

# **BAM** Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

## **Forschungsbericht 199**

**Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahn-Tunneln  
und dicht benachbarten Gebäuden**

Dr.-Ing. Werner F. Rücker und Dipl.-Ing. Samir Said



Berlin 1994

## Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

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

Die Bundesanstalt hat die Aufgabe, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern, indem sie Werkstoff- und Materialforschung betreibt, die Materialprüfung sowie die chemische Analytik und Sicherheitstechnik stetig weiterentwickelt.

In diesem Rahmen bestehen folgende Arbeitsschwerpunkte:

1. Technisch-wissenschaftliche Grundlagen des Materialwesens, der Sicherheitstechnik und der chemischen Analytik einschließlich zugehöriger Referenzmaterialien und -verfahren

2. Materialsicherung einschließlich Qualitätssicherung, Materialschutz, Recycling
3. Öffentliche technische Sicherheit
4. Technologien im Umwelt- und Gesundheitsschutz
5. Technologien in der Energiesicherung
6. Technologie- und Wissenstransfer

Ihre Arbeiten gliedern sich in:

- A Forschung und Entwicklung, besonders auf denjenigen Gebieten, die der Leistungssteigerung der Wirtschaft, der Sicherheitstechnik sowie der Schaffung und Erhaltung volkswirtschaftlicher Werte dienen,
- B Prüfung und Untersuchung von Stoffen und technischen Produkten auf der Basis von Gesetzen, Verordnungen oder technischen Regeln,
- C Beratung und Information von Bundesministerien sowie Durchführung von Aufgaben, die ihr von diesen im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft übertragen werden, Durchführung von Aufträgen aus der Wirtschaft, Beratung und Information von Wirtschafts- und Verbraucherorganisationen sowie Mitwirkung in nationalen und internationalen Gremien und Normenausschüssen und bei der Technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern.

Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen.



## **Forschungsbericht 199**

### **Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahn-Tunneln und dicht benachbarten Gebäuden**

Dr.-Ing. Werner F. Rücker und Dipl.-Ing. Samir Said

184 Seiten, 132 Abbildungen, 19 Tabellen

Diese Arbeit entstand im Rahmen des BMFT-Vorhabens „Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden, Teilprogramm Schienennahverkehr, BMFT-Vorhaben TV 8618 – Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahn-Tunneln und dicht benachbarten Gebäuden“. Auftragnehmer und Projektleiter war Herr Dr.-Ing. Werner F. Rücker, Laboratorium Baudynamik, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Herausgegeben von der

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
☒ 12200 Berlin  
Telefon (0 30) 81 04-0  
Telefax (0 30) 8 11 20 29

Copyright © 1994 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Am Alten Hafen 113-115 · 27568 Bremerhaven  
☒ Postfach 10 11 10 · 27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 4 60 93  
Telefax (04 71) 4 27 65

ISSN 0938-5533  
ISBN 3-89429-422-1

## Zusammenfassung

Mit dieser Untersuchung sollen Grundlagen zur zuverlässigen Erschütterungsprognose von Nah-, Fern- oder Hochgeschwindigkeitszügen geschaffen werden. Ein besonderes Problem stellen Fälle dar, in denen sich die Trasse dicht an oder unter Gebäuden befindet. Zur Untersuchung solcher Situationen wurden insgesamt 36 verschiedene Tunnel-Gebäude Situationen berechnet und diese Ergebnisse an 2 typischen Gebäuden meßtechnisch verifiziert. Folgende Parameter wurden im einzelnen untersucht: die Tiefenlage der Gebäude neben dem Tunnel, die Lage des Gebäudes relativ zum Tunnel, die Gebäudehöhe, die Gebäudefundamentierung, die Bodensteifigkeit und die Bodendämpfung. Zusätzlich wurden verschiedene Minderungsmaßnahmen wie offene Schlitze, Bodenverfestigung, Baugrubenverbau, massive und schwere Platten auf der Bodenoberfläche, Lichtschächte, Einzelfundamente mit und ohne aussteifende Bodenplatte, Tiefabstimmung des Gleises und des Gebäudes in verschiedenen Frequenzen betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, daß die Tunneldecke bei oberflächennahem Tunnel ein ausgeprägtes Eigenschwingungsverhalten aufweist. Oberhalb der Tunneldeckenresonanz wird das Schwingungs- und Abstrahlungsverhalten des Tunnels unabhängig von der Tiefenlage überwiegend von den elastischen Eigenschaften der Tunnelsohle und der Abstrahlungsdämpfung des Bodens bestimmt. Die Steifigkeit des Bodens ist dann ohne Bedeutung. Der Übergang der Schwingungen vom Boden in das Gebäude ist durch folgende Effekte geprägt: Schwingungen, die Frequenzen besitzen, die größer als die sogenannte Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz sind, werden abgemindert, darunter verstärkt. Die Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz wird durch die Fundament-Bodensteifigkeit und durch die Gesamtmasse des Gebäudes festgelegt. Neben der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz sind die nächsten relevanten Frequenzen die vertikalen Wandeigenfrequenzen. Diese legen die Bereiche fest, bei denen die einzelnen Stockwerke gegeneinander schwingen. Im weiteren sind die horizontalen Eigenfrequenzen des Gesamtbauwerks, die horizontalen Wandeigenfrequenzen und die Biegeeigenfrequenzen der Stockwerksdecken von grundlegender Bedeutung für das Schwingungsverhalten des Bauwerks. Hinsichtlich des Einflusses einer Einbettung gilt, daß das System dadurch versteift und die Systemdämpfung infolge verbesserter Wellenabstrahlung im Boden vergrößert wird. Die Lage des Gebäudes - seitlich oder unmittelbar über dem Tunnel - ist von großer Bedeutung hinsichtlich Art und Größe der Schwingungsübertragung. Während bei einer seitlichen Lage vorwiegend die horizontalen Wandschwingungen angeregt werden, ist dies bei zentraler Lage nicht der Fall. Das seitliche Gebäude wird zudem wesentlich mehr durch die Bodenschwingungen im Bereich der Kellerwände angeregt. Das zentrale Gebäude zeigt demgegenüber eine starke Koppelung mit den Tunnelschwingungen. Ist ein Gebäude ohne weitere Maßnahmen direkt auf der Decke eines Tunnels gegründet, dann wird das Schwingungsverhalten des Gebäudes einschließlich der Stockwerksdecken stark bis ausschließlich von dem Schwingungsverhalten der Tunneldecke bestimmt.

Als wirksame Abschirmmaßnahmen erwiesen sich Schlitze und Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Gebäude, Feder-Masse-Systeme unter der Fahrbahn, Bauwerksabstimmung mit niedrigen Abstimmfrequenzen sowie einseitige oder beidseitige Lichtschächte neben den Gebäuden. Nichtwirksam sind Maßnahmen wie Baugrubenverbau, steife und schwere Platte auf der Bodenoberfläche sowie die Art der Fundamentierung.



## Summary

This investigation serves as a basis for the prognosis of vibration of urban and highspeed trains. Special problems arise, when the railway track is very close to or under buildings. In order to investigate such situations computer models of 36 tunnel-building-systems are analyzed. The results from those computations are verified by measurements at two typical buildings. The following parameters are investigated: The embedment of the building into the soil, the relative location of the building to the tunnel, the height of the building, the kind of the construction of the foundations, the stiffness and damping of the surrounding soil. In addition different vibration reduction measures like open trenches, soil stiffening, excavation construction, very stiff and very heavy plates on the soil surface, light-shafts, single foundations with and without stiffening plates, and mass-spring-systems for the track and the building are analyzed. The results show, that the ceiling of a tunnel founded near the soil surface has a strong resonance. Above the resonance frequency of the ceiling of the tunnel mainly the elastic properties of the bed-plate of the tunnel and the damping values of the soil determine the vibrational behaviour of the tunnel and the propagation into the soil. The soil stiffness is of less importance. The interaction between the soil and the building is featured by: vibrations with frequencies above the so-called soil-building-frequency are reduced otherwise amplified. The soil-building frequency is the resonant frequency of the whole building resting on an elastic foundation. Further relevant frequencies of the building are the horizontal resonant frequency of the whole building, the vertical and horizontal resonant frequencies of the walls and the vertical resonant frequencies of the ceilings of the building. There is a strong influence to each other. Embedment of the building into the soil increases the stiffness and the damping of the whole building, with the effect that the maximum amplitudes at the ceilings are reduced significantly. The relative position of the building to the tunnel is of great importance. Is the building beside the tunnel especially the horizontal vibration of the ceiling walls and the horizontal vibration of the whole building are strongly activated. Is the building in a central position above the tunnel the whole building is influenced by the frequency behaviour and structural vibrations of the tunnel.

Significant vibration reduction measures are trenches and soil stiffening between tunnel and building, mass-spring-systems between track and tunnel, absorber systems at the foundation of the building and light-shafts at both sides of the building. No significant reduction can be achieved by excavation constructions, stiff and heavy plates on the surface of the soil and different kind of constructions of the foundations.

# Inhaltsverzeichnis

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 1     | AUSGANGSLAGE                                    | 7   |
| 1.1   | Bisherige Ergebnisse                            | 7   |
| 1.2   | Untersuchungsprogramm                           | 8   |
| 2     | GRUNDLAGEN                                      | 9   |
| 2.1   | Quellengeometrie und Zeitverhalten              | 9   |
| 2.2   | Grundlagen der Ausbreitung                      | 9   |
| 2.3   | Ausbreitung im homogenen Halbraum               | 9   |
| 2.3.1 | Verhalten bei harmonischer Anregung             | 9   |
| 2.3.2 | Verhalten bei impulsförmiger Anregung           | 11  |
| 2.3.3 | Harmonische Linien- und Streckenlasten          | 11  |
| 2.3.4 | Harmonische Flächenlasten                       | 12  |
| 2.3.5 | Stochastische Anregung                          | 12  |
| 2.3.6 | Zusammenfassung                                 | 12  |
| 2.4   | Geschichteter und inhomogener Halbraum          | 13  |
| 2.4.1 | Harmonisch angeregte Schicht                    | 13  |
| 2.4.2 | Impulsförmig angeregte Schicht                  | 13  |
| 2.4.3 | Impulsförmig angeregter inhomogener Halbraum    | 13  |
| 2.5   | Geometrische Effekte                            | 14  |
| 2.5.1 | Hohlräume                                       | 14  |
| 2.5.2 | Damm und Einschnitt                             | 14  |
| 2.6   | Zusammenfassung                                 | 14  |
| 2.7   | Boden-Bauwerks-Wechselwirkung                   | 15  |
| 3     | NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN                       | 25  |
| 3.1   | Vorbemerkung                                    | 25  |
| 3.2   | Untersuchungsprogramm                           | 25  |
| 3.3   | Beschreibung des Rechenverfahrens               | 25  |
| 3.3.1 | Teilbereich I                                   | 26  |
| 3.3.2 | Teilbereiche L und R                            | 26  |
| 3.3.3 | Teilbereich U                                   | 28  |
| 3.3.4 | Gesamtsteifigkeitsbeziehung                     | 29  |
| 3.4   | Systemvariationen                               | 29  |
| 3.5   | Ergebnisdarstellung                             | 31  |
| 3.6   | Ergebnisse Tunnel-Boden                         | 31  |
| 3.6.1 | Tiefenlage des Tunnels                          | 31  |
| 3.6.2 | Bodensteifigkeit                                | 32  |
| 3.7   | Ergebnisse Tunnel-Boden-Bauwerk                 | 33  |
| 3.7.1 | Allgemeines                                     | 33  |
| 3.7.2 | Schwingungsformen                               | 34  |
| 3.7.3 | Frequenzspektren                                | 35  |
| 3.8   | Zusammenfassung                                 | 37  |
| 4     | SCHWINGUNGSMINDERNDE MAßNAHMEN                  | 77  |
| 4.1   | Allgemeines                                     | 77  |
| 4.2   | Offene Schlitze                                 | 77  |
| 4.3   | Bodenverfestigung                               | 78  |
| 4.4   | Baugrubenverbau, Lichtschächte und Bodenplatten | 78  |
| 4.5   | Feder-Masse-Systeme                             | 79  |
| 4.5.1 | Im Tunnel                                       | 79  |
| 4.5.2 | Am Gebäude                                      | 79  |
| 4.6   | Zusammenfassung                                 | 80  |
| 4.7   | Bauzustände                                     | 80  |
| 5     | MESSUNGEN                                       | 108 |
| 5.1   | Allgemeines                                     | 108 |
| 5.2   | Beschreibung der Meßobjekte                     | 108 |

|         |                                      |     |
|---------|--------------------------------------|-----|
| 5.2.1   | Paul Löbe Oberschule                 | 108 |
| 5.2.2   | Technisches Zentrum Sparkasse Berlin | 108 |
| 5.3     | Erregerquellen                       | 109 |
| 5.3.1   | Paul Löbe Oberschule                 | 109 |
| 5.3.2   | Technisches Zentrum Sparkasse Berlin | 109 |
| 5.4     | Meßpunkte                            | 109 |
| 5.4.1   | Paul Löbe Oberschule                 | 109 |
| 5.4.2   | Technisches Zentrum Sparkasse Berlin | 110 |
| 5.5     | Meßeinrichtung                       | 110 |
| 5.6     | Ergebnisauswertung und -darstellung  | 111 |
| 5.7     | Meßergebnisse                        | 111 |
| 5.7.1   | Paul Löbe Oberschule                 | 111 |
| 5.7.1.1 | Impulse                              | 111 |
| 5.7.1.2 | Hydropuls                            | 112 |
| 5.7.1.3 | U-Bahnerschütterungen                | 114 |
| 5.7.2   | Technisches Zentrum Sparkasse Berlin | 117 |
| 5.7.2.1 | Zeit- und Amplitudenverhalten        | 117 |
| 5.7.2.2 | Frequenzverhalten                    | 122 |
| 5.7.2.3 | Übertragungsverhalten                | 122 |
| 6       | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK         | 174 |
| 7       | LITERATURVERZEICHNIS                 | 177 |



# 1 AUSGANGSLAGE

## 1.1 Bisherige Ergebnisse

Das Laboratorium Baudynamik, Erschütterungsschutz der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung befaßt sich seit 1975 intensiv mit der Untersuchung der Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrsererschütterungen sowie deren Einwirkung auf Gebäude und Menschen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, Grundlagen zu schaffen, die es ermöglichen, bei der Projektierung von neuen Nah-, Fern- oder Hochgeschwindigkeitsstrecken oder bei neuen Bebauungen in der Nähe dieser Strecken die Erschütterungsbelastung zuverlässig zu prognostizieren. Für diese Prognose ist zunächst die Kenntnis der Erschütterungsanregung der verschiedenen Züge bei verschiedenen Fahr- und Streckenzuständen notwendig. Danach müssen die Einflüsse des Untergrundes auf die Art der Erschütterungsausbreitung bekannt sein. Schließlich muß der Einfluß der Wechselwirkung zwischen Boden und Bauwerk auf die Erschütterungsübertragung und letztlich das Schwingungsverhalten der verschiedenen Bauwerke selbst untersucht werden.

Die Entwicklung eines Prognosemodells für Schienenverkehrserschütterungen begann mit Untersuchungen zur Entstehung von U-Bahnerschütterungen und deren Weiterleitung über den Tunnel und das umgebende inhomogene Erdreich an in der Nähe befindliche Gebäude [1]. Diese Arbeiten führten zu einer Methode zur Ermittlung von Erregerspektren von Zügen sowie zu einem Verfahren zur Berechnung der ebenen oder axialsymmetrischen Schwingungsausbreitung im inhomogenen Untergrund mit Einbauten. Diese finiten Rechenverfahren wurden ergänzt durch Rechenverfahren zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von dreidimensionalen Bauwerken, die sich auf dem Untergrund befinden [2]. In nachfolgenden Forschungsvorhaben wurden diese Berechnungsmethoden auf konkrete Situationen angewandt [3], [4]. Hierbei wurden z.B. die Erregerspektren folgender Zugtypen als Eingangsdaten in ein einfaches Prognosemodell ermittelt:

- Straßenbahn GT8;  $v = 40 - 60$  km/h;  
Gerade, Kurve
- Stadtbahnwagen B6;  $v = 40 - 60$  km/h;  
Gerade, Kurve, Weiche
- Stadtbahnwagen N8;  $v = 40 - 50$  km/h;  
Gerade
- S-Bahn ET 420;  $v = 80 - 120$  km/h;  
Gerade
- U-Bahn DT-3;  $v = 40 - 60$  km/h;  
Gerade
- Güterzug  $v = 50 - 90$  km/h;  
Gerade
- S-Bahn  $v = 70 - 120$  km/h;  
Gerade, Oberbauarten
- IC  $v = 140 - 160$  km/h;  
Gerade

- ICE (Meßzug)  $v = 200 - 230$  km/h;  
Gerade
- ICE  $v = \text{bis } 300$  km/h;  
Gerade

Bei der Berechnung dieser charakteristischen Emissionsdaten wurden die Züge als Punktquellen oder Linienquellen idealisiert. Für diese Quellenarten wurden durch umfangreiche numerische Simulationsrechnungen die Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten im inhomogenen Untergrund analysiert. Im einzelnen wurde der Einfluß von Bodenschichtungen, Bodensteifigkeit, Grundwasserhorizont, Materialdämpfung sowie Geländegeometrie und Einbauten im Boden auf die Erschütterungsausbreitung untersucht und in Form von frequenzabhängigen Einflußfunktionen beschrieben.

Die Einwirkung auf Gebäude wurde betrachtet, indem eine Vielzahl von Gebäuden in zweidimensionalen Finite-Element-Rechenmodellen abgebildet und Effekte wie z. B.

- steife (Gebäude auf Fels) und elastische (Gebäude auf Lockergestein) Lagerung
- verschiedene Gründungen, wie Streifen- und Plattenfundamente
- verschiedene Konstruktionsarten, wie Mauerwerk und Beton
- verschiedene Gebäudehöhen, etc.

untersucht wurden. Als Hauptergebnis dieser Studie wurde festgestellt, daß die Erschütterungsübertragung auf das Gebäude und das Schwingungsverhalten der Gebäude selbst im wesentlichen von 3 kennzeichnenden Eigenfrequenzen geprägt werden. Die erste kennzeichnende Eigenfrequenz wird durch die Bodensteifigkeit und die Gesamtgebäudemasse gebildet. Besitzen die Erschütterungen Frequenzanteile, die kleiner als diese Eigenfrequenz sind, dann werden diese Anteile beim Übergang auf das Gebäude im allgemeinen verstärkt. Höhere Frequenzen dagegen werden stets abgemindert. Die zweiten signifikanten Eigenfrequenzen sind die Eigenfrequenzen der Stockwerksdecken. Die auf das Gebäudefundament übertragenen Erschütterungen werden in diesen Frequenzbereichen stets verstärkt. Den dritten kennzeichnenden Bereich bilden die vertikalen Wandeigenfrequenzen. Diese legen fest, welche Teile des Gebäudes – betrachtet über die Gebäudehöhe – gleichphasig oder gegenphasig schwingen. Ab Erreichen der 1. Wandeigenfrequenz und über diese hinaus schwingt das Gebäude stark in sich, so daß die Bauwerksträgheit nicht weiter erschütterungsmindernd wirkt.

Dieses in einer ersten Phase erarbeitete Prognosemodell wurde in weiteren Arbeiten durch theoretische Untersuchungen und Erschütterungsmessungen an Nahverkehrs-, Fernverkehrs- und Hochgeschwindigkeitsstrek-

ken überprüft, getestet und weiter entwickelt. In theoretischer Hinsicht wurde die Modellierung der Lasteinleitung durch die Entwicklung von dreidimensionalen Modellen für die Fahrbahn schnellfahrender Züge verbessert [5],[6]. Mit diesen Modellen wird das Wechselwirkungsverhalten zwischen der Fahrbahn und dem Fahrzeug realitätsnah erfaßt. Somit wird nicht nur die Erschütterungsprognose verbessert, sondern es können auch Optimierungsberechnungen von Fahrbahn und Fahrzeug durchgeführt werden. Aufbauend auf der Theorie, die zur Entwicklung dieses Modelles führte, wurden neben der Erweiterung auf dreidimensionale Lastmodelle auch das nichtstationäre, zufällige Zeitverhalten des fahrenden Zuges sowie der Einfluß der Fahrzeugbewegung selbst auf das Erschütterungsabnahmegesetz theoretisch und meßtechnisch untersucht [7]. Als wesentlichstes Ergebnis dieser Untersuchung ergab sich, daß die Erschütterungsabnahme bis zu einer gewissen Entfernung im wesentlichen dem Abnahmegesetz einer linienförmigen Quelle, danach dem Gesetz einer punktförmigen Quelle folgt. Die Kenntnis dieser Abnahmegesetze und die genaue Lage dieser Grenzentfernung ist besonders im Nahfeld einer Bahntrasse von Bedeutung, da in diesem Bereich die Amplitudenabnahme – falls sich eine solche einstellt – fast ausschließlich durch die Quellengeometrie beschrieben wird. In größerer Entfernung von der Erschütterungsquelle verschwindet dann der Einfluß der Quellengeometrie immer mehr und die Erschütterungsabnahme wird überwiegend von der Materialdämpfung des Untergrundes bestimmt.

## 1.2 Untersuchungsprogramm

Das Anwendungsfeld dieses so konzipierten Prognoseverfahrens liegt zunächst dort, wo sich die Erschütterungen frei neben der Trasse bis zum Einwirkungsort ausbreiten können. In innerstädtischen Bereichen ist jedoch der Abstand zwischen Trasse und Gebäuden häufig sehr gering. In manchen Fällen befindet sich die Trasse sogar direkt unter Gebäuden oder führt durch ein Gebäude hindurch. Die besondere Problematik bei Bahntunneln liegt darin, daß Minderungsmaßnahmen nachträglich kaum noch möglich sind, zum Beispiel wegen der dafür benötigten zusätzlichen Tunnelhöhe. Eine weitere Besonderheit liegt in der Art der Schwingungsübertragung. Für Oberflächenverkehr wurde von der Übertragung durch Rayleighwellen ausgegangen. Bei dicht zusammenliegenden Gebäuden und Tunneln werden hingegen die Schwingungen durch Raumwellen übertragen, eventuell muß man sogar von einem durch den Boden gekoppelten Schwingungssystem Tunnel-Bauwerk sprechen. Da in diesen Fällen die oben mitgeteilten Ergebnisse und Verfahren nur beschränkt gültig sind, sollen zur Erfassung solcher Situationen die zu Beginn entwickelten Programme zur Berechnung der Erschütterungsausbreitung und zur Berechnung der Gebäudedynamik zusammengeführt werden. Mit diesem neuen, auch auf einem PC ablauffähigen Programmsystem, sollen verschiedene Tunnel-Gebäude-Situationen (etwa 30) be-

rechnet und der Einfluß verschiedener Parameter auf das Schwingungsverhalten, insbesondere der Gebäudedeken, systematisch untersucht werden. Variiert werden sollen:

- die Tiefenlage der Gebäude neben dem Tunnel
- die Lage des Gebäudes relativ zum Tunnel (über dem Tunnel und seitlich neben dem Tunnel)
- die Gebäudehöhe
- die Gebäudefundamentierung
- die Bodensteifigkeit und die Bodendämpfung.

Neben diesen Parametern sollen auch verschiedene mögliche Minderungsmaßnahmen wie:

- offener Schlitz zwischen Tunnel und Gebäude
- Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Gebäude
- Feder-Masse-System bzw. Unterschottermatten
- bis zur Fundamentierung reichende Lichtschächte
- federnde Gebäudeauflagerung
- zurückgelassener Baugrubenverbau
- Auflasten und Versteifung der Bodenoberfläche
- geschlossene und aufgelöste Gebäudefundamentierung etc.

untersucht werden. Aus den Ergebnissen dieser Berechnungen können dann einzelne Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit verglichen und daraus im Einzelfall technisch sinnvolle und wirtschaftlich vertretbare Maßnahmen abgeleitet werden.

Die theoretischen Untersuchungen sollen durch Messungen begleitet und überprüft werden. Für die Messungen werden zwei unterschiedliche Bauwerke ausgewählt. Das Meßziel beim ersten ausgewählten Bauwerk, dem Technischen Zentrum der Sparkasse Berlin, besteht darin, Veränderungen des Wechselwirkungsverhalten zwischen Untergrund und Bauwerk im Zuge der Erstellung eines Bauwerkes schrittweise zu erfassen. Durch diese Messungen sollten auch die theoretischen Erkenntnisse hinsichtlich der Verteilung der Schwingungsgrößen über die Gebäudehöhe sowie die Minderungswirkung eines steifen, schweren Kellergeschoßes überprüft werden. Das zweite vollständig auszumessende Bauwerk, die Paul Löbe Oberschule, ist ein Beispiel für ein sehr leichtes, sehr schwingungsfähiges Bauwerk. Neben der Ermittlung der Schwingungsübertragung zwischen U-Bahn-Tunnel und Bauwerk besteht hier ein wesentliches Meßziel darin, das Eigenschwingungsverhalten sowie eine mögliche Koppelung zwischen Wand- und Deckenresonanzen zu untersuchen.

Im folgenden werden zunächst einige wesentliche Ergebnisse der Erschütterungsausbreitung im ebenen Gelände sowie die zum weiteren Verständnis notwendigen Grundlagen in komprimierter Weise dargestellt. Es folgen einige Ergebnisse zur Gebäudedynamik, soweit sie für das Verständnis der nachfolgenden meßtechnischen und rechnerischen Ergebnisse notwendig sind.

Im unmittelbaren Anschluß werden Rechenergebnisse präsentiert, die den Einfluß der Tiefenlage des Tunnels,

der relativen Lage von Gebäuden zum U-Bahntunnel – darüber oder daneben –, sowie den Einfluß verschiedener Gründungstiefen der Gebäude aufzeigen.

Es folgen Ergebnisse von Untersuchungen über die Wirksamkeit von einigen praktisch relevanten Minderungsmaßnahmen am Tunnel, im Übertragungsweg zwischen Tunnel und Gebäude und am Gebäude selbst.

Hierbei werden mögliche und wirksame Maßnahmen unbrauchbaren und unwirksamen Maßnahmen gegenübergestellt.

Den Abschluß bilden die Ergebnisse von Messungen, die an den beiden oben beschriebenen Gebäuden durchgeführt wurden. Hierbei wird auch ein Vergleich mit den Rechenergebnissen durchgeführt.

## 2 GRUNDLAGEN

### 2.1 Quellengeometrie und Zeitverhalten

Der fahrende Zug stellt eine bewegliche transiente Quelle dar, die über die Radaufstandspunkte flächenhaft dynamische Kräfte an das Gleis abgibt. In welcher Weise die Erschütterungen dann in die Umgebung transportiert werden, hängt von den konstruktiven Eigenschaften der näheren Gleisumgebung ab. Bewegt sich der Zug an der Oberfläche, so kann man die Quelle im Nahfeld als Linienquelle und in weiterer Entfernung als Punktquelle idealisieren. Das Zeitverhalten kann je nach Untersuchungszweck als harmonisch, impulsförmig, transient oder stochastisch betrachtet werden. Zusätzlich kann die Quelle ortsfest oder bewegt sein. Fährt der Zug im Tunnel, so findet durch das relativ steife Tunnelbauwerk eine Verteilung der Kräfte in Zuglängsrichtung statt. Das 'richtige' Ausbreitungsmodell wird dann mehr die ebene Linienquelle bzw. die Flächenquelle darstellen als die Punktquelle. Die Quelle kann wie oben bewegt oder ortsfest sein.

Um die Unterschiede in den Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten der verschiedenen möglichen Quellengeometrien und ihres Zeitverhaltens aufzuzeigen, werden im folgenden einige grundlegende Zusammenhänge und Ergebnisse zusammengestellt.

### 2.2 Grundlagen der Ausbreitung

In einem unbegrenzten Kontinuum existieren zunächst 2 Wellenarten - Kompressionswellen (P-Wellen) und Scherwellen (S-Wellen)-, die Energie von einer Störung wegtransportieren können. Die Ausbreitung der Wellen erfolgt mit den Geschwindigkeiten

$$v_p = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}$$

und

$$v_s = \sqrt{G/\rho}.$$

In diesen beiden Gleichungen ist G der Schubmodul, die Dichte und die Poissonzahl des Kontinuums.

Bei punktförmiger Anregung erfolgt die Ausbreitung dieser Wellen längs einer Kugeloberfläche. Aus Energieerhaltungsgründen müssen sich die Amplituden u dieser sphärischen Wellen umgekehrt proportional zum Kugelradius r verhalten. Es gilt also

$$u \sim 1/r.$$

In einem Medium mit Berandungen - der Untergrund mit seiner freien Oberfläche (kurz Halbraum) - tritt als Folge dieser Randbedingung eine weitere Welle, die Rayleigh- oder Oberflächenwelle, auf. Diese Welle besitzt eine begrenzte Eindringtiefe, ihre Ausbreitung erfolgt längs einer Zylinderoberfläche und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_R$  ist etwas geringer als die der Scherwelle.

Für punktförmige Quellengeometrie wird die Amplitudenabnahme dieser Wellen mit der Entfernung durch

$$u \sim 1/\sqrt{r} \sim r^{-0.5}$$

beschrieben.

In Bild 2.1 sind diese grundlegenden Wellen mit ihrem typischen Verformungsbild schematisch dargestellt. Für punktförmige Quellen sind dort ebenfalls die sogenannten geometrischen Abnahmeexponenten n angegeben. Für linienförmige Quellen reduzieren sich diese Exponenten jeweils um  $\Delta n=0,5$ . Zum Beispiel ergibt sich dann der Abnahmeexponent einer Oberflächenwelle zu  $n=0$ , d.h.  $u \sim r^0 = \text{const.}$

### 2.3 Ausbreitung im homogenen Halbraum

#### 2.3.1 Verhalten bei harmonischer Anregung

In Bild 2.2 sind die horizontalen und vertikalen Verschiebungen der Halbraumoberfläche infolge Belastung durch horizontal und vertikal wirkende Punktquellen nach Betrag (Bild 2a) und Phase (Bild 2b) aufgetragen.



Bei der Berechnung [6] und Darstellung wurde ein polares Koordinatensystem verwendet. Die Halbraumoberfläche wird hierbei durch den Radius  $r$  und den Winkel aufgespannt, die  $z$ -Achse weist ins Innere des Bodens. Nach dieser Konvention ist z.B. unter der in Bild 2.2 dargestellten Bezeichnung  $w_{rpz}$  die radiale Verschiebung infolge einer vertikalen Punktlast  $P_z$  zu verstehen. Die anderen Verschiebungskomponenten sind sinngemäß zu interpretieren. In den Bildern sind auf der Abzisse die dimensionslosen Entfernungen  $\bar{r} = r \omega / v_s = r 2\pi / \lambda$  und auf der Ordinate die dimensionslosen Amplituden  $u = w_{jp} G \cdot r / P_j$  logarithmisch aufgetragen.  $j$  bezeichnet jeweils die Koordinatenrichtung,  $\omega$  ist die Erregerkreisfrequenz,  $v_s$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle,  $\lambda$  ist die Wellenlänge und  $G$  ist der Schubmodul des Untergrundes. Durch die Multiplikation der Amplituden mit dem Radius  $r$  stellen sich in diesem Bild Wellen, die mit  $1/r$  abnehmen, als horizontale Linien und Wellen, die mit  $1/\sqrt{r}$  abnehmen, durch ansteigende Geraden dar.

Diese Lösungen offenbaren das dynamische Verhalten des Systems „homogener Halbraum“ vollständig und sind die Basis für die Lösung einer ganzen Reihe von dynamischen Randwertproblemen des homogenen Halbraumes. So wurde damit erstmalig das Problem der dynamischen Wechselwirkung von mehreren starren Fundamenten (dem Eisenbahngleis) in allen Freiheitsgraden gelöst [5]. Neben diesen weitergehenden Anwendungen zeigen diese Funktionen für sich allein schon die wesentlichsten Phänomene der Schwingungsausbreitung im homogenen Halbraum:

So ist bei gleicher Lastintensität in vertikaler und in einer horizontalen Richtung ( $P_z = P_r$ ) die vertikale Verschiebung  $w_{zpz}$  infolge vertikaler Last  $P_z$  immer größer als die radiale Verschiebung  $w_{rpr}$  infolge radialer Last  $P_r$ .

Bei alleiniger vertikaler oder radialer Belastung existiert auch eine Verschiebung  $w_{rpz} = -w_{zpr}$  in der jeweils anderen Richtung. Die Amplituden dieser Koppelkomponente sind immer kleiner als die Amplituden der Hauptkomponente in vertikaler Richtung und immer größer als die Werte der Hauptkomponente in radialer Richtung.

Die radiale Verschiebung  $w_{rpr}$  infolge radialer Last  $P_r$  zeigt ein starkes Interferenzmuster, das durch Interferenzen der Rayleighwelle mit der an der Oberfläche entlang laufenden Kompressionswelle zustande kommt.

Das Verschiebungsfeld bei reiner horizontaler Belastung besteht in horizontaler Richtung aus zwei Komponenten, der radialen Komponente  $w_{rpr}$  und der tangentialen Komponente  $w_{\phi pr}$ . Die Amplitudenabnahme der radialen Komponente ist die einer Oberflächenwelle und die Abnahme der tangentialen Komponente die einer Raumwelle (der Scherwelle). Dieses Verhalten ist besonders bei einer meßtechnischen Ermittlung von Amplitudenabnahmegesetzen von Bedeutung, da man, je nachdem wie man zur Lastichtung steht, sehr unterschiedliche Abnahmegesetzmäßigkeiten messen kann.

In oberen Teil von Bild 2.2 sind strichliert diejenigen Amplituden eingetragen, die sich bei alleiniger Berücksichtigung der Oberflächenwelle ergeben. Man erkennt, daß sich ab einer Entfernung von etwa einer Wellenlänge die exakten Amplituden – das sind die aus der Überlagerung aller 3 Wellenarten –, nur noch gering (mit Ausnahme der radialen Komponente) von denjenigen der Oberflächenwelle allein unterscheiden. Es ist deshalb naheliegend das Ausbreitungsverhalten in zwei Bereiche, in ein Nahfeld und ein Fernfeld, einzuteilen. Die Bereiche sind so gekennzeichnet, daß im Nahfeld die Ausbreitung überwiegend in Form von Raumwellen und im Fernfeld überwiegend durch Oberflächenwellen erfolgt.

Die Ausbreitung im Fernfeld wird durch das einfache Gesetz

$$u = A \cdot \sqrt{\bar{r}} e^{-i(\omega t - \kappa \bar{r})}$$

beschrieben. Der von der Poissonzahl abhängige Wert  $\kappa$  ist die reelle Nullstelle der sogenannten Rayleighgleichung (siehe z.B. [6]). In Abhängigkeit der Poissonzahl ergeben sich folgende Werte für  $\kappa$ :

Tabelle 2.1  
Nullstellen der Rayleighgleichung in Abhängigkeit der Poissonzahl

|          |       |        |        |        |
|----------|-------|--------|--------|--------|
| $\nu$    | 0     | 0,25   | 0,33   | 0,5    |
| $\kappa$ | 1,144 | 1,0877 | 1,0729 | 1,0468 |

$A$  ist ein von der Poissonzahl abhängiger Amplitudenfaktor, dessen Berechnung z.B. in [6] zu finden ist.

Neben der Amplitudenabnahme durch die oben beschriebene sogenannte geometrische Dämpfung (Durchstrahlung eines mit der Entfernung je nach Wellenart charakteristisch zunehmenden Volumens) ergibt sich eine weitere Amplitudenabnahme durch die (dehnungsabhängige) Materialdämpfung  $D$  des Untergrundes. Berücksichtigt man die Materialdämpfung z. B. in Form eines komplexen Schubmoduls (hysteretische Dämpfung)

$$G = G_0 (1 + i2D),$$

$i = \sqrt{-1}$  ist die imaginäre Einheit und  $G_0$  ist der physikalische Schubmodul, dann führt diese Erweiterung im oben angeführten Näherungsgesetz für die Oberflächenwelle auf eine zusätzliche exponentielle Amplitudenabnahme

$$u = A \cdot \sqrt{\bar{r}} e^{-i(\omega t - \kappa \bar{r})} e^{-D \bar{r}}$$

Bild 2.3 zeigt für einen Dämpfungswert von  $D = 5\%$ , daß dieser Einfluß speziell in größeren Entfernungen und für höhere Frequenzen von Bedeutung ist.

Bei Berücksichtigung von Materialdämpfung, besonders im Nahfeld der Erregung, ist zu beachten, daß der Wert der Dämpfung amplitudenabhängig ist (größer für größere Amplituden). Befindet man sich im Fernfeld der hier betrachteten Erschütterungsquellen, so ist die Amplitudenabhängigkeit i.a. nur noch gering und es kann als grober Anhaltswert ein Wert von  $D = 2\%$  angesetzt werden.

