,18 \text{ mm/s}}{0,2 \text{ mm/s}} = 0,9 \quad .$$

Die im Spektrum abgelesenen Übertragungsverhältnisse werden im Mittel bestätigt. Die starke Deckenresonanz vorn macht sich im Maximalwert des Zeitverlaufs dagegen kaum bemerkbar. Die hohen Eigenfrequenzanteile des Spektrums stecken vielmehr in dem langanhaltenden Ausschwingvorgang.

3.5 Modellschutzbau Meppen

3.5.1 Verhältnis Freifeld - Bauwerk und Wellengeschwindigkeit

Zunächst sind in Bild 23 und 24 die Amplituden der einzelnen Boden- bzw. Bauwerksmeßpunkte über die jeweilige Anregungsfrequenz aufgetragen. Die

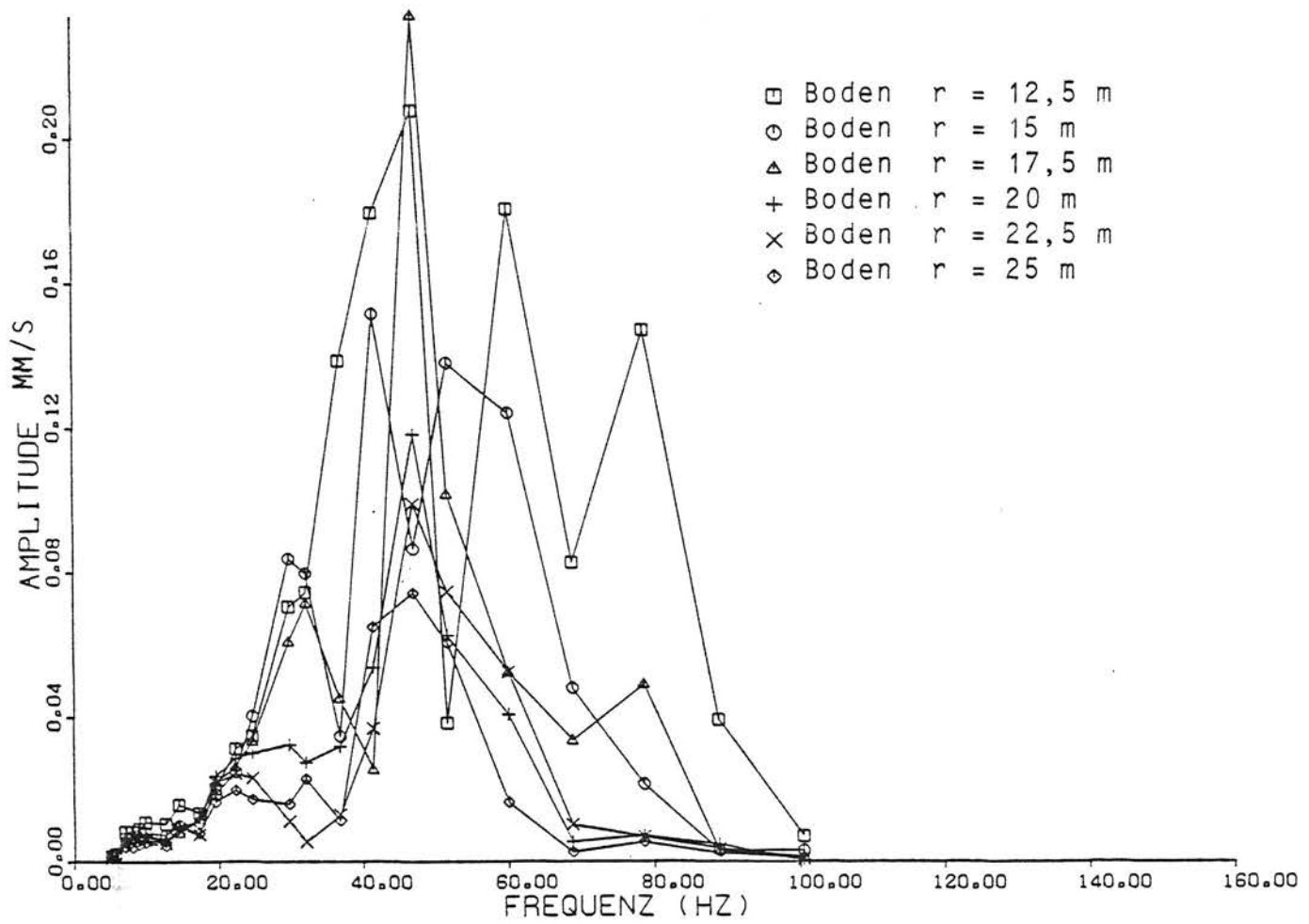


Bild 23 - Modellschutzbau Meppen: Amplituden der Bodenmeßpunkte in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz des elektrodynamischen Schwingers

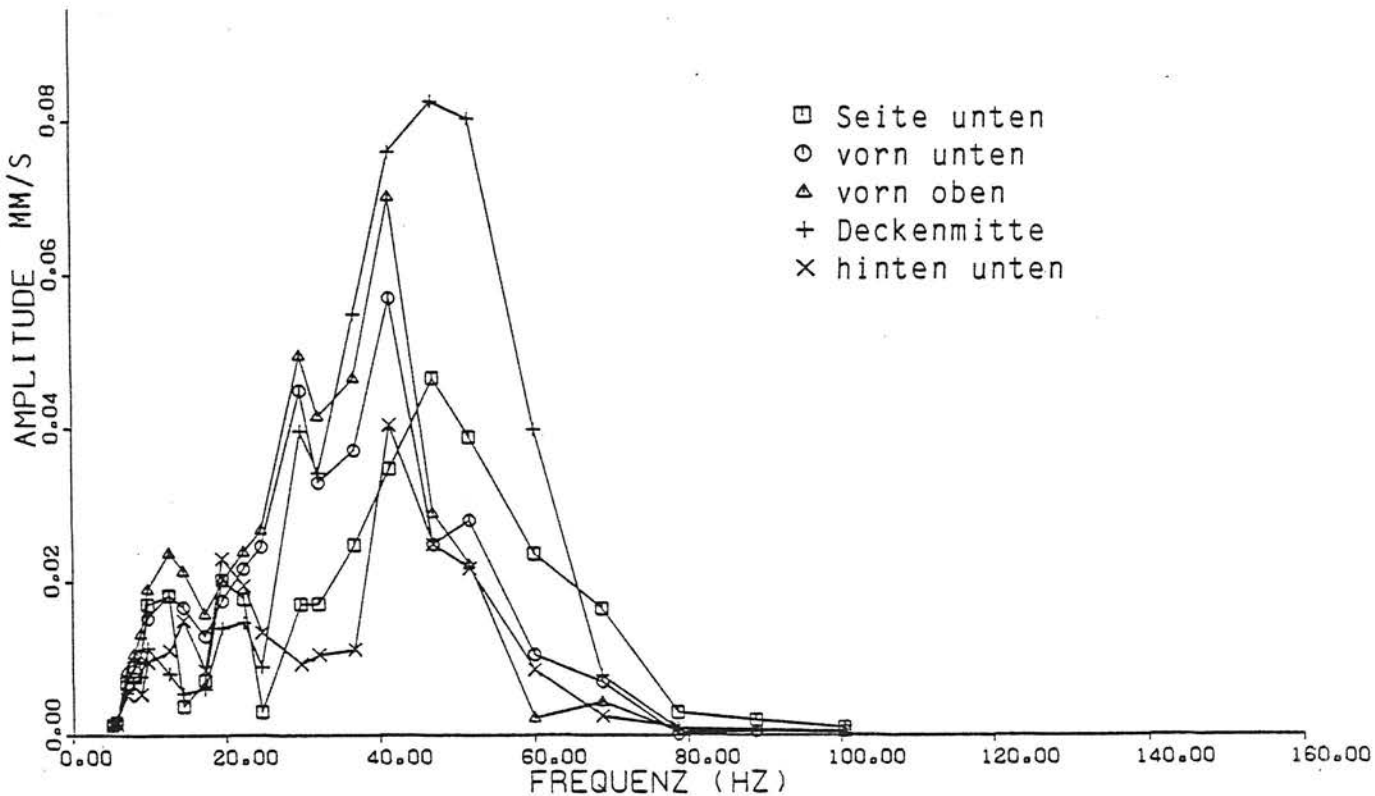


Bild 24- Modellschutzbau Meppen: Amplituden der Gebäudemesspunkte in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz des elektrodynamischen Schwingers

Amplituden im Boden sind bis 20 Hz ziemlich einheitlich, für höhere Frequenzen hat man eine größere Streubreite. Insbesondere bei 30 Hz hat man einen deutlichen Gegensatz zwischen den nahen Punkten (12,5 bis 17,5 m Abstand) und den entfernteren Punkten (20 bis 25 m). Weiterhin sind die hohen Frequenzanteile um 80 Hz nur in den nächsten Bodenpunkten vorhanden.

Das Wellenfeld im Boden wurde für die Anregungsfrequenzen 7, 10, 15, 20, 30 und 40 Hz auch hinsichtlich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen ausgewertet, wobei sich Werte zwischen 200 und 260 m/s, im Mittel von

$$v_R = 235 \text{ m/s}$$

für die Rayleighwellengeschwindigkeit ergaben.

In Bild 25 sind nun die einzelnen Gebäudeamplituden auf den quadratischen Mittelwert aller Bodenpunkte bezogen. Bild 26 zeigt den Mittelwert dieser bezogenen Gebäudeamplituden in Abhängigkeit von der Frequenz. Dieses mittlere Übertragungsverhältnis Bauwerk zu Freifeld weist folgende Merkmale auf:

- Im Bereich um 13 Hz sind die Gebäudeamplituden größer als die Bodenamplituden. Die Überhöhung ist etwa 2,5.
- Oberhalb von 20 Hz sind alle Amplituden im Gebäude kleiner als im Freifeld.
- Das Verhältnis Bauwerk zu Freifeld nimmt für größere Frequenzen weiter ab und erreicht zwischen 70 und 100 Hz Werte zwischen 0,1 und 0,2.

Die Amplituden der einzelnen Gebäudepunkte sind teilweise sehr unterschiedlich. Insbesondere im "Resonanzbereich" um 13 Hz und im Bereich um 30 Hz, wobei hier genauso wie bei den Bodenpunkten die näher am Schwinger gelegenen Gebäudepunkte deutlich größere Amplituden aufweisen. Im Bereich zwischen 45 und 60 Hz zeigt die Deckenmitte die eindeutig größten Bauwerksamplituden.

3.5.2 Deckeneigenfrequenz und -resonanz

Bei der Impulsanregung der Decke wurde eine Eigenfrequenz von 60 Hz gemessen. Dieser Frequenzbereich um 60 Hz wurde daraufhin in 1Hz-Schritten mit dem Schwingerreger durchfahren und folgende Resonanzkurve vor Ort ermittelt:

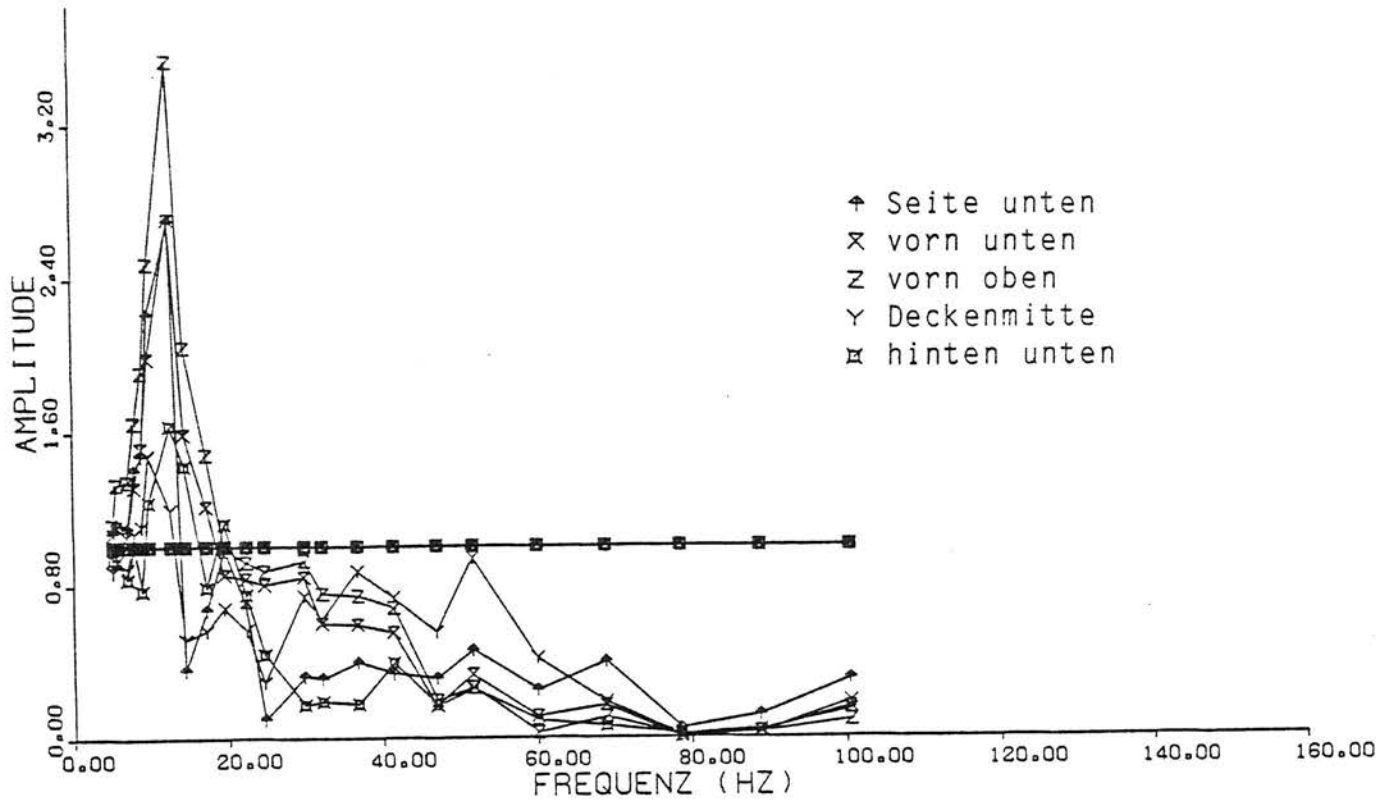


Bild 25 - Modellschutzbau Meppen: Verhältniswert der Gebäudeamplituden gegenüber dem Mittelwert der Bodenamplituden