### 2.3.2 Verhalten bei impulsförmiger Anregung

Alle folgenden Ergebnisse, die die Ausbreitung von impulsförmigen Schwingungen im homogenen Untergrund betreffen, wurden mit einem Verfahren berechnet, dessen theoretische Grundlagen ausführlich in [7] dargestellt sind. Das Wesentliche dieser Methode ist, daß damit das vollständige Verschiebungsfeld im und auf dem Halbraum infolge impulsförmig und harmonisch emittierenden Punktquellen sowohl im Zeitbereich wie auch im Frequenzbereich berechnet werden kann. Diese Lösungen sind die Grundlage zur Analyse und Lösung einer Reihe von elastischen und elasto-plastischen Problemen in der Baugrunderdynamik, z.B. des plastischen Eindringvorganges bei einer Pfahlrammung.

In Bild 2.4 sind die Amplitudenverläufe für einen 100 m von der Last entfernten Punkt der Halbraumboberfläche aufgetragen. Als Belastung wirkt eine vertikale (theoretische) Sprungfunktion in verschiedenen Tiefen. Bei Belastung an der Bodenoberfläche ( $z=0$ ) besteht die Hauptantwort aus einem verzögerten Sprung, dessen Ankunftszeit mit der Laufzeit der Rayleighwelle übereinstimmt. Vor der Ankunft der Rayleighwelle am Beobachtungspunkt wird dieser zunächst von der P-Welle und kurz vor der Rayleighwelle (kaum erkennbar) von der S-Welle erreicht.

Erfolgt die Belastung jedoch im Innern des Bodens, so verschwindet mit zunehmender Tiefe der dominante Einfluß der Oberflächenwelle immer mehr und mehr. Die Abstrahlung der Energie scheint dann hauptsächlich durch Scherwellen zu erfolgen. Weiter ist zu erkennen, daß bei Belastung ab einer bestimmten Tiefe (kritischer Winkel) eine sogenannte SP-Welle, auch als Kopfwelle bezeichnet, entsteht. Die Wellenfront der Kopfwelle liegt immer zwischen den Wellenfronten der P-Welle und S-Welle. Ihre Komponente parallel zur Oberfläche breitet sich mit P-Wellengeschwindigkeit und die Komponente senkrecht zur Wellenfront mit S-Wellengeschwindigkeit aus. Im Falle des Zusammentreffens der Wellenfront der Kopfwelle mit der Wellenfront der S-Welle (infolge der schnelleren Ausbreitungsgeschwindigkeit des P-Wellenanteils der SP-Welle) bilden sich zu diesem Zeitpunkt (und nur zu diesem Zeitpunkt) relativ große Amplituden der S-Welle aus. Dieses Phänomen wird als „logarithmische Singularität“ [7] bezeichnet. Zwar ist die praktische Bedeutung des Phänomens der Kopfwelle bei einer Erschütterungsprognose

im allgemeinen gering. Ihre Kenntnis erleichtert jedoch die Interpretation von Meßergebnissen erheblich.

In Bild 2.5 sind Ergebnisse aufgetragen, die das Verhalten eines Beobachtungspunktes an der Bodenoberfläche in 20 m Entfernung von einer impulsförmigen Belastung aufzeigen sollen. Der Schlagimpuls ist ein Halbsinustoß mit einer Zeitdauer von 50 ms, die maximale Kraftamplitude beträgt 2000 KN, der Boden besitzt eine Scherwellenausbreitungsgeschwindigkeit von 200 m/s und die Dichte ist  $1.8 \text{ t/m}^3$ . Das Bild zeigt die Antwort bei Beginn des Impulses (Belastung nur an der Oberfläche) und bei einer Eindringung von 9 m. Die gesamte Belastung wirkt im letzten Fall je zur Hälfte längs der Eindringtiefe und an der Spitze. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß bei einer ausschließlichen Belastung an der Bodenoberfläche der Antwortimpuls sich insgesamt schärfer abbildet, die Spitzenwerte größer sind und der Einsatz der P-Welle klarer zu erkennen ist. Die Ursache hierfür liegt darin, daß bei der über die Tiefe verteilten Last die einzelnen Lastimpulse den Beobachtungspunkt zu verschiedenen Zeiten erreichen und das Antwortverhalten bei Anregung in der Tiefe mehr durch die S-Welle geprägt wird. Bei zunehmender Eindringtiefe werden die Amplituden also geringfügig kleiner und mögliche Spitzen im Erregerkraftverlauf werden ausgeglättet.

In Bild 2.6 sind die Antwortzeitverläufe in verschiedenen Entfernungen infolge vertikaler Anregung eines wassergesättigten Untergrundes dargestellt. Man erkennt den wesentlichen Effekt, nämlich die Ausprägung einer starken P-Welle, die auch noch in größerer Entfernung zu erkennen ist. Die Amplitudenmaxima im Antwortverhalten werden jedoch wie im Falle eines grundwasserfreien Untergrundes überwiegend durch die Oberflächenwelle bestimmt. Der Vergleich dieser Zeitverläufe mit dem in Bild 2.5 dargestellten Ergebnis zeigt, daß im Falle des Vorhandenseins von Grundwasser der Untergrund eher steifer reagiert, die Amplituden sind nämlich kleiner. Die oftmals geäußerte Behauptung, daß bei Vorhandensein von Grundwasser größere Erschütterungsamplituden zu erwarten sind als bei einem grundwasserfreien Untergrund, kann damit nicht aufrecht erhalten werden. Dies wird im übrigen auch durch Finite-Element-Rechnungen bestätigt.

### 2.3.3 Harmonische Linien- und Streckenlasten

Der Fall einer Linienlast ( $u = r^0$ ) ist in diesem Zusammenhang nur von theoretischem Interesse und braucht deshalb nicht weiter verfolgt zu werden. Von Interesse ist jedoch das Ausbreitungsverhalten einer Streckenlast, das hier berechnet wird, indem die oben angegebenen Punktlastlösungen für den Fernfeldbereich (nur Oberflächenwellen) über die Länge  $L$  der Linienlast integriert werden.

In Bild 2.7 sind die, auf die Amplituden einer Linienlast bezogenen Amplituden einer Streckenlast verschiedener Länge  $L$  über die Entfernung aufgetragen [8]. Die Erregerfrequenz war hier  $f = 50$  Hz. Man erkennt, daß sich im wesentlichen zwei Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten, das der Linienlast bei kleinen Entfernungen und ab einer bestimmten Grenzentfernung das der Punktlast, einstellen. Weiter zeigt sich, daß mit zunehmender Lastlänge der Bereich vergrößert wird, in dem Linienlastgesetzmäßigkeiten gelten. Die Amplituden der Streckenlast sind in diesem Bereich im Mittel etwas größer als diejenigen der Linienlast gleicher Lastintensität. Wird zusätzlich zu der Variation der Lastlänge eine Variation der Anregungsfrequenz durchgeführt (hier nicht gezeigt), so erkennt man, daß die Grenze bis zu der das Abnahmegesetz einer Linienlast und ab der das Gesetz der Punktlast gilt, durch

$$R_0 = L^2/\lambda$$

festgelegt wird.

### 2.3.4 Harmonische Flächenlasten

Zur Untersuchung der Amplituden-Abstandsgesetze für räumlich verteilte Lastflächen wurde die Lasteinleitung über ein starres Rechteckfundament mit den Seitenverhältnissen  $b/a = 1$  bis 5 berechnet [5], [6]. Ausgangspunkt der Berechnung sind die in Bild 2.2 dargestellten exakten Verschiebungsfelder für eine harmonisch emittierende Punktquelle. Für den hier betrachteten Fall von starren Rechteckflächen genügt es jedoch nicht, die Punktlastlösungen einfach über die Rechteckfläche zu integrieren. Die hier zu erfüllenden Randbedingungen beschreiben ein sogenanntes gemischtes Randwertproblem, nämlich vorgeschriebene Starrkörperverschiebungen und -verdrehungen innerhalb der Rechteckfläche und vorgeschriebene Spannungen (identisch Null) außerhalb. Die Lösung dieses gemischten Randwertproblems wird mit einem Verfahren durchgeführt, das ausführlich in [5] beschrieben ist. Als Lösung des Randwertproblems ergibt sich die Spannungsverteilung unterhalb des starren Fundamentes. Diese Spannungen werden auf die Halbraumoberfläche aufgebracht und das dadurch entstehende Verschiebungsfeld in Abhängigkeit der Entfernung und der Frequenz berechnet.

In Bild 2.8a und 2.8b sind die Ergebnisse für den Fall  $b/a = 5$  dargestellt. Der Parameter der Kurvenschar ist der dimensionslose Frequenzparameter  $a_0 = a/vs$ .

Betrachtet man zunächst den Fall der Ausbreitung senkrecht zur längeren Fundamentseite (Bild 2.8a), so erkennt man, daß sich ein ähnliches Verhalten wie bei der Streckenlast einstellt. Das heißt, es gibt einen Nahbereich, in dem im Mittel das Abnahmegesetz einer Linienlast (keine Amplitudenabnahme) gilt. Ab einer gewissen Grenzentfernung  $R_0$  erfolgt dann die weitere Ausbreitung mit dem Gesetz einer Punktlast (strichliert). Die

Grenzentfernung  $R_0$  errechnet sich in gleicher Weise wie bei der Streckenlast zu

$$R_0 = (2b)^2/\lambda.$$

Die Ausbreitung senkrecht zur kürzeren Seite (Bild 2.8b) zeigt ein völlig anderes Verhalten. In Fundamentnähe bis zu einer Entfernung von etwa einer Wellenlänge vom Fundamentrand erfolgt die Erschütterungsabnahme mit dem Abnahmegesetz von Raumwellen, d.h.  $u \sim 1/r$ . Danach gilt für alle Frequenzen das Abnahmegesetz einer Raumwelle infolge einer Punktlast (strichliert), d.h.  $u \sim 1/\sqrt{r}$ .

### 2.3.5 Stochastische Anregung

Eine Punktquelle, deren Zeitverlauf stochastischen Charakter hat, verändert nicht ihre Ausbreitungsgesetzmäßigkeit. Damit gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie für eine harmonische oder impulsartig emittierende Punktquelle. Veränderungen treten jedoch auf, wenn die Anregung stochastisch, – genauer mit Zufallsphase – über eine Strecke oder eine Fläche erfolgt.

Die Untersuchung des Ausbreitungsverhalten von stochastischen Lasten basiert wiederum auf der Ausbreitungsgesetzmäßigkeit einer harmonischen Punktlast. Das Abnahmegesetz ergibt sich hier jedoch aus den Übertragungsbeziehungen linearer Systeme unter Zufallsbelastung (s. z. B. [1]). Dies bedeutet explizit, daß sich das stochastische Amplituden-Abstandsgesetz aus der quadratischen Mittelung des Punktlastgesetzes ergibt. Das genaue Verfahren ist ausführlich in [4] beschrieben, dort ist auch ein explizites Gesetz angegeben.

In Bild 2.9 sind gemittelte Amplituden-Abstandsgesetze für eine stochastische Streckenlast aufgetragen. Variiert wurde hierbei die Lastlänge  $L$ . Das Ergebnis der Untersuchung ist, daß sich ab einer Entfernung, die in etwa der Lastlänge entspricht, das Ausbreitungsgesetz der Punktlast einstellt. In unmittelbarer Lastnähe ist die Amplitudenabnahme geringer als die der Punktlast. Bei weiterer Annäherung an die Quelle wird das Abnahmegesetz der Linienlast jedoch nur approximativ erreicht.

### 2.3.6 Zusammenfassung der Effekte des homogenen Halbraumes

1. Die Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld von harmonisch emittierenden Punktquellen liegt bei ca. 1 Wellenlänge.
2. Für alle Lastgeometrien liegt das Amplituden-Abstandsgesetz zwischen dem Gesetz einer Linienlast und dem einer Punktlast.
3. Bei endlich ausgedehnten Quellen ist zu unterscheiden zwischen der Ausbreitung senkrecht und parallel



zur längeren Seite. Ist die untersuchte Ausbreitungsrichtung senkrecht zur längeren Seite (das ist bei der Streckenlast immer der Fall) dann existiert ein Nahbereich mit dem Ausbreitungsgesetz einer Linienlast und ein Fernbereich mit dem Ausbreitungsgesetz einer Punktlast. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen wird durch die Entfernung  $R_0 = L^2/\lambda$  beschrieben, hierin ist  $L$  die Lastlänge und  $\lambda$  die Wellenlänge. Die Amplituden im Nahbereich sind im Mittel geringfügig größer als die einer Linienquelle gleicher Lastintensität.

Wird jedoch die Ausbreitung parallel zur längeren Seite untersucht, dann nehmen die Amplituden bis zu einer Entfernung von etwa einer Wellenlänge vom Fundamentrand mit dem Abnahmegesetz von Raumwellen ( $u \sim r^{-1}$ ) und dann mit dem Gesetz von punktförmigen Oberflächenwellen ( $u \sim r^{-1/2}$ ) ab.

4. Das Ausbreitungsgesetz von räumlich verteilten, stochastisch emittierenden Quellen ist im wesentlichen das einer Punktquelle. Die Grenzentfernung ab der dies gilt, kann mit etwa einer Lastlänge (Zuglänge) angegeben werden.

## 2.4 Geschichteter und inhomogener Halbraum

Ein realer Untergrund weicht immer mehr oder weniger stark von der Fiktion eines elastischen homogenen Halbraumes ab. Die wesentlichen Abweichungen bestehen darin, daß ein realer Untergrund oft geschichtet ist. Aber auch im Falle des Freiseins von Schichten ist ein anstehender Boden stets inhomogen, da seine Steifigkeit infolge der mit der Tiefe zunehmenden Auflast ebenfalls zunimmt ([5] und Bild 2.10).

Im folgenden werden diejenigen Änderungen dargestellt, die sich im Vergleich mit einem homogenen Halbraum ergeben. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden mit dem in [4] beschriebenen finiten Element Program SESAB berechnet. Mit diesem Programm ist es möglich, sowohl die Abstrahlung ins Innere des Halbraumes wie die seitliche Ausbreitung ins Unendliche zu erfassen (siehe auch Kapitel 3.).

### 2.4.1 Harmonisch angeregte Schicht

In Bild 2.11 sind die Ergebnisse von drei berechneten Schichtsystemen dargestellt. Im Fall „Schicht auf starrem Untergrund“ handelt es sich um ein 1-Schichtsystem mit starren Verschiebungsrandbedingungen am unteren Rand. Bei dem Fall „Schicht auf steiferem Untergrund“ wurde ein 2-Schichtensystem untersucht, wobei der Schubmodul  $G$  der unteren Schicht (siehe auch Bild 2.10) steifer war, als der Schubmodul der oberen Schicht. Im Fall „Schicht auf steiferem und trägerem Untergrund“ wurde zusätzlich die Materialdichte der unteren

Schicht relativ zur oberen Schicht vergrößert. In allen Fällen ist eine freie Schwingungsausbreitung nach den Seiten durch entsprechende Randbedingungen gewährleistet.

Aus den in Bild 2.11 auf die Halbraumamplituden bezogenen Amplituden eines Punktes der freien Oberfläche der starren Schicht, aufgetragen über der Erregerfrequenz  $f$ , lassen sich folgende wesentliche Ergebnisse erkennen:

1. Die Schicht mit der Mächtigkeit  $H$  besitzt eine ausgeprägte Resonanzfrequenz, die durch  $f_g = v_s/4H$  berechnet werden kann.
2. Für Schwingungen mit Anregungsfrequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz findet keine Ausbreitung statt. Das dynamische Verhalten des Untergrundes entspricht hier mehr dem Verhalten eines endlichen Systems.
3. Oberhalb der Resonanzfrequenz nähern sich die Schichtamplituden rasch den Halbraumamplituden an.

Die ebenfalls in Bild 2.11 dargestellten, näher an der Realität liegenden, anderen Schichtfälle zeigen, daß in diesen Fällen das Resonanzphänomen zwar gemildert wird, am prinzipiellen Verhalten ändert sich aber nichts.

### 2.4.2 Impulsförmig angeregte Schicht

In Bild 2.12 sind die Impulsantworten einer elastischen Schicht im Vergleich mit denjenigen eines homogenen Halbraumes dargestellt [9]. Die wesentlichen Unterschiede bestehen darin, daß die Raumwellen, besonders die P-Wellen, bei einer Schicht stärker ausgeprägt sind und die Schicht nach der Ankunftszeit der Rayleighwelle längere Zeit in der Schichtresonanzfrequenz nachschwingt. Die Schichtamplituden der Rayleighwelle sind im allgemeinen etwas kleiner als diejenigen des Halbraumes.

Betrachtet man die Amplituden-Abstandsgesetze, so zeigen die im Impuls enthaltenen einzelnen harmonischen Anteile unterschiedliches Verhalten. Bei tieffrequenter Anregung ( $< f_g$ ) ist die Abnahme exponentiell wie im statischen Fall. Bei Anregung in bzw. um die Resonanzfrequenz stellt sich bis zu einer Entfernung von  $r = 4H$  eine ebene Ausbreitung (keine Amplitudenabnahme) ein. Danach entspricht die Abnahme  $u \sim r^{-0.7}$ . Bei hochfrequenter Anregung entspricht die Abnahme derjenigen des homogenen Halbraumes.

### 2.4.3 Impulsförmig angeregter inhomogener Halbraum

Emittiert eine Quelle impulsförmig, so entstehen durch die veränderliche Steifigkeit über die Tiefe infolge der

frequenzabhängigen Eindringtiefe der Oberflächenwelle dispersive Effekte. Das heißt, daß sich die im Impuls enthaltenen harmonischen Anteile, entsprechend der tiefenabhängigen Steifigkeitsverteilung, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten (Bild 2.13). Anteile mit niedriger Frequenz (größere Wellenlänge, größere Eindringtiefe) pflanzen sich schneller fort, als Anteile mit höherer Frequenz. Ein Impuls weitet sich dadurch zu einem Wellenzug auf (Bild 2.14). Durch die Aufweitung erfährt der Maximalwert des Zeitverlaufs eine zusätzliche Abnahme (gleiche Energie über eine größere Zeit) um  $\Delta n = 0,5$ . Zum Beispiel ergibt sich dann die Amplitudenabnahme einer impulsförmig emittierenden Punktquelle zu  $u \sim r^{-1}$  anstatt  $u \sim r^{-0,5}$  wie im Falle eines homogenen Halbraumes.

Von zusätzlicher praktischer Bedeutung ist, daß man diesen Effekt zur Ausmessung der tiefenabhängigen Steifigkeitsverteilung ausnutzen kann. Erzeugt und nur an der Oberfläche ausgemessen wird hierbei ein harmonisches Wellenfeld mit unterschiedlichen Anregungsfrequenzen. Entsprechend obigen Erläuterungen ergeben sich aus diesen Messungen bei tiefen Frequenzen die Steifigkeitseigenschaften tieferer Bodenschichten und bei Erhöhung der Frequenz mehr und mehr die Steifigkeitseigenschaften oberflächennaher Bereiche. Es ist weiter möglich, dieses frequenzabhängige Steifigkeitsprofil in ein tiefenabhängiges Profil umzurechnen.

## 2.5 Geometrische Effekte

Bisher wurden nur Fälle mit ebener Halbraumoberfläche betrachtet. In der Realität ist die Bodenoberfläche geneigt, besitzt Erhöhungen und Vertiefungen und im Boden können Einbauten verschiedenster Art vorhanden sein.

Für die im Untergrund oder an der Oberfläche sich ausbreitenden Wellen bedeutet eine Änderung der Geometrie längs ihres Ausbreitungsweges stets, daß sie reflektiert oder refraktiert werden. Betrachtet man deshalb Punkte an der Halbraumoberfläche, die hinter einer Geometrieänderung liegen, so kann man erwarten, daß die sich einstellenden Amplituden im allgemeinen kleiner sein werden, als die vergleichbaren eines Halbraumes mit ebener Oberfläche.

Zur Quantifizierung dieser Effekte wurden mit dem oben genannten Finiten Element-Programm SESAB Modellrechnungen durchgeführt. Als signifikante Geometrien wurden ein Hohlraum, ein Damm und ein Einschnitt untersucht. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Bildern 2.15 bis 2.17 dargestellt.

### 2.5.1 Hohlräume

Hohlräume im Untergrund stören im wesentlichen die Ausbreitung der Oberflächenwelle. Der Grad der Stö-

rung wird von der Tiefenlage des Störkörpers im Verhältnis zur Wellenlänge der Oberflächenwelle bestimmt. Liegt er tiefer als eine Wellenlänge oder ist die Wellenlänge kleiner als die Tiefe des Körpers so werden die Auswirkungen klein sein. Somit verbleibt ein mittlerer Frequenzbereich in dem reduzierte Auswirkungen auftreten können. Dies wird durch die Rechnungen bestätigt, wobei sich ein maximaler Reduktionsfaktor von 0,5 ergibt. Der Frequenzbereich, um den merkbare Abminderungen auftreten, liegt bei etwa  $\lambda/2$ .

### 2.5.2 Damm und Einschnitt

Bei beiden Systemen tritt im Vergleich zu einem ebenen Untergrund, wie erwartet, eine Reduktion der Erschütterungsamplituden auf. Die Reduktion ist beim Einschnitt größer und erreicht Werte von etwa 0,4 bei der horizontalen Komponente und etwa 0,3 bei der vertikalen Komponente. Beim Damm sind die entsprechenden Werte etwa 0,7 für die Horizontalkomponente und etwa 0,55 für die Vertikalkomponente.

## 2.6 Zusammenfassung

Es wurden die Amplituden-Abstandsgesetze von harmonisch, impulsförmig und stochastisch emittierenden Punkt-, Linien- und Flächenquellen als Idealisierung des fahrenden Zuges untersucht. Betrachtet wurde hierbei die Ausbreitung im homogenen Halbraum, in Schichtsystemen sowie im inhomogenen Halbraum. Weiterhin wurden geometrische Veränderungen der Halbraumoberfläche sowie Einbauten im Untergrund hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Schwingungsausbreitung analysiert. Im einzelnen ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Die Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld von harmonisch emittierenden Punktlasten liegt bei etwa 1 Wellenlänge.
- Für alle untersuchten Lastgeometrien liegt das Amplituden-Abstandsgesetz zwischen dem Gesetz einer Linienlast und dem Gesetz einer Punktlast.
- Für endlich ausgedehnte Quellen existiert ein Nahbereich, beschrieben durch das Linienlastgesetz, und ein Fernbereich, beschrieben durch das Punktlastgesetz. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen wird durch  $R_0 = L^2/\lambda$  festgelegt. Die Amplituden im Nahbereich sind im Mittel geringfügig größer als die einer Linienquelle gleicher Lastintensität.
- Das Ausbreitungsgesetz von räumlich verteilten, stochastisch emittierenden Quellen ist im wesentlichen das einer Punktquelle. Die Grenzentfernung ab der dies gilt, kann mit etwa der Lastlänge  $L$  angegeben werden.

- Bei geschichteten Bodenverhältnissen lassen sich diese Gesetzmäßigkeiten auch anwenden. Von Bedeutung ist jedoch, daß die Schicht eine Grenzfrequenz von  $f_g = v_s / 4H$  besitzt, unterhalb der sich Erschütterungen nicht ausbreiten.
- Die Materialdämpfung des Bodens ist insbesondere bei großen Entfernungen und hohen Frequenzen von Bedeutung und bestimmt dann überwiegend die Erschütterungsabnahme.
- Geometrieänderungen der Bodenoberfläche, wie z.B. Dämme oder Einschnitte, bewirken eine Reduzierung der Erschütterungsamplituden um ca. 50 % bzw. bis zu ca. 80 %.
- Bei Einbauten im Boden ergeben sich ebenfalls Abminderungen, deren Größe von den Abmessungen des Einbaues abhängig und auf einen bestimmten Frequenzbereich beschränkt ist.

## 2.7 Boden-Bauwerks-Wechselwirkung

Der Übergang der Schwingungen vom Boden in das Gebäude ist durch folgende Effekte geprägt:

Schwingungen, die Frequenzen besitzen, die größer als die sogenannte Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz  $f_b$  sind, werden abgemindert, darunter verstärkt. Die Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz wird durch die Fundament-Bodensteifigkeit und durch die Gesamtmasse des Gebäudes festgelegt.

$$f_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{Boden}}}{M_{\text{Bauwerk}}}}$$

Bei einem bestimmten konstanten Anregungsspektrum werden dann niedrige Gebäude (kleine Gesamtmasse) die auf einem steifen Untergrund stehen (große Bodensteifigkeit) weitaus mehr mit Schwingungen belastet, als größere Gebäude, die auf einem weichen Untergrund stehen.

Neben der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz sind die nächsten relevanten Frequenzen die vertikalen Wand-eigenfrequenzen

$$f_{w,j} = j \frac{v_L}{4H}$$

Diese legen die Bereiche fest, bei denen die einzelnen Stockwerke gegeneinander schwingen. Anschaulich heißt das, das sind die Frequenzen, die sich ergeben, wenn das gesamte Bauwerk als eine Kette von Einmassenschwinger

betrachtet wird, bei denen die Federn die Vertikalsteifigkeiten der Wände und die Decken die Einzelmassen darstellen.

Im weiteren sind dann die Biegeeigenfrequenzen der Stockwerksdecken von grundlegender Bedeutung für das Schwingungsverhalten des Bauwerks. Für balkenartige Tragwerke werden diese durch

$$f_{D,j} = \frac{\lambda^2 j}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}}$$

bzw. bei plattenartigen Tragwerken durch

$$f_{P,j,k} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{j^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{E h^2}{\rho 12(1-\nu^2)}}$$

berechnet. Hierin ist L die Spannweite, a und b die halben Rechteckseiten, E der Elastizitätsmodul, J das Trägheitsmoment, F die Querschnittsfläche, h die Querschnittshöhe und  $\rho$  die Materialdichte.

Neben diesen Grundeigenfrequenzen kann es dann eine Fülle weiterer Eigenfrequenzen geben, die aus der Koppelwirkung mehrerer Bauwerke, z.B. Tunnel-Gebäude, der Koppelung von Bauteilen, z.B. den Decken und Wänden sowie aus den Rand- und Einspannbedingungen, wie z. B. die Einbettung der Gebäude resultieren. Hierzu können keine speziellen Angaben gemacht werden, da die sich jeweils ergebenden gekoppelten Eigenfrequenzen von den aktuellen Steifigkeits- und Massenverhältnissen abhängig sind.

Neben der Ermittlung bzw. auch der näherungsweise Ermittlung von Resonanzfrequenzen ist die Ermittlung oder Abschätzung der Resonanzamplituden von großer praktischer Bedeutung. Dies gelingt natürlich nur bei einfachen Tragwerken wie Einmassenschwinger und Balken oder Stäben, da bei zusammengesetzten Tragwerken die auf dem natürlichen Untergrund gegründet sind, der wesentliche Anteil der Dämpfung aus Systemdämpfung - Reibung und Anschlüsse- sowie aus der Abstrahlungsdämpfung des Untergrundes besteht. Für die einfachen Systeme gilt für die Resonanzamplituden:

Ein-Massenschwinger:  $A \sim 1/2D$   
 Stab:  $A \sim 2\pi/D$

Mit den in Kapitel 2 gegebenen Hinweisen sind alle grundlegenden Zusammenhänge hinsichtlich der Erschütterungsausbreitung im natürlichen Erdreich und deren Einleitung und Weiterleitung in Gebäuden dargestellt. Im folgenden wird nun auf die Vorgehensweise bei der Untersuchung der Erschütterungsübertragung von U-Bahn-Schwingungen auf dicht benachbarte Gebäude im einzelnen eingegangen.

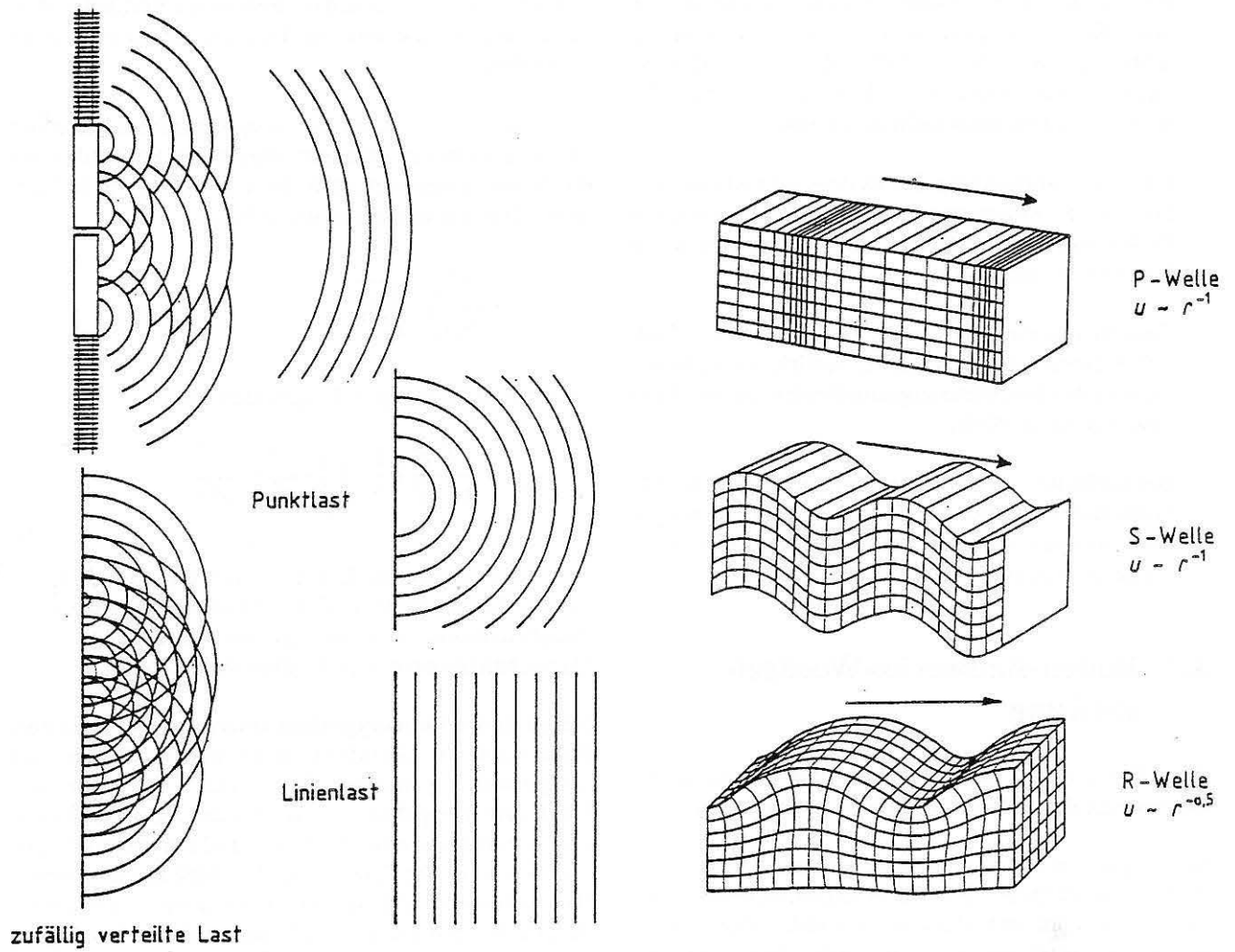


Bild 2.1  
Ausbreitungsverhältnisse bei verschiedenen Lasttypen (a) und Wellenarten mit Abnahmekoeffizienten für Punktlast im Halb-  
raum (b)

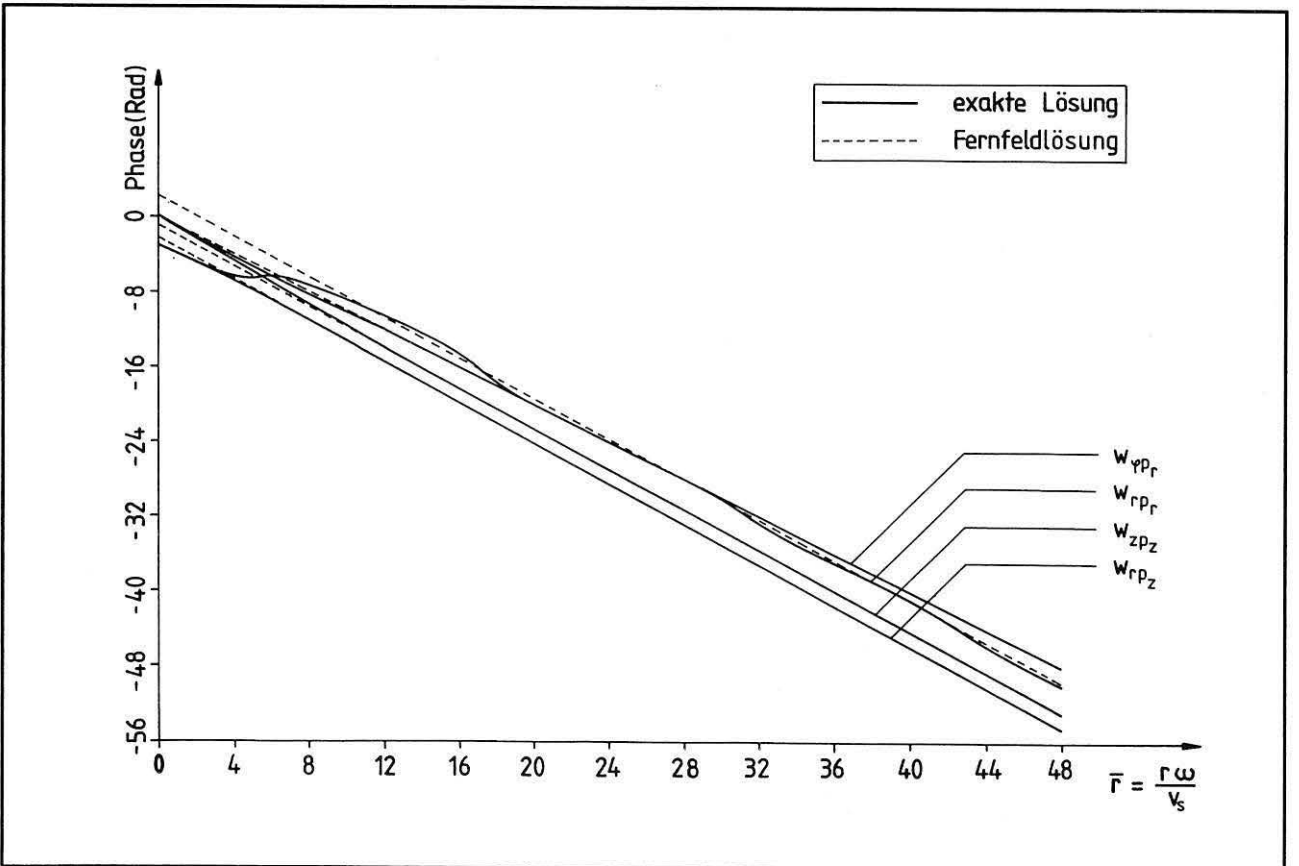
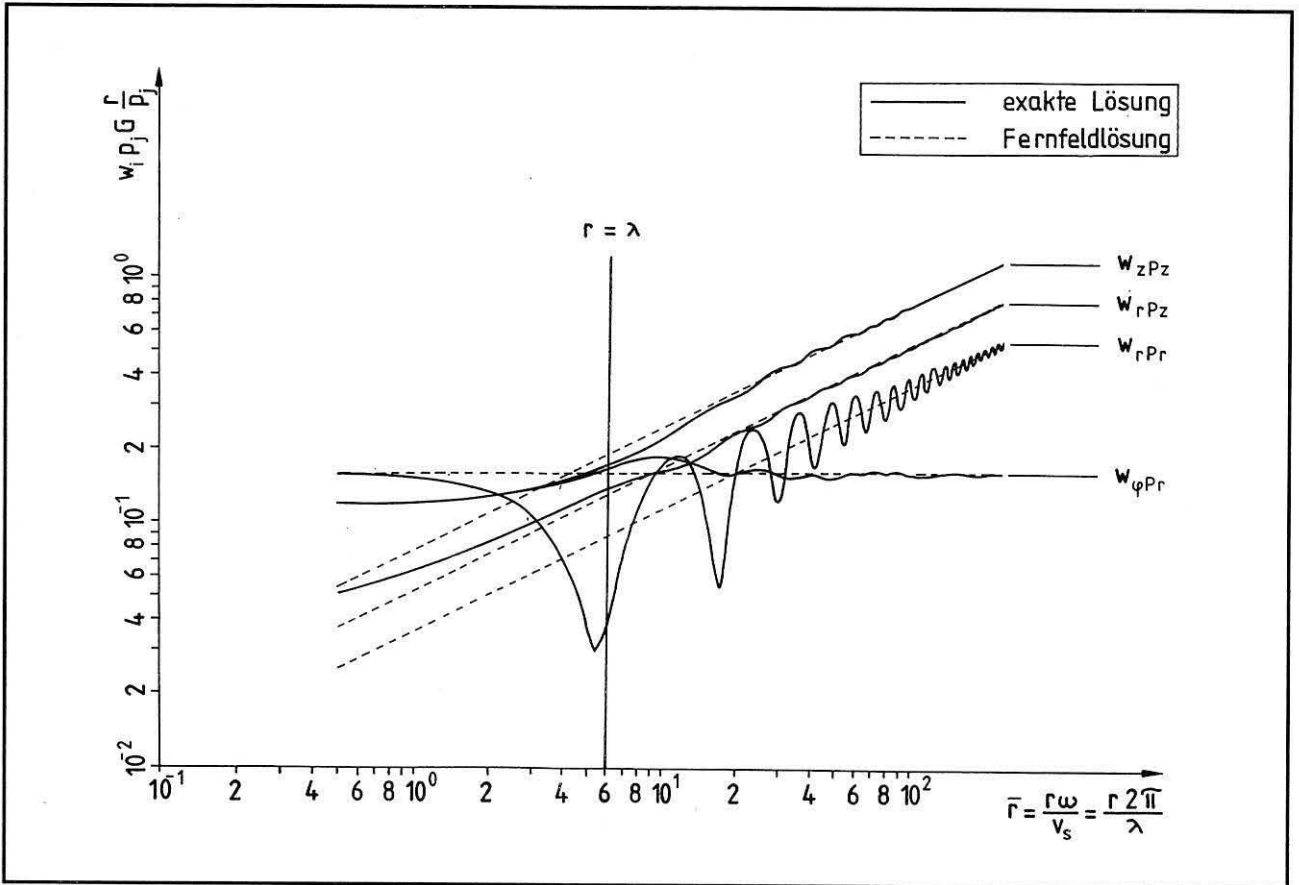