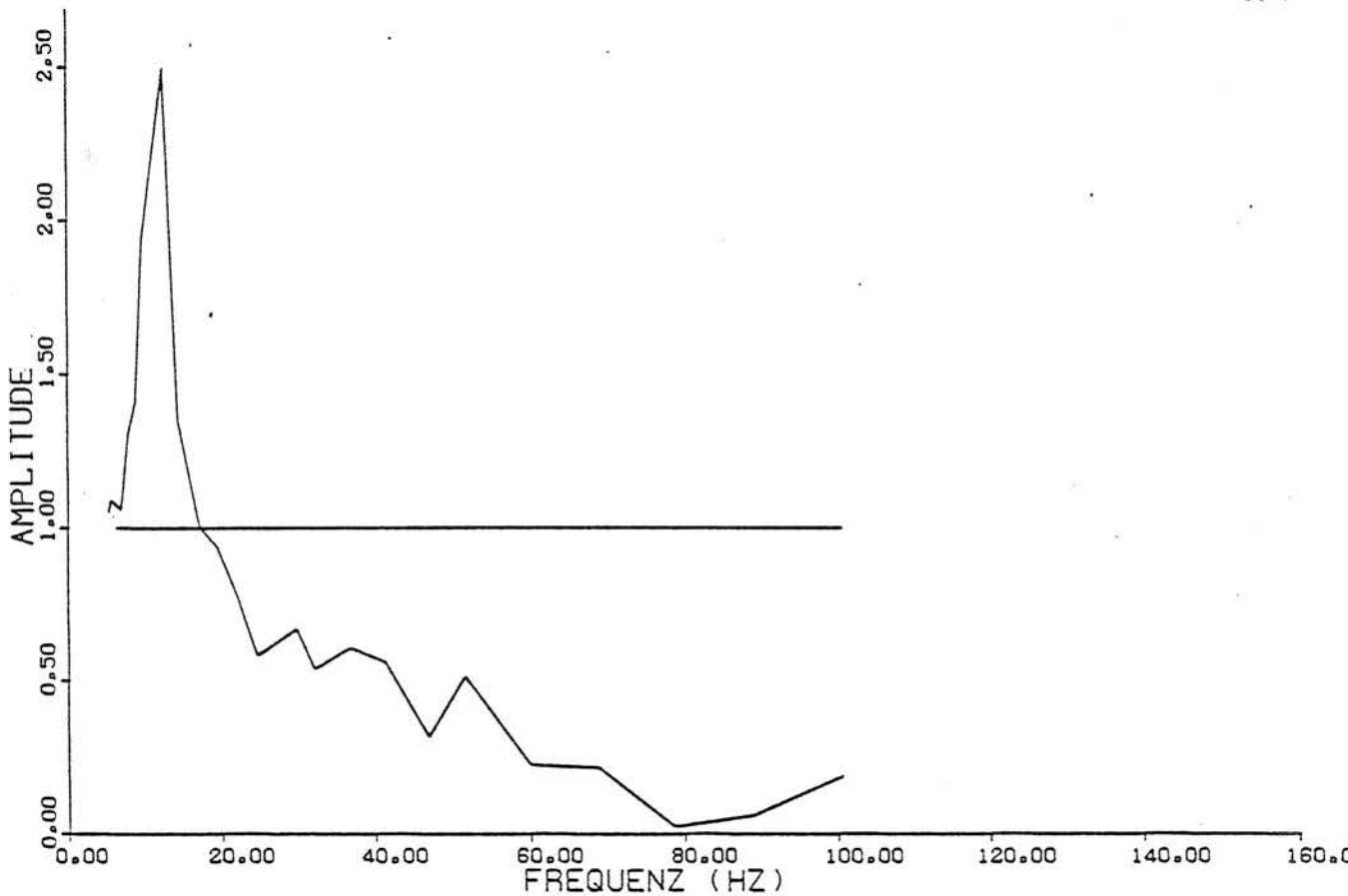


Bild 26 - Modellschutzbau Meppen, Übertragung Freifeld-Bauwerk: Verhältnis Mittelwert der Gebäudeamplituden zu Mittelwert der Bodenamplituden

Frequenz	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	Hz
Amplitudenverhältnis Deckenmitte zu Fundament vorn rechts	2	2	2,3	3	5	5	4	2	2	1,7	

Bezieht man die Amplitude der Deckenmitte auf den Mittelwert aller übrigen Gebäudemeßpunkte, so ergibt sich eine Resonanzüberhöhung von 3,5. Damit ist die Deckenamplitude aber immer noch kleiner als die Freifeldamplituden des Bodens (s. Bild 25).

Die genauere Abtastung der Schwingungsform der Decke bei 60 Hz zeigte, daß die Eigenschwingung der Decke nicht klar angeregt wird. Die Gebäudeeckpunkte schwingen jeweils paarweise gegenphasig, wobei der Phasenübergang längs einer Wand sich entweder langsam bei gleichbleibender Amplitude oder sprunghaft an einem Punkt mit verschwindender Amplitude vollzieht. Die Deckenmitte schwingt gegenüber den Ecken jeweils 90° phasenverschoben.

4. Zusammenfassung der Meßergebnisse

Die Meßergebnisse sollen hier unter den in der Einleitung genannten Fragestellungen zusammengefaßt werden.

- Wie korreliert bzw. unkorreliert werden die einzelnen Fundamente durch den Zugverkehr angeregt?

In 3.1.2.1 wurden die Korrelationen einzelner Hochhausfundamente bei Zuganregung untersucht. Die im Idealfall zu erwartenden Ergebnisse werden ansatzweise bestätigt: von der Quelle aus gesehen nebeneinanderliegende Fundamente schwingen gleichzeitig, hintereinanderliegende Fundamente schwingen zeitlich versetzt - allerdings mit überraschend kurzer Verzögerungszeit. Bei der Ausmessung der Schwingungsform des Modellschutzbaus in der Deckeneigenfrequenz (3.5.2) ergab sich bei scheinbar symmetrischen Verhältnissen ein asymmetrisches Schwingungsbild: symmetrisch gelegene Fundamentpunkte schwingen genau gegenphasig.

Diese Meßergebnisse legen es nahe, bei der Berechnung einer Erschütterungsprognose eher von einer unkorrelierten zufälligen Anregung der einzelnen Fundamente auszugehen oder verschiedene Phasenlagen der Fundamente zueinander (z.B. auch Gleichphasigkeit) miteinzubeziehen.

- Wie ist das Verhältnis zwischen den Gebäudeschwingungen und den Freifeldschwingungen des Bodens?

Bei allen fünf Gebäudebeispielen wurde das Amplitudenverhältnis von Bauwerk zu Freifeld ausgewertet, wobei bei den Bauwerksamplituden nur die Fundament- und die Wand- bzw. Stützenmeßpunkte berücksichtigt wurden, und die Deckenmeßpunkte wegen der möglichen Resonanz herausgenommen wurden. Bei den in Bild 27 dargestellten fünf Kurven der Übertragungsverhältnisse ist zu beachten, daß hinter den einzelnen Kurven zum Teil sehr verschiedene Datenmengen mit unterschiedlicher Qualität und Zuverlässigkeit stehen. Die aussagekräftigste und am besten abgesicherte Kurve ist die des Modellschutzbaus. Hier wurde unter kontrollierten Bedingungen (harmonische Punkterregung, simultane Messung des echten Freifeldes, Vielzahl von Meßpunkten) das Übertragungsverhältnis in kleinen Frequenzschritten ermittelt.

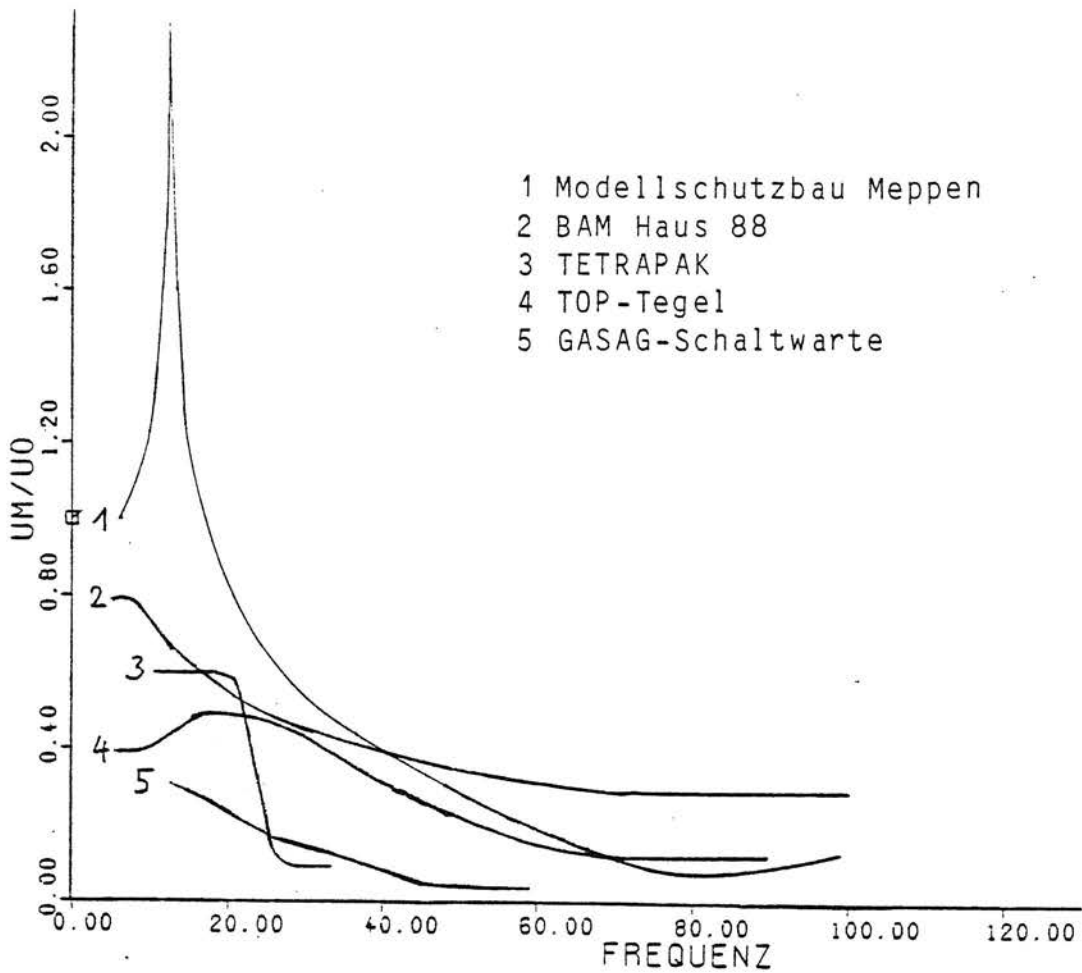


Bild 27 - Übertragungsverhältnis Bauwerksamplituden zu Freifeldamplituden des Bodens,
Zusammenfassung aller Gebäudemessungen

Alle Übertragungsfunktionen haben eine gemeinsame Tendenz: Für höhere Frequenzen nimmt das Verhältnis von Bauwerks- zu Freifeldamplituden ab, ab 40 Hz ist das Verhältnis in allen Fällen kleiner als $1/2$. In vier der fünf Fälle ist das Verhältnis im gesamten erfaßten Frequenzbereich zwischen 5 (bzw. 10) und 100 Hz kleiner als 1, das heißt, die Bauwerksamplituden sind (im Mittel der Meßpunkte) immer kleiner als das Freifeld. Eine Ausnahme bildet hier der Modellschutzbau, bei dem deutlich die Bauwerk-Boden-Resonanz mit einer Überhöhung von 2,5 festzustellen ist.

- Wie ist die Amplitudenverteilung über die Gebäudehöhe?

Ergebnisse hierzu liegen in Abschnitt 3.1.2.2 und 3.3.1 vor. Die Amplituden der Wand bzw. Stütze in verschiedenen Stockwerken unterscheiden sich maximal um den Faktor 2, wobei die größeren Werte in der Regel oben auftreten. Dies kann bei den anderen Gebäudebeispielen durch den Vergleich Fundament und Wand im 1. Stock (Deckenaufleger) bestätigt werden. Beim Gebäudebeispiel "TETRAPAK" wurde die Tilgung der Fundamentalschwingungen durch die Deckenresonanz beobachtet.

- Wie stark werden Deckenresonanzen angeregt?

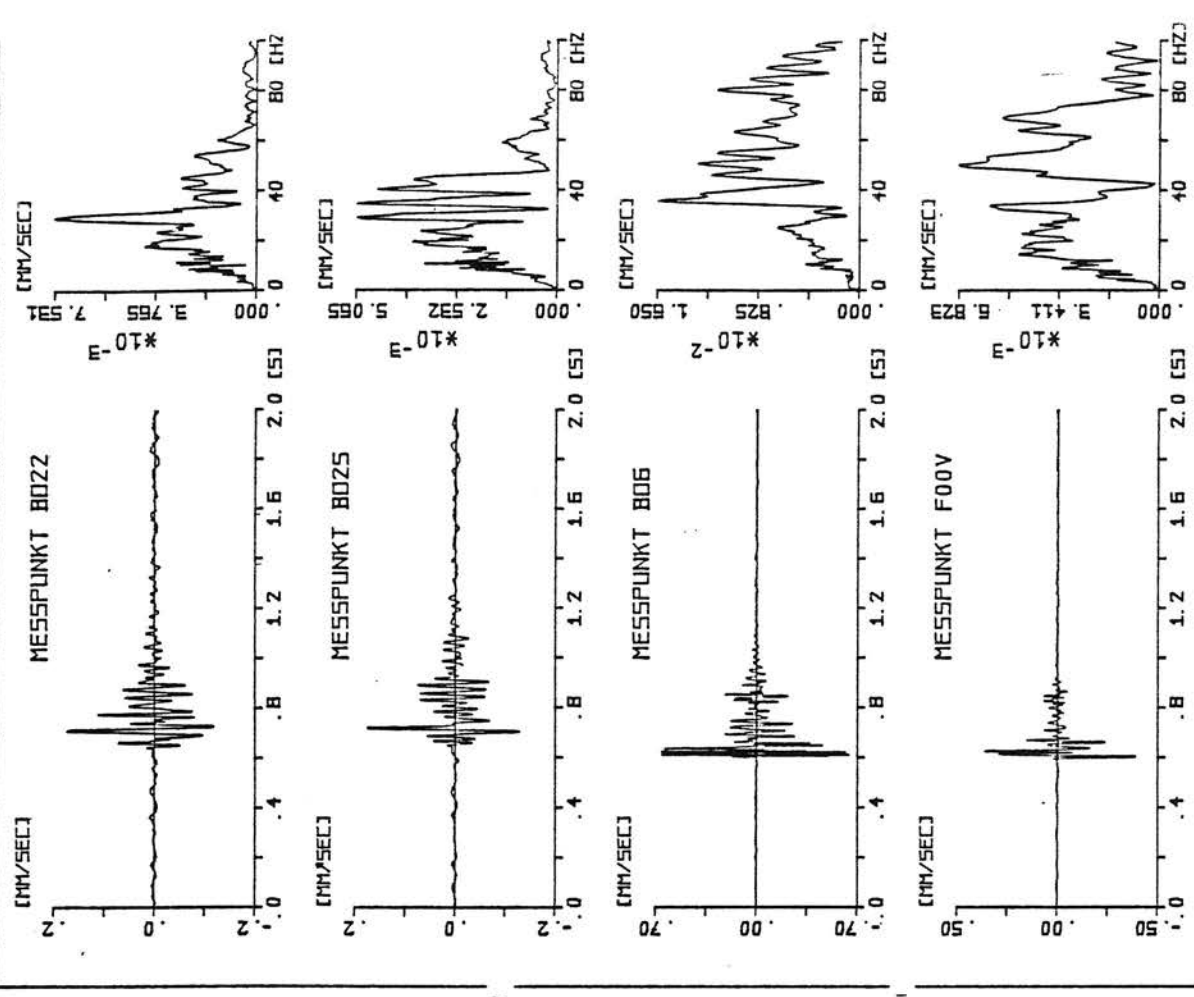
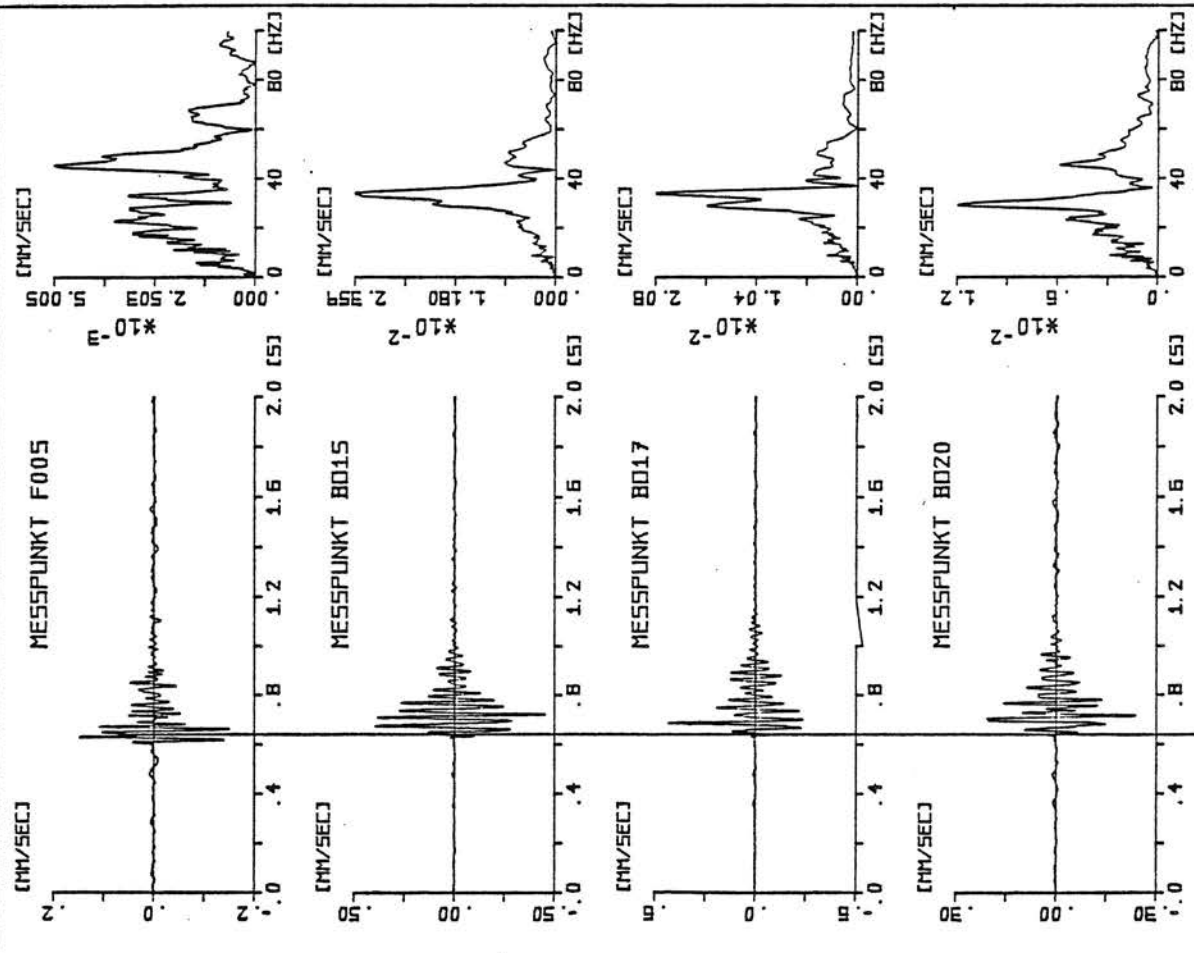
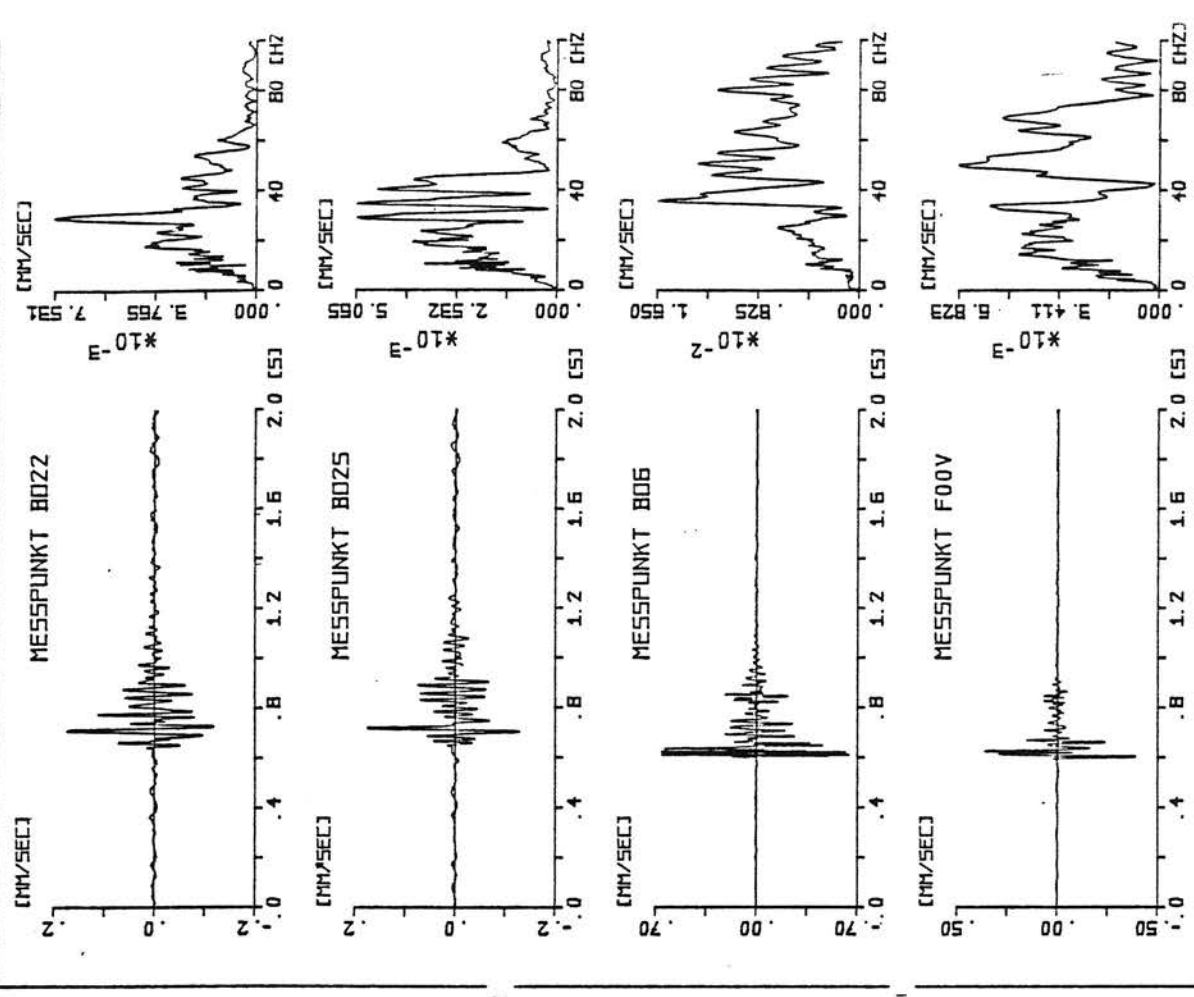
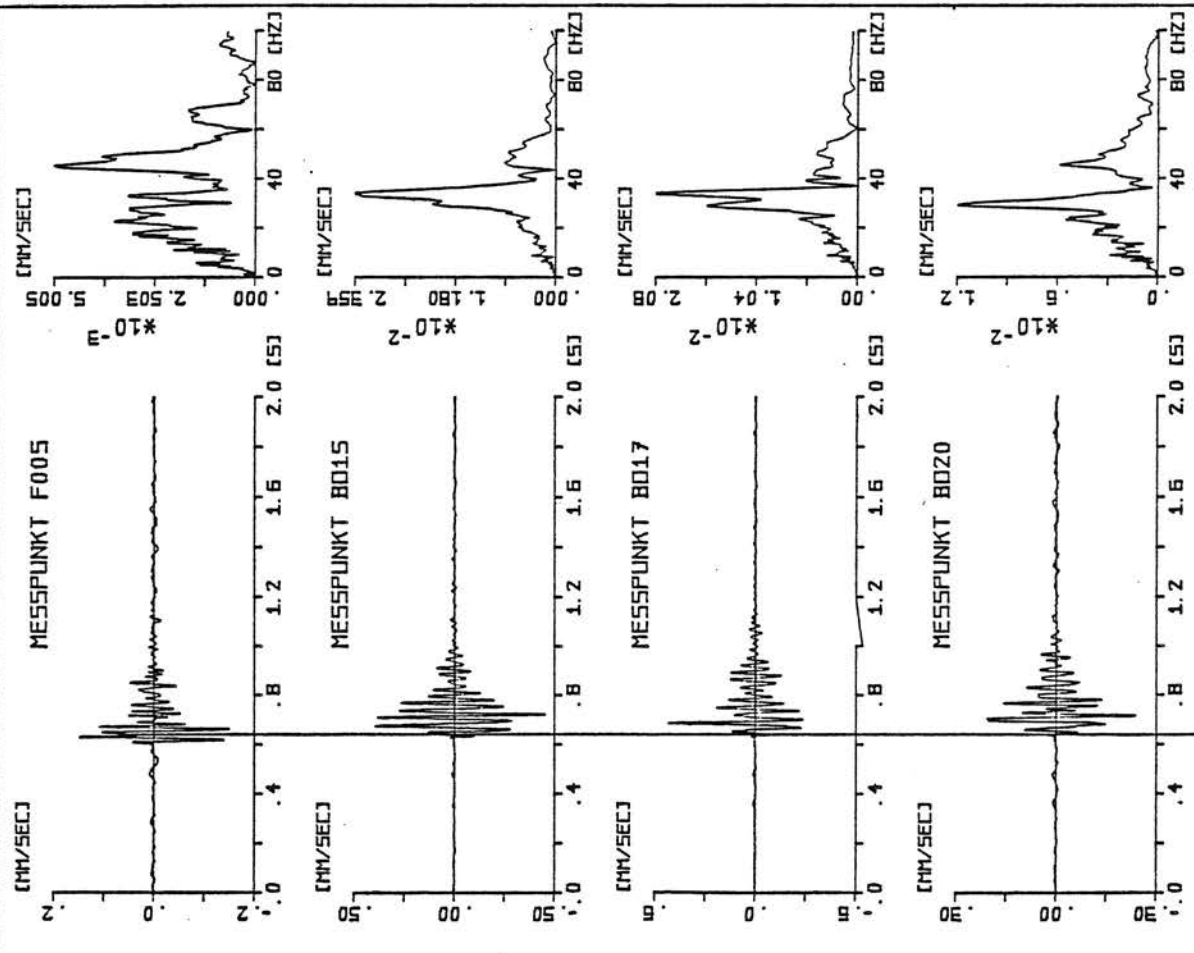
Die in den einzelnen Gebäuden gemessenen Deckeneigenfrequenzen, die Resonanzüberhöhungen und gegebenenfalls die Dämpfungsmaße bei Impulsanregung der Decke sind in nachfolgender Tabelle zusammengefaßt. Die Tabelle wurde ergänzt mit Beispielen, bei denen nur Impulsanregungen durchgeführt wurden. Bei diesen Versuchen zeigte sich, daß sich die Eigenfrequenz am besten anregen ließ, wenn die Decke die längste Spannweite bzw. die tiefste Eigenfrequenz innerhalb des umliegenden Gebäudeabschnitts besaß. Waren gleich große Decken benachbart, traten Schwebungen auf (s. auch 3.1.2.3). Bei kleineren Decken mit höheren Eigenfrequenzen, insbesondere wenn tieffrequentere Decken benachbart sind, waren die Schwingungen in der Regel so schnell abgeklungen, daß eine Dämpfung nicht zu ermitteln war. Insofern ergeben die aufgeführten Dämpfungen eher eine Mindestdämpfung der Deckeneigenfrequenzen.

Meßergebnisse zur Deckenresonanz

Meßobjekt	f_0	D	Decke/Fundament	Decke/Boden
TOP-Tegel	20 Hz	-	8	4
Tetrapak	23 Hz	3,2 %		3
BAM, Haus 88	12,5 Hz	4,2 %		15
	10 Hz	3,9 %		6
Modellschutzbau	60 Hz	-	3,5	0,8
Stahlbetondecke	31 Hz	6,0 %		
Stahlsteindecke	11 Hz	3,7 %		
Holzbalkendecke	9 Hz	5,1 %		
Holzbalkendecke	15 Hz	4,2 %		
Holzbalkendecke	10 Hz	4,6 %		

ANHANG A

Impulsanregung BAM Berlin, Haus 88



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BEGRÜNDUNGSFACH
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

BAM HAUS BB. 29.5.1985
IMPULSANREGUNG

29.01

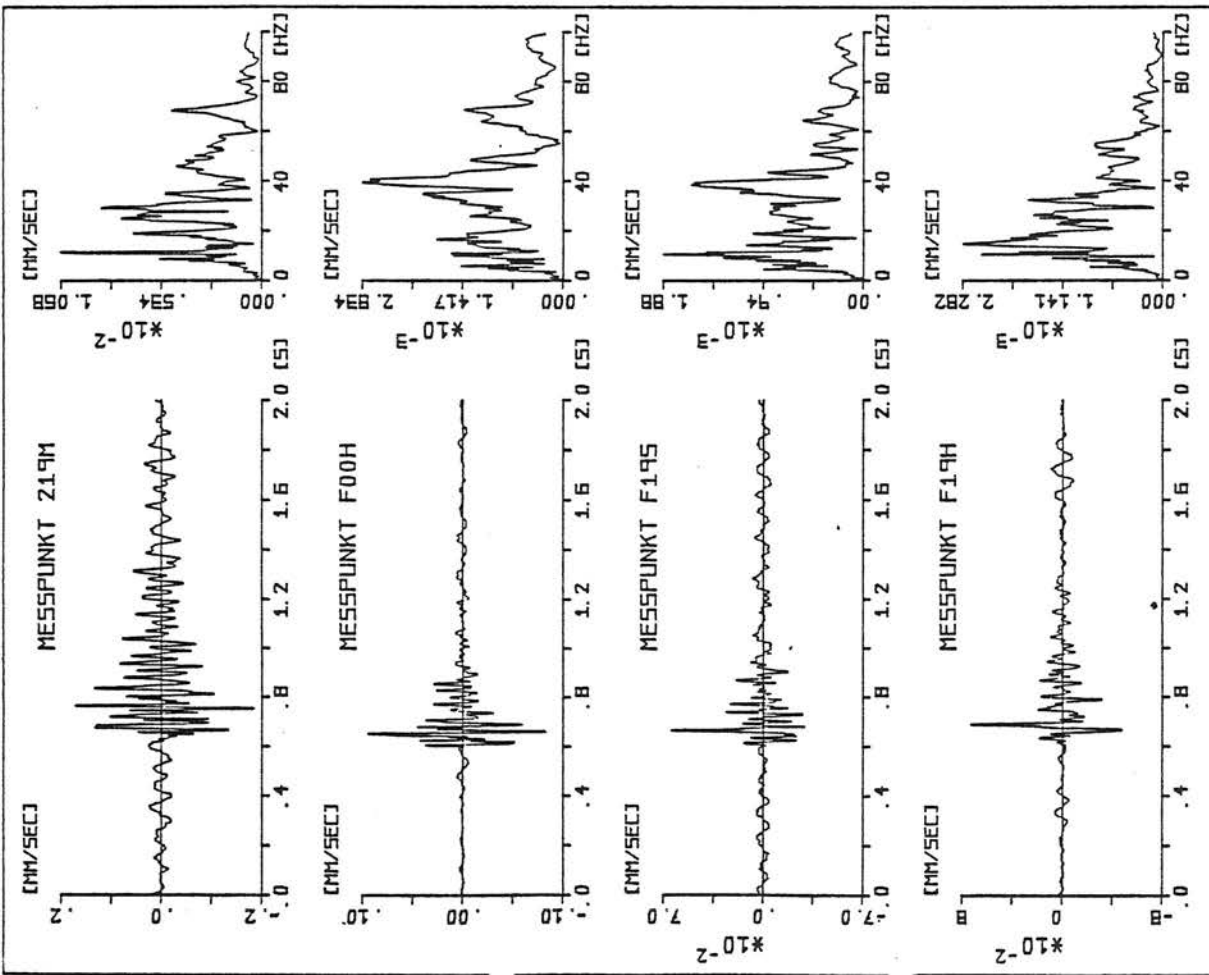
BLATT NR. 1

B A M BERLIN
LABOR 2.32
BEGRÜNDUNGSFACH
ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