Bild 2.2  
 Harmonische Punktquellen  
 a) Amplitudenverlauf  
 b) Phasenverlauf



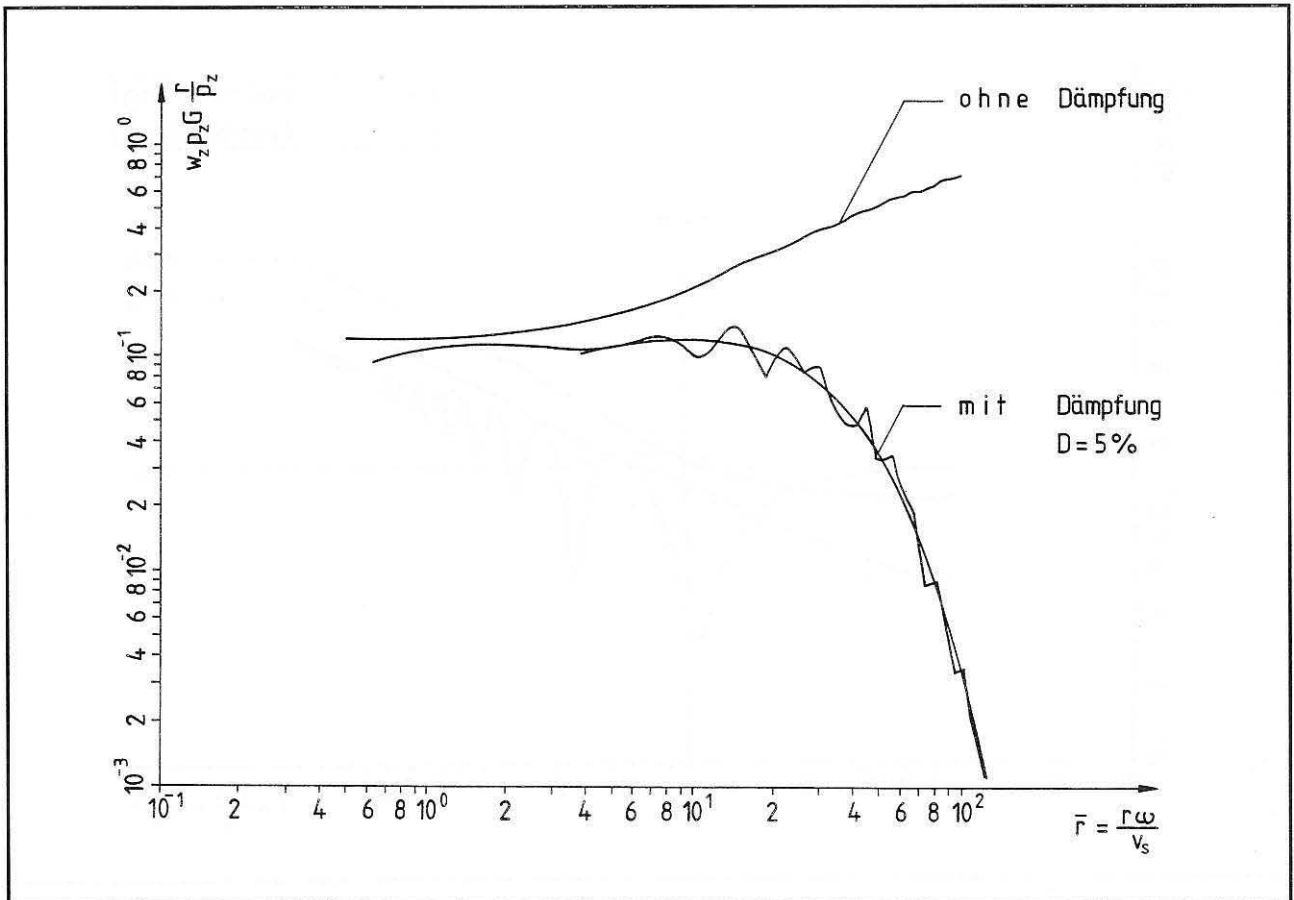


Bild 2.3  
Einfluß der Materialdämpfung auf die Amplitudenabnahme

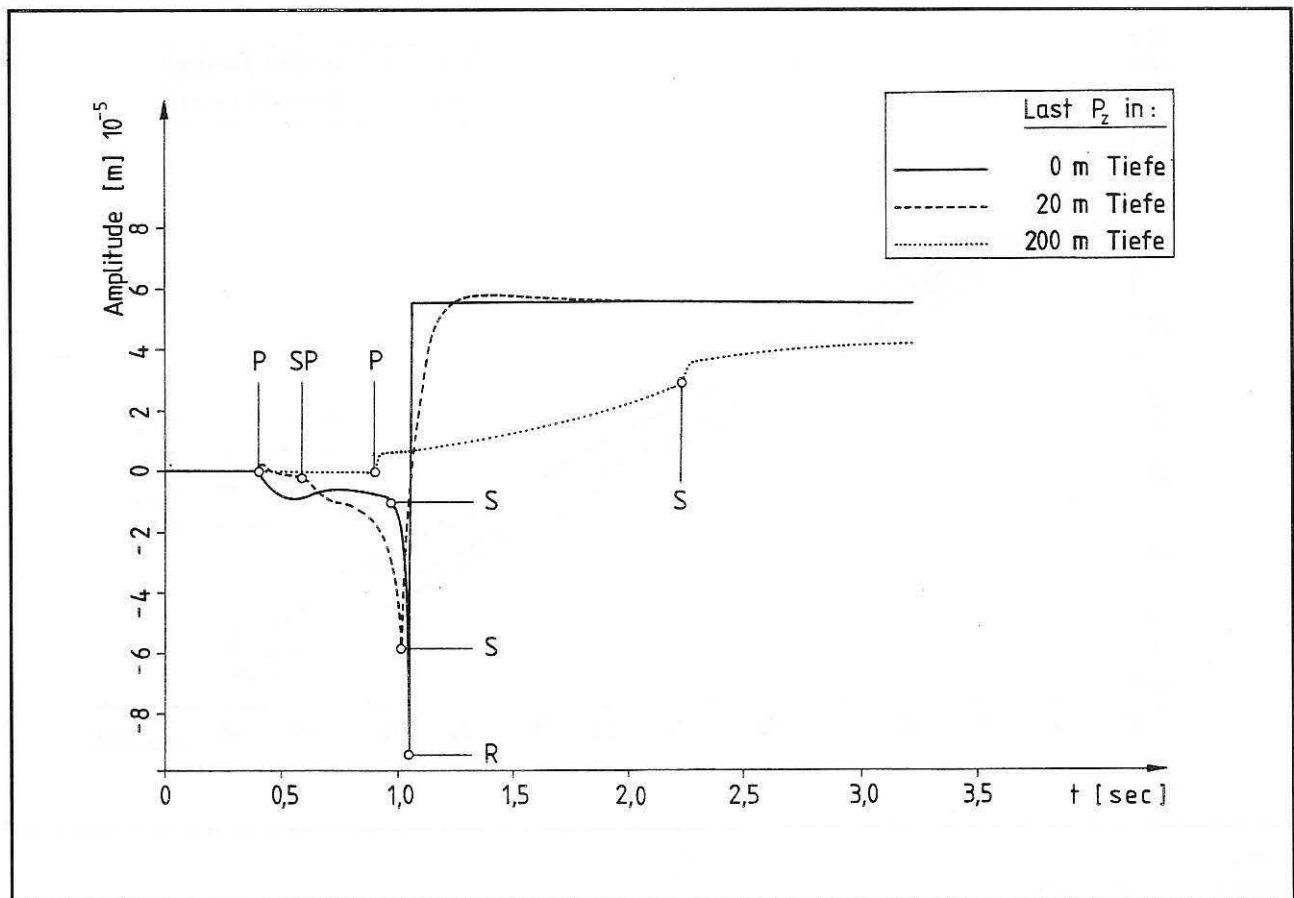


Bild 2.4  
Antwortzeitverläufe an der Bodenoberfläche bei Anregung in verschiedenen Tiefen

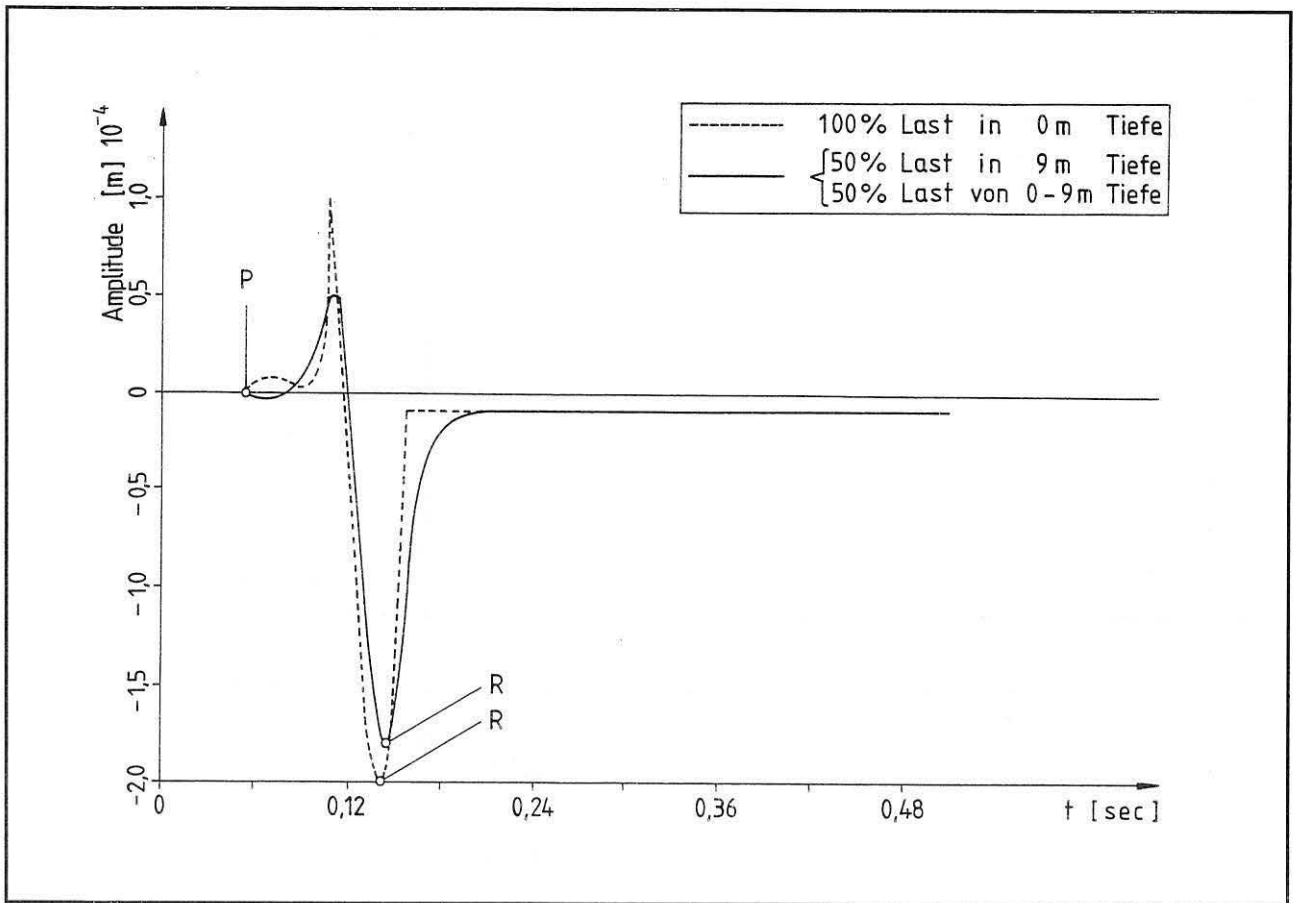


Bild 2.5  
 Freifeldantwort einer impulsförmigen Last bei verschiedenen Eindringtiefen

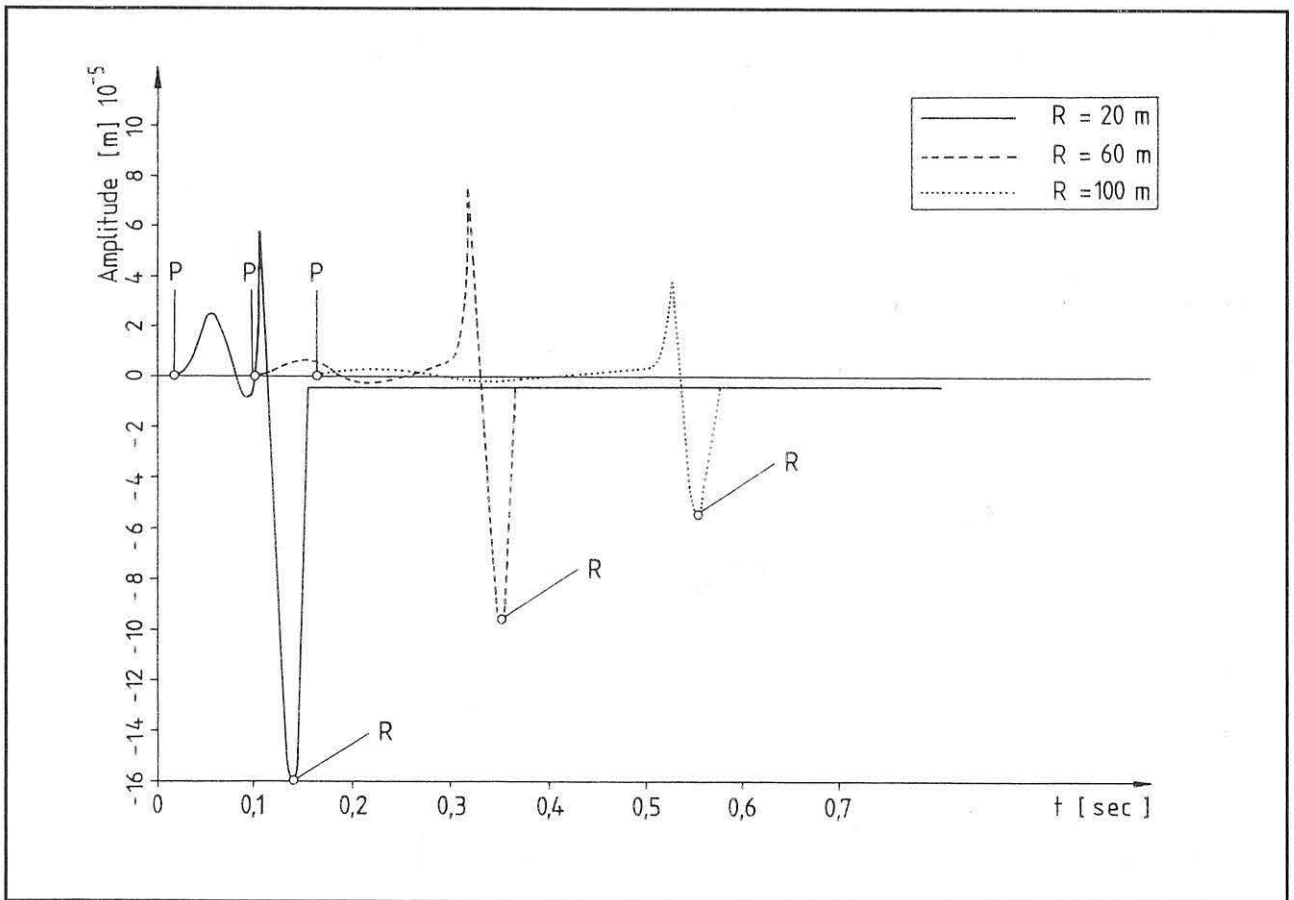


Bild 2.6  
 Freifeldantworten eines wassergesättigten Bodens in verschiedenen Entfernungen

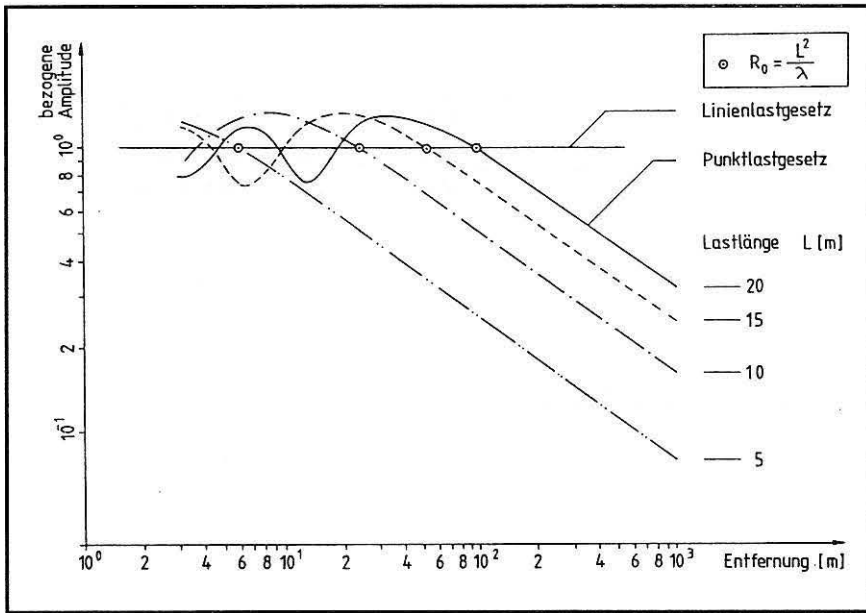


Bild 2.7  
Amplituden-Abstandsgesetz einer gleichphasigen Streckenlast

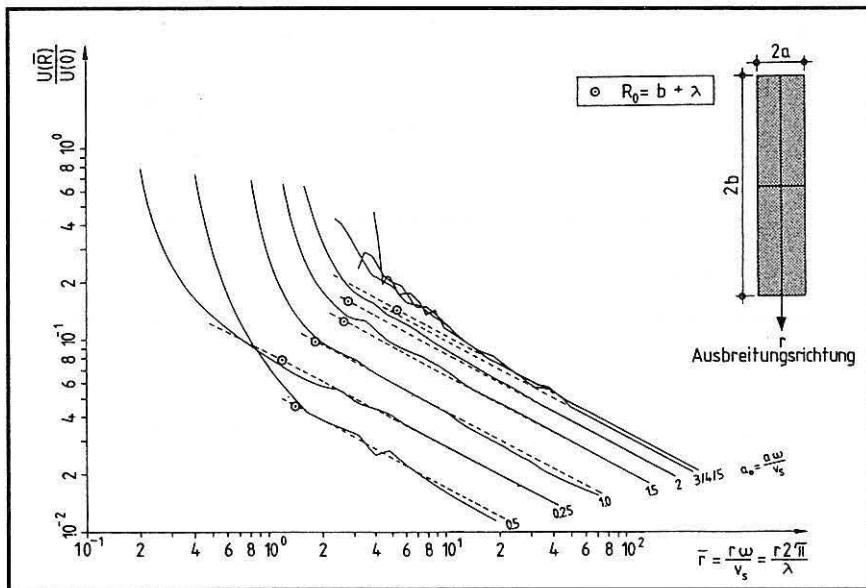
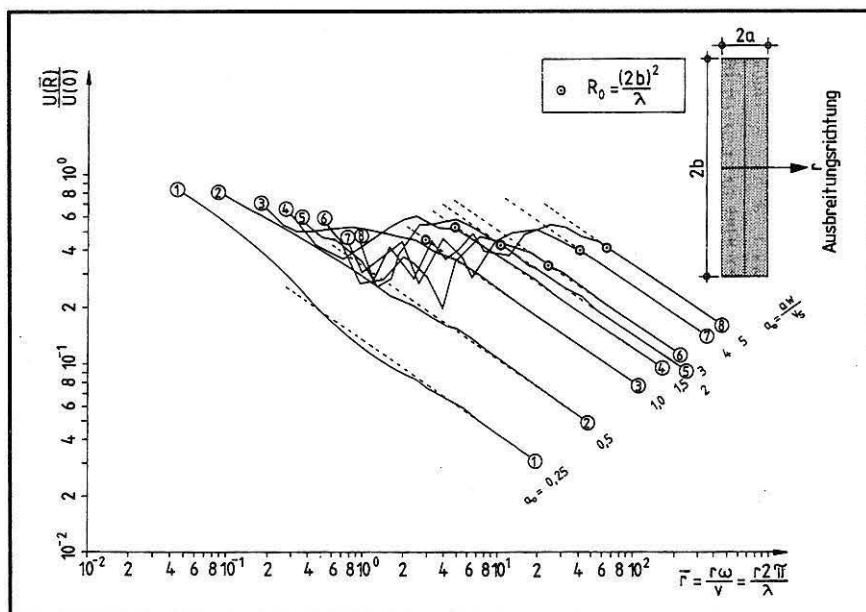


Bild 2.8  
Amplituden-Abstandsgesetz einer gleichphasigen Flächenlast;  
a) Ausbreitung senkrecht  
b) parallel zur längeren Seite



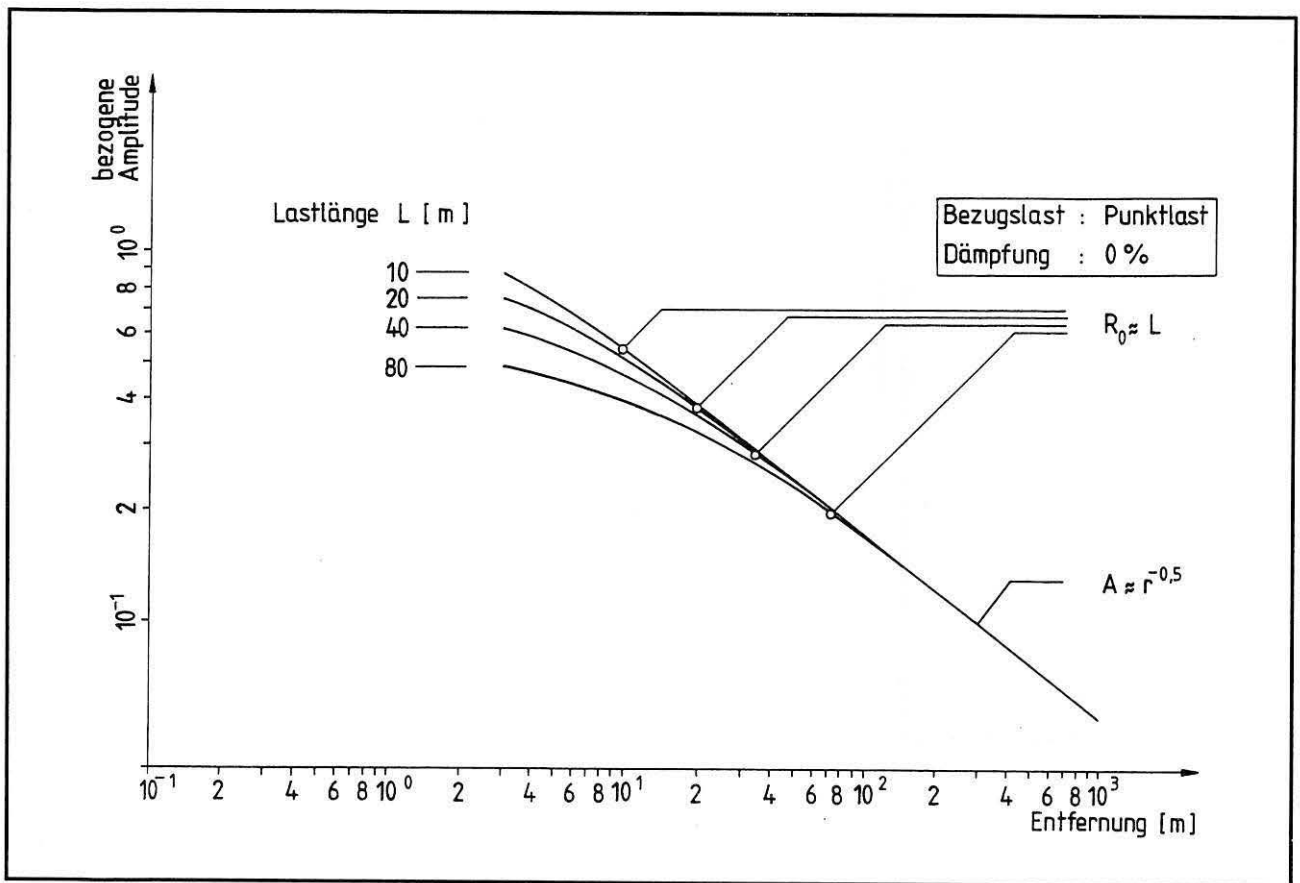


Bild 2.9  
Amplituden-Abstandsgesetz einer stochastischen Streckenlast

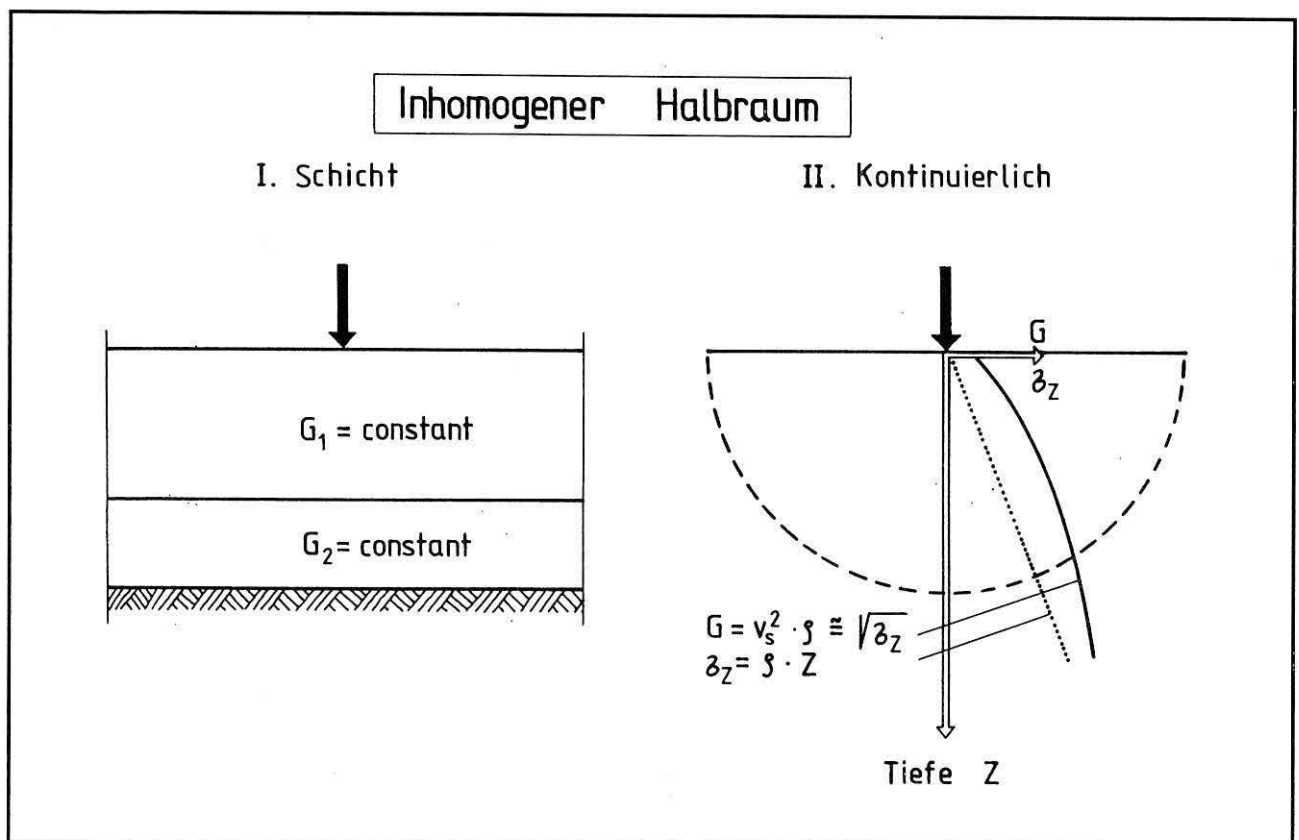


Bild 2.10  
Rechenmodell eines  
a) geschichteten  
b) kontinuierlich inhomogenen Halbraumes

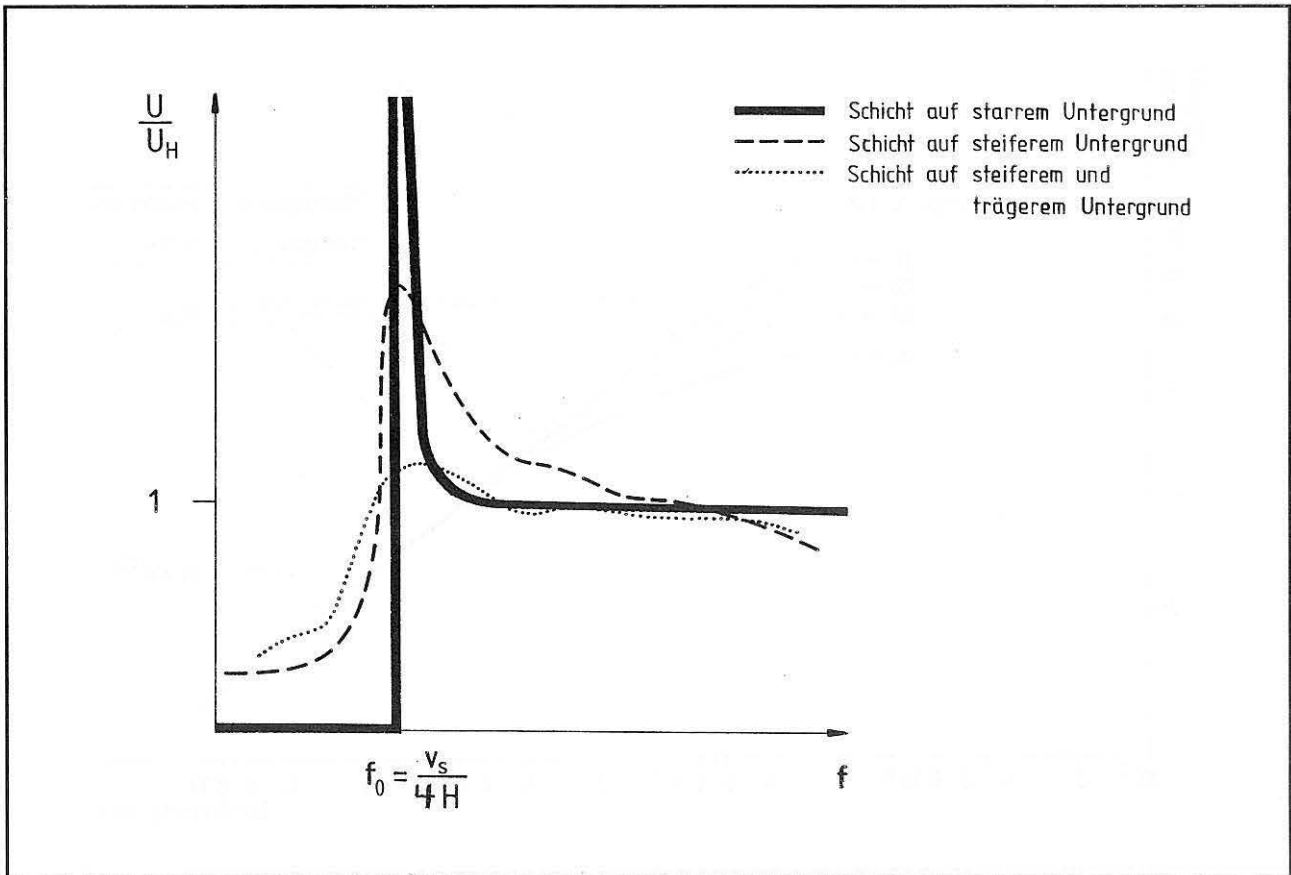


Bild 2.11  
Spektralamplituden verschiedener Schichtsysteme bezogen auf die Halbraumamplituden