BAM HAUS BB. 29.5.1985
IMPULSANREGUNG

29.01

BLATT NR. 2

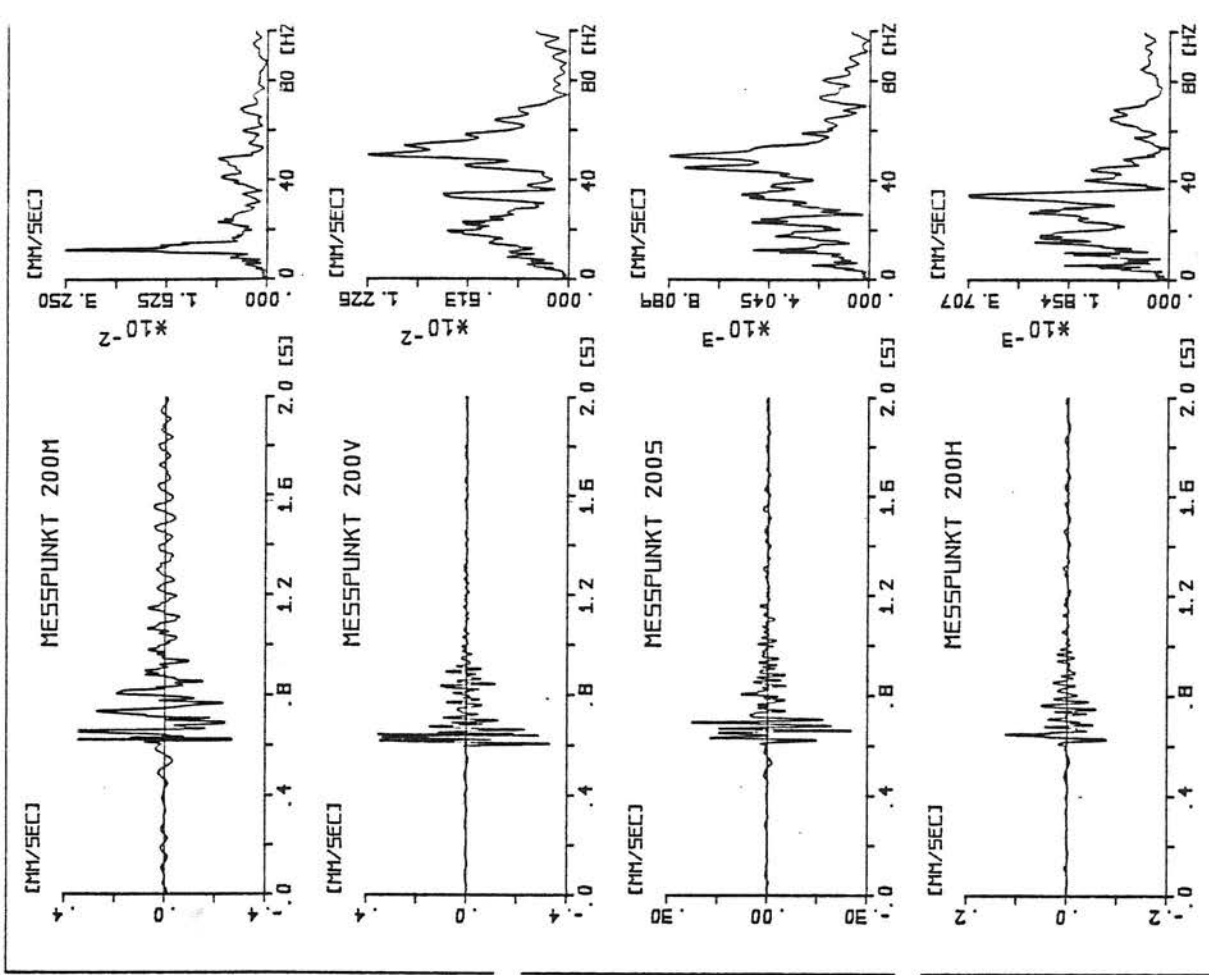


B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BRÜCKENBAUWESEN
 ERSCHEINUNGSSCHUTZ

BAM HAUS 88, 29.5.1985
 IMPULSANREGUNG

29.01

BLATT NR. 3

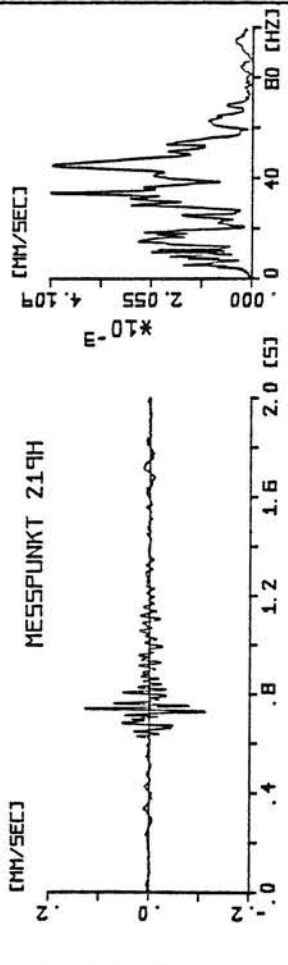
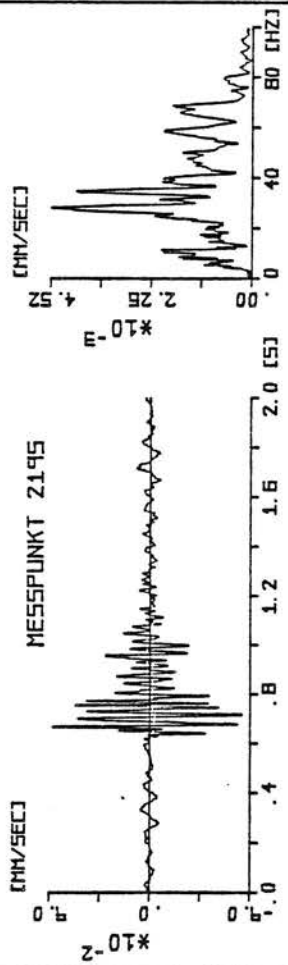


B A M BERLIN
 LABOR 2.32
 BRÜCKENBAUWESEN
 ERSCHEINUNGSSCHUTZ

BAM HAUS 88, 29.5.1985
 IMPULSANREGUNG

29.01

BLATT NR. 4



B A M BERLIN
LABOR 2.32
BRUNNENSTRASSE
ERSCHUTTERUNGSSCHUTZ

BAM HAUS BB. 29.5.1985
IMPULSANREGUNG

29.01

BLATT NR. 5

Teil VI

Vergleich von Theorie und Messung,
Prognosemodell

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>Teil VI: Vergleich von Theorie und Messung, Prognosemodell</u>	
1. Einleitung	VI/1
2. Theorie und Messung im Gesamtüberblick	VI/2
2.1 Amplituden-Abstands-Gesetz	VI/2
2.1.1 Ein Nachtrag zu den Messungen der Erschütterungsausbreitung	VI/2
2.1.2 Vergleich zwischen Theorie und Messung	VI/3
2.2 Verhältnis Freifeld-Bauwerk	VI/4
2.3 Deckenresonanz	VI/6
3. Der Vergleich von Theorie und Messung im Einzelfall	VI/8
3.1 Zugverkehr in Berlin-Britz: Erschütterungsausbreitung bei verschiedenen Zuglängen	VI/8
3.2 Modellschutzbau Meppen: Verhältnis Freifeld-Bauwerk	VI/8
3.3 BAM Berlin, Haus 88: Deckenresonanz bei harmonischer Anregung	VI/13
3.4 Zusammenstellung übereinstimmender Einzelheiten	VI/13
3.4.1 Emission und Transmission	VI/13
3.4.2 Immission	VI/15
4. Schlußfolgerungen für die Erschütterungsprognose	VI/17
4.1 Erschütterungsquelle (Emission)	VI/17
4.2 Erschütterungsausbreitung durch den Boden (Transmission)	VI/17
4.3 Erschütterungsübertragung in Gebäude (Immission)	VI/17
4.4 Konsequenzen für das Prognoseprogramm	VI/19
4.5 Ein Prognosebeispiel zur Übertragungskette Gleis-Boden-Bauwerk	VI/20

Literatur zu den Teilen IV, V und VI

1. Einleitung

Mit diesem letzten Teil des Berichtes sollen die Ergebnisse der fünf vorangehenden Teile "Theorie der Emission", "Theorie der Transmission", "Messungen zur Emission und Transmission", "Theorie der Immission" und "Messungen zur Immission" miteinander verknüpft werden. Einerseits werden jeweils Theorie und Messungen miteinander verglichen, andererseits sind die drei Teilbereiche Emission, Transmission und Immission in einem Prognosemodell zusammenzufassen.

Der Vergleich zwischen Theorie und Messung umfaßt einen Gesamtüberblick, bei dem die theoretischen und die gemessenen Ergebnisse zusammengefaßt und gegenübergestellt werden, und einen detaillierteren Vergleich einzelner Messungen mit den zugehörigen theoretischen Ergebnissen. Der Gesamtüberblick (Abschnitt 2) enthält die drei wichtigsten Aspekte der Erschütterungsausbreitung und -übertragung: das Amplituden-Abstands-Gesetz, das Verhältnis Freifeld-Bauwerk und die Deckenresonanzen. Der Vergleich im Einzelfall (Abschnitt 3) belegt an drei Meßbeispielen und einer Sammlung von Übereinstimmungen von Theorie und Messung die Richtigkeit und Anwendbarkeit der theoretischen Untersuchungen.

Die Ergebnisse zur Emission, Transmission und Immission werden in einem Prognosemodell zusammengefaßt (Abschnitt 4). Aus dem Vergleich von Theorie und Messung ergeben sich Konsequenzen für das im vorangehenden Forschungsvorhaben [1] entwickelte Prognoseprogramm. Als Ergebnis erhält man ein durch Messungen und genauere Berechnungen abgesichertes Prognoseverfahren für Erschütterungen infolge von Schienennahverkehr. Der Abschnitt schließt mit einem Prognosebeispiel zum Einfluß des Bodens in der gesamten Übertragungskette Gleis-Boden-Bauwerk.

2. Theorie und Messung im Gesamtüberblick

2.1 Amplituden-Abstands-Gesetz

2.1.1 Ein Nachtrag zu den Messungen der Erschütterungsausbreitung

Neben den drei Meßreihen, die im Berichtsteil "Messungen zur Emission und Transmission" dokumentiert sind, sollen die Ergebnisse von einem weiteren Meßort herangezogen werden. Diese Messungen sollen hier kurz beschrieben werden.

Es handelt sich um Messungen, die im Zusammenhang mit dem vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] aufgezeichnet wurden. Einzelheiten zum Meßort (Köln-Thielenbruch, "Gerade"), zu den eingesetzten Fahrzeugen (Straßenbahn 8-achsig, Stadtbahnwagen 6-achsig), zum Bodenaufbau und zu den bodendynamischen Kenngrößen können deshalb dem Bericht [1] entnommen werden. Es wurden zwanzig Zugvorbeifahrten mit einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 50 km/h, sowie einige Impulsanregungen des Bodens gemessen. Die Meßpunkte lagen in 5 bis 50 m Abstand von der Gleismitte.

Ergebnisse zum Amplituden-Abstands-Gesetz:

Bei den Impulsmessungen nehmen die Maxima der Zeitverläufe gemäß $r^{-1,3}$ mit der Entfernung r ab. Für einzelne Anteile des Spektrums ist die Abnahme geringer:

20-25 Hz	$n = 0,6$,
30 Hz	$n = 0,7$,
40 Hz	$n = 1,2$.

Das Maximum des Spektrums verschiebt sich mit zunehmender Entfernung zu tieferen Frequenzen hin.

Die Straßenbahnerschütterungen enthalten Frequenzen zwischen 7 und 32 Hz, in 5 m Abstand auch Anteile zwischen 50 und 75 Hz. Es dominieren Pulse um 20 Hz. Die Maximalamplituden im Zeitverlauf nehmen mit $n = 0,65$ ab.

2.1.2 Vergleich zwischen Theorie und Messung

Sowohl in der Theorie als auch bei den Messungen wurden zum Teil sehr verschiedene Gesetzmäßigkeiten der Amplitudenabnahme mit der Entfernung gefunden. Um alle Gesetze miteinander vergleichen zu können, wird als Bezugspunkt das einfache Potenzgesetz $A \sim r^{-n}$ herangezogen. Das bedeutet, daß alle Gesetzmäßigkeiten nur durch den Exponenten n (und gegebenenfalls durch Abweichungen vom Potenzgesetz) charakterisiert werden. Die wichtigsten Ergebnisse sind in folgender Aufstellung zusammengefaßt:

Messung	n	Bemerkungen
Köln-Thielenbruch	0,65	
Berlin-Britz	0,3-1	deutlich exponentiell
Dachau (Schotteroberbau)	1	
Dachau (feste Fahrbahn)	1	außer Nahbereich
Theorie		
gleichphasige Streckenlast	0 und 0,5	Nah- und Fernbereich
zufällige Streckenlast	0,5	außer Nahbereich
Dämpfung	exponentiell	für jede Frequenz
Dämpfung + Rauschen	1	

Die Exponenten bei den Messungen gelten für die zeitlichen Maximalwerte, die theoretischen Exponenten für den quadratischen Zeitmittelwert. Es besteht jedoch bei stationären Zeitvorgängen ein fester Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen. Für einige Stichproben wurden bei den Messungen auch die quadratischen Zeitmittelwerte ausgewertet, wobei sich keine Unterschiede zum Abnahmeverhalten der Maximalwerte zeigten.

Die angegebenen Abnahmeexponenten weisen sowohl bei der Theorie als auch bei den Messungen eine große Spannweite auf. Bei den Messungen erklärt sich dies durch den zum Teil sehr unterschiedlichen Charakter der Erschütterungen. In Köln-Thielenbruch dominieren die tiefen Frequenzen bis 30 Hz, in Berlin-Britz gibt es eine herausragende Frequenz von 20 Hz. In Dachau dagegen war die Anregung ziemlich breitbandig. Bei den theoretischen Ergebnissen ist zu beachten, daß die Werte 0 und 0,5 der beiden Streckenlastfälle für den Boden ohne Materialdämpfung gelten. Da bei den Messungen jeweils eine stärkere Abnahme festgestellt wurde, ist offensichtlich die Materialdämpfung von großer Bedeutung für die Amplitudenabnahme.

Eine zutreffende theoretische Beschreibung der Meßergebnisse scheint die zufällige Streckenlast mit Materialdämpfung des Bodens zu sein, wobei zufällige Streckenlast bedeutet, daß die einzelnen Achs- oder Radanteile der Erregung unkorreliert sind. Für eine schmalbandige Anregung wie etwa in Berlin-Britz bedeutet dies, daß die Amplitudenabnahme im wesentlichen exponentiell gemäß

$$A \sim r^{-0,5} e^{-\alpha r}$$

ist. Im Nahbereich ist der Exponent geringer, etwa $n = 0,3$ so wie gemessen. Für die tieffrequente Anregung in Köln-Thielenbruch ergibt die zufällige Streckenlast mit Materialdämpfung des Bodens in den Entfernungen bis 50 m nur eine geringfügige Anhebung des Abnahmeexponenten in Übereinstimmung mit den Meßergebnissen. Für die breitbandige Anregung in Dachau stimmen Theorie (Dämpfung + Rauschen) und Messung mit einem Exponenten von jeweils $n = 1,0$ gut überein.

2.2 Verhältnis Freifeld-Bauwerk

Bei allen Gebäudemessungen ist jeweils das Amplitudenverhältnis von Bauwerk zu Freifeld ausgewertet worden. Bild 1 zeigt dazu noch einmal die Zusammenfassung der frequenzabhängigen Übertragungsverhältnisse der fünf Gebäudebeispiele. Als theoretisches Gegenstück sind die Ergebnisse einiger Modellrechnungen in Bild 2 zusammengefaßt. Diese Ergebnisse sind dem Bericht [1] des vorangegangenen Forschungsvorhabens entnommen. Es sind die Ergebnisse einer Parameterstudie am einfachen Gebäudemodell (dem "Stabmodell", s. [1] Teil III, Abschnitt 3.4) zusammengefaßt worden, wobei jeweils der Mittelwert über alle Stockwerke aufgetragen ist.

Übereinstimmend zeigen Theorie und Messung eine Tendenz zu geringeren Werten bei höheren Frequenzen, auch der Wertebereich von 0,1 bis rund 2 stimmen in Theorie und Messung überein. Deutliche Unterschiede gibt es jedoch im Detail: Bei den Modellrechnungen weisen alle Beispiele eine leichte Resonanzüberhöhung von 1,5 bis 2 bei der Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz auf. Diese Resonanzüberhöhung konnte in den Messungen nur bei einem Bauwerk beobachtet werden. Weiterhin beginnen die Modellrechnungen mit einem Übertragungsverhältnis von 1 bei der Frequenz 0. Bei vier der fünf gemessenen Gebäude war das Übertragungsverhältnis schon bei der tiefsten ausgewerteten Frequenz kleiner als 1.

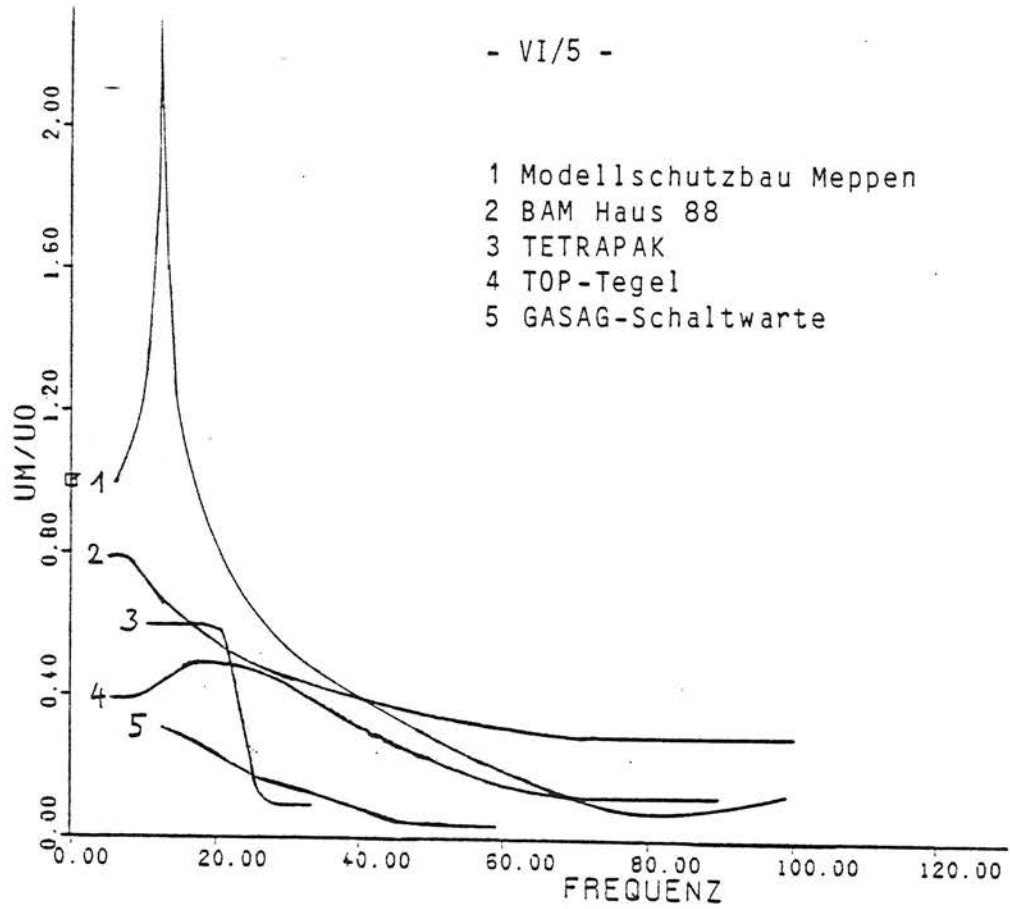


Bild 1 - Übertragungsverhältnis Bauwerksamplituden zu Freifeldamplituden des Bodens, Zusammenfassung aller Gebäudemessungen

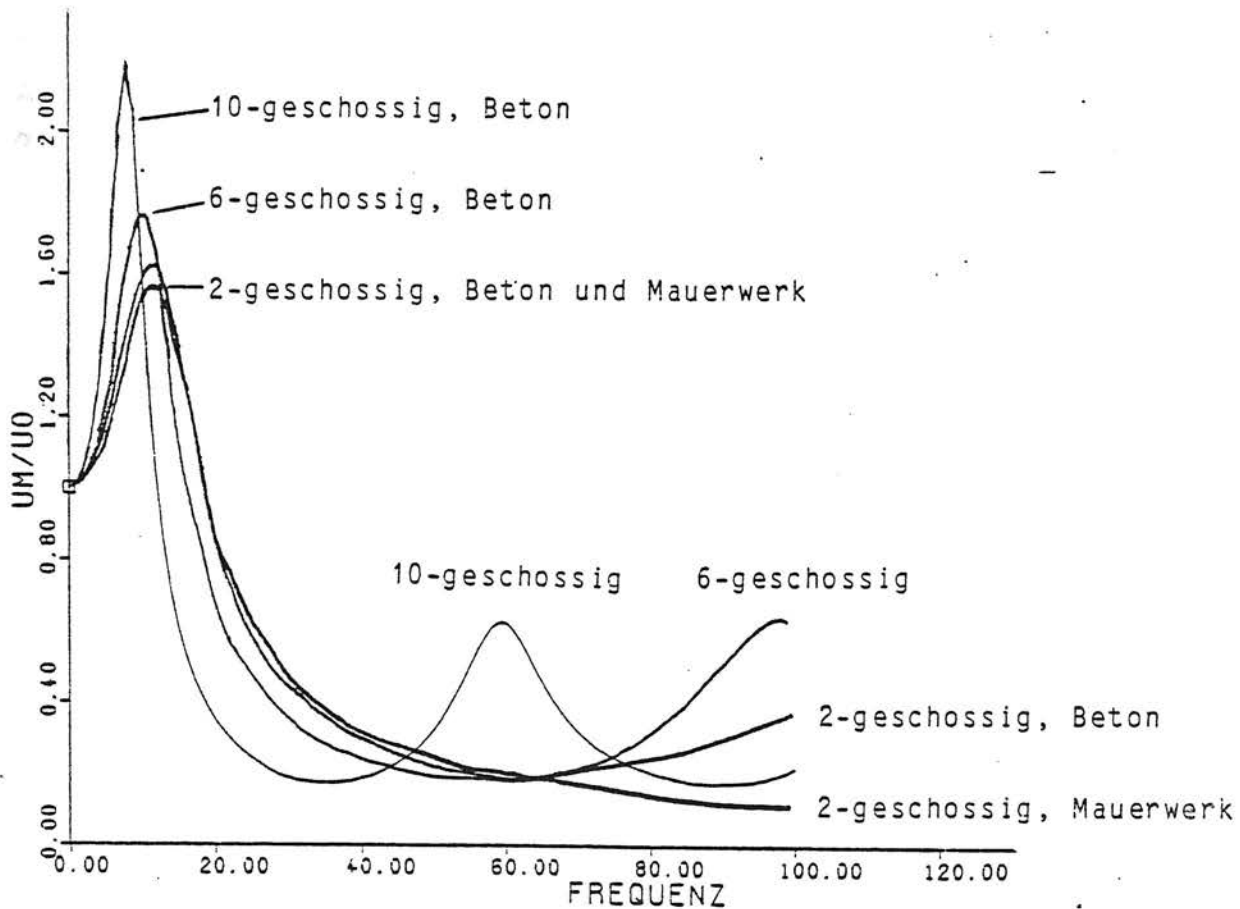


Bild 2 - Übertragungsverhältnis Bauwerksamplituden zur Freifeldamplitude des Bodens, Zusammenfassung einiger Modellrechnungen

Auch hierbei ist der Modellschutzbau in Meppen das einzige Gebäudebeispiel, das mit der Theorie übereinstimmt. Allerdings muß auch darauf hingewiesen werden, daß der Modellschutzbau in Meppen das Objekt mit den kontrollier-testen Versuchsbedingungen war (stationäre harmonische Anregung, wirkliches Freifeld in simultaner Messung an mehreren Meßpunkten ermittelt, feine Fre-quenzauflösung). Die vier von der Theorie abweichenden Gebäudemessungen deu-ten aber zumindest darauf hin, daß die theoretischen Übertragungsverhältnisse die Bauwerk-Boden-Resonanz und allgemein auch den tiefen Frequenzbereich eher überschätzen.

2.3 Deckenresonanz

Bei der Deckenresonanz wird in diesem Bericht hauptsächlich das Amplituden-verhältnis von Deckenmitte zum Freifeld betrachtet und als Resonanzüberhöhung bezeichnet. Dabei muß noch zwischen der Resonanzüberhöhung bei harmonischer Anregung in der Eigenfrequenz und dem Amplitudenverhältnis Decke-Freifeld bei breitbandiger Rauschanregung unterschieden werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Resonanzüberhöhung in der Eigenfrequenz bei einigen Messungen im Vergleich zu den Rechenergebnissen für jeweils in etwa passende Gebäudemodelle. Die Meßergebnisse sind zum Teil bei harmonischer Schwingeranregung in der Resonanzfrequenz erzielt worden (BAM Berlin, Haus 88 - Abschnitt V 3.4 - "2-geschossig" und Modellschutzbau Meppen - Abschnitt V 3.5 - "hohe Deckeneigenfrequenz"), beim 10-geschossigen Hochhaus TOP-Tegel (Abschnitt V 3.1) mußte das Verhältnis aus den Spektren bei U-Bahnverkehr abgelesen werden. Zum Vergleich wurden jeweils Modellrechnungen aus der Para-meterstudie in Abschnitt IV 2.2.1 ausgewählt, die den Bauwerksmerkmalen des Meßobjekts am nächsten kommen. Die Werte von Rechnung und Messungen stimmen sehr gut überein. Insbesondere werden die Größenordnung der maximalen Reso-nanzüberhöhung (im Normalfall zwischen 4 und 15) und die Tendenzen, daß die Resonanzüberhöhung bei hohen Gebäuden und bei hohen Deckeneigenfrequenzen kleiner sind, durch die Meßergebnisse bestätigt.

Vergleich der Resonanzüberhöhungen aus Rechnung und Messung:

Bauwerksmerkmal	Rechnung	Messung
2-geschossig	10	15/6
10-geschossig	4	4
hohe Deckeneigenfrequenz (60 Hz)	1,1	0,8

Die Amplitudenverhältnisse Decke-Freifeld bei Rauschanregung wurden in Abschnitt IV 2.3.2 für alle behandelten Gebäudemodelle berechnet. Beim in der Regel anzutreffenden Lockerboden ist bei allen Gebäudebeispielen die Überhöhung kleiner als 3. Dieses Ergebnis kann für die zum größten Teil mit harmonischer Anregung durchgeführten Messungen nicht überprüft werden. Für einige Beispiele (einzelne Zugvorbeifahrten, Impulse) wurden die Maximalamplituden im Zeitbereich ausgewertet. Die einzelnen Verhältnisse Decke-Freifeld streuen stark, liegen aber jeweils unter 3. Auch die Meßerfahrungen anderer mit Erschütterungsproblemen befaßter Institutionen, die in den letzten Jahren zur Überarbeitung der Norm DIN 4150 "Erschütterungen im Bauwesen" zusammengetragen wurden, lassen sich mit einem Übertragungsverhältnis kleiner oder gleich 3 zwischen Decke und Boden zusammenfassen und bestätigen somit die hier gewonnenen Rechenergebnisse.

3. Der Vergleich von Theorie und Messung im Einzelfall

3.1 Zugverkehr in Berlin-Britz:

Erschütterungsausbreitung bei verschiedenen Zuglängen

In Berlin-Britz sind die Erschütterungen bei Versuchsfahrten mit verschiedenen langen Zügen in 8 bis 100 m Entfernung gemessen worden (Abschnitt III, 5.2.1). Außerdem wurden die Materialdaten des Bodens aus Schwinger- und Impulsmessungen ermittelt (Abschnitt III 5.1). Auf der theoretischen Seite steht ein Rechenprogramm zur Verfügung, mit dem die Erschütterungsausbreitung bei Zugverkehr simuliert werden kann (Abschnitt II 6). Mit diesem Programm, das als Erschütterungsquelle auf die Zuglänge verteilte unkorrelierte Kräfte benutzt, können die Meßergebnisse nachgerechnet werden. Als Eingabedaten werden

die Zuglängen $L = 30, 60, 90$ m,
die Anregungsfrequenz $f = 20$ Hz,
die Bodensteifigkeit $v_R = 235$ m/s
und die Dämpfung $D = 4,5$ %

verwendet. Die Frequenz $f = 20$ Hz kann wegen der Schmalbandigkeit der gemessenen Erschütterungen zugrunde gelegt werden.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Bild 3 dargestellt, zum direkten Vergleich sind die glatt angenäherten Meßergebnisse aus Bild III C1-12 eingetragen. Man kann daraus ablesen, daß die Kurvenverläufe der einzelnen Fälle sowie die Tendenz bei veränderlicher Zuglänge richtig erfaßt werden. Die Amplituden-Abstands-Gesetze haben für kleinere Entfernungen zunächst eine kleinere Neigung als $n = 0,5$. Mit zunehmender Entfernung wird die Neigung stärker, die Kurve bekommt eine exponentielle Gestalt, wobei diese Tendenz bei der kürzesten Zuglänge am stärksten ist. Die Amplitudenunterschiede bei verschiedenen Zuglängen sind insbesondere im Nahbereich gering.

3.2 Modellschutzbau Meppen: Verhältnis Freifeld-Bauwerk

Für den eingeschossigen, einräumigen Modellschutzbau aus Stahlbeton liegen sowohl Meßergebnisse (Abschnitt V 3.5) als auch Rechenergebnisse (Abschnitt IV 3.3) vor. Das Bauwerk wurde bei harmonischer Schwingeranregung verschiede-

Amplitudenabnahme mit der Entfernung

nq Quellen, zufaellige Phasen Boden :
f = 16.0 Hz vr = 235.0 m/s
L wird variiert D = 4.5 %

Bezugsamplitude: A(Linienquelle)

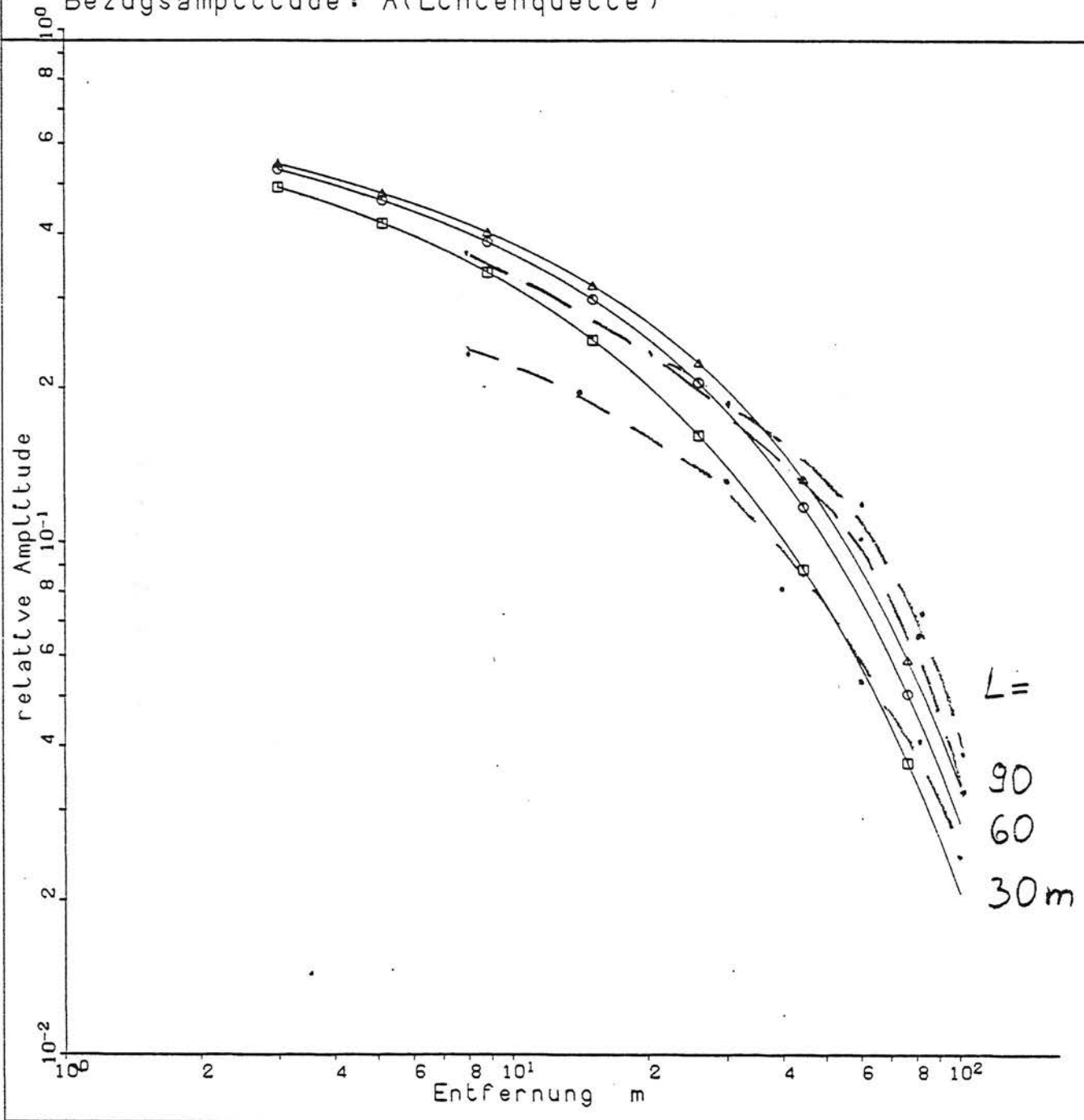


Bild 3 - Amplituden-Abstands-Beziehung bei verschiedenen Zuglängen
Theorie ———
Messungen - - - (Maximalamplituden aus III C1-12)

ner Frequenzen gemessen. Das gleichzeitig gemessene Freifeld liefert einerseits den jeweiligen Bezugswert zur Bildung des Übertragungsverhältnisses und andererseits die Rayleighwellengeschwindigkeit des Bodens ($v_R = 235 \text{ m/s}$) zur Festlegung der Bodensteifigkeit bei den Rechnungen.