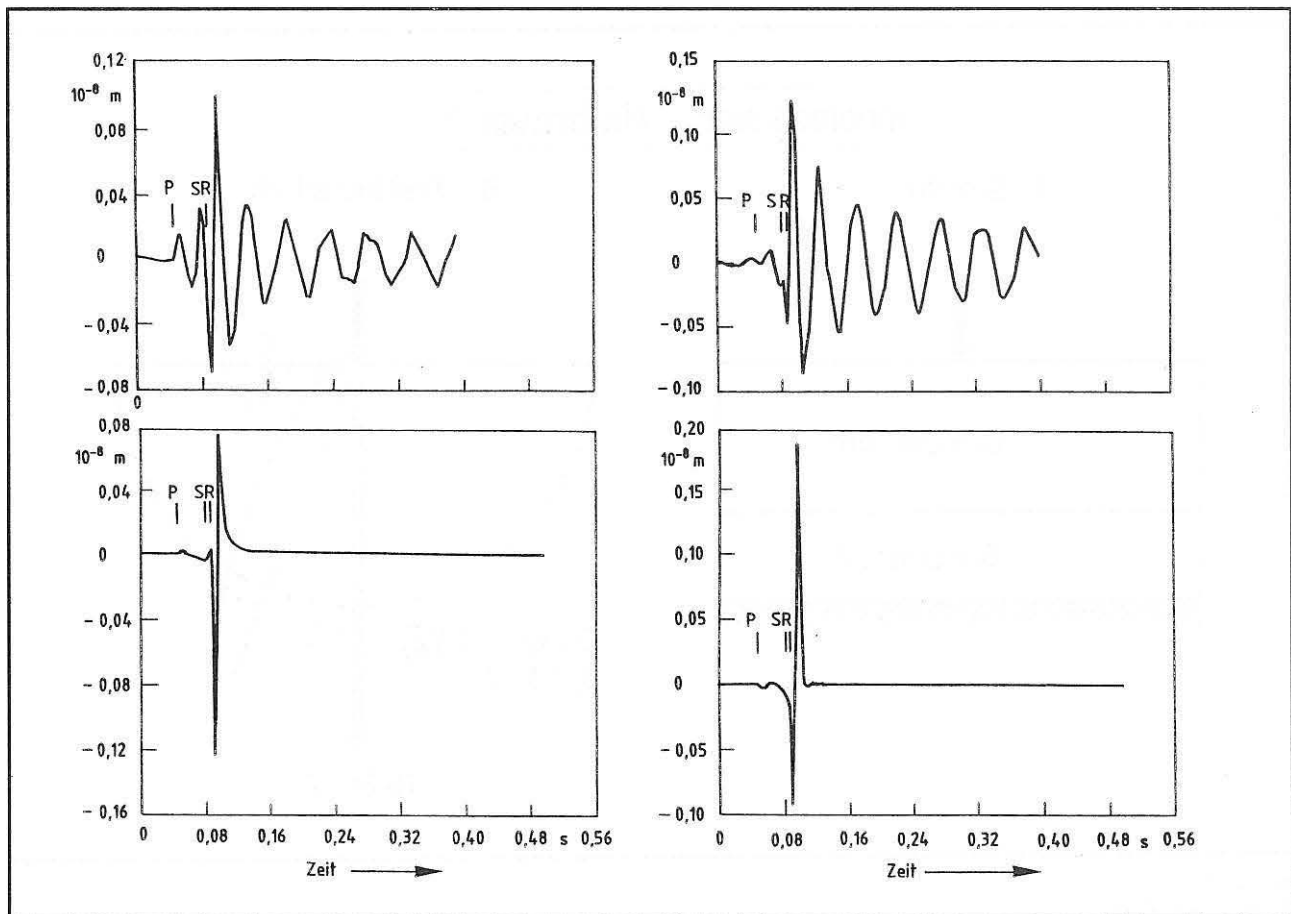


Bild 2.12  
Impulszeitverläufe a) in einer Schicht b) im Halbraum



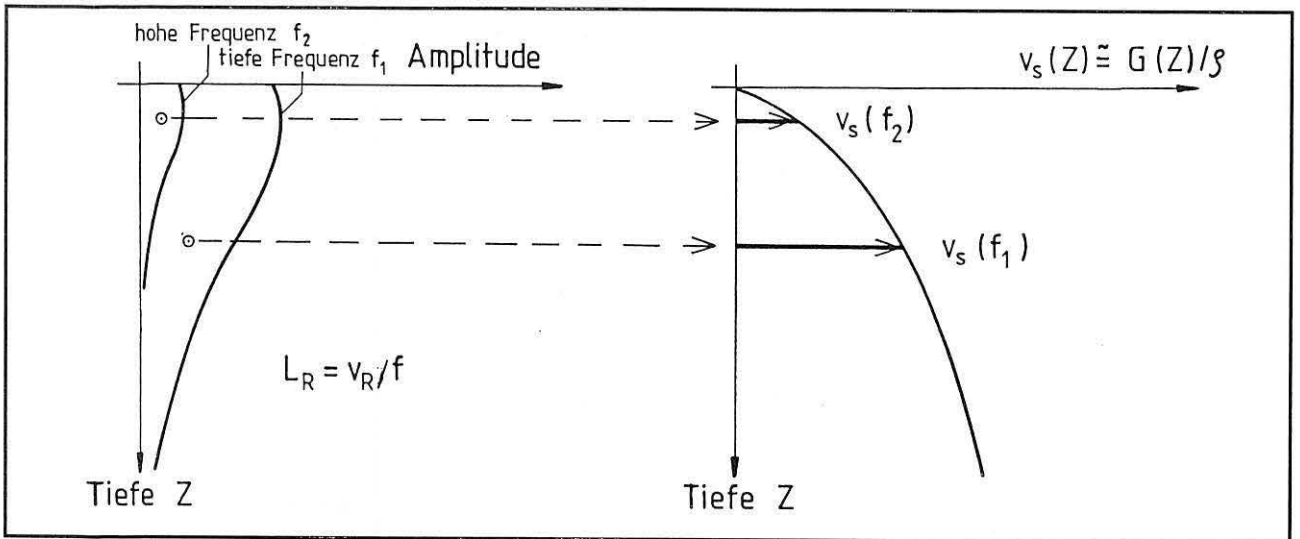


Bild 2.13

Ursache des Dispersionseffektes im inhomogenen Halbraum

a) Eindringtiefe der Rayleighwelle bei verschiedenen Frequenzen

b) Ausbreitungsgeschwindigkeit verschiedener Frequenzanteile eines Impulses

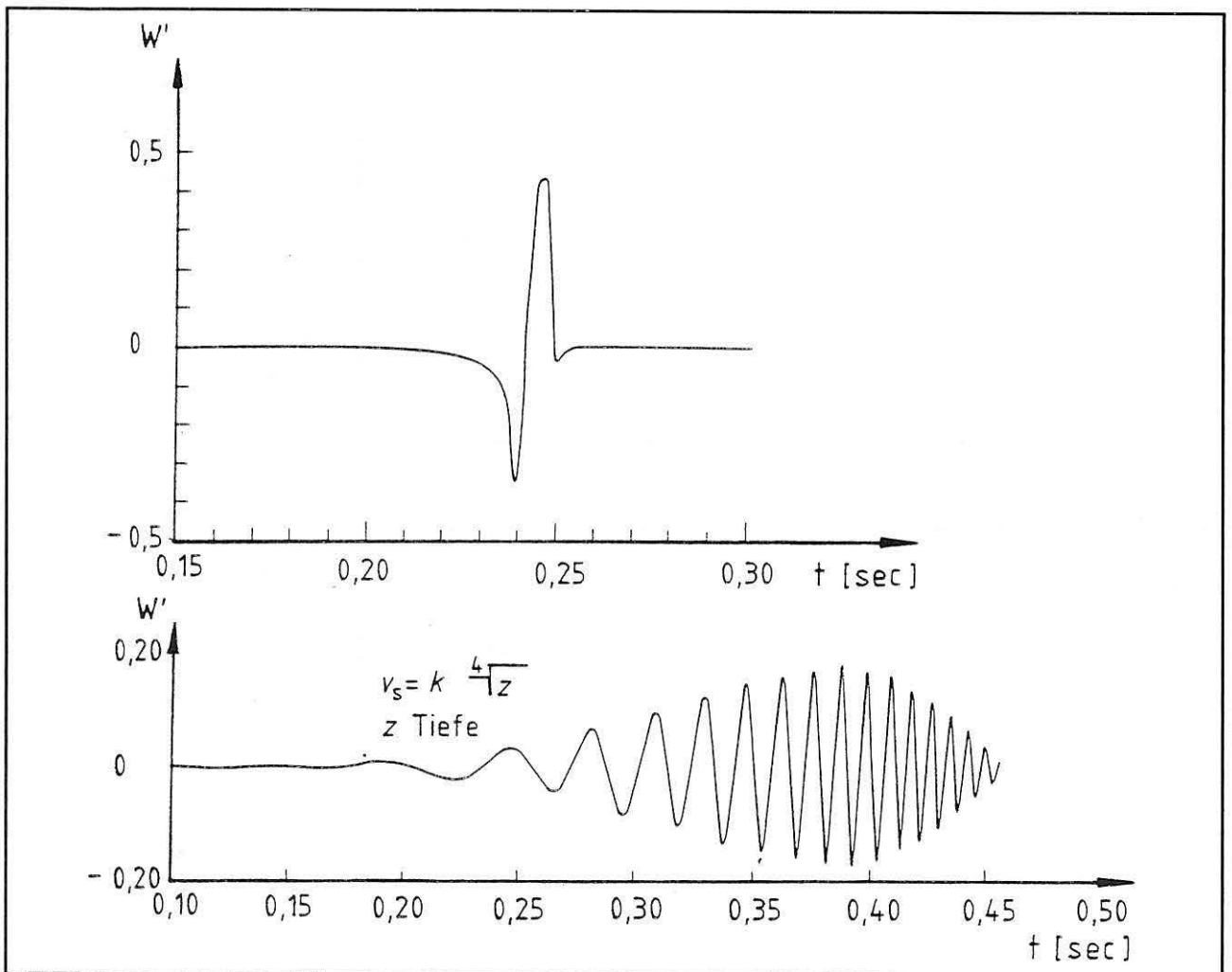


Bild 2.14

Impulszeitverlauf (nur Oberflächenwelle)

a) im homogenen Halbraum

b) im inhomogenen Halbraum

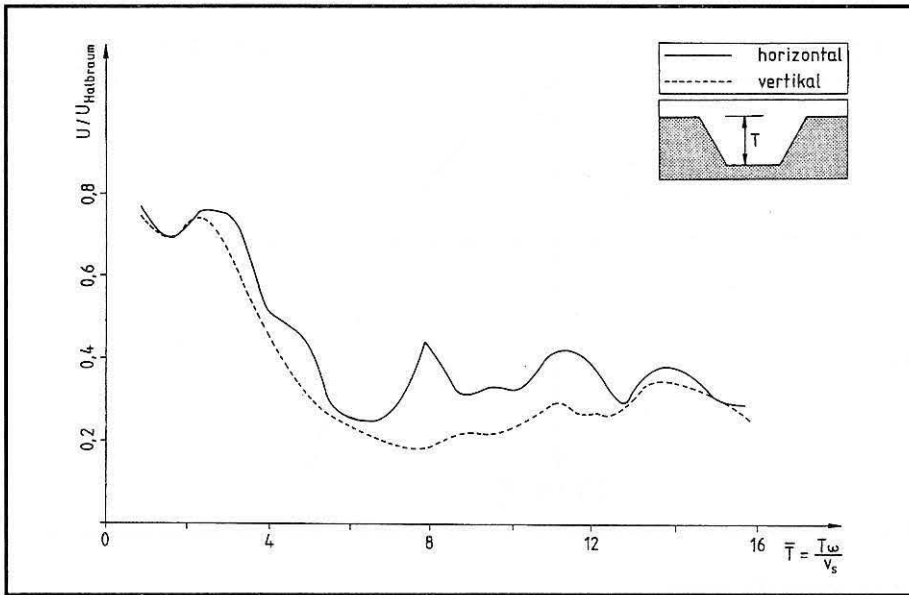


Bild 2.15  
Einfluß eines Hohlraumes  
auf die Spektralamplituden  
(Bezugssystem: ebener Halbraum)

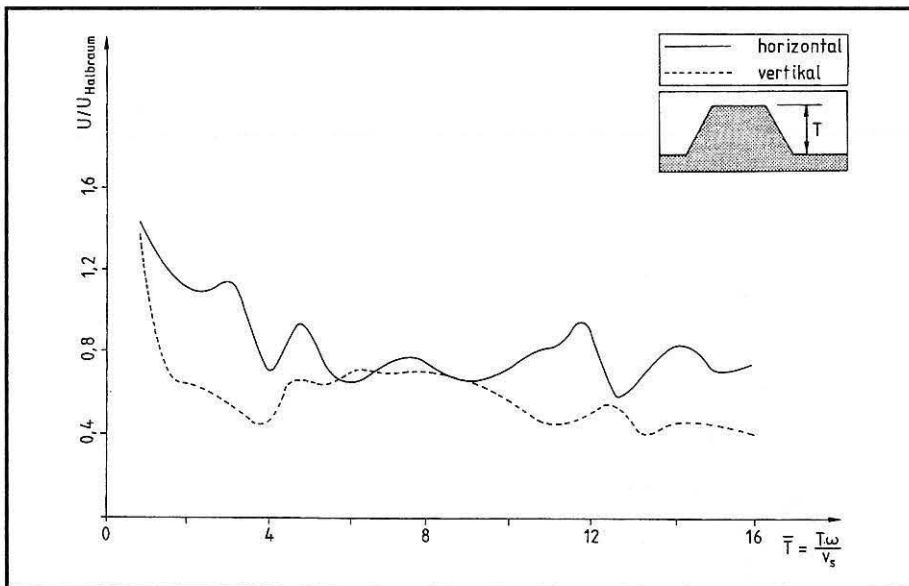


Bild 2.16  
Einfluß eines Dammes  
auf die Spektralamplituden  
(Bezugssystem: ebener Halbraum)

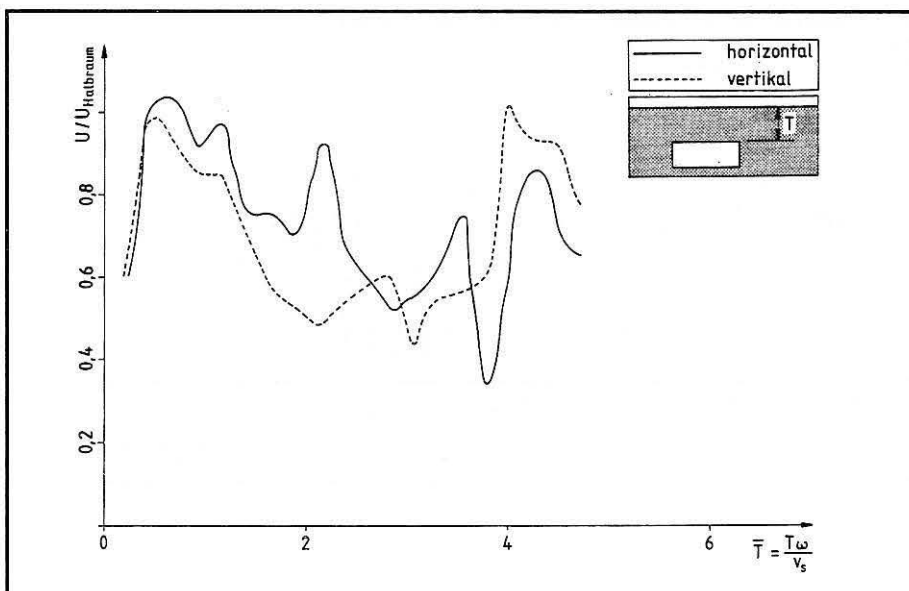


Bild 2.17  
Einfluß eines Einschnittes  
auf die Spektralamplituden  
(Bezugssystem: ebener Halbraum)

# 3 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

## 3.1 Vorbemerkung

Die Untersuchung des Schwingungsverhaltens des gekoppelten Systems „Tunnel-Boden-Bauwerk“ kann auf rechnerischem und/oder meßtechnischem Wege erfolgen. Eine rein numerische Untersuchung bietet den Vorteil, daß die einzelnen, das Schwingungsverhalten beeinflussende Größen wie

- Geometrie der einzelnen Bauteile
- ihre relative Lage zueinander
- die Anordnung spezieller Konstruktionselemente
- die Materialeigenschaften

genau festgelegt werden können. Weiterhin sind numerische Simulationsrechnungen im Vergleich mit Messungen viel schneller, viel kostengünstiger und vor allem in weit größeren Variationsbreiten durchführbar.

Im Vergleich mit Messungen ist bei numerischen Simulationsrechnungen eventuell als Nachteil anzusehen, daß bei der Modellierung der Wirklichkeit im Rechenmodell mehr oder weniger idealisiert werden muß. Die Auswirkungen dieser notwendigen Vereinfachungen auf die Genauigkeit der numerisch erzielten Ergebnisse sind oftmals nicht oder nur in gewissen Grenzen abschätzbar. Ist man an absoluten Aussagen interessiert, so sind deshalb in jedem Fall zu den numerischen Untersuchungen weitere meßtechnische Untersuchungen notwendig. Solche meßtechnischen Untersuchungen zeigen zum einen Phänomene bei einer realen Situation auf und geben somit Hinweise zur wirklichkeitsnahen Modellierung. Zum anderen kann die Güte eines Rechenmodells durch Vergleich mit den meßtechnisch erzielten Ergebnissen eines vergleichbaren Systems direkt überprüft werden. In dieser Arbeit werden deshalb sowohl rechnerische wie meßtechnische Untersuchungen durchgeführt.

## 3.2 Untersuchungsprogramm

Das für die numerischen Untersuchungen zum Einsatz kommende Rechenprogramm SESAB wurde ursprünglich zur Berechnung des Schwingungsverhaltens von U-Bahntunneln entwickelt. Im Rahmen des ERP-Forschungsvorhabens „Ausbreitung der durch Verkehr in Tunneln in Lockergesteinen erzeugten Erschütterungen und Maßnahmen zu ihrer Abminderung“ wurden damit verschiedene Tunnelsysteme untersucht. Dabei zeigte sich, daß die Tunnelgeometrie nur einen geringen Einfluß auf die Erschütterungsstärke in der Umgebung hat. Deshalb soll hier nur die Tiefenlage des Tunnels näher untersucht werden.

Eine Variation der Bodensteifigkeit kann die Frage klären, inwieweit der umgebende Boden nicht nur Ausbreitungsmedium ist, sondern auch die Schwingungseigenschaften des Tunnels beeinflusst.

Für den Problembereich Immission in Gebäuden soll weiterhin der Einfluß der Gründungstiefe von Gebäuden untersucht werden. Eine zunehmende Tiefenlage der Fundamente führt vermutlich zu einer Abminderung der Gebäudeschwingungen gegenüber den Freifeldschwingungen, da die Amplituden der anregenden Oberflächenwellen mit der Tiefe abnehmen. Andererseits werden die einfallenden Wellen zum Teil an der Kellerwand reflektiert und zum Teil unter dem Gebäude hindurchgeführt. Die Reflexion an der Kellerwand bedeutet eine zusätzliche Anregung des Gebäudes, die Umleitung unter dem Gebäude ergibt größere Amplituden an den Fundamenten als bei Anregung im ungestörten Freifeld. Hier sollen die Modellrechnungen die tatsächliche Abminderungswirkung durch die Tiefenlage der Fundamente aufzeigen.

Neben der Tiefenlage der Gebäudefundamente ist die relative Lage des Gebäudes zum Tunnel – über dem Tunnel, neben dem Tunnel – sowie die absolute Entfernung zwischen Tunnel und Gebäude von großer Bedeutung. Es ist zu erwarten, daß bei einer Lage des Gebäudes über dem Tunnel eine starke Koppelung zwischen den einzelnen Massenträgheiten von Tunnel und Boden einerseits und dem darüber befindlichen Gebäude andererseits auftritt. Bei einer seitlichen Lage des Gebäudes relativ zum Tunnel sind dagegen die Auswirkungen mehr im anregenden Wellenfeld entsprechend den oben bei der Tiefenlage der Fundamente genannten Effekte zu suchen. Diese Erwartung gilt es zu überprüfen und in quantifizierbaren Größen zu belegen.

Schließlich werden einige aktive bzw. passive schwingungsmindernde Baumaßnahmen untersucht. Aufgezeigt werden soll die Wirksamkeit folgender Maßnahmen:

- Feder-Masse-System bzw. Unterschottermatten im Tunnel unterhalb des Gleises
- offene Schlitze verschiedener Tiefe und Lage zwischen Tunnel und Gebäude
- (zurückgelassener) Baugrubenverbau
- Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Gebäude
- Auflasten und Versteifung der Bodenoberfläche
- bis zur Fundamentierung reichende Lichtschächte
- federnde Gebäudeauflagerung
- geschlossene und aufgelöste Gebäudefundamentierung.

## 3.3 Beschreibung des Rechenverfahrens

Das zu analysierende System wird für die Berechnung in drei Teilbereiche aufgeteilt. Im inneren **Teilbereich I**, der keinen geometrischen Beschränkungen unterworfen ist, befindet sich das Tunnelbauwerk mit dem Schotterbett, der über und unter dem Tunnelbauwerk befindliche Boden bis zu einer gewissen Tiefe sowie das Gebäude.

Dieser Bereich wird mit der Methode der finiten Elemente berechnet. An den inneren Bereich schließen sich rechts und links zwei als horizontal geschichtet, bis ins Unendliche ausgedehnt gedachte **Bereiche L und R** an. Diese Bereiche können nicht mit der Methode der finiten Elemente berechnet werden, da die unendliche Ausdehnung eine unendliche Anzahl von finiten Elementen zur Folge haben würde. Diese Bereiche werden mit einer nach [11] entwickelten Methode berechnet. Bei dieser sogenannten Finiten Streifen-Methode werden die beiden äußeren Bereiche nur in vertikaler Richtung diskretisiert, in horizontaler Richtung dagegen als unendlich ausgedehntes Kontinuum betrachtet. An der **unteren Systembegrenzung U** zum Halbrauminneren werden frequenzabhängige viskose Dämpferelemente angeordnet. Ist der Winkel zwischen Fortpflanzungsrichtung der Wellenfront und der unteren Systembegrenzung größer als 20° bis 30°, so absorbieren die Dämpferelemente vollständig die Energie der einfallenden Wellenfront. Dadurch werden das Ergebnis verfälschende Reflexionen vermieden.

### 3.3.1 Teilbereich I

Dieser Bereich wird nach der Methode der finiten Elemente berechnet. Die Finite-Element-Methode ist ein Verfahren zur Berechnung angenäherter Lösungen für komplexe Randwertaufgaben. Da diese Methode eine breite Anwendung gefunden hat, sollen hier nur die wichtigsten Zusammenhänge dargelegt werden.

Der Bereich I wird durch eine gewisse Anzahl finiter Elemente diskretisiert, deren Form grundsätzlich beliebig gewählt werden kann. Die Elemente sind durch eine diskrete Anzahl von Knotenpunkten auf den Elementrändern miteinander verbunden. In jedem Element wird eine Verschiebungsfunktion vorgegeben, die den Verformungszustand bzw. Verzerrungszustand innerhalb des Elements und auf den Elementrändern festlegt. Die Verschiebungsfunktionen müssen dabei derart beschaffen sein, daß an den Elementrändern keine Klaffungen bzw. Überschneidungen auftreten. Zusammen mit einem Stoffgesetz, das hier linear ist, beschreiben die aus den Verschiebungen abgeleiteten Verzerrungen den Spannungszustand innerhalb eines Elements und auf den Elementrändern.

Da hier ein ebener Dehnungszustand betrachtet werden soll, sind die Freiheitsgrade des Elements die Knotenpunktverschiebungen  $u_x$  in x-Richtung (Halbraumoberfläche) und  $u_z$  in z-Richtung (Halbrauminnere).

Die Impulsbilanz in jedem Freiheitsgrad wird mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Verrückungen formuliert. Mit den hier getroffenen Voraussetzungen eines linearen, hysteretisch gedämpften Materials – hysteretische Dämpfung kann durch die Einführung von komplexen Größen für den Schubmodul  $G$  berücksichtigt werden – und stationärer, harmonischer Erregung, üblicherweise dargestellt durch den komplexen Ansatz für die Kno-

tenpunktverschiebungen  $\mathbf{u}$  und  $\mathbf{p}$

$$\begin{aligned}\mathbf{u} &= \hat{\mathbf{u}} \exp(i\omega t) \\ \mathbf{p} &= \hat{\mathbf{p}} \exp(i\omega t)\end{aligned}$$

führt das Prinzip der virtuellen Verrückungen zu einem linearen, symmetrischen komplexen Gleichungssystem für die Knotenpunktverschiebungen  $\mathbf{u}$

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{p}}.$$

$\mathbf{K}$  ist die komplexe Steifigkeitsmatrix und  $\mathbf{M}$  die reelle Massenmatrix, die hier als „consistent-mass-matrix“ eingeführt wird. In den komplexen Vektoren  $\hat{\mathbf{u}}$  und  $\hat{\mathbf{p}}$  sind die Amplituden der unbekanntenen Knotenpunktverschiebungen und der äußeren Knotenkräfte angeordnet.

Die Komplexität der Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  folgt aus der Stoffmatrix  $\mathbf{D}$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mathbf{G} & \lambda & \mathbf{0} \\ \lambda & \lambda + 2\mathbf{G} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \lambda + 2\mathbf{G} \end{bmatrix},$$

die durch die Einführung komplexer Werte für den Schubmodul  $G$  und die Lamesche Konstante  $\lambda$  komplex wird.

Für die Generierung der Systemsteifigkeits- und Systemmassenmatrix wird das sogenannte „direkte Steifigkeitsverfahren“ verwendet. Bei diesem Verfahren werden an jedem Knoten eines jeden Elementes innere Knotenkräfte eingeführt, die zu jeder Zeit mit dem Element einen Gleichgewichtszustand im d'Alembertschen Sinne bilden. Aus der Formulierung der Impulsbilanz mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Verrückungen zwischen inneren und äußeren Knotenkräften an jedem Knoten des Systems entsteht dann die Systemsteifigkeitsmatrix und Systemmassenmatrix, die Bandstruktur besitzt. Die Bandbreite, die proportional der maximalen Knotendifferenz eines Elementes ist, kann durch geschickte Knotennumerierung minimiert werden.

### 3.3.2 Teilbereiche L und R

Bei der Analyse werden die Bereiche L und R links und rechts neben dem inneren Bereich I im Sinne des Schnittprinzips von dem inneren Bereich I getrennt. Die Lösung der dynamischen Reaktion der seitlichen Bereiche auf harmonische Erregung besteht in der Berechnung einer frequenzabhängigen komplexen dynamischen Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{R}$  für die unendlich ausgedehnten Bereiche L und R. Nach der Berechnung der dynamischen Steifigkeitsmatrix werden die durch den Schnitt freigegebenen Schnittkräfte in Abhängigkeit der Verschiebungen an der Schnittfläche bestimmt. Danach werden die Schnittkräfte als äußere Belastung auf den inneren Bereich I aufgebracht. Damit ist die Impulsbilanz erfüllt und der innere Bereich kann mit dem Verfahren der finiten Elemente berechnet werden.

Für das hier behandelte ebene Dehnungsproblem und freie harmonische Bewegung (keine äußere Belastung) werden die Bewegungen des linear elastisch/viskosen Kontinuums L bzw. R durch folgendes partielle Differentialgleichungssystem beschrieben:

$$G\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + (\lambda + G)\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z}\right) + \rho \omega^2 u_x = 0\right.$$

$$\left. G\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + (\lambda + G)\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right) + \rho \omega^2 u_z = 0\right.$$

Hierin sind

- $u_x(x,z,t), u_z(x,z,t)$  die reellen oder komplexen Verschiebungen eines Massenpunktes in x- bzw. z-Richtung für ein elastisches bzw. elastisch/viskoses Material
- $\rho$  die Materialdichte
- $G$  der reelle oder komplexe Schubmodul
- $\lambda$  die reelle oder komplexe Lamesche Konstante
- $\omega$  die Kreisfrequenz.

Da harmonische Bewegung vorausgesetzt wird, können die Verschiebungen  $u_x(x,z,t), u_z(x,z,t)$  in üblicher Weise in komplexer Form

$$\hat{u}_x(x,z,t) = \hat{u}_x(x,z) \exp(i\omega t)$$

$$\hat{u}_z(x,z,t) = \hat{u}_z(x,z) \exp(i\omega t)$$

dargestellt werden. Die Realteile obiger Gleichungen stellen die eigentliche physikalische Lösung dar.

Im weiteren wird für die Amplituden  $\hat{u}_x(x,z), \hat{u}_z(x,z)$  ein Produktansatz der Form

$$\hat{u}_x(x,z) = \hat{u}(z) \hat{g}(x)$$

$$\hat{u}_z(x,z) = \hat{w}(z) \hat{g}(x)$$

gewählt.

Da im folgenden durchweg mit komplexen Größen, gekennzeichnet durch  $\sim$ , und mit Amplituden, gekennzeichnet durch  $\hat{\phantom{x}}$ , gearbeitet wird, werden diese Bezeichnungen zur vereinfachten Schreibweise ab jetzt ebenfalls weggelassen. Sie werden nur dort wieder eingeführt, wo sie zum Verständnis notwendig sind.

Einsetzen der obigen Gleichungen in das partielle Differentialgleichungssystem ergibt zwei gewöhnliche Differentialgleichungen für  $u(z)$  und  $w(z)$  und eine dritte einfache Differentialgleichung für  $g(x)$  mit der Lösung

$$g(x) = \exp(-ikx) \text{ mit } k = \omega/c,$$

wobei  $c$  die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in horizontaler Richtung ist. Mit diesen Ergebnissen ergibt sich für die Verschiebungsfelder

$$u_x(x,z,t) = u(z) \exp(i\omega t - ikx)$$

$$u_z(x,z,t) = w(z) \exp(i\omega t - ikx)$$

Diskretisiert man nun die seitlichen Bereiche L und R in der Art, daß der gesamte Bereich in dünne horizontale Schichten der Dicke  $h_j, j = 1 \dots n$  aufgeteilt wird, nimmt weiter lineare Variation der horizontalen Verschiebungen  $u(z)$  und vertikalen Verschiebungen  $w(z)$  über die Dicke  $h_j$  der einzelnen Schicht an, dann können die Verschiebungen  $u(z)$  und  $w(z)$  als Funktionen der diskreten Verschiebungen  $v_j$  an den Schichtbegrenzungen erklärt werden.

Für eine Schicht  $j$  gilt:

$$u(z) = (z_{j+1} - z)/h_j v_{2j-1} + (z - z_j)/h_j v_{2j+1}$$

$$w(z) = (z_{j+1} - z)/h_j v_{2j} + (z - z_j)/h_j v_{2j+2}$$

Aus obigen Gleichungen erhält man nach den Regeln der Elastizitätstheorie unter Kürzung des gemeinsamen Zeitfaktors  $\exp(i\omega t)$  für die Schichtverzerrungen:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x(x,z)}{\partial x} = -ik u_x(x,z)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z(x,z)}{\partial z} = (-v_{2j} + v_{2j+2}) / h_j \exp(-ikx)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_x(x,z)}{\partial z} + \frac{\partial u_z(x,z)}{\partial x} = (-v_{2j-1} + v_{2j+1}) / h_j \exp(-ikx) - ik u_z(x,z)$$

für die Schichtspannungen

$$\sigma_x = (\lambda_j + 2G) \varepsilon_x + \lambda_j \varepsilon_z$$

$$\sigma_z = (\lambda_j + 2G) \varepsilon_z + \lambda_j \varepsilon_x$$

$$\tau = G_j \gamma_{xz}$$

und für die Schichtmassenkkräfte

$$f_x = \omega^2 \rho_j u_x(x,z)$$

$$f_z = \omega^2 \rho_j u_z(x,z)$$

Formulierung der Impulsbilanz mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Verrückungen ergibt für jede Schicht  $j$ :

$$\iint (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \varepsilon_z \sigma_z + \delta \gamma_{xz} \tau - \delta u_x f_x - \delta u_z f_z) dz dx = \lim \int \left( -\delta u_x(0,z) \sigma_x(0,z) - \delta u_z(0,z) \tau(0,z) \right) dz + \int (\delta u_x(\xi,z) \sigma_x(\xi,z) + \delta u_z(\xi,z) \tau(\xi,z)) dz$$



Unter dem Integral auf der linken Seite der obigen Gleichung stehen die Arbeitsanteile der inneren Spannungen der in  $x$ -Richtung unendlich ausgedehnten Schicht, auf der rechten Seite stehen die Arbeitsanteile der freigeschnittenen Oberflächenkräfte in der Ebene zwischen dem Bereich I und den Bereichen L bzw. R ( $x = 0$ ) und die Arbeitsanteile der Oberflächenkräfte in einem unendlich entfernt gedachten Schnitt  $\xi$ .

Schließlich erhält man aus obigen Gleichungen ein homogenes quadratisches Eigenwertproblem für die  $n$  Schichten der Bereiche L und R der Form

$$(k^2 \mathbf{A} - i k \mathbf{D} + i k \mathbf{D}^T + \mathbf{G} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{v} = \mathbf{0} .$$

Die Kompatibilität der Verschiebungen angrenzender Schichten ist durch Berücksichtigung der Arbeitsanteile angrenzender Schichten direkt gewährleistet. Im ungedämpften Fall sind die Matrizen  $\mathbf{A}, \mathbf{D}, \mathbf{G}$  reell im gedämpften Fall komplex. Matrix  $\mathbf{M}$  ist eine konsistente Massenmatrix und immer reell.

Die obige Matrixgleichung definiert ein Eigenwertproblem mit dem zugehörigen charakteristischen Polynom vom Grade  $4n$ . Die Lösung erfolgt mit einem Vektoriterationsverfahren mit Hilfe des Rayleigh-Quotienten und ergibt  $4n$ , im allgemeinen komplexe Eigenwerte  $k_s, s=1 \dots 4n$  mit den zugehörigen komplexen Eigenvektoren.

Da dem System  $2n$  Freiheitsgrade (horizontale und vertikale Verschiebungen an jeder Schichtbegrenzung) gegeben wurden, rechnerisch sich aber  $4n$  Lösungen ergeben, müssen aus den  $4n$  möglichen Lösungen die physikalisch sinnvollen  $2n$  Lösungen aussortiert werden. Das Auswahlkriterium ist, diejenigen Eigenwerte und Eigenvektoren auszuwählen, die eingesetzt in die Wellengleichungen Wellen ergeben, die von der Störungsquelle weglafen und deren Amplituden mit zunehmender Entfernung  $x$  von der Störungsquelle abnehmen. Die Gesamtheit aller möglichen Lösungen für das Schwingungsfeld ergibt sich durch Linearkombinationen der  $2n$  möglichen Einzellösungen, die das Schwingungsfeld der äußeren Teilbereiche L und R im Rahmen der gewählten  $2n$  Freiheitsgraden vollständig beschreiben.

$$u_{x,z}(x, z, t) = \sum \alpha_s v_s \exp(i\omega t - i k_s x)$$

Speziell ist an der Grenzfläche  $x=0$  zwischen dem Teilbereich I und den Bereichen L bzw. R unter Weglassung des Zeitfaktors  $\exp(i\omega t)$

$$\mathbf{u}_{x,z}(0, z) = \mathbf{u}^R = \sum \alpha_s v_s = \mathbf{V} \boldsymbol{\alpha}$$

Hierin ist  $\mathbf{V}$  die  $2n \times 2n$  Modalmatrix, die die Eigenvektoren  $\mathbf{v}$  spaltenweise enthält.

Die Inverse letzter Gleichung liefert den Vektor der Beteiligungsfaktoren  $\boldsymbol{\alpha}$  jedes Eigenvektors  $\mathbf{v}_s$  zu

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{u}^R$$

Damit kann die Schwingungsausbreitung in den seitlichen Bereichen L bzw. R berechnet werden.

Die gesuchten Kräfte an der Grenzfläche  $x=0$  zwischen dem Teilbereich I und den seitlichen Regionen ergeben sich, wenn die über die Grenzfläche verteilten Normalspannungen  $\sigma_x$  und Schubspannungen  $\tau_{xz}$  zu konzentrierten Knotenkräften  $\mathbf{p}^R$  zusammengefaßt werden. Die Knotenkräfte errechnen sich dann aus:

$$\mathbf{p}^R = (i \mathbf{A} \mathbf{V} \mathbf{K} + \mathbf{D} \mathbf{V}) \boldsymbol{\alpha}$$

mit der  $2n \times 2n$  Diagonalmatrix  $\mathbf{K}$ , die die Eigenwerte  $k_s, s=1 \dots 2n$  spaltenweise enthält. Die Knotenkräfte können dann in Abhängigkeit der Randverschiebungen beschrieben werden durch:

$$\mathbf{p}^R = (i \mathbf{A} \mathbf{V} \mathbf{K} \mathbf{V}^{-1} + \mathbf{D}) \mathbf{u}^R = \mathbf{R} \mathbf{u}^R$$

Die  $2n \times 2n$  Matrix  $\mathbf{R}$  ist die dynamische Steifigkeitsmatrix der seitlichen Bereiche L und R. Mit dieser Matrix sind die dynamischen Eigenschaften der unendlich ausgedehnten Regionen L und R vollständig beschrieben.

### 3.3.3 Teilbereich U

Bisher wurde die Berechnung des inneren Bereichs I sowie der beiden äußeren Bereiche L bzw. R behandelt. Damit bleibt als letzter zu klärender Punkt die Frage nach der sinnvollsten Begrenzung am unteren Systemrand. Wählt man eine starre Systembegrenzung, so werden an dieser Systemgrenze das Ergebnis verfälschende Reflexionen auftreten. Da nun im Gegensatz zu den seitlichen Bereichen L und R die Verschiebungen unterhalb der Systembegrenzung ohne Interesse sind, kann für diese Systembegrenzung ein Ansatz gewählt werden, der der Bedingung genügt, daß an dieser Stelle keine Reflexionen auftreten. Dies kann durch die Anbringung von viskosen Dämpferelementen erreicht werden.

Für die Entwicklung der Dämpferelemente wird zunächst folgender Ansatz gewählt:

$$\sigma = a(\alpha) \rho v_p u_z$$

$$\tau = b(\alpha) \rho v_s u_x$$

Dieser Ansatz besagt, daß Phasengleichheit der Normalspannungen  $\sigma$  und Schubspannungen  $\tau$  zu den zugeordneten Knotenpunktgeschwindigkeiten  $u_z$  (vertikale Geschwindigkeit des Knotenpunktes) und  $u_x$  (horizontale Geschwindigkeit des Knotenpunktes) besteht.  $a(\alpha), b(\alpha)$  sind vom Welleneinfallswinkel  $\alpha$  abhängige Konstante,  $v_p$  und  $v_s$  sind die Geschwindigkeiten der Kompressionswellen respektive der Scherwellen.

Aus einer Betrachtung über das Verhältnis der reflektierten Welle zur einfallenden Welle mit der Bedingung, daß keine Reflexionen auftreten sollen, ergibt sich  $a = b = 1$ ,

wenn der Einfallswinkel  $\alpha$  zwischen Fortpflanzungsrichtung der Wellenfront und der unteren Systembegrenzung größer als  $20^\circ$  bis  $30^\circ$  ist. Unter dieser Voraussetzung gilt vereinfachend für obige Gleichungen

$$\sigma = \rho v_p u_z$$

$$\tau = \rho v_s u_x$$

Die an den Knotenpunkten angreifenden Dämpfungskräfte lassen sich jetzt aus einer Integration über das Volumen der angrenzenden Elemente ermitteln. Für ein ebenes Problem und harmonische Anregung erhält man für die Dämpfungskräfte:

$$p_x = \rho v_p A i \omega u_x = c_x u_x$$

$$p_z = \rho v_s A i \omega u_z = c_z u_z$$

wobei  $A$  aus der Integration der Verschiebungsverteilung der einem Knoten benachbarten Elemente folgt.

### 3.3.4 Gesamtsteifigkeitsbeziehung

Zur Erlangung der Impulsbilanz des Gesamtgebietes müssen die als äußere Belastung aufgebrachten Kräfte der seitlichen Regionen und die viskosen Dämpfungskräfte des unteren Systemrandes zusammengefügt werden. Dies ergibt folgende endgültige Steifigkeitsbeziehung für das gesamte System:

$$(\mathbf{K} + i \omega \mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M} - \mathbf{R}^R - \mathbf{R}^L) \mathbf{u} = \mathbf{p}$$

Hierin wird die untere Systembegrenzung durch den rein imaginären Anteil  $i\omega\mathbf{C}$  beschrieben. Die Matrizen  $\mathbf{R}^R$  und  $\mathbf{R}^L$  sind die frequenzabhängigen dynamischen Steifigkeitsmatrizen der Teilbereiche L und R.