Bild 4 zeigt die Rechen- und Meßergebnisse untereinander zum Vergleich. Die Ergebnisse stimmen in allen wesentlichen Merkmalen überein, die genauen Werte und die einzelnen Frequenzen weichen allerdings etwas voneinander ab. Gleiche Merkmale sind bei den Messungen etwas zu tieferen Frequenzen verschoben, was unter Umständen auf eine doch zu steife Modellierung des Bodens zurückzuführen ist. Zunächst der Vergleich der groben Tendenzen:

Bei 10 Hz beginnen jeweils alle Kurven bei ungefähr 1. Es folgt eine Bauwerk-Boden-Resonanz bei 13 Hz (Messung) bzw. 20 Hz (Rechnung). Die Resonanzstärke ist bei der Messung deutlich größer. Oberhalb der Resonanz fallen die Amplituden schnell ab. Im Bereich zwischen 30 und 40 Hz (bzw. 25 bis 40 Hz bei der Messung) liegen die Amplituden der einzelnen Meßpunkte in einem breiten Band zwischen 0,2 und knapp 1. Ab 50 Hz (45 Hz) sind die Amplituden deutlich kleiner und einheitlicher. Bei 60 Hz (55 Hz) sind die Deckenamplituden maximal, wobei die Überhöhung in der Rechnung deutlich größer ist. Bei 80 Hz wird ein Minimum erreicht, danach steigen die Amplituden wieder leicht an. In diesem Bereich sind die gemessenen Amplituden etwas kleiner.

Auch im Verhältnis der Amplituden der einzelnen Meßpunkte untereinander werden eine Reihe von Übereinstimmungen sichtbar:

Zunächst bei tiefen Frequenzen sind die Amplituden in Bauwerksmitte, das heißt die Meßpunkte "Deckenmitte" und "Seite unten", am kleinsten. Dieser Effekt ist am deutlichsten bei 20 Hz (15-25 Hz) und ist auf den großen Kipp-schwinganteil an der Bauwerksbewegung zurückzuführen. Bei 40 Hz (30-40 Hz) sind die Amplituden hinten deutlich am kleinsten, die Amplituden vorne am größten (Kippen um das hintere Fundament). Bei 50 Hz (45 Hz) fallen die Amplituden vorn sehr schnell ab, die Amplituden in Bauwerksmitte ("Seite unten") sind relativ am größten. In dieser Frequenz stimmen Wellenlänge im Boden und die Bauwerkslänge überein, so daß sich die verschiedenphasigen Anregungsanteile einer Welle gerade auslöschen und die verbleibenden Amplituden im wesentlichen durch Wandverformungen zustandekommen. Der Frequenzbereich, in dem die Deckenamplituden größer als alle übrigen Amplituden sind, liegt übereinstimmend zwischen 40 und 70 Hz.

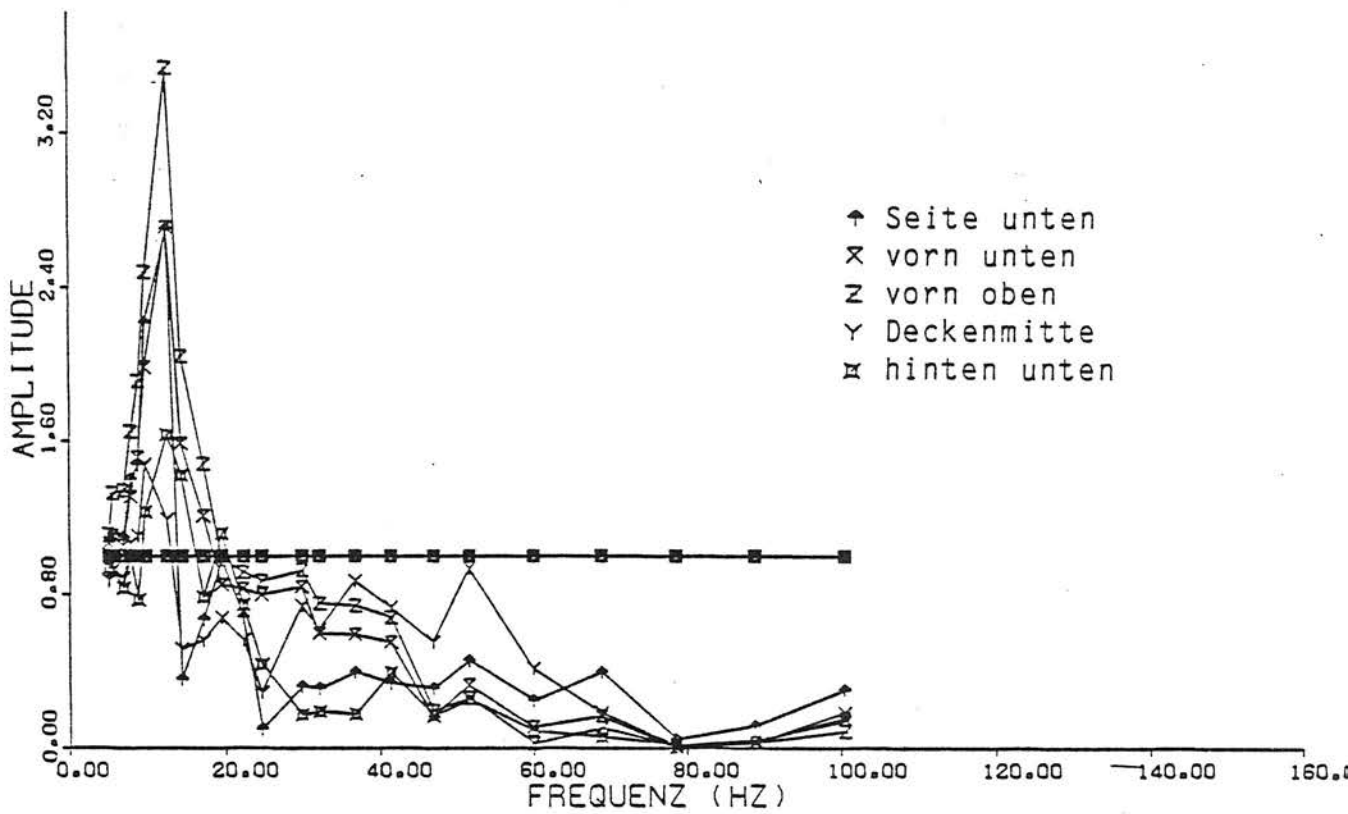
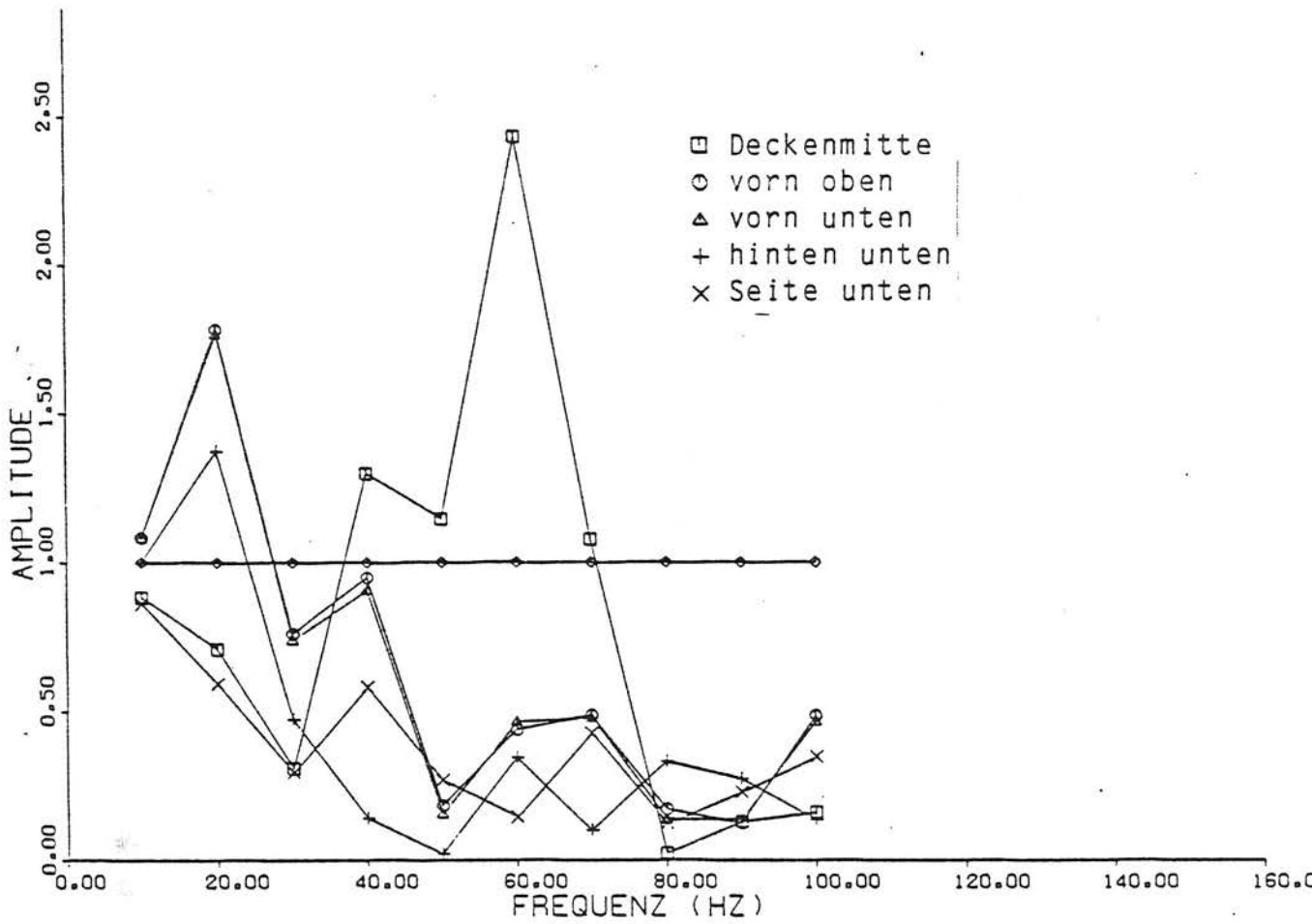


Bild 4 - Modellschutzbau Meppen, Verhältnis der Bauwerksamplituden gegenüber den Freifeldamplituden des Bodens, Vergleich Rechnung (oben) und Messung (unten)

Zum Vergleich der Deckenresonanz muß ergänzt werden, daß die Eigenfrequenz der Decke durch Impulsanregung und durch Abtasten der Frequenzen zwischen 55 und 65 Hz vor Ort zu 60 Hz ermittelt wurde, in Übereinstimmung mit der berechneten Resonanzspitze bei 60 Hz. Beim Ausmessen der Schwingungsform in der Eigenfrequenz zeigte sich ein stark unsymmetrisches Verhalten (je zwei Ecken schwingen gegenphasig), was ein Fehlen der Resonanzüberhöhung erklären würde. Die Unsymmetrie kann durch den Eingang und durch die beschädigte Wand auf der linken Seite zustandekommen. Bei den Rechnungen wurde nur der Eingang berücksichtigt, wobei sich ab 60 Hz schon deutlich unsymmetrisches Schwingungsverhalten zeigte.

An diesem Beispiel ist besonders wichtig, daß hier im Gegensatz zu den übrigen Messungen die Bauwerk-Boden-Resonanz deutlich gemessen wurde. Zu den Abweichungen bei der Resonanzfrequenz und Resonanzüberhöhung läßt sich folgendes sagen: Als mögliche Erklärungen kommen eine geringere Bodensteifigkeit, eine geringere Fundamentfläche oder eine größere schwingende Masse (die "mitschwingende Bodenmasse") in Betracht. Nimmt man dazu einen 1-Massen-Schwinger mit den Feder- und Dämpferwerten eines Kreisfundaments, so ist

$$f_0 \sim \frac{\sqrt{G}}{\sqrt{m}} F^{1/4} \quad \text{und}$$

$$D \sim \frac{F^{3/4}}{\sqrt{m}} .$$

Das heißt, Eigenfrequenz f_0 und Dämpfung D sind beide umgekehrt proportional zur Wurzel der Masse m . Beide Größen nehmen mit der Fundamentfläche F zu, die Eigenfrequenz allerdings nur geringfügig (mit $F^{1/4}$), die Dämpfung ist annähernd proportional ($F^{3/4}$). Die Bodensteifigkeit (Schubmodul G) beeinflusst nur die Eigenfrequenz etwas.

Gegenüber der Rechnung sind die gemessenen Werte für f_0 und D jeweils um den Faktor 0,6 kleiner. Dies ließe sich am leichtesten mit einer mitschwingenden Bodenmasse erklären, die das 1,5-fache der Bauwerksmasse betragen müßte. Auch eine geringere Fundamentfläche kann beide Unterschiede der Tendenz noch erklären. Wäre die Fundamentfläche nur halb so groß wie in der Rechnung, so hätte man die gemessene Dämpfung (Resonanzüberhöhung). Dies würde aber zur Erklärung der niedrigen, gemessenen Eigenfrequenz nicht ausreichen. Dazu müßte noch zusätzlich die Bodensteifigkeit fast halbiert werden.

Zur "mitschwingenden Bodenmasse", die die Meßergebnisse am leichtesten erklären würde, ist zu bemerken, daß sie nicht in die Theorie des homogenen Halbraums paßt. Die Erklärung der Meßergebnisse durch eine kleinere Fundamentfläche bleibt im Rahmen der Halbraumtheorie, ist allerdings nicht ganz befriedigend. Eine kleinere Fundamentfläche als konstruktiv vorgesehen ist durchaus realistisch. Sie kann auf einem unvollständigen Kontakt des Fundaments mit dem Boden beruhen. Bei anderen auf den Boden aufgelegten Meßobjekten waren solche Hohllagen festgestellt worden, und die Meßergebnisse zeigten dementsprechend eine sehr starke Resonanz bei einer tieferen Frequenz als erwartet.

3.3 BAM Berlin, Haus 88: Deckenresonanz bei harmonischer Anregung

Bei den Versuchen mit harmonischer Schwingeranregung war im 1. Stock des 2-geschössigen Gebäudes "BAM Haus 88" die Deckenresonanz deutlich gemessen worden (Abschnitt V 3.4). Aus der Parameterstudie zur Deckenresonanz (Abschnitt IV 2.2.1) wurde ein System mit ähnlicher Struktur und Abmessungen ausgewählt: die 2-geschossige Standardstruktur auf Lockerboden mit dünneren Wänden (um die geringere Steifigkeit der Mauerwerkswände zu erfassen). In Bild 5 sind die jeweiligen Ergebnisse zum Vergleich noch einmal dargestellt. Man findet eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Resonanzfrequenz (ca. 12 Hz) und der Resonanzüberhöhung (15 bzw. 12 und 17) sowie in einigen Einzelheiten (relatives Maximum bei 9 Hz, Fundamentminimum bei 13 Hz).

3.4 Zusammenstellung übereinstimmender Einzelheiten

3.4.1 Emission und Transmission

Im theoretischen Teil I dieses Berichts wurde abgeleitet, daß der instationäre Charakter der Erschütterungsanregung am Gleis (die Achsüberfahrten) schon in einiger Entfernung (etwa 15 m) keine Bedeutung mehr hat. Dies wird durch die Messungen bestätigt: Bild III C2-1 zeigt die Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe der Schwelle und in 3, 20 und 75 m Entfernung. An der Schwelle sind die Achsüberfahrten deutlich zu erkennen. In 3 m Entfernung ist noch ein deutliches An- und Abschwollen der Amplituden bei jeder Überfahrt

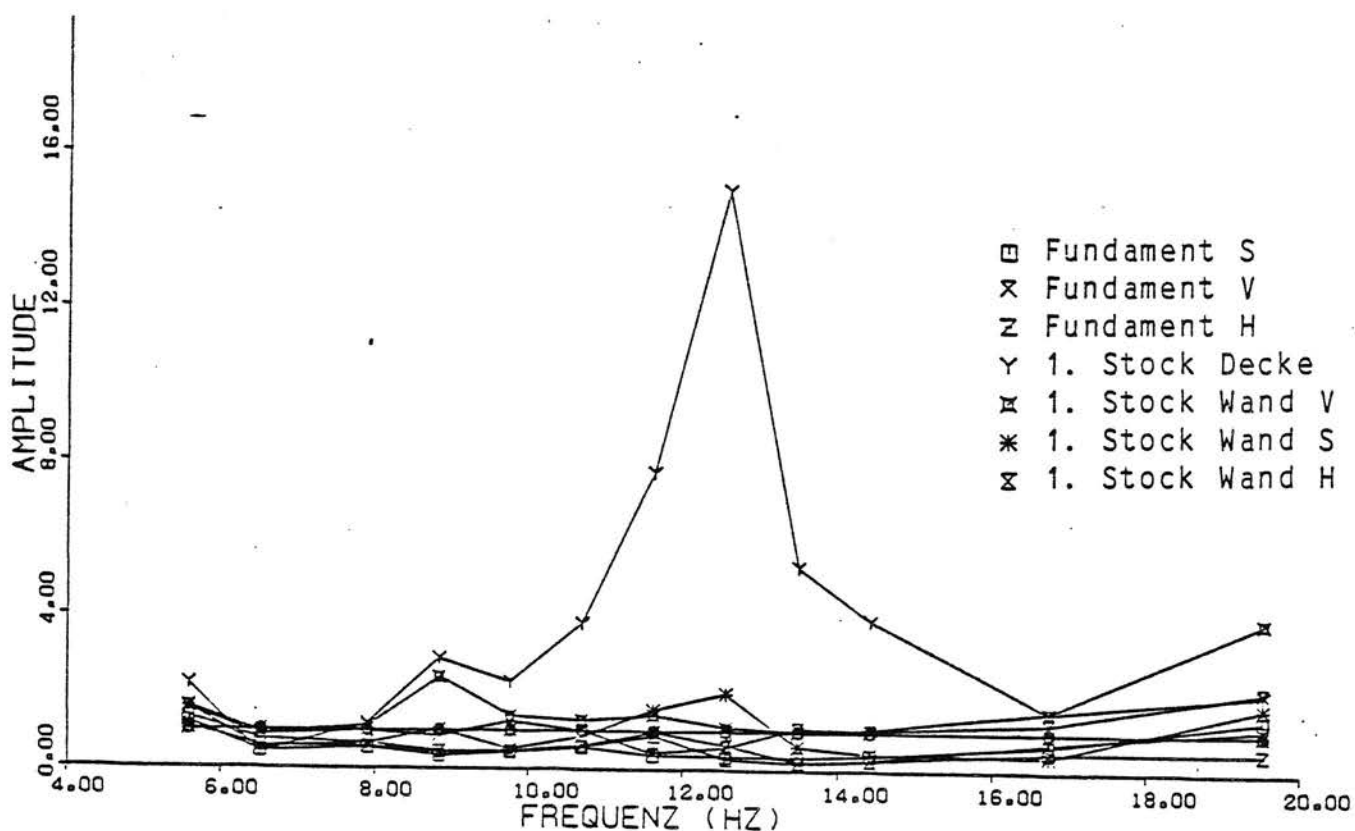
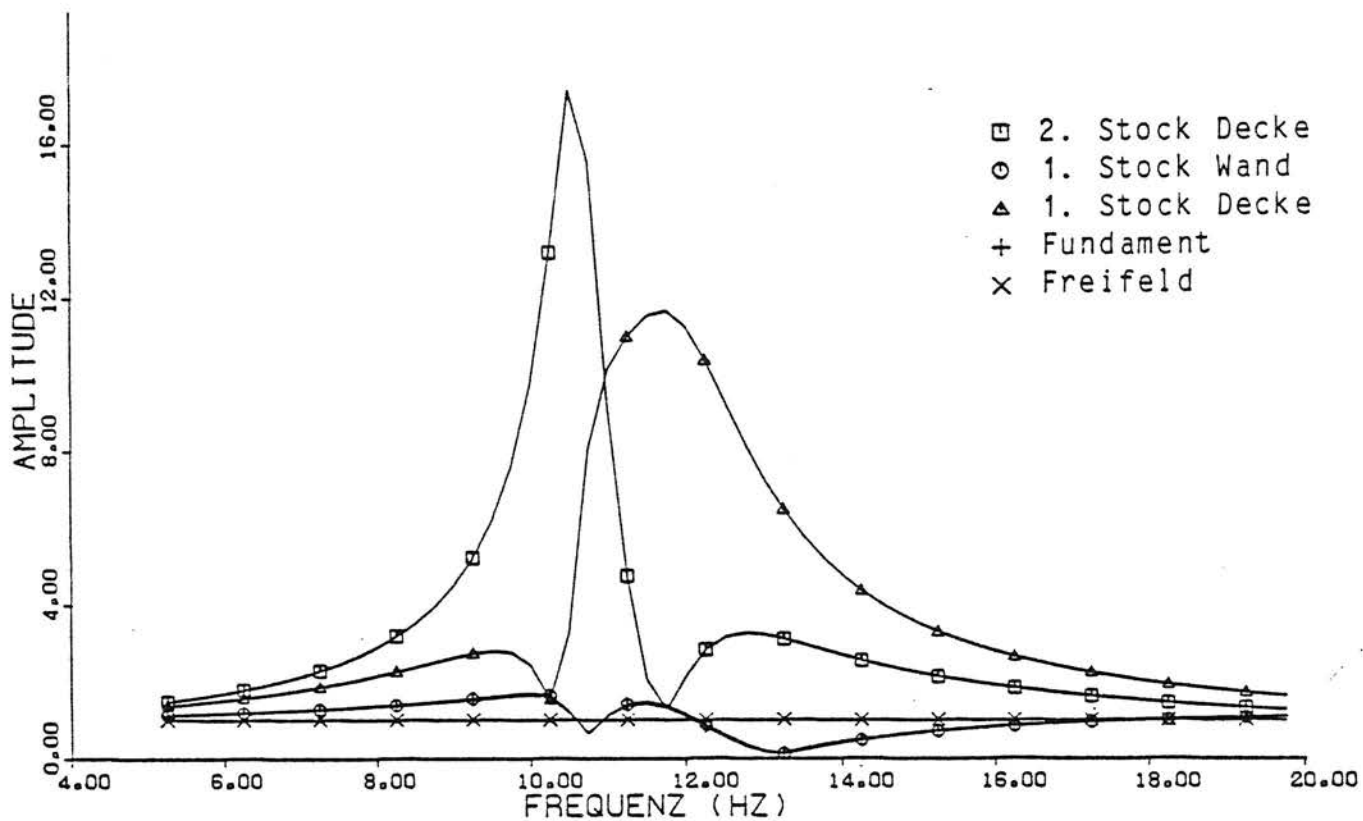


Bild 5 - BAM Haus 88, Verhältnis der Bauwerksamplituden gegenüber den Freifeldamplituden des Bodens, Vergleich Rechnung (oben: 2 Stockwerke, Standardmaße außer $d_w = 0,15$ m) und Messung (unten)

sichtbar. Dagegen besteht die Schwingung in 20 m Entfernung aus einem gleichmäßigen Rauschen mit regellosen Schwankungen.

Die ungleiche Charakteristik der Schwingungen in Gleisnähe und in einiger Entfernung führte zu dem Schluß, daß Messungen am Gleis oder in unmittelbarer Umgebung die Erschütterungsanregung nicht zutreffend erfassen. Dies wird ebenfalls durch Messungen bestätigt: Zum einen ist auf Bild III C2-1 zu sehen, daß an der Schwelle eine sehr tieffrequente Schwingung (etwa 10 Hz) dominiert, die in der Umgebung nicht mehr festzustellen ist. Zum anderen war als wesentliches Ergebnis der Messung herausgestellt worden, daß bei der festen Fahrbahn zwar am Gleis eine 10-mal kleinere Schwingung als beim Schotteroberbau auftritt, in der Umgebung (ab 5 m) aber kein Unterschied zwischen den Amplituden bei beiden Oberbauarten mehr festzustellen ist.

3.4.2 Immission

Bei der Berechnung der Bauwerksschwingungen hatte sich im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] die sogenannte Wandfrequenz (die Eigenfrequenz der vertikal schwingenden Wand auf starrem Untergrund) als eine wesentliche Kenngröße neben der Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz herausgestellt. Beim Bauwerk auf Lockerboden kennzeichnet sie die Frequenz, bei der die stärkste Abminderung der Amplituden durch die Bauwerksträgheit erreicht ist. Bei niedrigen Gebäuden liegt diese Frequenz allerdings sehr hoch (etwa um 100 Hz). Von den gemessenen Gebäuden kommt deshalb nur das zehngeschossige Hochhaus TOP-Tegel in Betracht, um diese "Wandfrequenz" zu beobachten. In Bild V 12 sind die Spektren der Meßpunkte in verschiedenen Stockwerken aufgetragen. Man erkennt einen "Resonanzbereich" um 9 Hz, bei dem das Fundament die kleinsten Amplituden aufweist und die Amplituden mit der Höhenlage im Gebäude zunehmen - in Übereinstimmung zum theoretischen Bauwerksverhalten in der Wandfrequenz. Die Frequenz von 9 Hz stimmt etwa mit der theoretisch berechneten Wandfrequenz für dieses Bauwerk überein, wobei allerdings die Deckenmassen mitberücksichtigt werden müssen.

Im theoretischen Teil IV dieses Berichts ist ausführlich das Resonanzverhalten der Decken und insbesondere der Einfluß des Baugrunds auf die Resonanzüberhöhung untersucht worden. Zum qualitativen Vergleich mit diesen Ergebnissen bieten sich die Messungen am zweigeschossigen Gebäude "TETRAPAK, Berlin-Heiligensee" (Abschnitt V 3.2) an. Dabei ist einerseits sehr genau die Eigenfrequenz und Dämpfung der Decke gemessen worden, andererseits sind in den Zeitverläufen von Boden, Fundament und Deckenmitte ganz deutliche Frequenzverschiebungen sichtbar geworden.

Bei der Impulsanregung der Decke sind die Amplituden auch vom Fundament und Boden gemessen worden, und man erkennt in Bild V 16, wie stark selbst der Boden in 5 m Entfernung des Gebäudes noch an der Eigenschwingung der Decke beteiligt ist. Das Amplitudenverhältnis von Fundament (Mittelwert der Meßpunkte FU und D2) zu Deckenmitte beträgt immerhin 0,05. Die Modellrechnungen mit Krafterregung in Deckenmitte (vgl. Abschnitt IV 2.2.2) ergaben dazu übereinstimmend ein Verhältnis von 0,06 (Bild V A-14). Weiterhin belegt der hohe gemessene Dämpfungswert von $D = 3,4 \%$ bei dieser Stahlbetonrohbaudecke, der höchstens eine Materialdämpfung von 1 % zugeordnet werden kann, daß der Boden entscheidend für die Dämpfung der Deckeneigenschwingung verantwortlich ist.

Die Zeitverläufe der Boden-, Fundament- und Deckenmeßpunkte (Bild V 17 und 18) zeigen eine auffällige Frequenzverschiebung. Aus der breitbandigen Bodenschwingung werden am Fundament die hohen (in der Nähe der Deckeneigenfrequenz liegenden) Frequenzen herausgefiltert, während in der Deckenmitte die Deckeneigenfrequenz klar dominiert. Dieser Effekt ist auch bei den Modellrechnungen durchgängig beobachtet worden und ist als Schwingungstilgung eines 2-Massenschwingers zu erklären.

4. Schlußfolgerungen für die Erschütterungsprognose

4.1 Erschütterungsquelle (Emission)

Der Vergleich zwischen Theorie und Messung legt folgende Idealisierung der Erschütterungsanregung durch Zuganregung nahe:

Die Anregung besteht aus über die Zuglänge verteilten unkorrelierten Punktlasten. Es ist ein mehr oder weniger breitbandiges Rauschen, das für einen mitfahrenden Beobachter stationär ist. (Für einen etwas vom Gleis entfernten Beobachter ist der Vorgang immer noch quasi-stationär während der Vorbeifahrt, und nur in unmittelbarer Gleisnähe ist der Vorgang deutlich instationär mit einzelnen Achsüberfahrten.)

4.2 Erschütterungsausbreitung durch den Boden (Transmission)

Für die Erschütterungsausbreitung kann die oben angegebene Anregung auch vereinfacht als ortsfest betrachtet werden. Das zugehörige Amplituden-Abstands-Gesetz ist in Abschnitt II 6 berechnet worden. Es stimmt im wesentlichen mit dem Amplituden-Abstands-Gesetz einer äquivalenten Punktlast überein. Lediglich im Nahbereich wird die Neigung der Amplituden-Abstands-Kurve etwas kleiner. Die Abweichungen sind aber so gering, daß es gerechtfertigt ist, vereinfachend nur das Punktlastgesetz zu benutzen. Für eine einzelne Anregungsfrequenz bedeutet das eine Amplitudenabnahme

$$A \sim r^{-0,5} e^{-\alpha r}$$

mit der Potenz $n = 0,5$ und einem exponentiellen Faktor $e^{-\alpha r}$ aufgrund der Materialdämpfung. Für ein breitbandiges Rauschen wird daraus näherungsweise eine Amplitudenabnahme mit $n \approx 1$

$$A \sim r^{-1} .$$

Diese Gesetzmäßigkeiten sind durch Messungen bestätigt.

4.3 Erschütterungsübertragung in Gebäude (Immission)

Der Vergleich zwischen Theorie und Messung zeigt, daß das im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1], Teil III abgeleitete Näherungsmodell eines vertikal

schwingenden Stabes brauchbar ist. Für niedrige zum Beispiel zweigeschossige Gebäude geht dieses Modell im betrachteten Frequenzbereich von 0 bis 100 Hz in das 1-Massen-Modell über. Es erklärt damit insbesondere die Erschütterungsabminderung (Bauwerk gegenüber Boden) mit größer werdenden Frequenzen durch die Trägheit des Gebäudes. Für höhere Gebäude zeigt das Stabmodell die Grenzen dieser Abminderung auf: Ab der sogenannten "Wandfrequenz" schwingt das Bauwerk stark in sich, so daß die Bauwerksträgheit nicht weiter erschütterungsmindernd wirkt. Das Übertragungsverhältnis Boden-Bauwerk bleibt dann im wesentlichen konstant und ist durch das Verhältnis der Wellenwiderstände von Bauwerk und Boden bestimmt.

Das Modell weist bei einer in der Regel tiefen Frequenz (um 10 Hz) eine Bauwerk-Boden-Resonanz mit einer leichten Überhöhung (ca. Faktor 2) auf. Das scheint im Vergleich zu den meisten Messungen eher unrealistisch zu sein. Die Meßergebnisse lassen es gerechtfertigt erscheinen, bei einer Erschütterungsprognose davon auszugehen, daß für tiefe Frequenzen das Bauwerk die gleichen Amplituden wie das Freifeld aufweist.