Damit sind alle notwendigen mathematischen Beziehungen zur Berechnung des Systems „Tunnel-Boden-Bauwerk“ bekannt.

## 3.4 Systemvariationen

Aufgrund der Vielzahl möglicher Variationen von Systemparametern wie z.B. Querschnittsform, Abmessungen der Bauteile, Baumaterialien usw. ist eine umfassende Parametervariation nicht möglich. Die Auswahl der zu untersuchenden und gegebenenfalls zu variierenden Bauwerks- und Tunnelparameter orientiert sich deshalb an praktischen Gegebenheiten.

Hinsichtlich der Querschnittsform werden ausschließlich Tunnel mit rechteckigem Querschnitt untersucht. Den Gebäudeparametern wie Deckenabmessungen und -spannweiten, Stockwerkshöhen und Stockwerksanzahl liegen die im Wohnungsbau üblichen Standardwerte

zugrunde. Das Gebäude selbst ist stets parallel zur Bahnlinie ausgerichtet und die Entfernung des Gebäudes zum Tunnel beträgt immer 3 m.

Im einzelnen werden folgende Systemparameter variiert:

#### Tunnel-Boden:

- o Tiefenlage des Tunnels mit Überdeckungshöhen von  $T = 1,5 \text{ m}, 4,5 \text{ m}$  und  $10 \text{ m}$ .
- o Steifigkeit des umgebenden Bodens, beschrieben durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle mit folgenden Werten:  $v_s = \{100, 200, 300, 400, 750 \text{ m/s}\}$ . Hierbei entspricht eine Scherwellengeschwindigkeit von  $100 \text{ m/s}$  einem sehr lockeren Sand, der Bereich  $200$  bis  $300 \text{ m/s}$  entspricht einem dichten bis sehr dichten sandigem Untergrund, während der Bereich um  $750 \text{ m/s}$  einem stark kiesigem Untergrund zuzuordnen ist.

#### Tunnel-Boden-Bauwerk:

- o Tiefenlage des Gebäudes
  - ohne Keller, Lagerung direkt auf der Bodenoberfläche
  - 1 Kellergeschoß, Einbindetiefe  $H = 3 \text{ m}$
  - 2 Kellergeschoße, Einbindetiefe  $H = 6 \text{ m}$
- o relative Lage des Gebäudes zum Tunnel
  - neben dem Tunnel
  - direkt über dem Tunnel
 Ansonsten gilt hier die gleiche Variation der Einbindetiefe wie oben.

#### Bauphasen:

- o Zum Vergleich mit den in Kapitel 5 beschriebenen Messungen wurde auch der Einfluß verschiedener Bauphasen auf das Schwingungsverhalten von Tunnel und in einer späteren Bauphase auch das gekoppelte System „Tunnel-Gebäude“ untersucht. Untersucht wurden folgende Phasen:
  - Baugrube neben dem Tunnel bis auf Höhe der Tunnelsohle
  - Fertigstellung der beiden Kellergeschoße bis auf Geländehöhe
  - Gesamter 4-geschoßiger Rohbau erstellt.

#### Schwingungsmindernde Baumaßnahmen:

- o offene Schlitze mit Tiefen von  $T = \{3,0, 6,0, 7,5, 9,0 \text{ und } 12,0 \text{ m}\}$ . Bei allen Variationen befindet sich der Schlitz mit einer Breite von  $d = 0,5 \text{ m}$  in einem Abstand von  $1 \text{ m}$  vom Tunnel und  $1,5 \text{ m}$  vom Gebäude.
- o Bodenverfestigung im gesamten Bereich zwischen Tunnel und Gebäude mit einer Steifigkeit

von  $v_s = 700$  m/s, beginnend von der Bodenoberfläche bis zu den Gebäudefundamenten.

- o Baugrubenverbau, unmittelbar neben dem U-Bahn-Tunnel, mit einer Steifigkeit von 1/36 der Betonsteifigkeit. Der Verbau reicht bis in eine Tiefe von 3,50 m über der Tunnelsohle.
- o Lichtschächte rechts und links neben dem Gebäude, die bis zur Gebäudefundamentierung reichen. Die Breite der Lichtschächte beträgt 0,5 m.
- o Betonplatte mit einer Dicke von 0,5 m auf der Geländeoberfläche unmittelbar über dem Tunnel
- o Betonplatte auf der Geländeoberfläche unmittelbar über dem Tunnel mit dem 3-fachen Gewicht wie vor
- o Einzelfundamente ohne aussteifende Bodenplatte
- o Einzelfundamente mit aussteifender Bodenplatte

*Tabelle 3.1  
Übersicht über die Gesamtheit aller untersuchten Systeme*

| System Nr. | Bodenüberdeckung Tunnel | Lage, Größe, Tiefe oder sonstige Variation           |
|------------|-------------------------|--|
| 1          | Z = 1,5 m               | nicht vorh.  |
| 2          | Z = 4,5 m               | nicht vorh.  |
| 3          | Z = 10,0 m              | nicht vorh.  |
| 4          | Z = 1,5 m               | Gebäude neben Tunnel, 6 Geschosse, ohne Keller       |
| 5          | Z = 1,5 m               | Gebäude neben Tunnel, 6 Geschosse, 1 Kellergeschoß   |
| 6          | Z = 1,5 m               | Gebäude neben Tunnel, 6 Geschosse, 2 Kellergeschoße  |
| 7          | Z = 1,5 m               | Gebäude über Tunnel, 6 Geschosse, ohne Keller        |
| 8          | Z = 6,0 m               | Wie 7, 1 Kellergeschoß                               |
| 9          | Z = 1,5 m               | Wie 7, 1 Kellergeschoß                               |
| 10         | Z = 6,0 m               | Wie 7, 2 Kellergeschoße                              |
| 11         | Z = 1,5 m               | Baugrube neben dem Tunnel                            |
| 12         | Z = 1,5 m               | 2 Kellergeschosse neben dem Tunnel                   |
| 13         | Z = 1,5 m               | Wie System 9, jedoch mit Lichtschächten              |
| 1a-1d      | Z = 1,5 m               | Wie System 1 mit Variation der Bodensteifigkeit      |
| 6a-6d      | Z = 1,5 m               | Wie System 6 mit Schlitzten in verschiedener Tiefe   |
| 6i1        | Z = 1,5 m               | Wie System 6, mit Baugrubenverbau                    |
| 6i2        | Z = 1,5 m               | Wie System 6, mit Lichtschächten                     |
| 6i3        | Z = 1,5 m               | Wie System 6, mit Einzelfundament ohne Bodenplatte   |
| 6iea       | Z = 1,5 m               | Wie System 6, mit Einzelfundament und Bodenplatte    |
| 6i4        | Z = 1,5 m               | Wie System 6, mit Betonplatte auf Bodenoberfläche    |
| 6i5        | Z = 1,5 m               | Wie System 6, mit schwerer Betonplatte               |
| 6i6        | Z = 1,5 m               | Wie System 6, Feder-Masse System Gleis, $f=80$ Hz    |
| 6i6a       | Z = 1,5 m               | Wie System 6, Feder-Masse System Gleis, $f=45$ Hz    |
| 6i6b       | Z = 1,5 m               | Wie System 6, Feder-Masse System Gleis, $f=26$ Hz    |
| 6i6c       | Z = 1,5 m               | Wie System 6, Feder-Masse System Gleis, $f= 8$ Hz    |
| 13a        | Z = 1,5 m               | Wie System 13, mit Bauwerkstiefabstimmung, $f= 5$ Hz |
| 13b        | Z = 1,5 m               | Wie System 13, mit Bauwerkstiefabstimmung, $f= 2$ Hz |

- o Tiefabstimmung des Gleises mit einem Feder-Masse-System Abstimmfrequenzen:  $f_c = \{80, 45, 26, 8 \text{ Hz}\}$
- o Tiefabstimmung der Gebäude bei Lage direkt über dem Tunnel Abstimmfrequenzen:  $f_c = \{5, 2 \text{ Hz}\}$

Zur Variation dieser Parameter wurden insgesamt 36 Systeme berechnet. Die vorstehende Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über alle berechneten Systeme, kennzeichnet diese für die spätere Darstellung mit Zahlen und Buchstaben und nennt in Kurzform die durchgeführte Variation. Bild 3.1 gibt einen Überblick über die FE-Modelle der untersuchten Systeme.

Bei allen Untersuchungen wurden folgende Systemwerte für das Gebäude und das Tunnelbauwerk angesetzt:

*Tabelle 3.2  
Geometrie und Materialkennwerte der untersuchten Systeme*

|               | Gebäude | Tunnel |
|---------------|---------|--------|
| Breite        | 6,0 m   | 9,0 m  |
| Höhe          | 18,2 m  | 6,0 m  |
| Geschoßanzahl | 6       | -      |
| Geschoßhöhe   | 3,0 m   | -      |
| Wandstärke    | 0,25 m  | 0,7 m  |
| Deckenstärke  | 0,20 m  | 0,7 m  |
| Sohlenstärke  | -       | 0,7 m  |

| Materialien        | Beton                             | Boden                           |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Schubmodul         | $1,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ | $8,0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$  |
| Querkontraktionsz. | 0,16                              | 0,33                            |
| Dichte             | $2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$   | $2,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ |
| Dämpfungsgrad D    | 1 %                               | 3 %                             |

Bei allen Berechnungen wird die Erregung durch den fahrenden U-Bahnzug durch zwei Ersatzlasten an den Radaufstandspunkten dargestellt. Die Größe der beiden Lasten entspricht den Radlasten von U-Bahnzügen. Das Spektrum der Lasten ist konstant über den berechneten Frequenzbereich. Die Lasten werden immer auf das rechte Gleis im Tunnel aufgebracht.

### 3.5 Ergebnisdarstellung

Das Rechenverfahren liefert für jede Frequenz die komplexen Verschiebungen aller Knotenpunkte des inneren Bereichs, dazu die komplexen Verschiebungen an allen gewünschten Punkten in den seitlichen Bereichen. Diese

Datenmengen müssen in geeigneter Weise komprimiert werden, um zu überschaubaren Ergebnissen zu kommen. Dies geschieht in folgender Weise:

Zunächst wird die Geometrie des untersuchten Systems anhand des FE-Modells dargestellt. Die eigentliche Ergebnispräsentation beginnt dann mit der Darstellung des gesamten Verschiebungsbildes für einige ausgesuchte Frequenzen. Bei der Betrachtung der Bilder ist zu beachten, daß der Maßstab der Verschiebungen von Bild zu Bild unterschiedlich ist, da die Maximalverschiebungen jedes Bildes jeweils in gleicher absoluter Länge gezeichnet werden. Durch die Darstellung der Schwingungsformen gewinnt man einen sehr genauen Einblick über das generelle Schwingungsverhalten des Systems im Zusammenspiel aller Komponenten. Dies ist besonders bei der Untersuchung von Abschirmmaßnahmen von Bedeutung, da hieraus der Abschirmmechanismus erkannt werden kann. Danach folgen die Frequenzspektren von Punkten an ausgewählten Bauteilen. Soweit wie möglich werden diese für relevante Systempunkte, wie z.B. die Tunneldecken, für die verschiedenen Systeme direkt miteinander verglichen. Um noch einen komprimierteren Überblick zu erlangen, werden auch Mittelwertspektren, z.B. der Mittelwert der Spektren aller Decken eines Systems, gebildet und dargestellt. Aus diesen Darstellungen lassen sich Informationen über die Eigenfrequenzen und über die Amplitudenstärken in Abhängigkeit des jeweils untersuchten Systemparameters ableiten.

## 3.6 Ergebnisse Tunnel-Boden

### 3.6.1 Tiefenlage des Tunnels

Die FE-Modelle der Systeme 1 bis 3 können Bild 3.1 entnommen werden. Die Überdeckung ist 1,50 m, 4,50 m und 10 m. Die Bodensteifigkeit, ausgedrückt durch die Scherwellengeschwindigkeit, beträgt 200 m/s. Die Modelle enthalten kein Gebäude.

In den Bildern 3.2 bis 3.4 sind die Real- und Imaginärteile der Verschiebungen für die Frequenzen 20, 40 60 und 80 Hz dargestellt. Aus diesen beiden Bildern läßt sich der gesamte Schwingungszustand einer Periode erkennen, da der Realteil die Schwingungen bei einer Phase von 0 und 180 Grad dargestellt und der Imaginärteil diejenigen bei 90 und 270 Grad. Ganz generell läßt sich aus dieser Darstellung erkennen, daß

- die Tunneldecke vorwiegend in der ersten Eigenfrequenz schwingt.
- die Tunnelsohle mit zunehmender Frequenz auch Schwingungen in höheren Eigenformen ausführt.
- die Bodenschwingungen im unteren Frequenzbereich (hier bis etwa 20 bis 30 Hz) vorwiegend den Tunnel-schwingungen folgen. Im höherem Frequenzbereich



(hier etwa ab 60 Hz) sind dann auch Ausbreitungsvorgänge im Boden mit typischen Bildern von Rayleighwellen an der Bodenoberfläche und Raumwellen im Bereich unterhalb der Tunnelsohle zu erkennen.

Während sich das Schwingungsverhalten des Tunnels über die Einbettungstiefe nicht ändert, treten im umgebenden Erdreich mit zunehmender Tiefenlage doch größere Änderungen auf. Diese sind vorwiegend darin zu sehen, daß mit zunehmender Tiefenlage relevante Schwingungen vorwiegend unterhalb der Tunnelsohle und in den seitlichen Bereichen in Höhe des Tunnels auftreten. Im Bodenbereich über der Tunneldecke sind dann die Schwingungen relativ klein.

Die Frequenzspektren einiger Punkte der Tunneldecke, der Tunnelwand und der Tunnelsohle sind in den Bildern 3.5 bis 3.7 (K3 Deckenmitte, K7 Wandmitte rechts, K12 Sohlenmitte, K14 Wandmitte links, K4 Decke 1/4 P., K8 Wand rechts 1/4 P., K11 Sohle 1/4 P.) dargestellt. Die Bilder 3.8 und 3.9 zeigen einen Vergleich der 3 mit unterschiedlicher Tiefenlage berechneten Systeme. Es ergibt sich folgendes Verhalten:

- Nur bei geringer Überdeckung ( $T=1,50$  m) erhält man eine ausgeprägte Resonanzfrequenz der Tunneldecke, die hier im Bereich zwischen 16 bis 18 Hz liegt. Tritt diese Resonanz auf, dann zeigt die Tunnelsohle diese Resonanz in gleicher Weise. Mit zunehmender Tiefenlage des Tunnels verschwindet diese 1. Resonanzfrequenz völlig. Dieses Verschwinden kann sowohl mit dem Einfluß der zunehmenden aufliegenden Bodenmasse (Verschieben zu niedrigen Frequenzen und Reduktion der Amplituden) wie auch mit der zunehmenden Dämpfung infolge Wellenabstrahlung im Boden erklärt werden.
- Nach Überschreiten der Resonanzfrequenz nehmen die Schwingungen an der Tunneldecke stark ab. Zwar ist im Viertelpunkt (Punkt K4) der Tunneldecke bei etwa 48 Hz eine leichte Verstärkung infolge Erreichen der zweiten Resonanzfrequenz festzustellen. Die Überhöhung liegt jedoch im Amplitudenniveau der Wandschwingungen, die generell die kleinsten Amplituden aufweisen. Daß bei der Tunneldecke nur die 1. Resonanzfrequenz eine Rolle spielt, ist darin begründet, daß das Teilsystem Tunnel mit zunehmender Frequenz durch die Wellenabstrahlung ins umgebende Erdreich stark bedämpft wird. Eine Analyse, die nur die Eigenformen des Tunnels ohne Einfluß des umgebenden Bodens betrachtet, ist deshalb zwar hinsichtlich der Resonanzfrequenzen als brauchbar zu betrachten, solange die Steifigkeit des umgebenden Bodens nicht wesentlich zur Gesamtsteifigkeit des Systems Tunnel-Boden beiträgt. Die Amplituden werden jedoch in einer solchen Analyse stark überschätzt.
- Im Bereich oberhalb der 1. Deckenresonanz wird das Schwingungsverhalten des Tunnels dann vorwiegend

vom Verhalten der Tunnelsohle bestimmt. Die Impedanzfunktion  $I_z = \text{Kraft/Schwingungsgeschwindigkeit}$  der Tunnelsohle ist im Bereich oberhalb der Deckenresonanz nahezu konstant. Dies bedeutet, daß das dynamische Verhalten der Bodenplatte in diesem Bereich überwiegend von der Abstrahlungsdämpfung des Erdreichs bestimmt wird. Die Bodensteifigkeit ist dann von untergeordneter Bedeutung. Das mechanische Ersatzsystem der Bodenplatte ist dann ein viskos gedämpfter Ein-Massen-Schwinger.

- Die spektralen Amplituden sind im Bereich oberhalb der 1. Deckeneigenfrequenz unabhängig von der Tiefenlage des Tunnels.
- Aus dem, in den Bildern 3.8 und 3.9 dargestellten, direkten Vergleich der Systeme 1 bis 3 erkennt man, daß im niederfrequenten Bereich zwischen 4 bis 8 Hz eine weitere Systemeigenfrequenz vorhanden ist, die sich mit zunehmender Tiefenlage zu niedrigen Frequenzen hin verschiebt. Hierbei handelt es sich um eine Starrkörpereigenfrequenz des Systems „Tunnel mit aufliegender Masse im Boden“ (siehe hierzu auch die Ausführungen zu den Gebäudeschwingungen). Da jedoch einerseits die Amplituden im Vergleich zu denjenigen um 16 Hz relativ klein sind und andererseits die Anregung durch U-Bahnverkehr ebenfalls keine oder nur relativ kleine Anteile in diesem unteren Frequenzbereich enthält, ist dies zunächst ohne Bedeutung. Werden jedoch Abschirmmaßnahmen wie „Feder-Masse-Systeme“ in den Tunnel eingebaut, so kann es, wenn die Abstimmfrequenzen in diesem Bereich liegen, durchaus zu Verstärkungen kommen. Hierauf ist gegebenenfalls zu achten (siehe auch Kapitel 4.4.2).

Das Verhalten des umgebenden Freifeldes wird im direkten Vergleich der Ergebnisse der 3 Systeme gezeigt. Damit die Darstellung nicht zu unübersichtlich wird, werden die Schwingungen aller berechneten Bodpunkte bis zu einer Entfernung von maximal 30 m vom Lasteinleitungspunkt quadratisch gemittelt und nur das so gemittelte Ergebnis in Bild 3.10 dargestellt. Aus dem Bild ist ein Einfluß der Tiefenlage nur schwach zu erkennen. Hinsichtlich der Frequenzen, bei denen Maximalwerte auftreten, ergeben sich zwei Bereiche. Der 1. Bereich liegt zwischen 0 bis 30 Hz und umfaßt somit die oben diskutierte Starrkörpereigenfrequenz sowie die 1. Eigenfrequenz der Tunneldecke. Der zweite Bereich liegt zwischen 48 und 72 Hz und wird anscheinend von der 2. Eigenfrequenz der Tunneldecke bestimmt.

### 3.6.2 Bodensteifigkeit

Die Untersuchung des Einflusses der Steifigkeit des umgebenden Bodens auf das Antwortverhalten des Tunnels wird mit Hilfe des FE-Modells des Systems 1 mit einer Überdeckung von 1,50 m durchgeführt. Insgesamt wurden 5 verschiedene Bodensteifigkeiten untersucht. Diese waren:

Tabelle 3.3  
Untersuchte Bodensteifigkeiten

| vs [m/s]              | 100            | 200            | 300              | 400              | 750               |
|-----------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|
| G [N/m <sup>2</sup> ] | $2 \cdot 10^7$ | $8 \cdot 10^7$ | $1,8 \cdot 10^8$ | $3,2 \cdot 10^8$ | $1,13 \cdot 10^9$ |

Die Ergebnisse dieser Variationen sind in den Bildern 3.11 und 3.12 dargestellt. Hieraus können folgende Ergebnisse abgelesen werden:

1. Im Antwortverhalten der Tunneldecke (Bild 3.11) bewirkt eine Zunahme der Bodensteifigkeit ein Anwachsen der ersten Resonanzfrequenz, wobei die Resonanzamplituden stark abnehmen. Die Resonanzspitzen selbst werden mit zunehmender Tiefenlage breiter. Dies entspricht einer Zunahme der Systemdämpfung. Die oben besprochene 2. Tunnel-Deckeneigenfrequenz mit ca. 48 Hz tritt nur bei der geringsten Bodensteifigkeit ( $v_s = 100\text{m/s}$ ) auf. Bei allen anderen berechneten Systemen liegt diese Eigenfrequenz oberhalb von 80 Hz.
2. Bei der Tunnelsohle (Bild 3.11) ist das Verhalten bis zur ersten Deckenresonanz ähnlich demjenigen der Tunneldecke. Gleichzeitig ist jedoch zu beobachten, daß ab einer gewissen Steifigkeit (hier etwa ab 300 m/s) das Resonanzverhalten an der Tunnelsohle völlig verschwindet. Darüber hinaus scheint das Impedanzverhalten der Tunnelsohle mit zunehmender Frequenz einem Grenzwert, der unabhängig von der umgebenden Bodensteifigkeit ist, zuzustreben. Über einem Frequenzbereich, der grob mit etwa 200 Hz abgeschätzt wird, sind die Tunnelsohlenimpedanzen dann nur von der Impedanz der Tunnelsohle selbst (Material und Dicke) und der Abstrahlungsdämpfung im Boden abhängig. Im unteren Frequenzbereich zwischen Deckenresonanz und etwa 200 Hz sind die Amplituden dann in etwa umgekehrt proportional der Scherwellengeschwindigkeit.
3. An den Tunnelwänden (Bild 3.12) zeigt sich die Zunahme der Bodensteifigkeit in den horizontalen und vertikalen Komponenten im Frequenzbereich bis zur Deckenresonanzfrequenz in ähnlicher Weise wie bei Decke und Sohle. Darüber hinaus ist das Verhalten sehr uneinheitlich, wobei generell nur gilt, daß die Amplituden mit zunehmender Bodensteifigkeit in gleicher Weise abnehmen.
4. Im umgebenden Boden (Bild 3.12) läßt sich der Einfluß der Zunahme der Steifigkeit nur bis etwa 35 Hz an einer deutlichen Abnahme der Amplituden mit der bereits besprochenen Frequenzverschiebung erkennen. Über einer Frequenz, die hier bei 35 Hz liegt, ist ein Einfluß der Bodensteifigkeit, zumindest für den hier untersuchten Bereich bis 750 m/s, nicht zu beobachten.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der umgebende Boden, insbesondere im unteren Frequenzbereich

bis hier etwa 35 Hz, einen starken Einfluß auf das Antwortverhalten des Tunnels und in gewisser Weise auch für das umgebende Erdreich ausübt. Der Einfluß ist darin zu sehen, daß zum einen eine Koppelung der Bodensteifigkeiten mit den Tunnelsteifigkeiten im Sinne einer Parallelschaltung stattfindet. Das heißt, wenn der Boden steifer wird, dann wird das gesamte Systemverhalten steifer. Die Folge ist ein Anwachsen der Resonanzfrequenzen. Gleichzeitig werden die Amplituden des Tunnels und des umgebenden Bodens kleiner. In welcher Weise die Amplituden abgemindert werden, hängt vom Steifigkeitsverhältnis Tunnel zu Boden ab. Generell gilt, daß die Abminderung schwächer ist als die Zunahme der Bodensteifigkeit.

## 3.7 Tunnel-Boden-Bauwerk

### 3.7.1 Allgemeines

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Ergebnisse zeigen das grundsätzliche Verhalten eines im Erdreich eingebetteten Tunnelbauwerkes sowie die, auf die Tunnel-schwingungen sich ergebende Schwingungsausbreitung im umgebenden Erdreich. In den nachfolgenden Kapiteln wird die Schwingungsausbreitung bei Vorhandensein von Gebäuden neben und über dem U-Bahntunnel untersucht. Hierbei ist von Interesse:

- ob und in welcher Weise sich das Schwingungsverhalten des Tunnels selbst durch das Vorhandensein des Gebäudes ändert.
- welche Änderungen sich in der Schwingungsausbreitung im umgebenden Boden einstellen.
- welche Systemparameter bei der Übertragung der Schwingungen vom Boden in das Bauwerk maßgeblich beteiligt sind. Als Parameter sind hier:
  - die relative Lage des Bauwerkes zum Tunnel
  - die Einbettungstiefe des Bauwerkes
  - die Art der Fundamentierung
  - die seitliche Anbindung des Bauwerkes an das umgebende Erdreich zu nennen.
- in welcher Weise das Bauwerk insgesamt und seine Bauteile, die Wände und Decken, auf die Wellenfeldanregung durch die Tunnelschwingungen antworten.

Zur Klärung dieser Fragen werden zunächst 7 weitere Systeme mit den Nummern 4 bis 10 berechnet (siehe Bild 3.1 und Tabelle 3.1). Bei den Systemen 4 bis 6 befindet sich das Bauwerk 3 m seitlich neben dem Tunnel. Bei

System 4 befindet sich das Bauwerk an der Bodenoberfläche. Bei System Nr. 5 ist die Einbettungstiefe 3 m und bei System Nr. 6 6 m. Die Überdeckungshöhe des Tunnels ist in allen diesen Fällen 1,50 m. Bei den Systemen 7 bis 10 befindet sich das Bauwerk direkt über dem Tunnel. In System 7 ist das Bauwerk an der Bodenoberfläche und in System 9 direkt über dem Tunnel, dessen Überdeckung hier 3 m beträgt, gegründet. In den Systemen 8 und 10 ist die Überdeckungshöhe jeweils 6 m und die Einbettungstiefe der Gebäude beträgt 3 m und 6 m.

Im folgenden werden die Rechenergebnisse in gleicher Weise wie bei den oben dargestellten Systemen 1 bis 3 präsentiert. Zunächst werden die prinzipiellen Effekte und Phänomene anhand der Schwingungsbilder bestimmter Frequenzen gezeigt und diskutiert. Danach folgen die Frequenzspektren ausgewählter Systempunkte, die die vorher beschriebenen Effekte quantifizieren.

### 3.7.2 Schwingungsformen

Die Bilder 3.13 bis 3.19 zeigen das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems „Tunnel-Boden-Bauwerk“ der Systeme 4 bis 10 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz. Dargestellt sind jeweils die Realteile und Imaginärteile. Aus dem Vergleich der Schwingungsformen der Systeme 4 bis 10 mit den Schwingungsformen des Systems 1 bzw. 2 lassen sich folgende Ergebnisse ablesen:

Die Eigenschwingungsformen des Tunnels werden durch das Vorhandensein eines Gebäudes nicht beeinflusst. Dies gilt in gewissen Grenzen selbst dann, wenn sich das Gebäude direkt über dem Tunnel befindet. Das Vorhandensein eines Gebäudes beeinflusst jedoch die Tunnel-schwingungen im Sinne einer Verstärkung der Amplituden, insbesondere in höheren Frequenzen. Für den Fall, daß Tunnel und Gebäude keine direkte Verbindung besitzen, wie in den Fällen der Systeme 9 und 10, gilt, daß die Rückwirkung von Gebäuden auf das Schwingungsverhalten des Tunnels nicht vorhanden bzw. nur sehr schwach ist.

Befindet sich das Gebäude jedoch direkt auf dem Tunnel, so tritt eine starke Koppelung des Schwingungsverhaltens ein, das sich auf den ganzen Tunnel, in besonders starker Weise jedoch auf die Tunneldecke auswirkt. Aber auch die Wände zeigen in diesen Fällen eine verstärkte Schwingungsabstrahlung.

Im umgebenden Boden direkt um den Tunnel sind zunächst im unteren Frequenzbereich nur marginale Veränderungen zu beobachten. Mit höher werdender Frequenz bilden sich dann an der Bodenoberfläche stärkere Wellenfelder aus, die direkt vor dem Gebäude eine Verstärkung infolge Reflexion an den Gebäudewänden aufweisen. Diese Veränderungen des Wellenfeldes an der Bodenoberfläche werden umso ausgeprägter, je tiefer das Gebäude eingebettet ist.

Mit zunehmender Frequenz und größerer Einbettungs-

tiefe der Gebäude ist dann weiterhin zu beobachten, daß zwischen Tunnel und Gebäude, unter dem Gebäude und unter der Tunnelsohle das Wellenfeld stark gestaucht wird. Wie die Bilder zeigen, finden dann vielfältige Reflexionen und Beugungen statt, die das Wellenfeld sehr unübersichtlich werden lassen.

Befinden sich die Gebäude direkt über dem Tunnel, dann sind ähnliche Effekte im Wellenfeld des Bodens nur dann wie bei den oben beschriebenen Fällen mit seitlichem Gebäude zu beobachten, wenn das Gebäude direkt auf der Tunneldecke gegründet ist. In diesen Fällen stellt sich eine starke Wechselwirkung zwischen Tunnel und Gebäude ein, die starke Veränderungen im umgebenden Wellenfeld des Bodens nach sich zieht.

Die Bauwerksschwingungen selbst sind stark von der relativen Lage des Gebäudes zum Tunnel abhängig. Befindet sich das Gebäude neben dem Tunnel und an der Erdoberfläche, so werden zunächst die Schwingungen beim Übergang zwischen Boden und Fundament, zumindest für den hier dargestellten Frequenzbereich zwischen 20 und 80 Hz, abgemindert. Das Gebäudefundament folgt in diesem Frequenzbereich nicht den Bodenschwingungen, sondern es bilden sich Schwingungsformen aus, die aus den Eigenschwingungsformen der Bodenplatte entstehen. Die Außenwände des Gebäudes werden insbesondere im unteren Frequenzbereich zu horizontalen Schwingungen in den Gebäudegrundeigenfrequenzen angeregt, die wiederum die Decken zu Schwingungen anregen. Die Deckenschwingungen sind dann eine Kombination aus den Deckeneigenschwingungsformen infolge vertikaler Anregung und erzwungenen Schwingungen aus den Verformungen der Gebäudewände am Deckenauflagerpunkt. Dadurch ist das Schwingungsverhalten der Decken über die Gebäudehöhe auch nicht einheitlich, sondern je nach Anregung der Gebäudewände schwingen einige besonders stark und andere wiederum nur sehr schwach (im jeweiligen Frequenzbereich). Dies wird besonders deutlich, wenn die Einbettungstiefe des Gebäudes zunimmt (Systeme 5 und 6 sowie Bilder 3.13 und 3.14). Aus diesen Bildern ist auch zu ersehen, daß die Schwingungsabminderung beim Übergang zwischen Boden und Fundament mit zunehmender Frequenz größer wird.

Die zunehmende Einbindetiefe des Gebäudes stellt eine Versteifung und eine zusätzliche Anregungsfläche des Gebäudes dar, wodurch einerseits dem Gebäude oberhalb der Bodenoberfläche andere Gesamtschwingungsformen aufgezwungen werden (niedere Eigenformen bei gleicher Anregungsfrequenz). Andererseits wird das Gebäude besonders bei höheren Frequenzen zusätzlicher Schwingungsanregung ausgesetzt, was zu höheren Decken- und Wandschwingungen führt. Eine größere Einbindetiefe des Gebäudes führt weiterhin zu starken Phasenunterschieden der Anregung der Gebäudefundamente. Dies wiederum zieht unterschiedliche Schwingungsformen der beiden Gebäudewände nach sich, mit der Folge stark unterschiedlich ausgeprägter Deckenschwingungen über der Gebäudehöhe.



Befindet sich das Gebäude direkt über dem Tunnel, dann sind die Schwingungsformen der Fundamentplatte stark von den Schwingungsformen der Tunneldecke beeinflusst. Die Tunneldecke, der darüber befindliche Boden und die Fundamentplatte bewegen sich dann nahezu gleichphasig. Das führt dazu, daß die Gebäudewände im Gegensatz zu dem Gebäude seitlich, nur sehr geringe Horizontalschwingungen ausführen. Trotzdem schwingen hier die Gebäudedecken ebenfalls relativ unterschiedlich über die Gebäudehöhe. Geringe Phasenunterschiede bei der Anregung der Gebäudefundamente, hier bedingt durch die nur einseitige Anregung auf der rechten Gleisseite des Tunnels, haben demnach eine starke Auswirkung auf die Deckenschwingungen.

Befindet sich die Gründung des Gebäudes direkt auf der Tunneldecke, so ist die Übertragung auf das Gebäude, wie aus den Bildern 3.18 und 3.19 zu ersehen, besonders stark. Im Gegensatz zu den vorher betrachteten Fällen schwingen die Decken hier zwar ebenfalls nicht gleichphasig, aber in nahezu allen Stockwerken mit etwa gleicher Amplitude. Die Tiefe der Einbettung des Gebäudes ist hier im Gegensatz zu dem seitlichen Gebäude nicht von Bedeutung. Wichtig ist jedoch, ob das Gebäude überhaupt eingebettet ist oder nicht, wobei im Falle einer Einbettung größere Amplituden auftreten.

### 3.7.3 Frequenzspektren

Die folgende Darstellung umfaßt nur die Frequenzspektren des Gebäudes, da aus der vorherigen Diskussion ersichtlich ist, daß sich die Tunnelschwingungen nur im Falle des mit dem Tunnel direkt verbundenen Bauwerks (Systeme 9 und 10) merklich ändern. Ansonsten gelten für den U-Bahn-Tunnel die gleichen Aussagen wie in den Fällen ohne Gebäude (Systeme 1 bis 3). Dargestellt und diskutiert werden die vertikalen und horizontalen Wandschwingungen sowie die Deckenschwingungen. Zum Schluß dieses Kapitels erfolgt ein Vergleich der Spektren dieser Bauteile für die hier betrachteten Systeme 4 bis 10.

#### Vertikale Wandschwingungen

Die Spektren der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten am Knotenpunkt Wand-Decke sind in Bildern 3.20 bis 3.22 für die Systeme 4 bis 6 und in den Bildern 3.23 bis 3.26 für die Systeme 7 bis 10 dargestellt. Generell ergeben sich für die vertikalen Schwingungen 4 signifikante Antwortfrequenzen bzw. Frequenzbereiche:

Wie aus Bild 3.27 zu erkennen ist, handelt es sich bei den Frequenzen um 8 und 14 Hz um Frequenzbereiche, die aus der Koinzidenz von Wellenlängen im Boden mit der Gebäudebreite entstehen. Bei der Frequenz von 8 Hz (bei System 6 liegt diese bei 12 Hz) liegt die dem Tunnel zugewandte Bauwerksseite in einem Wellental, während die andere Seite in einem Wendepunkt liegt und damit keinerlei Verschiebungen aufweist. Bei einer Frequenz

von 14 Hz (System 4) liegt dann das gesamte Bauwerk innerhalb einer halben Wellenlänge. Dadurch werden die Fundamente gegenphasig angeregt. Diese Art der Anregung entspricht quasi einer Kippeigenfrequenz und führt dementsprechend zu Amplitudenmaximas.

Der nächste Bereich – mit relativ kleinen Resonanzüberhöhungen – liegt zwischen 16 und 18 Hz und entspricht somit der Resonanzfrequenz der Tunneldecke. Im vorliegenden Fall kommt es nicht zu großen Resonanzüberhöhungen, da die Bauwerkseigenfrequenzen, insbesondere der Stockwerksdecken um 22 Hz liegen.

Wie aus Bild 3.22 für das System 6 zu erkennen ist, liegt der 4. relevante Frequenzbereich, der die Deckenresonanzen kennzeichnet, jedoch nicht bei 22 Hz, sondern im Bereich um 30 Hz. Wie aus Bild 3.28 unten zu erkennen ist, werden die Resonanzeigenschaften der Stockwerksdecken in starkem Maße von den elastischen Eigenschaften der Wände beeinflusst. Aus dem in Bild 3.28 oben dargestellten Schwingungsbild für das System 6 für eine Frequenz von 22 Hz ist zu erkennen, daß einige Stockwerksdecken tatsächlich in ihrer „eigentlichen“ Eigenfrequenz schwingen. Ob diese Eigenfrequenz angeregt werden kann, hängt jedoch ausschließlich von den vertikalen und horizontalen Schwingungen der Gebäudewände ab. Diese wiederum werden von der Elastizität der Gründung, von der Einspannung im Untergrund, von ihrer Eigenelastizität und der Elastizität der Decken bestimmt. So kann es sein, daß die Decken keinerlei Resonanzüberhöhungen zeigen, obgleich sie in oder nahe ihrer Eigenfrequenz angeregt werden. Wie aus Bild 3.28 unten zu erkennen ist, liegen dann die Amplitudenmaximas der Decken in Frequenzbereichen die über oder unterhalb der eigentlichen Deckenresonanz sind.

Mit zunehmender Einbettungstiefe des Gebäudes seitlich des U-Bahntunnels entsteht eine Tendenz der Verschiebung zu niederen Frequenzen. Dies ist eine Folge der starken Zunahme der Systemdämpfung durch die Wellenabstrahlung im Untergrund mit zunehmender Einbindetiefe.