Während einerseits die Bauwerk-Boden-Resonanz im Modell eher überschätzt wird, ist auf der anderen Seite die Resonanz der Decken in dem einfachen Stabmodell nicht berücksichtigt. Eine deutliche Deckenresonanz ist insbesondere bei einfeldrigen Decken großer Spannweite und bei steifem Baugrund zu erwarten. Zur Prognose der Erschütterungen aus Schienenverkehr können die Übertragungsverhältnisse Deckenmitte zu Freifeld des Bodens bei Rauschanregung benutzt werden, die in Abschnitt IV 2.3.1 für einige Bauwerks- und Baugrundsituationen zusammengestellt sind. Für Lockerboden ($v_s \leq 200$ m/s) sind die Deckenamplituden maximal um den Faktor 3 gegenüber dem Boden verstärkt. Ist die Erschütterungsanregung schmalbandig und liegt eine Deckeneigenfrequenz in diesem Frequenzbereich, so kann zunächst als konservative Abschätzung die Resonanzüberhöhung in der Resonanzfrequenz herangezogen werden, die in Abschnitt IV 2.2.1.2 entsprechend zusammengefaßt sind. Für Lockerboden liegen diese Resonanzüberhöhungen zwischen 3 und 20. Der Weg zu einer weniger konservativen Abschätzung ist in Abschnitt IV 2.3.1 aufgezeigt. Die Aussagen zur Deckenresonanz sind durch die Meßergebnisse bestätigt.

4.4 Konsequenzen für das Prognoseprogramm

Ein Rechenprogramm für die Prognose von Erschütterungen aus Schienennahverkehr ist im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] Teil IV ausführlich dargestellt worden. Es enthält alle Ergebnisse, die in [1] aus zweidimensionalen Modellrechnungen gewonnen wurden. Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Messungen und dreidimensionalen Modellrechnungen bestätigen im wesentlichen die Ergebnisse. Es kann in der dargestellten Form befriedigend benutzt werden.

Aus den Messungen und Berechnungen ergeben sich allerdings einige Hinweise zur richtigen oder besseren Nutzung des Prognoseprogramms:

1. Zur Erschütterungsausbreitung stellt das Programm zwei Alternativen zur Verfügung: die Punktlast- und die Linienlastlösung. In Abschnitt II 5 wird dazu gezeigt, daß für eine endlich lange "Linienlast" (die über die Zuglänge verteilte Streckenlast) gerade jeweils die kleinere der beiden Lösungen richtig ist (im Nahbereich die konstante Linienlastlösung, im Fernbereich die abnehmende Punktlastlösung). Für die Anwendung ist allerdings die gleichphasige Streckenlast unrealistisch, wie die Messungen und die Überlegungen in Teil I zeigen. Es ergibt sich, daß die Punktlastlösung mit ausreichender Genauigkeit das Amplituden-Abstands-Gesetz erfaßt. Da diese bereits im Programm enthalten ist, verbleibt nur die Aufgabe, eine der Zusanregung äquivalente Punktlast zu ermitteln.
2. Für die Kennzeichnung der Erregung liegen aus [1] Teil IV eine Reihe von Erregerspektren für verschiedene Nahverkehrszugtypen, Fahrgeschwindigkeiten und Gleissituationen vor. Es handelt sich um Linienlastspektren der Dimension Kraft pro (Gleis-)Länge. Um zu einer Punktlast zu kommen, muß man diese Spektren noch mit einer charakteristischen Länge multiplizieren. Für die (nicht realistische) gleichphasige Streckenlast wäre das die Zuglänge. Möchte man die Zufälligkeit bzw. Unkorreliertheit der einzelnen Anteile berücksichtigen, so ergeben detailliertere Nachrechnungen, daß die in [1] Teil IV dargestellten Spektren benutzt werden können, wenn sie mit einer Lastlänge von etwa 5 m (dem Einflußbereich eines Drehgestells) multipliziert werden.

Ermittelt man sich die Erregerspektren neu, so könnten die gemessenen Amplituden der Umgebung sinnvollerweise mit dem Amplituden-Abstands-Gesetz der "zufälligen Streckenlast" (Abschnitt II 6) unmittelbar auf eine äquivalente Punktlast zurückgerechnet werden. Es erscheint aufgrund der Meßerfahrungen außerdem sinnvoll, geglättete Spektren für die Prognose zu benutzen, wobei auf den gleichen "Energie"inhalt $\int P^2(f) df$ zu achten ist.

3. Zur Berechnung des Bauwerks ist folgendes zu bemerken: Die Fundamente werden im Prognoseprogramm sehr grob durch äquivalente Kreisfundamente ersetzt. Die genauen dreidimensionalen Berechnungen von Gebäudefundamenten (Abschnitt IV 3.2) zeigen aber, daß dies annähernd richtig ist, wenn man das Fundament richtig in Teilflächen zerlegt. Das Kriterium für die richtige Zerlegung ist, daß die dabei entstehenden Streifenfundamente ungefähr ein Seitenverhältnis 5:1 besitzen. Einzelfundamente sind von vornherein unproblematisch.
4. Zur Interpretation der Bauwerksschwingungen gibt der Vergleich Theorie und Messung folgende Hinweise: Es ist nicht sinnvoll, die Amplitudenspektren der einzelnen Stockwerke und die Schwankungen mit der Frequenz zu verfolgen. Stattdessen sollte der Mittelwert über alle Stockwerke und auch der "Mittelwert" über die Frequenzen als aussagekräftiges Ergebnis benutzt werden. Als Mittelwert über die Frequenzen bietet sich die Summe

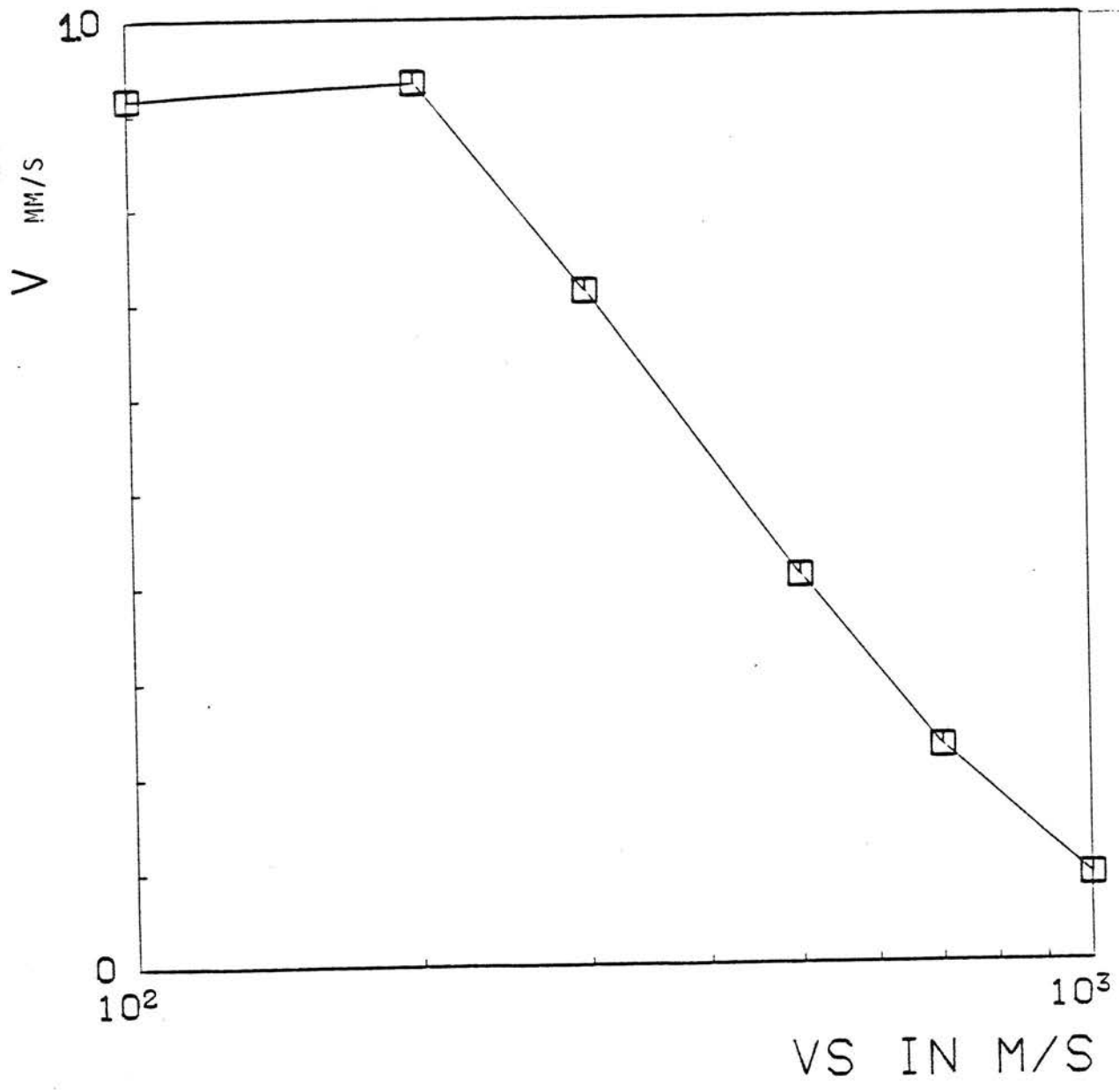
$$\sqrt{\sum_i U(f_i)^2} = M_2(u)$$

an, die zugleich der quadratische Mittelwert des Zeitverlaufs (der Effektivwert) ist. Hinsichtlich der Bauwerk-Boden- und der Deckenresonanz wird auf Abschnitt 4.3 verwiesen.

4.5 Ein Prognosebeispiel zur Übertragungskette Gleis-Boden-Bauwerk

Es wird das Gebäudebeispiel aus [1] Abschnitt III 2.2, ein 6-geschossiger Stahlbetonrahmen mit den Außenabmessungen 20 m x 12 m x 18 m (Länge x Breite x Höhe) verwendet, das sich 20 m neben dem Gleis befindet. Als Anregung wird ein konstantes Lastspektrum zwischen 0 und 100 Hz benutzt. Die Bodensteifigkeit wird variiert.

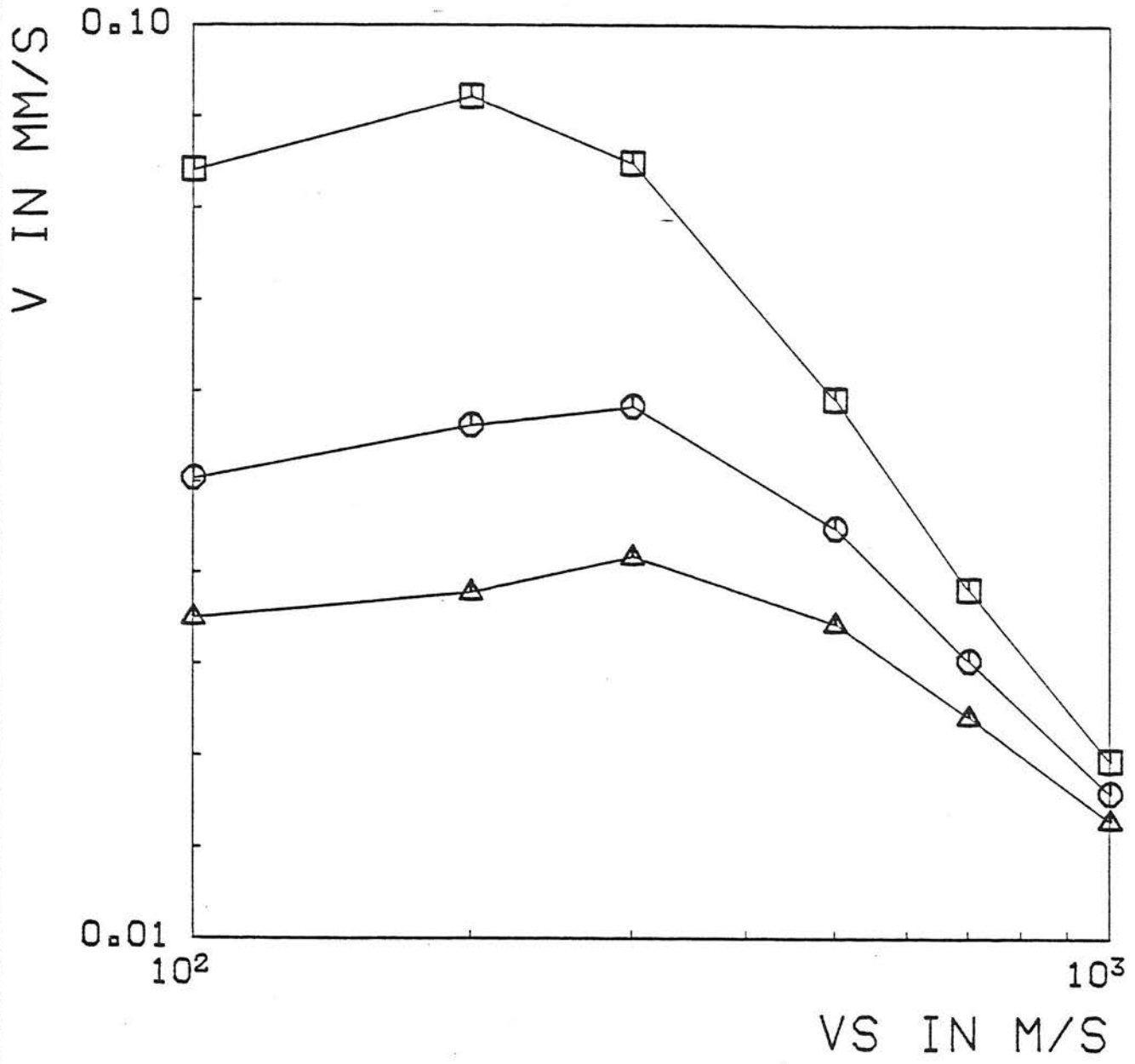
Als Ergebnis wird für jeden Fall der mittlere Effektivwert der Schwinggeschwindigkeiten aller Stockwerke festgehalten und in Abhängigkeit von der Scherwellengeschwindigkeit des Bodens aufgetragen (Bild 6). Es zeigt sich, daß insgesamt die Amplituden beim steifen Baugrund kleiner sind. Die Unterschiede verschieden steifer Lockerböden ($v_s = 100 - 300 \text{ m/s}$) sind dagegen nur geringfügig. Diese ausgleichende Wirkung verschiedener, zum Teil gegenläufiger Übertragungseffekte wird noch deutlicher, wenn man die Materialdämpfung des Bodens vergrößert. Bild 7 zeigt dazu ein Ergebnis der Rad/Schiene-Forschung, bei dem das gleiche Bauwerk bei Anregung durch einen Intercityzug untersucht wurde. Bei 5 Prozent Bodendämpfung ergibt sich praktisch für alle vorkommenden Bodenarten die gleiche (genauer natürlich nur die gleich große!) Gebäudeantwort.



UEBERTRAGUNG GLEIS-BODEN-BAUWERK

QUADRATISCHER MITTELWERT DER SCHWINGGESCHWINDIGKEIT
IM GEBAEUDE BEI KONSTANTEM ERREGERSPEKTRUM FUER
VERSCHIEDENE BODENSTEIFIGKEITEN

Bild 6



UEBERTRAGUNG GLEIS-BODEN-BAUWERK

DER QUADRATISCHER MITTELWERT DER SCHWINGGESCHWINDIGKEIT IM GEBAEUDE FUER VERSCHIEDENE BODENSTEIFIGKEITEN UND -DAEMPFUNGEN, ANREGUNG; IC-ZUG MIT V=200KM/H

- : D = 1%
- : D = 3%
- △ : D = 5%

Bild 7

Literatur zu Teil IV, V und VI

- [1] L. Auersch, F. Krüger: Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienen- gebundenen Stadtverkehrs in Geländeniveau.
Bericht 9 des BMFT Forschungsprogramms "Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden - Teilprogramm Schienennahverkehr", STUVA Köln, BAM Berlin, 1983.
- [2] K.J. Bathe, E. Wilson, F. E. Peterson, W. Wunderlich: SAP IV-B Beschreibung und Benutzerhandbuch. Ein Pro- grammsystem zur linearen statischen und dynamischen Berechnung von Tragwerken.
Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 82-7, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universi- tät Bochum, 1982.
- [3] W. Rücker: Dynamische Wechselwirkung eines Schienen- Schwellen-Systems mit dem Untergrund.
Forschungsbericht 78, BAM Berlin, 1981.