Befindet sich das Gebäude direkt über dem U-Bahntunnel, so erhält man zunächst für die vertikalen Wandschwingungen ein ähnliches Ergebnis wie vor. Die Lage der Frequenzen stimmt exakt überein, auch die Amplituden in den einzelnen Frequenzen weichen nur wenig voneinander ab. Sind die Gebäude jedoch direkt auf der Tunneldecke gegründet (Systeme 9 und 10 und Bilder 3.25 und 3.26), dann ergeben sich nahezu im gesamten Bereich größere Abweichungen. Einzelne signifikante Eigenfrequenzen sind dann nur noch schwer zu erkennen. Vorhandene Amplitudenmaxima weisen ein sehr breites Spektrum auf. Dies deutet auf eine starke Systemdämpfung hin, die durch die Koppelung mit dem Tunnel und durch die damit verbundene verstärkte Schwingungsabstrahlung in den Boden entsteht. Während in den anderen beschriebenen Fällen alle Punkte über die Bauwerkshöhe in etwa mit gleichen Amplituden schwin-

gen, tritt in den beiden letztgenannten Fällen eine Zunahme der Amplituden mit der Bauwerkshöhe auf.

### Horizontale Wandschwingungen

Die Frequenzspektren für die Wandfußpunkte der 6 Stockwerke der Systeme 4, 6 und 7 sind in den Bildern 3.29 bis 3.31 dargestellt.

In den horizontalen Bauwerksschwingungen der Wandfußpunkte des Systems 4 sind im wesentlichen 3 Hauptfrequenzen zu entdecken. Es handelt sich um die bereits besprochenen Frequenzen von 8 und 14 Hz, sowie um eine weitere Frequenz von 20 Hz. Bei der letztgenannten Frequenz handelt es sich um eine elastische Eigenform der Wände. Mit zunehmender Einbindetiefe des Bauwerks wachsen diese Resonanzfrequenzen an. Die Resonanzfrequenz von 8 Hz des nichteingebetteten Gebäudes wächst beispielsweise auf 10 Hz bei einer Einbettung von 3 m (System 5) und auf etwa 14 Hz bei einer Einbettung von 6 m (System 6) an.

Die in Bild 3.31 dargestellten horizontalen Schwingungen der Wandfußpunkte des Systems 7 (direkt über dem Tunnel, nichteingebettet) zeigen im Prinzip die gleichen Frequenzen wie das äquivalente System 4. Zusätzlich ergibt sich jedoch eine starke Resonanzspitze bei 28 Hz, die aus der Wechselwirkung mit den Decken resultiert. Im Gegensatz zum seitlich gelegenen Gebäude sind dann auch Amplitudenmaxima im höheren Frequenzbereich um 56 Hz, die vermutlich höheren horizontalen Eigenformen des Gesamtbauwerks zuzuordnen sind, vorhanden.

Schließlich sind in Bild 3.32 exemplarisch die horizontalen Schwingungen in den Wandmitten des Systems 6 (seitlich gelegenes Gebäude, Einbettung 6 m) dargestellt. Der Vergleich mit den in Bild 3.30 dargestellten Schwingungen an den Wandfußpunkten zeigt im unteren Frequenzbereich bis etwa 40 Hz Übereinstimmung sowohl hinsichtlich der Frequenzen wie auch der Amplituden. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer Amplitudenmaxima, insbesondere bei 72 Hz, die elastischen Eigenformen der Stockwerkswände entsprechen. Um Mißverständnisse zu vermeiden, sei darauf hingewiesen, daß es sich hierbei nicht um elastische Eigenformen des Gesamtgebäudes handelt.

### Vertikale Deckenschwingungen

Die vertikalen Schwingungen der Stockwerksdecken weisen generell die größten Amplituden auf. Im folgenden werden die Spektren aller Stockwerksdecken in den Bildern 3.33 bis 3.39 dargestellt, die auftretenden Effekte beschrieben und diskutiert und schließlich die Mittelwertspektren aller Stockwerksdecken der Systeme 4 bis 10 miteinander verglichen. Zusätzlich zu der Darstellung der direkten Antwortspektren werden in einigen Fällen auch auf das Spektrum der Fundamentplatte (Mittelpunkt für die Decken, Randpunkt für die Wände) bezogene Spektren gezeigt. Hieraus ergeben sich Ver-

stärkungsfaktoren der einzelnen Stockwerksdecken über die Bauwerkshöhe.

Aus den in Bild 3.33 dargestellten Spektren für die Mittel- und Viertelpunkte aller Stockwerksdecken des Systems 4 (nichteingebettetes Gebäude neben dem Tunnel) ist zu erkennen, daß es im berechneten Frequenzbereich zwischen 0 bis 80 Hz im wesentlichen 2 Frequenzbereiche gibt, in denen die Decken schwingen. Der erste Frequenzbereich liegt hier bei 28 Hz und ist mit der 1. Biegeeigenfrequenz der Decken – gekoppelt mit den Wänden – identisch. Der zweite Frequenzbereich liegt zwischen 54 und 64 Hz. Hierbei handelt es sich um die 2. Biegeeigenfrequenz. Im Gegensatz zu der 1. Eigenfrequenz ist diese Frequenz jedoch nicht konstant, sondern es ergeben sich an allen Decken mehrere Spitzen. Die Ursache für dieses Verhalten ergibt sich zum einen daraus, daß die Deckenschwingungen stark mit den Wandschwingungen gekoppelt sind. Dies ist sowohl eine Steifigkeitskoppelung als auch, wie oben bereits ausgeführt, eine Anregungskoppelung. Weiterhin wird die Einspannung der Decken in die Wände mit zunehmender Gebäudehöhe infolge des Abnehmens der durch die Wände verursachten Zwänge immer weicher. Dadurch verschieben sich die Resonanzfrequenzen der einzelnen Stockwerksdecken mit größerer Stockwerksnummer zu tieferen Frequenzen.

Vergleicht man nun die in den Bildern 3.34 und 3.35 dargestellten Spektren der Systeme 5 und 6 (zunehmende Einbindetiefe des Gebäudes) so stellt man zunächst fest, daß die maximalen Amplituden im Vergleich zu dem System ohne Einbettung etwa um den Faktor 3 zunehmen. Diese sehr große Amplitudenvergrößerung ergibt sich unabhängig von der Einbettungstiefe. Hinsichtlich der Lage der ersten Biegeeigenfrequenz zeigt sich bei beiden eingebetteten Systemen eine Reduzierung, wobei die Lage der Eigenfrequenz von Stockwerksdecke zu Stockwerksdecke stark schwankt. Eine Tendenz in der Art, daß die unterste oder oberste Stockwerksdecke jeweils Größtwerte der Amplituden aufweist, kann nicht festgestellt werden. Wie bereits mehrmals bemerkt, hängt die Lage des Amplitudengrößtwertes von der Phasenlage der anregenden Schwingung am Fundament, von den sich ausbildenden Wand-eigenformen und von der Stockwerksnummer im Bauwerk ab. Die Wand-eigenformen wiederum sind eine Funktion der Materialeigenschaften der Wände, der Stockwerkshöhe und den Einbettungsbedingungen bzw. allgemeiner den kinematischen Randbedingungen.

Befindet sich das Gebäude direkt über dem Tunnel, dann zeigen die Frequenzspektren der Stockwerksdecken (Bilder 3.36 bis 3.39) für den Fall ohne Einbettung ein gänzlich anderes Verhalten. Das Spektrum ist durch 2 Amplitudenmaxima im Bereich zwischen 18 bis 22 Hz und durch eine einzelne schwach gedämpfte Resonanzspitze bei 30 Hz geprägt. Wie der Vergleich mit den im unteren Bildteil dargestellten Frequenzspektren des Tunnels zeigt, entstehen die Antworten im Bereich 18 bis 22 Hz durch eine starke Koppelung mit dem Tunnel. Die



Tunneldecke besitzt in diesem Bereich eine Resonanzfrequenz. Wie die Amplitudenspektren am Deckenviertelpunkt zeigen, bildet sich eine starke 2. Resonanzfrequenz bei 54 Hz aus. Der Vergleich der maximalen spektralen Deckenamplituden mit denen des Systems 4 (Gebäude seitlich, keine Einbettung) ergibt, daß hier etwa um den Faktor 1,5 größere Amplituden auftreten.

Wird die Einbettung vergrößert (System 8), dann überwiegen die Antworten im Frequenzbereich zwischen 18 und 22 Hz. Die maximalen spektralen Amplituden vergrößern sich nochmals um etwa den Faktor 1,5. Die Lage der Resonanz der 2. Biegeeigenfrequenz verringert sich von 54 Hz auf etwa 48 Hz. Wird das Gebäude direkt auf der Tunneldecke aufgelagert (Bilder 3.38 und 3.39), dann überwiegen die Antworten im Bereich zwischen 18 und 22 Hz vollständig. Zusammenfassend gilt damit für die Decken bei Gebäuden die sich direkt über dem U-Bahntunnel befinden, daß deren Schwingungsverhalten stark bis ausschließlich von dem Schwingungsverhalten der Tunneldecke bestimmt wird.

Schließlich soll noch in Bild 3.40 ein direkter Vergleich der Amplitudenfrequenzgänge der Systeme 4 bis 10 (Tunnel mit Gebäude seitlich und direkt darüber) gegeben werden. Dargestellt sind die Mittelwerte aller Frequenzgänge eines Systems. Obgleich die Geometrie und die Materialien aller Systeme identisch sind, ergibt sich für die Stockwerksdecken ein breites Band von Resonanzfrequenzen zwischen 16 und 32 Hz. Die Randbedingungen, die schließlich zu dem jeweils aktuellen Wert führen, sind die elastischen Eigenschaften der Stockwerkswände zusammen mit den Einbettungsbedingungen.

Eine Einbettung äußert sich generell dadurch, daß mit zunehmender Einbettungstiefe eine Systemversteifung eintritt und die Systemdämpfung sich infolge verbesserter Wellenabstrahlung im Boden vergrößert. Die Versteifung der aufgehenden Wände durch die Einbettung führt jedoch im allgemeinen dazu, daß die Decken phasengleicher als bei Nichteinbettung angeregt werden. Dies wiederum führt zu einer Vergrößerung der Deckenschwingungen. Hinsichtlich des Vergrößerungsverhältnisses der maximalen spektralen Amplituden ist, wie aus Bild 3.40 zu ersehen, ein mittlerer Faktor von etwa 2 zu erwarten.

Hinsichtlich der vertikalen Schwingungen der Gebäudewände sind die Unterschiede von System zu System – mit Ausnahme der Systeme 9 und 10, bei denen das Gebäude direkt auf die Tunneldecke aufgelagert wurde – nur graduell. Bei allen Systemen bilden sich die Resonanzfrequenzen nahezu an den gleichen Stellen, nämlich bei 14 Hz, bei 30 Hz, bei 58 Hz und bei 76 Hz aus. Im niederen Frequenzbereich bis etwa 30 Hz sind die spektralen Amplituden für alle Systeme i.M. etwa gleich. Darüber bilden sich dann größere Unterschiede aus, deren Ursache mit unterschiedlichem Dämpfungsverhalten bei unterschiedlicher Einbettung begründet werden kann.

### 3.8 Zusammenfassung

Im vorigen Kapitel wurde das Schwingungsverhalten der grundlegenden Systeme

- Tunnel im Boden
- Tunnel im Boden mit seitlichem Gebäude
- Tunnel im Boden mit darüber befindlichen Gebäude

rechnerisch untersucht und die sich ergebenden Effekte anhand der Schwingungsbilder phänomenologisch und anhand der Amplitudenspektren von ausgewählten Punkten des Tunnels und des Gebäudes quantitativ dargestellt und diskutiert. Hierbei wurden die wesentlichen Effekte bei der Tunnel-Boden-Wechselwirkung, bei der Ausbreitung im Untergrund sowie bei der Einleitung und Weiterleitung im Gebäude erklärt. Anhand dieser Ergebnisse kann in der Praxis eine qualitative Beurteilung einer gegebenen Situation durchgeführt werden. Für eine quantitative Beurteilung muß das in dieser Arbeit vorgestellte Rechenmodell und Berechnungsverfahren angewendet werden. Auf der Basis der in dieser Arbeit dargestellten Zusammenhänge des Schwingungsverhaltens der einzelnen Bauwerke und Bauteile sind aber auch einfache Modelle für eine erste Prognoseberechnung denkbar und möglich. So kann der Tunnel in die Elemente Decke und Sohle aufgeteilt und diese Elemente separat analysiert werden. Im interessierenden Frequenzbereich bis etwa 100 Hz genügt es einen eingespannten Balken mit der Zusatzmasse des aufliegenden Bodens zu betrachten. Mit einem solchen System kann die Eigenfrequenz genügend genau abgeschätzt werden. Hinsichtlich der Berechnung der Amplituden gestalten sich die Verhältnisse etwas schwieriger, da hierbei die Abstrahlungsdämpfung durch die Wellenausbreitung im umgebenden Boden von entscheidender Bedeutung ist. Für die anzusetzenden Dämpfungswerte können hier keine allgemeinen Hinweise gegeben werden, da diese stark vom Bodenaufbau und der Geometrie des Gesamtsystems – Lage und Einbettung der umliegenden Bauwerke – abhängig sind.

Der Übergang der Schwingungen vom Boden in das Gebäude ist durch folgende Effekte geprägt:

1. Schwingungen, die Frequenzen besitzen, die größer als die sogenannte Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz sind, werden abgemindert, darunter verstärkt. Die Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz wird durch die Fundament-Bodensteifigkeit und durch die Gesamtmasse des Gebäudes festgelegt. Bei einem bestimmten konstanten Anregungsspektrum werden dann niedrige Gebäude (kleine Gesamtmasse) die auf einem steifen Untergrund stehen (große Bodensteifigkeit) weitaus mehr mit Schwingungen belastet, als größere Gebäude, die auf einem weichen Untergrund stehen.
2. Neben der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz sind die nächsten relevanten Frequenzen die vertikalen Wand-eigenfrequenzen. Diese legen die Bereiche fest, bei denen die einzelnen Stockwerke gegeneinander

- schwingen. Anschaulich heißt das, das sind die Frequenzen, die sich ergeben, wenn das gesamte Bauwerk als eine Kette von Einmassenschwinger betrachtet wird, bei denen die Federn die Vertikalsteifigkeiten der Wände und die Decken die Einzelmassen darstellen. Für den hier betrachteten Frequenzbereich bis etwa 100 Hz und die Baumaterialien Ziegel oder Beton ist hierbei meistens nur die erste dieser Eigenfrequenzen von Bedeutung, da die weiteren weit oberhalb des betrachteten Frequenzbereiches liegen.
3. Im weiteren sind die horizontalen Eigenfrequenzen des Gesamtbauwerks, die horizontalen Wandeigenfrequenzen und die Biegeeigenfrequenzen der Stockwerksdecken von grundlegender Bedeutung für das Schwingungsverhalten des Bauwerks. Die horizontalen Gebäude- und Wandeigenschwingungen sind deshalb von großer Bedeutung, weil sie die Einspann- und Anregungsbedingungen der Stockwerksdecken bestimmen. Neben der Wandgeometrie und dem Wandmaterial ist hierbei auch die Einbettung der Gebäude von großer Bedeutung, da beide die horizontalen Eigenschwingungsformen bestimmen. Durch diese Wechselwirkung zwischen Wand und Decke ergeben sich veränderte Einspannbedingungen über die Bauwerkshöhe und in Folge von Stockwerksdecke zu Stockwerksdecke veränderliche Eigenfrequenzen. In praktischer Hinsicht bedeutet dies, daß ein Gebäude bei gleichen Spannweiten und Abmessungen ein ganzes Band von Deckeneigenfrequenzen besitzt, so daß bei breitbandiger Anregung, wie sie bei U-Bahn und Straßenbahnerschütterungen immer vorhanden ist, mit großer Wahrscheinlichkeit immer irgendeine Decke zu Resonanzschwingungen angeregt wird.
  4. Hinsichtlich des Einflusses einer Einbettung gilt, daß das System dadurch versteift und die Systemdämpfung infolge verbesserter Wellenabstrahlung im Boden vergrößert wird. Die Versteifung der aufgehenden Wände durch die Einbettung führt jedoch im allgemeinen dazu, daß die Decken phasengleicher als bei Nichteinbettung angeregt werden. Dies wiederum führt im allgemeinen zu einer Vergrößerung der Deckenschwingungen.
  5. Die Lage des Gebäudes – seitlich oder unmittelbar über dem Tunnel – ist von großer Bedeutung. Während bei einer seitlichen Lage die horizontalen Wandschwingungen in großem Maße angeregt werden, ist dies bei zentraler Lage von weit geringerer Bedeutung. Gleichzeitig wird das seitliche Gebäude wesentlich mehr durch die Bodenschwingungen im Bereich der Kellerwände angeregt. Das zentrale Gebäude zeigt demgegenüber eine starke Koppelung mit den Tunnelschwingungen. Besonders die Resonanz der Tunneldecke wirkt sich dann auf die Gebäudeschwingungen stark aus. Durch die mehr phasengleiche Anregung der Gebäudefundamente des zentralen Gebäudes im Vergleich mit dem seitlich gelegenen Gebäude ergeben sich beim zentralen Gebäude stets größere Deckenschwingungen.
  6. Ist ein Gebäude ohne weitere Maßnahmen direkt auf der Decke eines Tunnels gegründet, dann wird das Schwingungsverhalten des Gebäudes einschließlich der Stockwerksdecken stark bis ausschließlich von dem Schwingungsverhalten der Tunneldecke bestimmt.

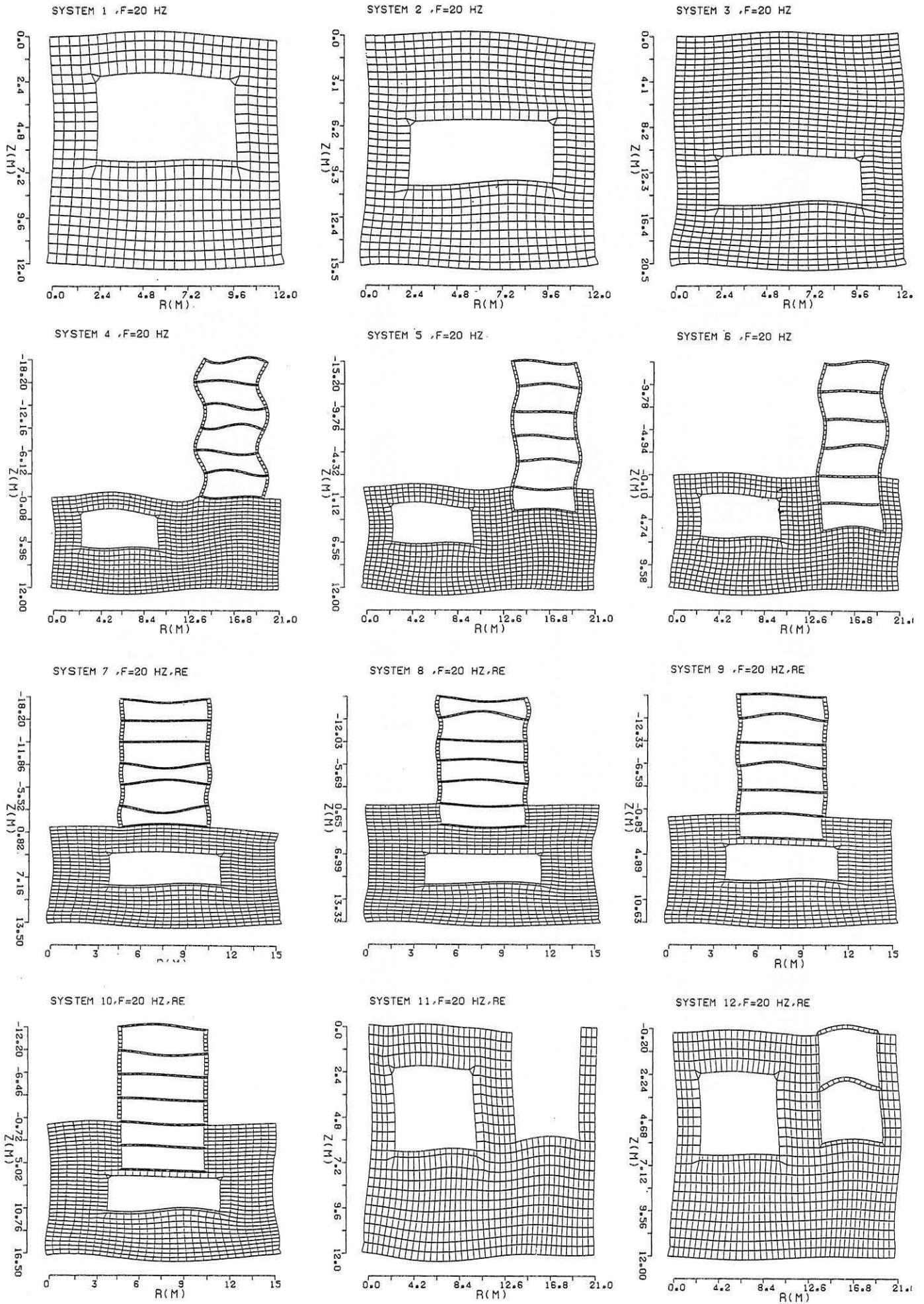


Bild 3.1  
FE-Modelle aller untersuchten Systeme

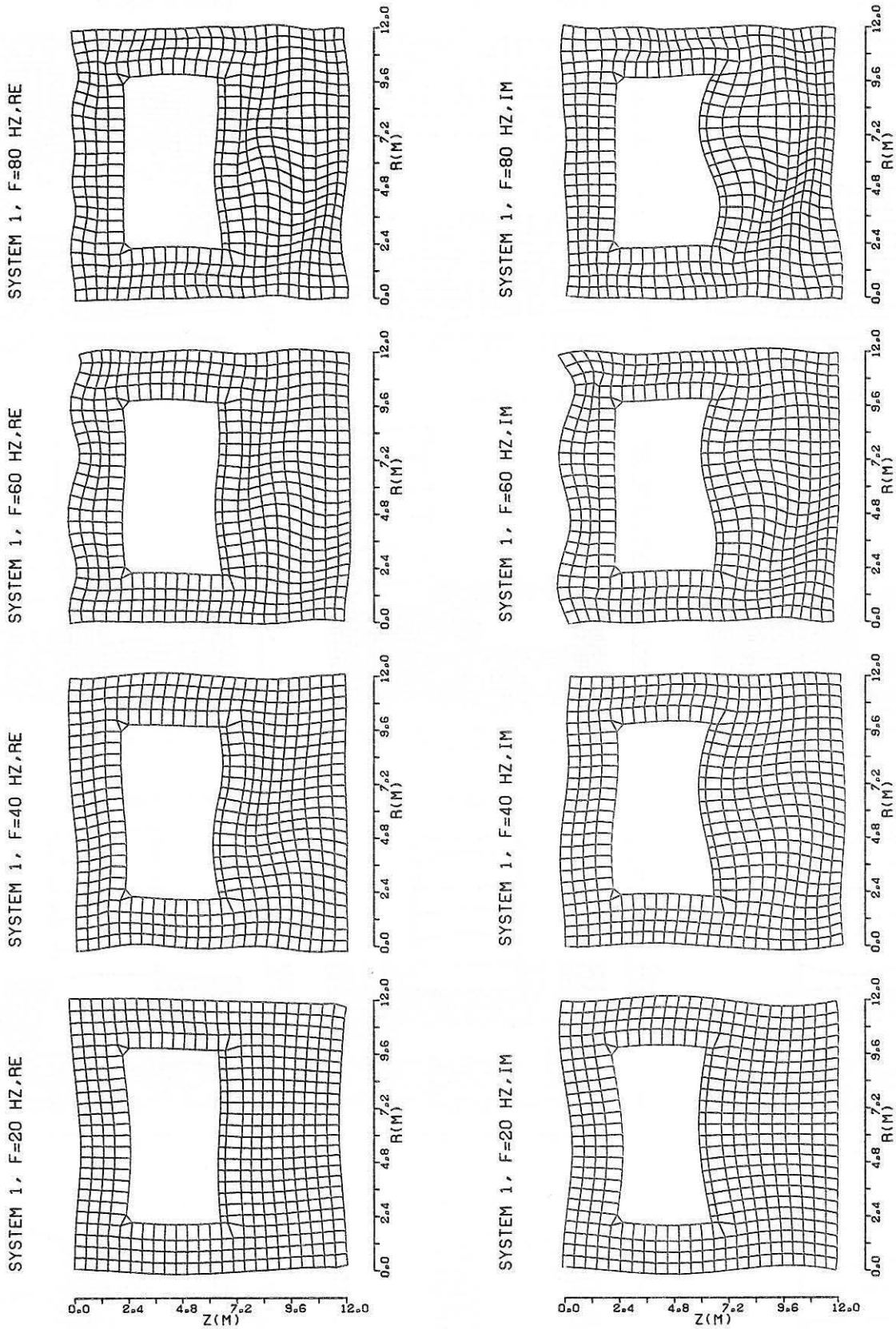


Bild 3.2  
 Schwingungsbild des Systems 1 für die Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz



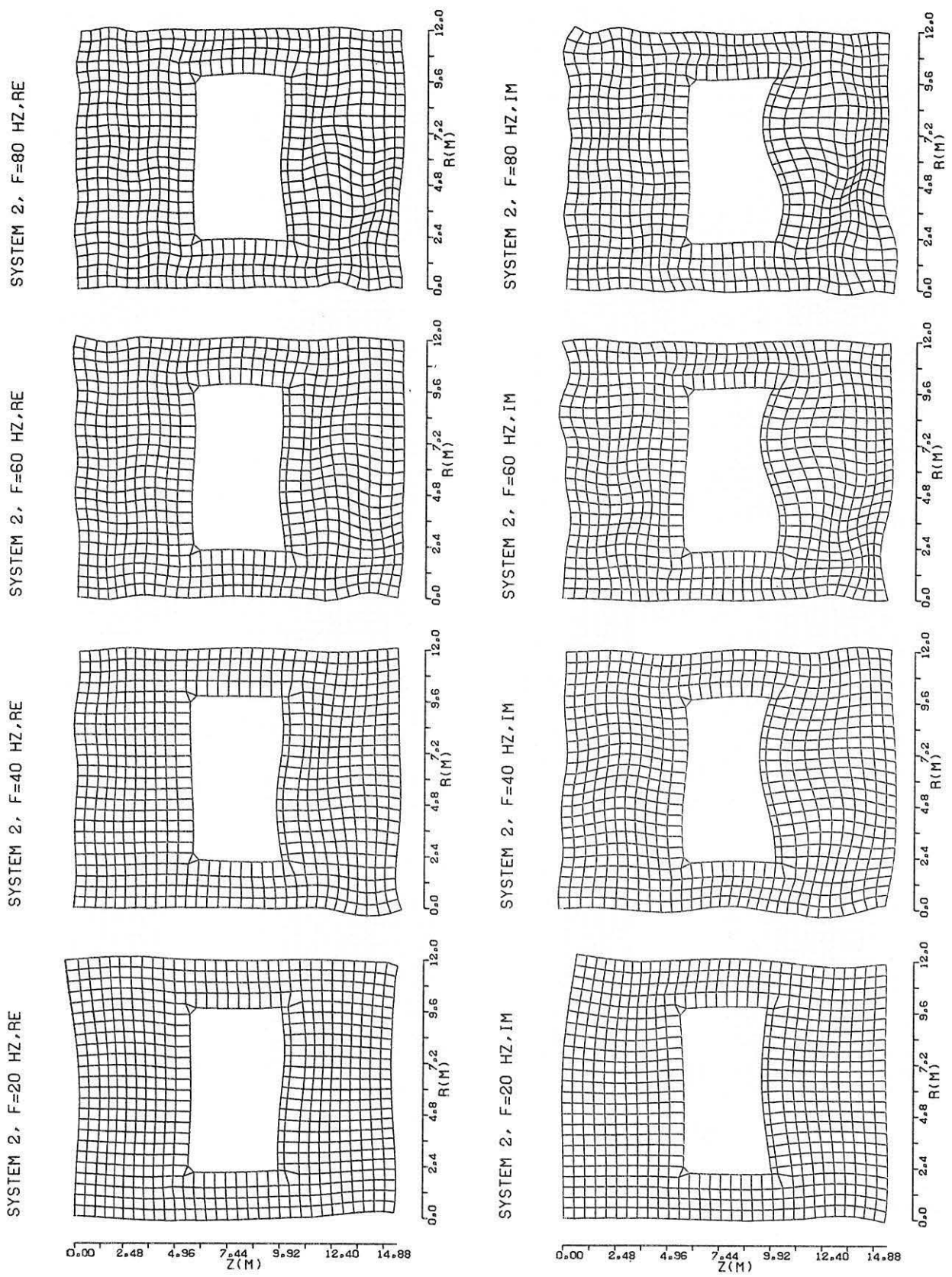
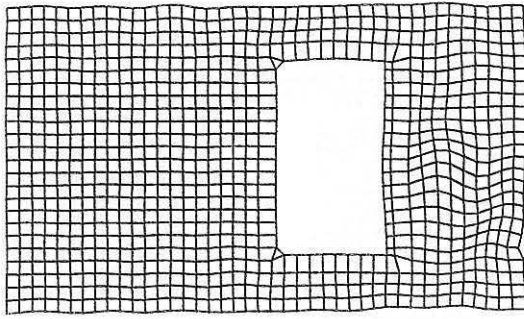


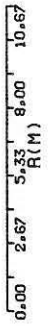
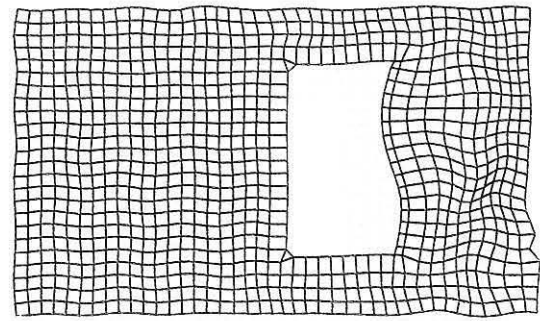
Bild 3.3  
 Schwingungsbild des Systems 2 für die Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz



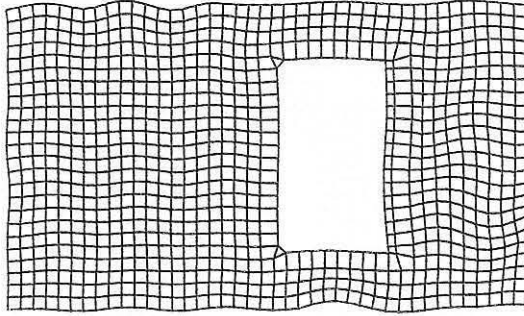
SYSTEM 3, F=80 HZ, RE



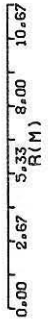
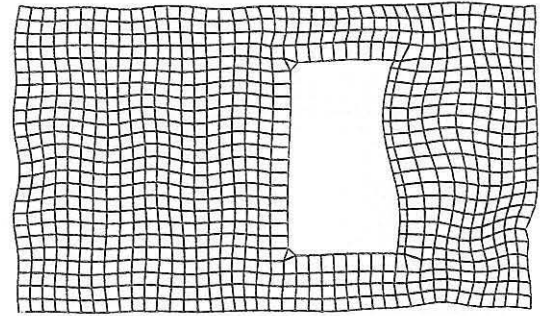
SYSTEM 3, F=80 HZ, IM



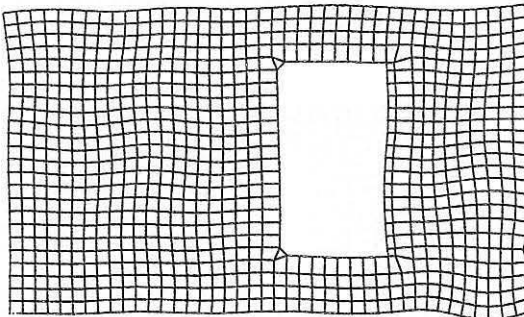
SYSTEM 3, F=60 HZ, RE



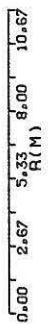
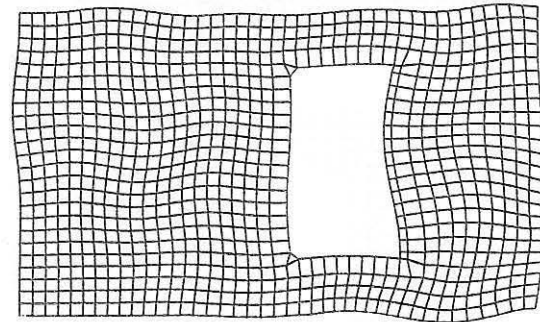
SYSTEM 3, F=60 HZ, IM



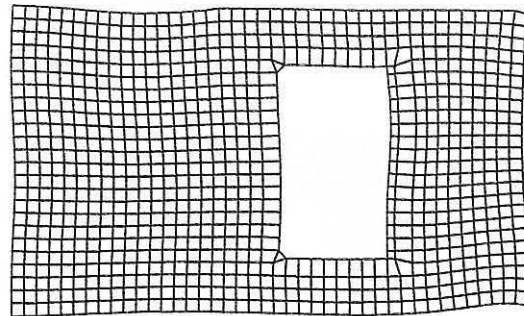
SYSTEM 3, F=40 HZ, RE



SYSTEM 3, F=40 HZ, IM



SYSTEM 3, F=20 HZ, RE



SYSTEM 3, F=20 HZ, IM

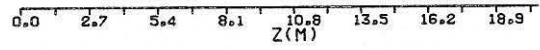
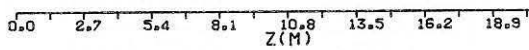
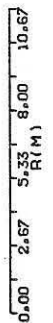
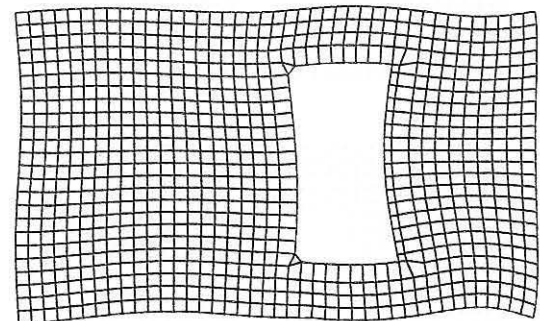


Bild 3.4  
Schwingungsbild des Systems 3 für die Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz

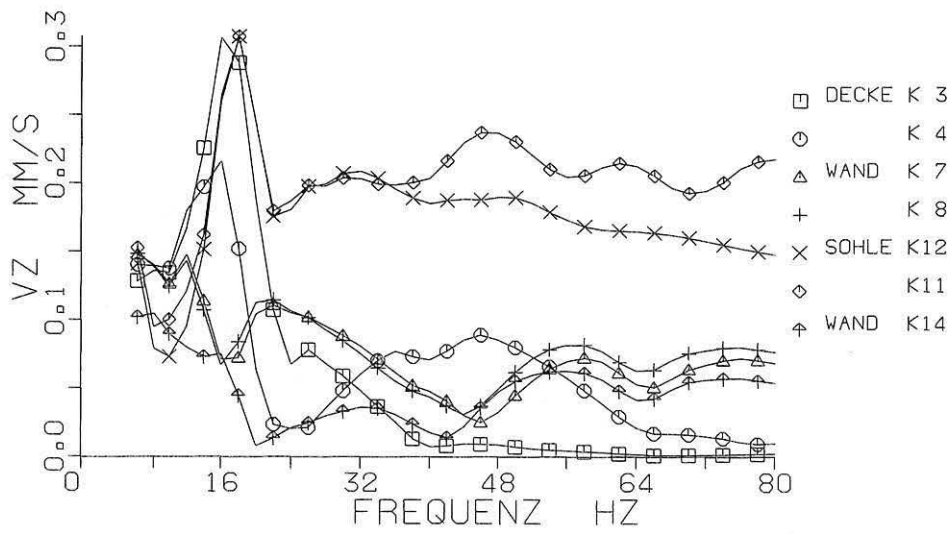


Bild 3.5  
 Frequenzspektren von Tunneldecke, -wand und -sohle des Systems 1

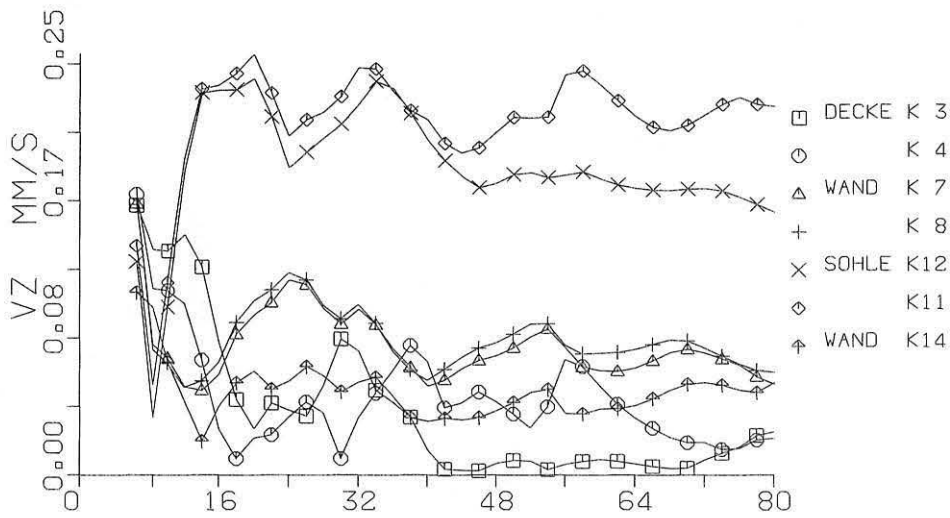


Bild 3.6  
 Frequenzspektren von Tunneldecke, -wand und -sohle des Systems 2

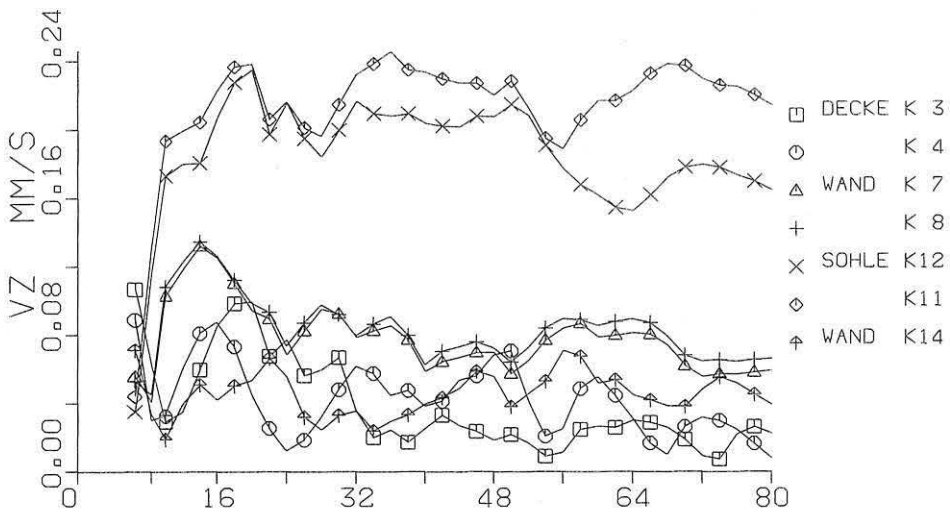


Bild 3.7  
 Frequenzspektren von Tunneldecke, -wand und -sohle des Systems 3

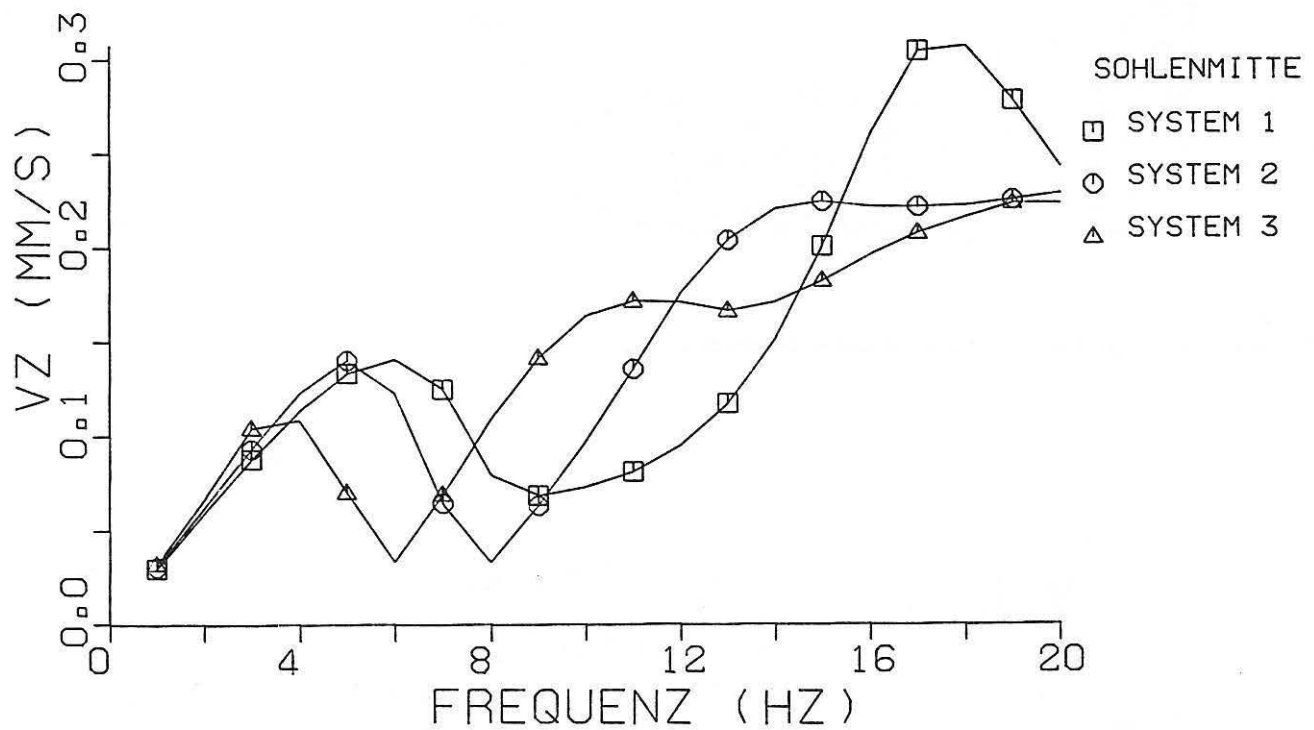
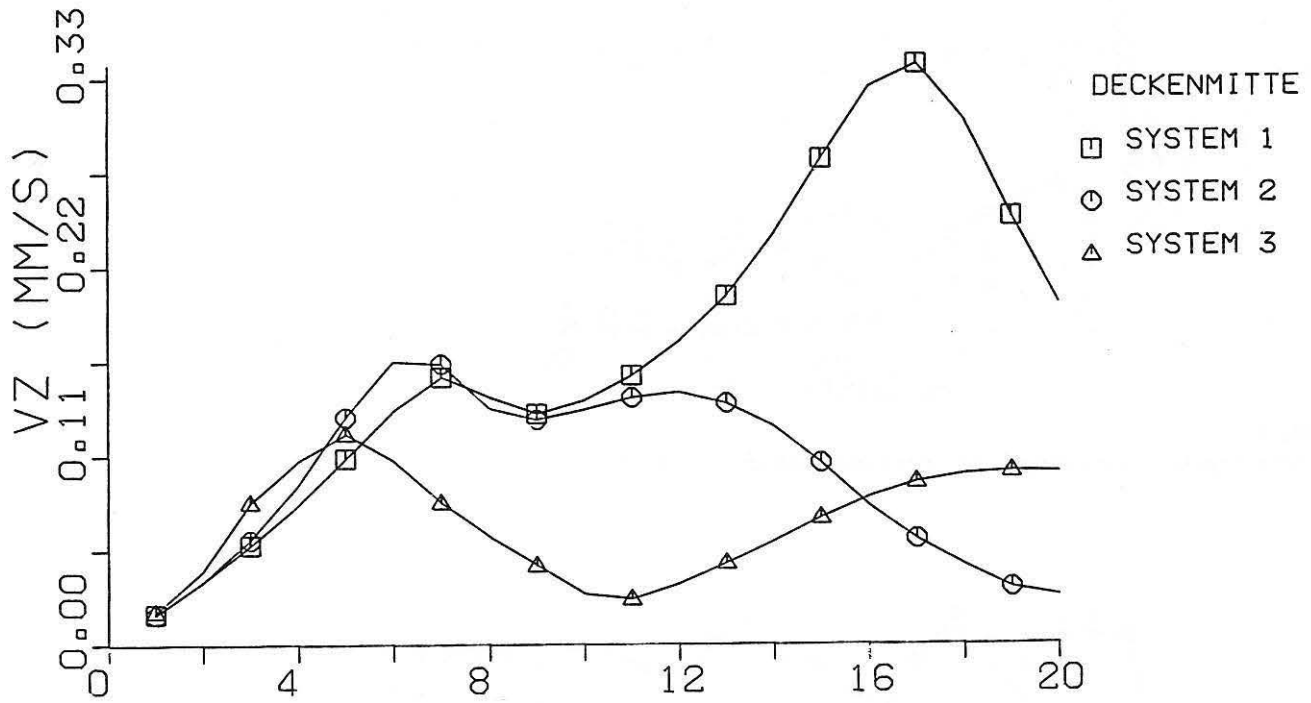


Bild 3.8  
Vergleich der Spektren der Tunneldecke und -sohle für die Systeme 1 bis 3

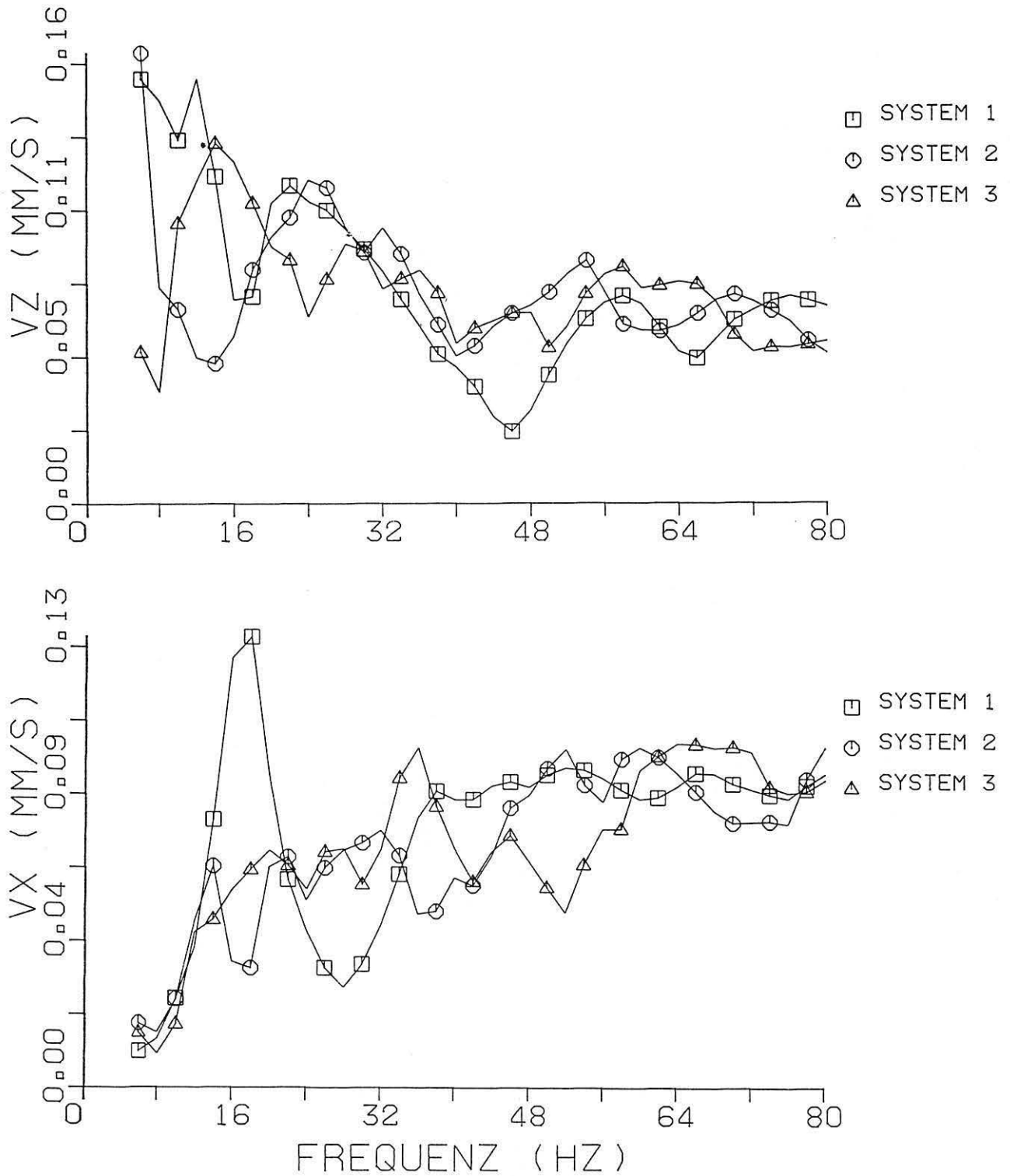


Bild 3.9  
 Vergleich der Spektren der Tunnelwand für die Systeme 1 bis 3

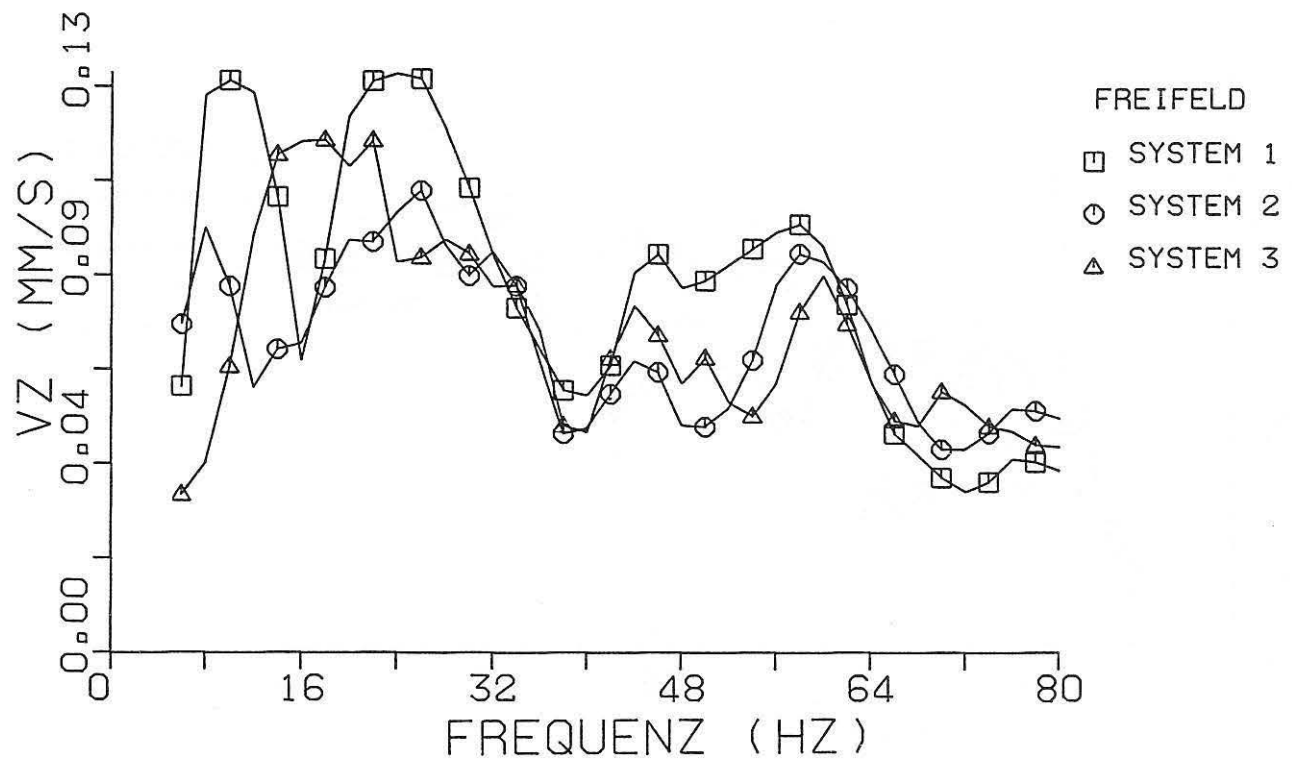
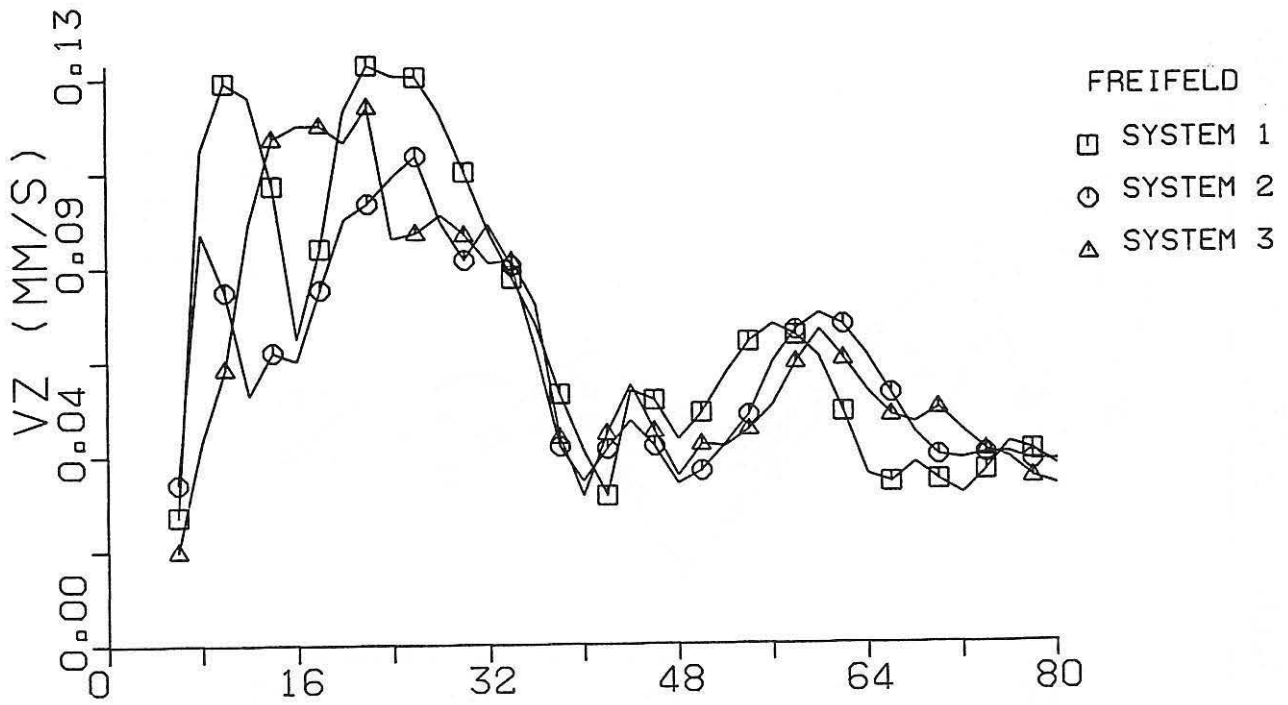


Bild 3.10  
 Vergleich der Spektren im Freifeld, Systeme 1 bis 3



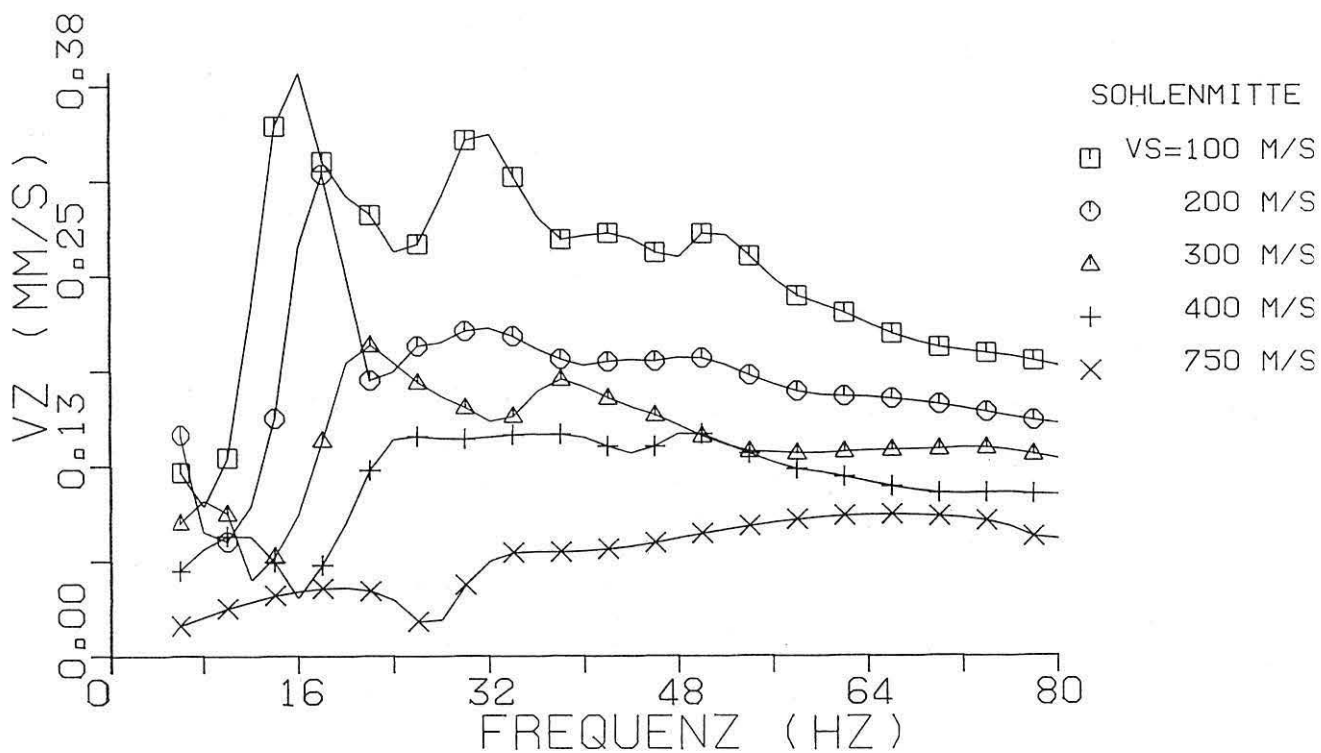
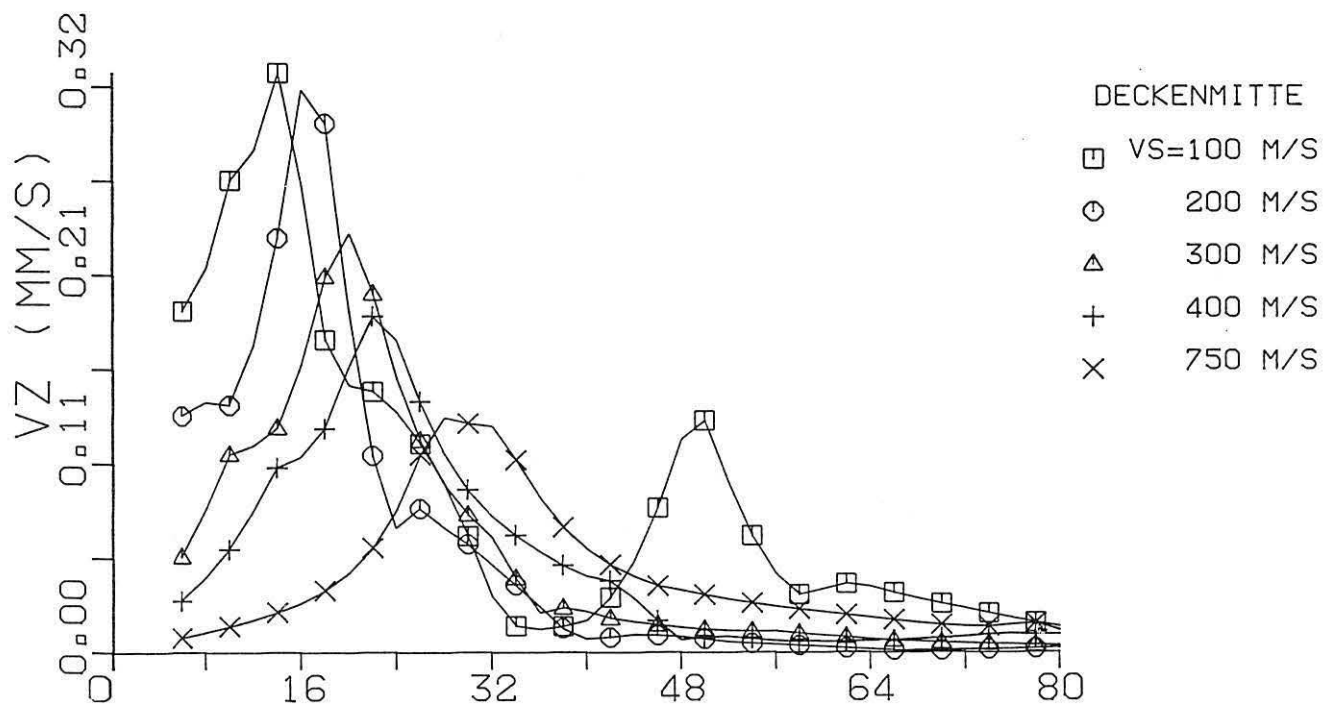


Bild 3.11  
Spektren von Tunneldecke und Tunnelsohle bei zunehmender Bodensteifigkeit, System 1

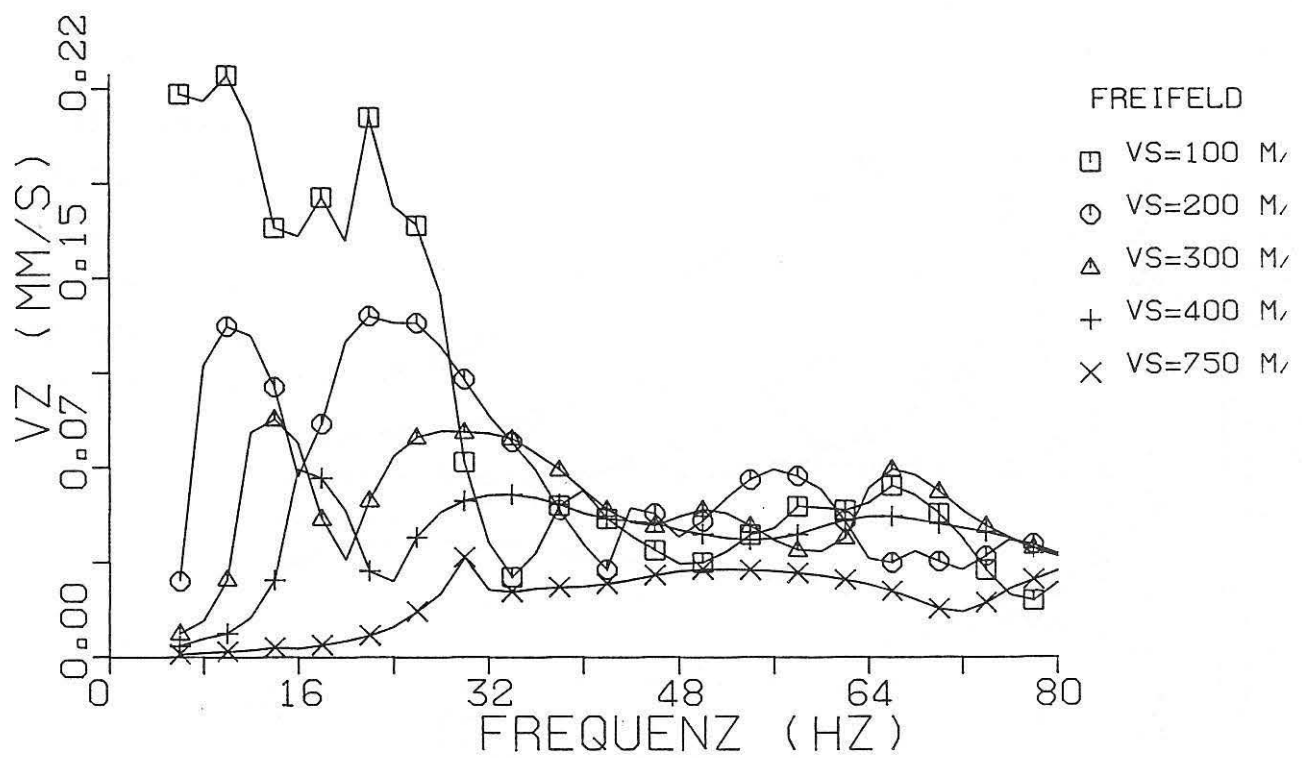
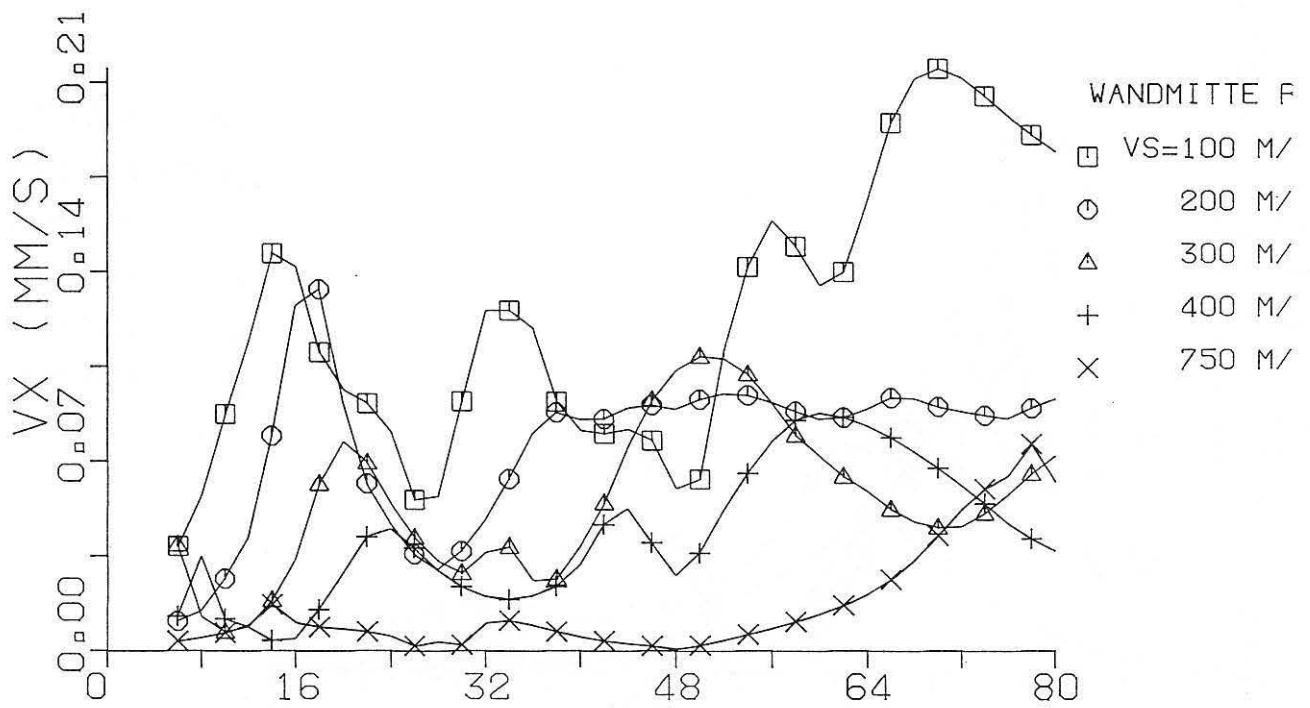


Bild 3.12  
Spektren von Tunnelwand und Freifeld bei zunehmender Bodensteifigkeit, System I

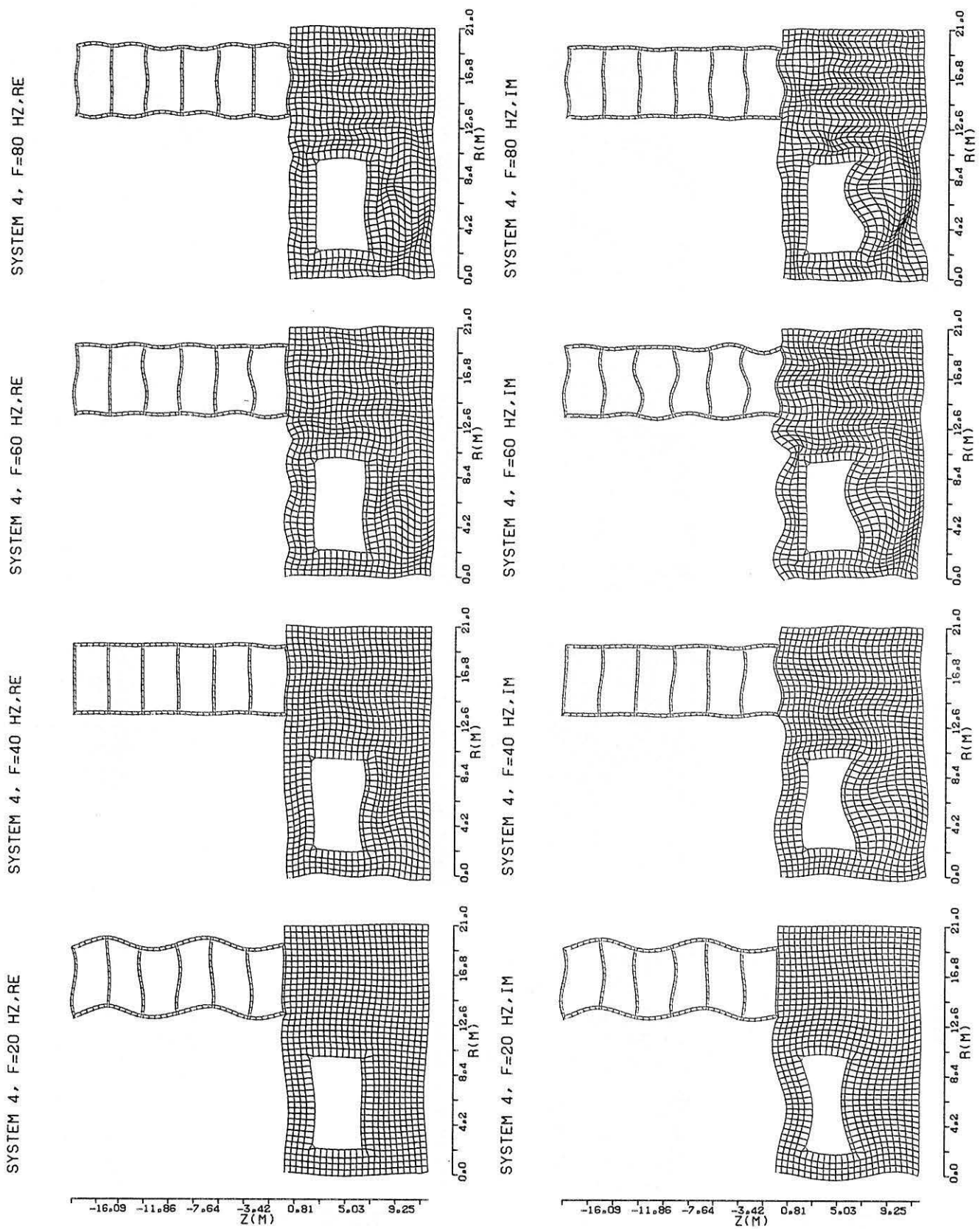
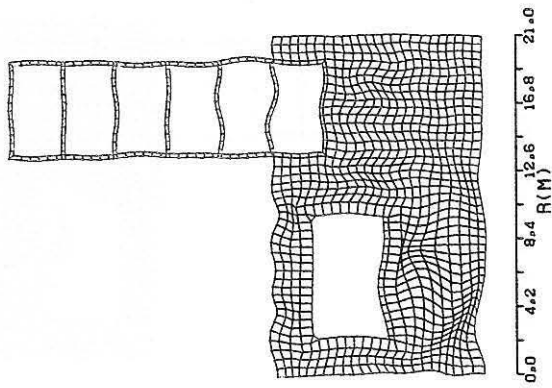
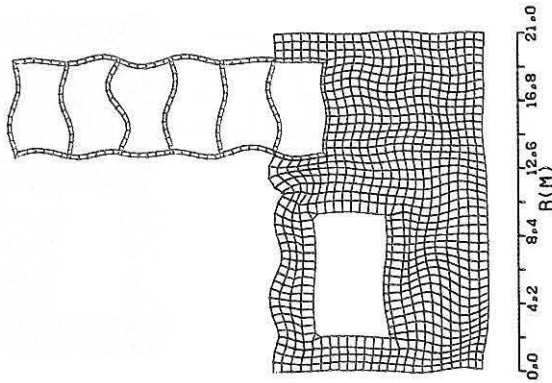


Bild 3.13  
Schwingungsbilder des Systems 4 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz

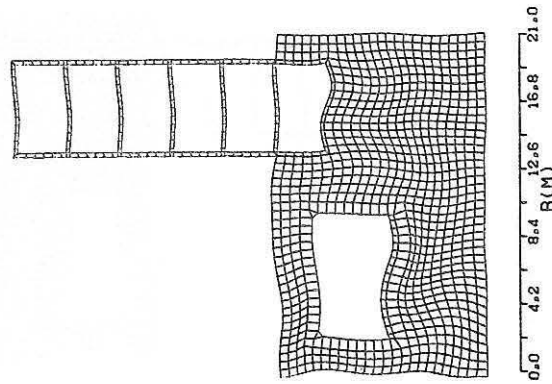
SYSTEM 5, F=80 HZ, RE



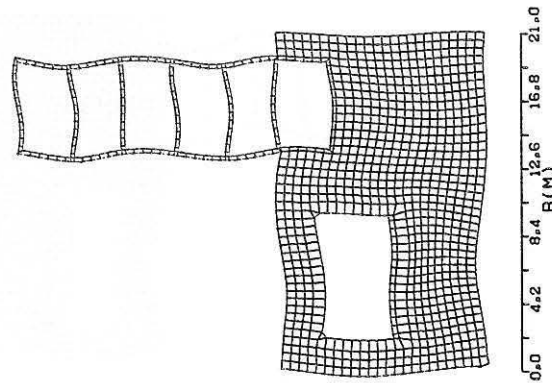
SYSTEM 5, F=60 HZ, RE



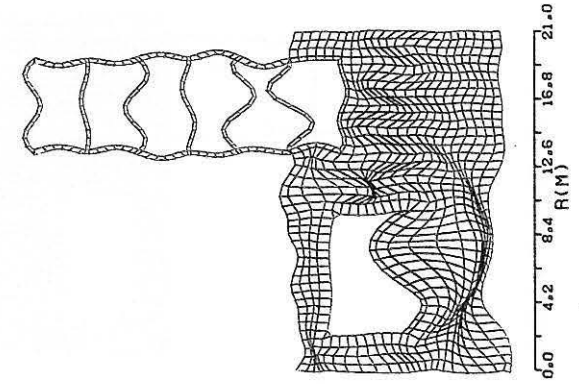
SYSTEM 5, F=40 HZ, RE



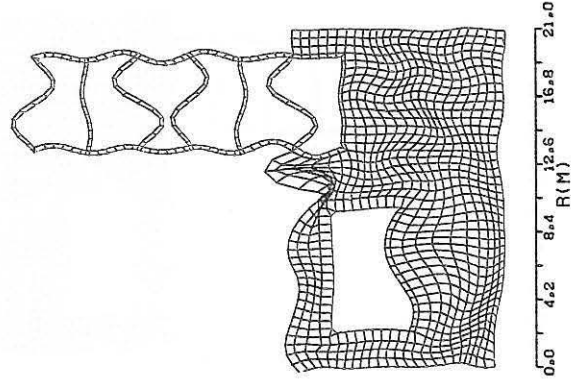
SYSTEM 5, F=20 HZ, RE



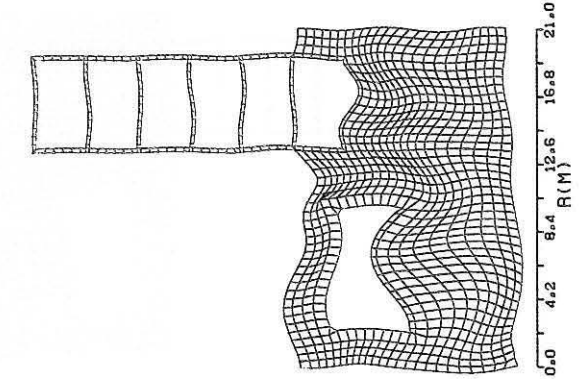
SYSTEM 5, F=80 HZ, IM



SYSTEM 5, F=60 HZ, IM



SYSTEM 5, F=40 HZ, IM



SYSTEM 5, F=20 HZ, IM

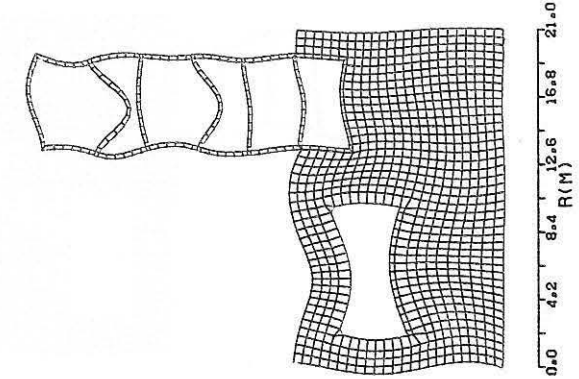


Bild 3.14

Schwingungsbilder des Systems 5 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz

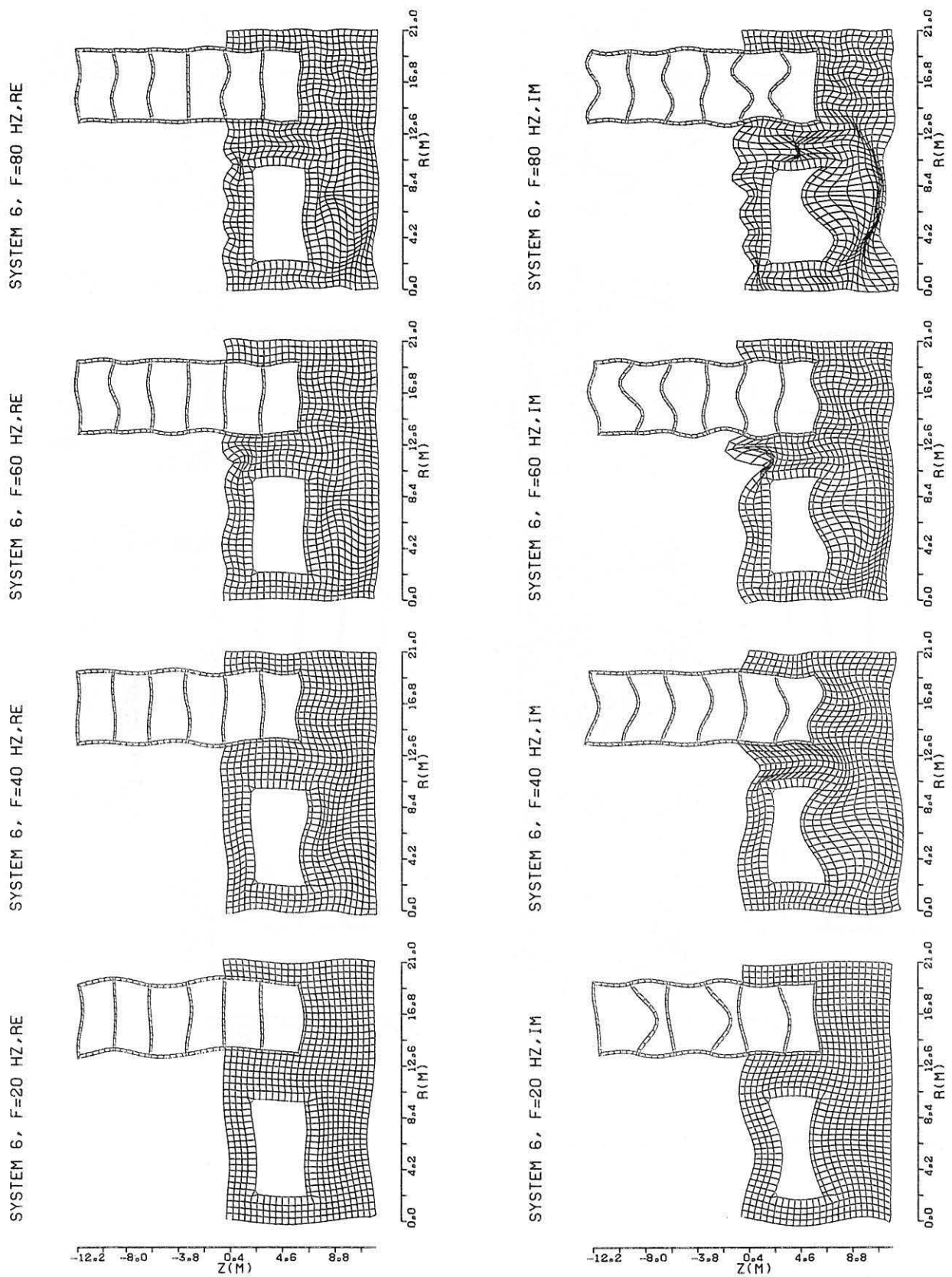


Bild 3.15  
Schwingungsbilder des Systems 6 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz



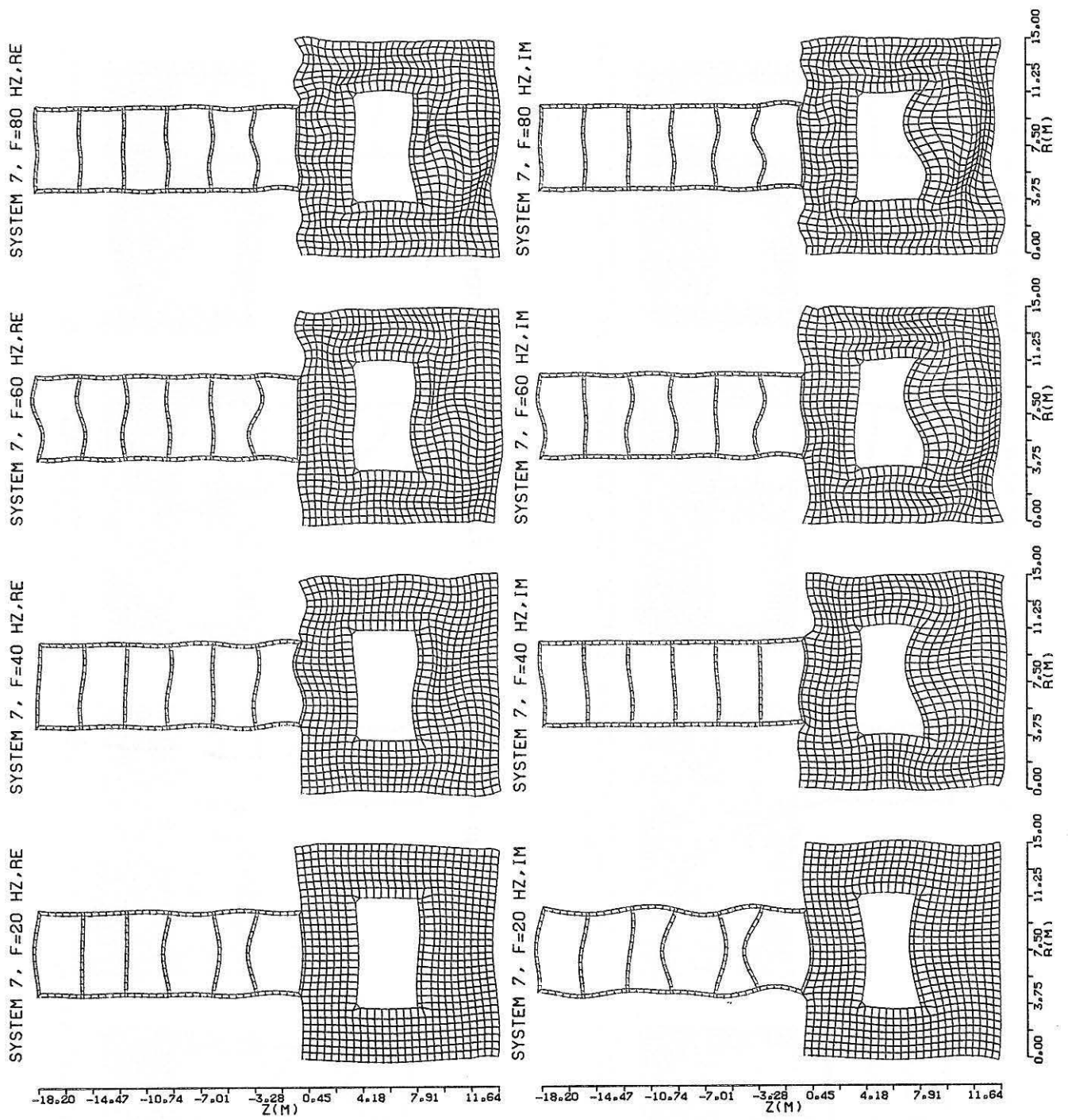


Bild 3.16  
Schwingungsbilder des Systems 7 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz

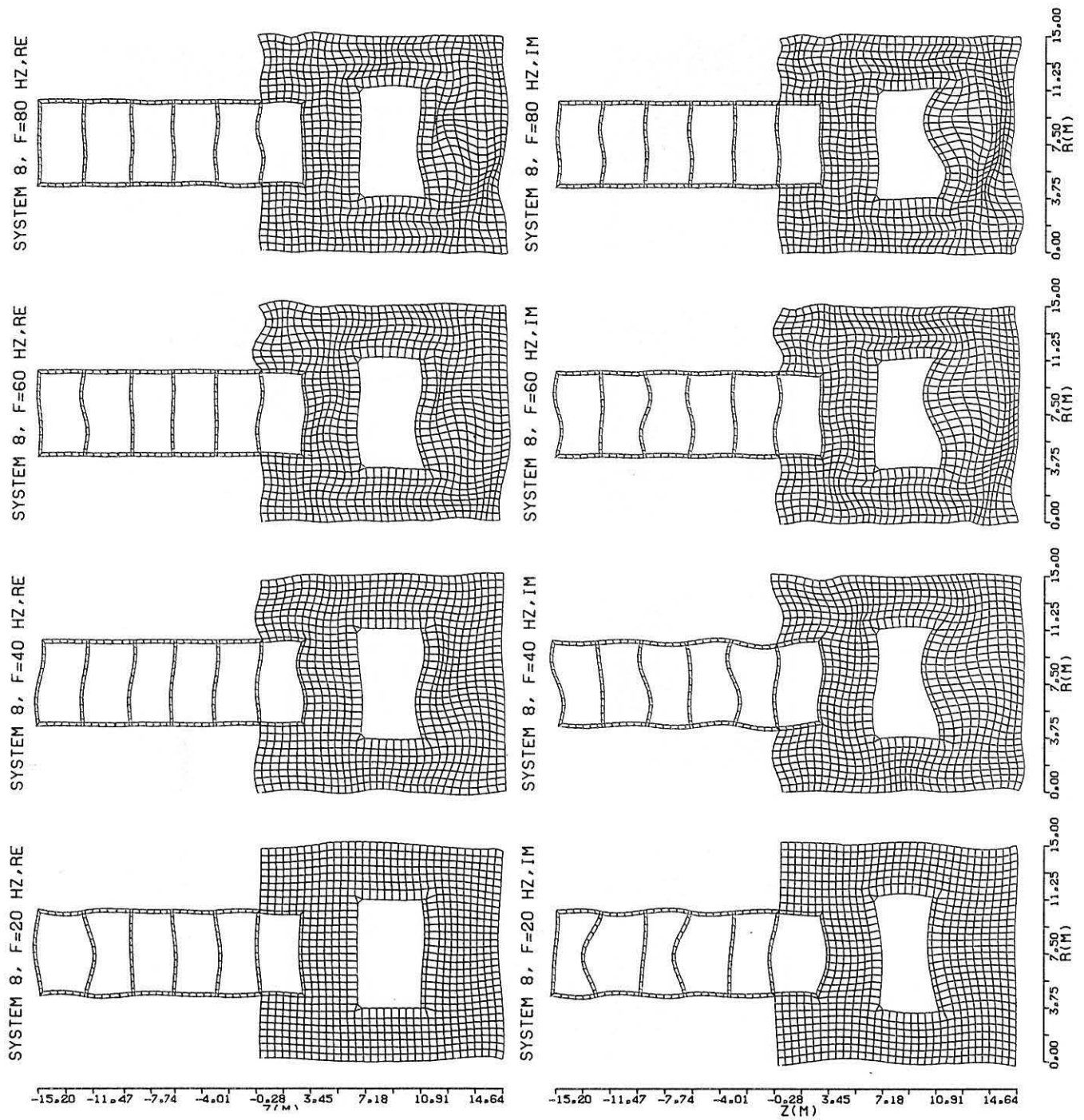


Bild 3.17  
Schwingungsbilder des Systems 8 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz

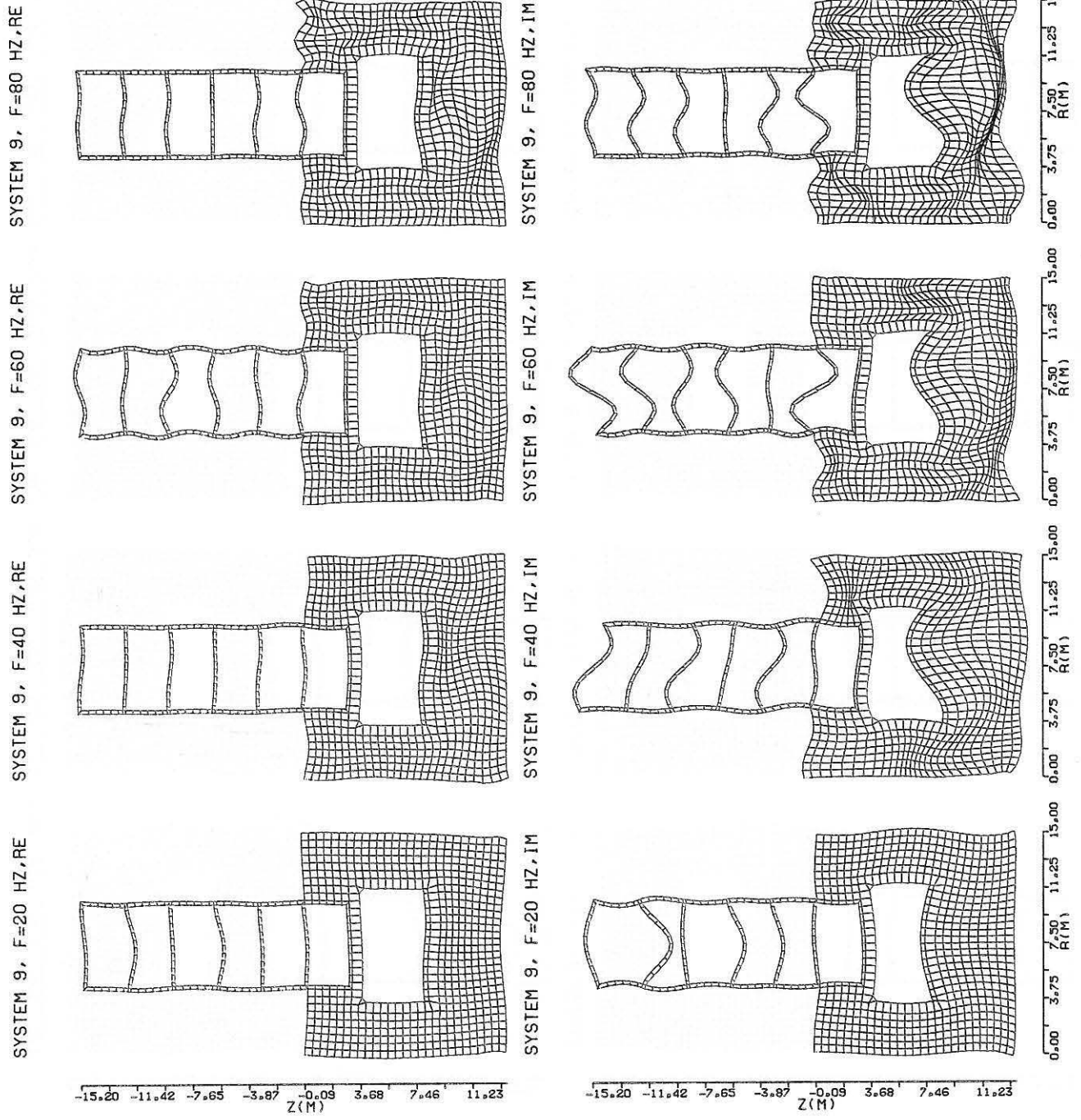
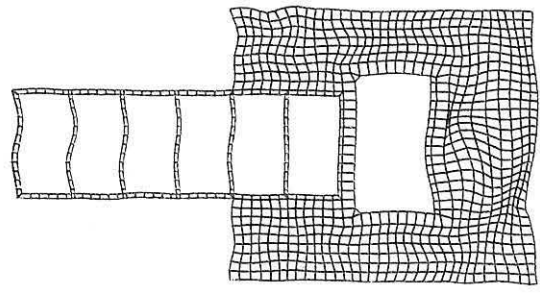
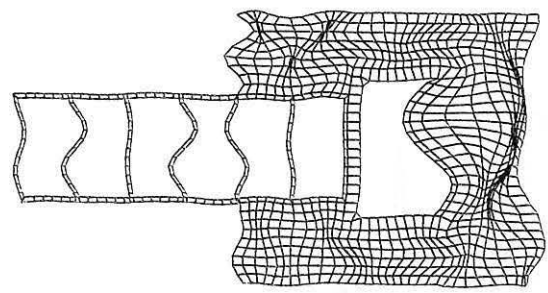


Bild 3.18  
Schwingungsbilder des Systems 9 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz

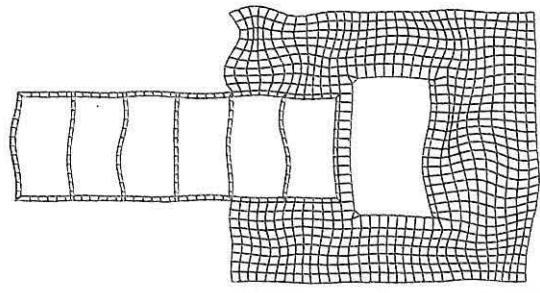
SYSTEM 10, F=80 HZ,R



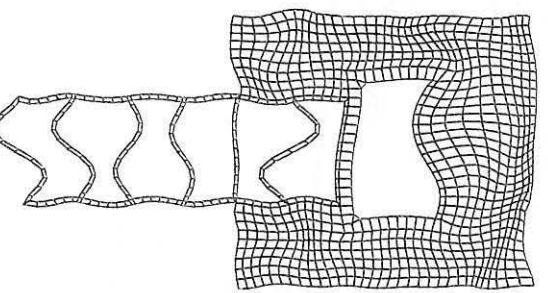
SYSTEM 10, F=80 HZ,I



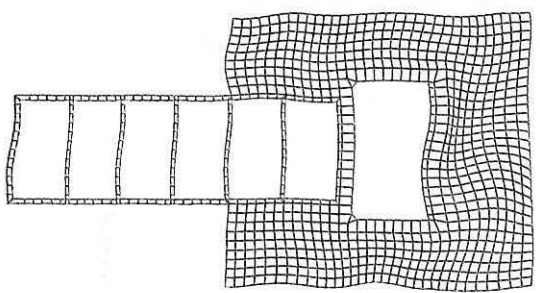
SYSTEM 10, F=60 HZ,R



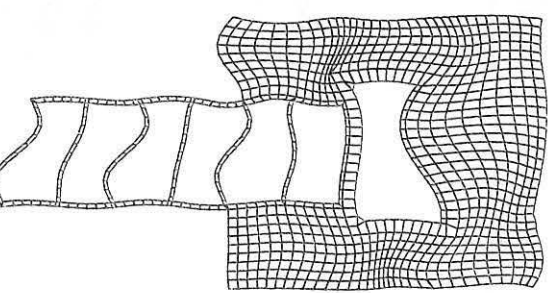
SYSTEM 10, F=60 HZ,I



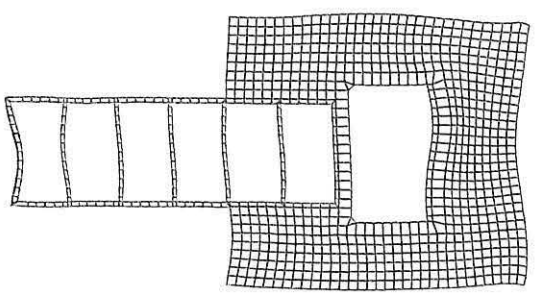
SYSTEM 10, F=40 HZ,R



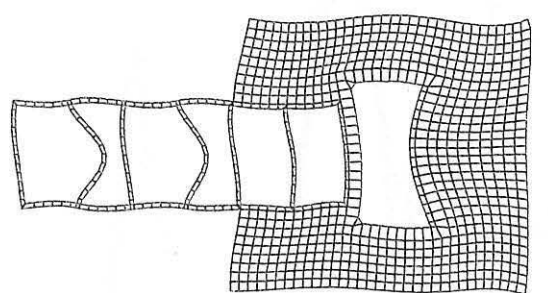
SYSTEM 10, F=40 HZ,I



SYSTEM 10, F=20 HZ,R



SYSTEM 10, F=20 HZ,I



-12.20 -8.42 -4.65 -0.87 2.91 6.68 10.46 14.23  
Z (M)

-12.20 -8.42 -4.65 -0.87 2.91 6.68 10.46 14.23  
Z (M)

0.00 3.75 7.50 11.25 15.00  
R (M)

0.00 3.75 7.50 11.25 15.00  
R (M)

0.00 3.75 7.50 11.25 15.00  
R (M)

0.00 3.75 7.50 11.25 15.00  
R (M)

Bild 3.19  
Schwingungsbilder des Systems 10 in den Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz

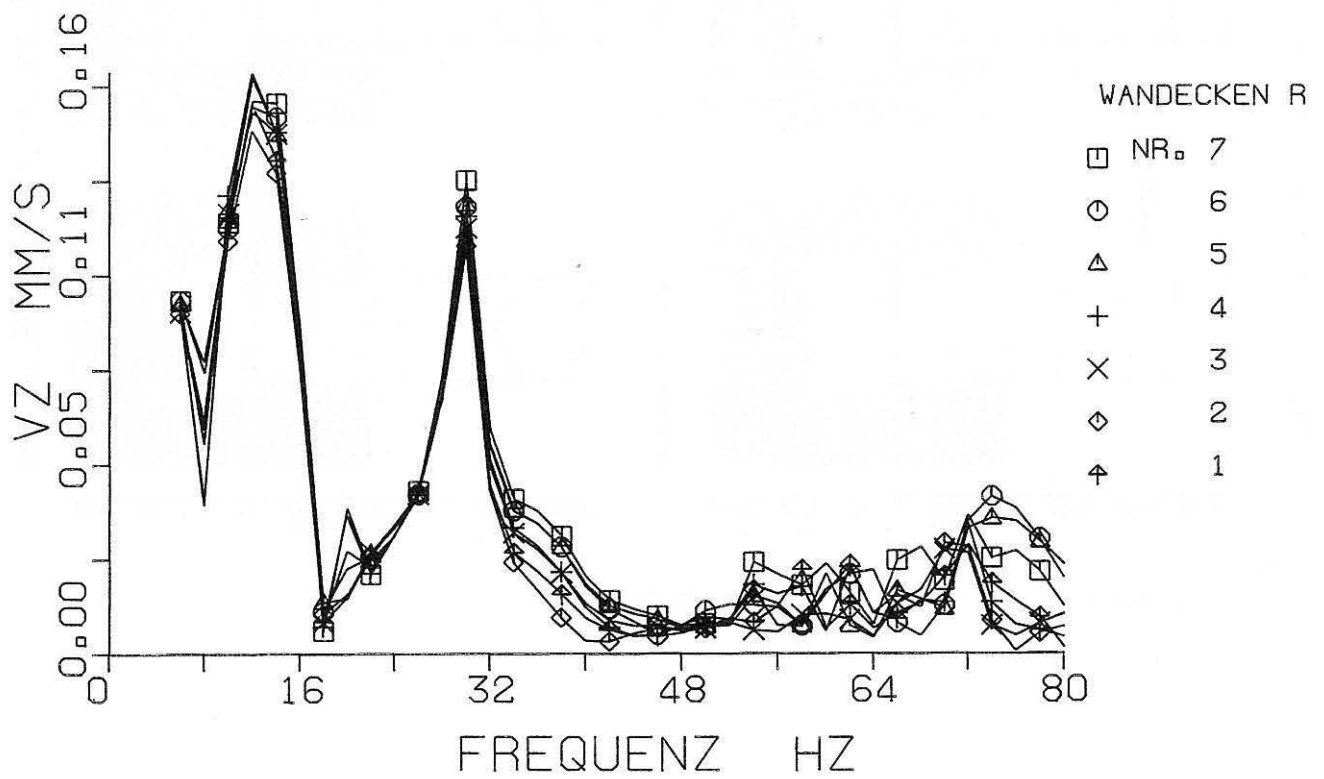
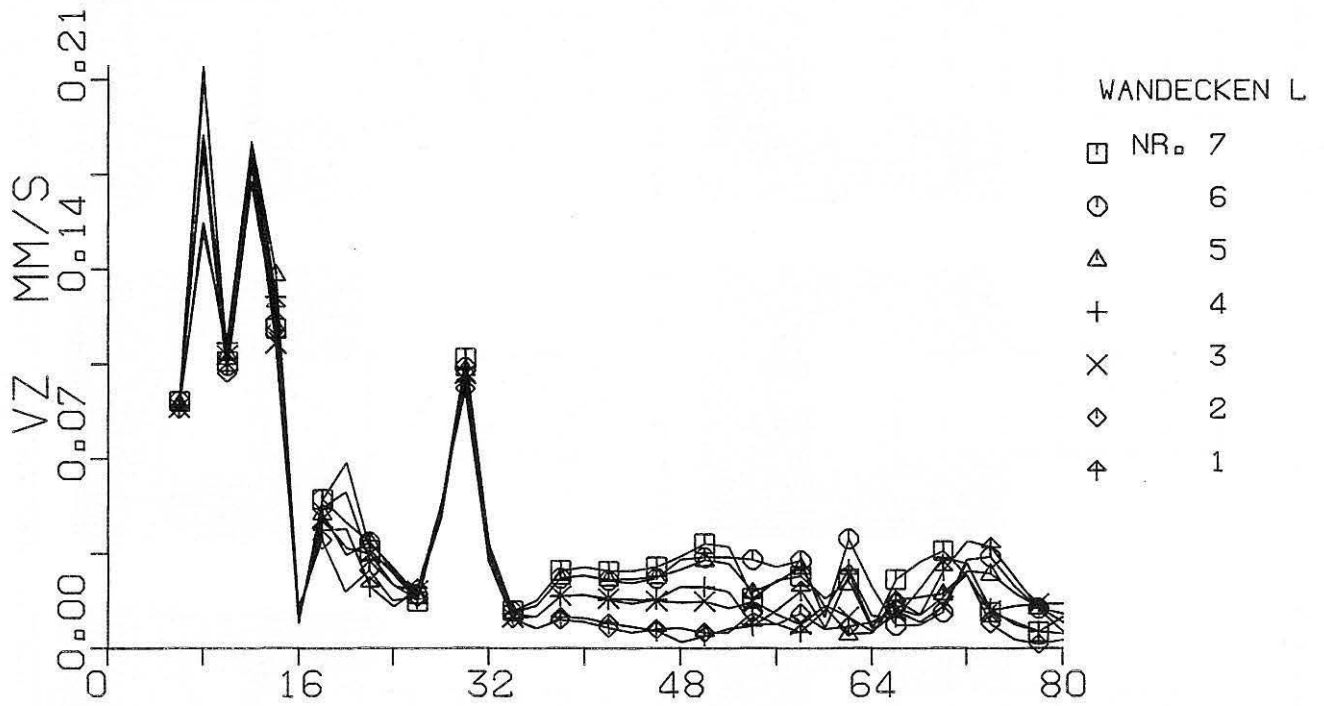


Bild 3.20  
Vertikale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 4



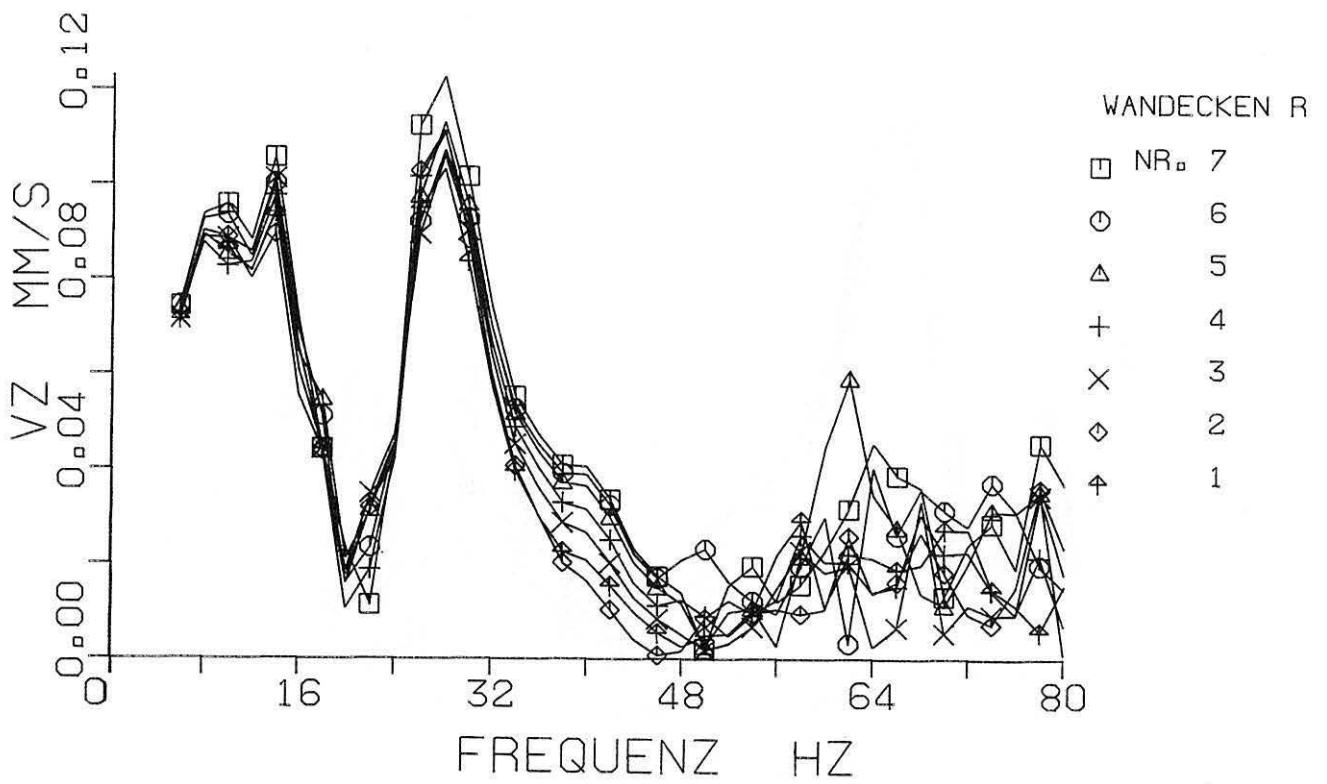
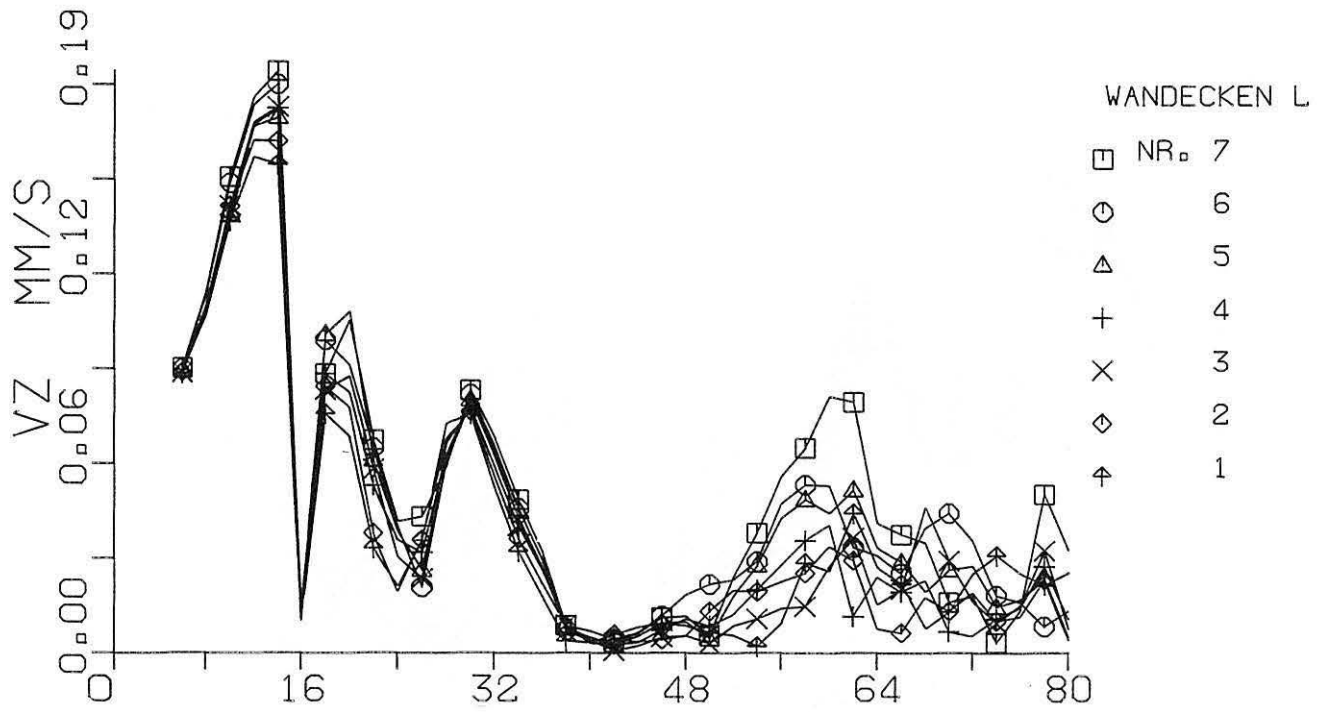


Bild 3.21  
Vertikale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 5

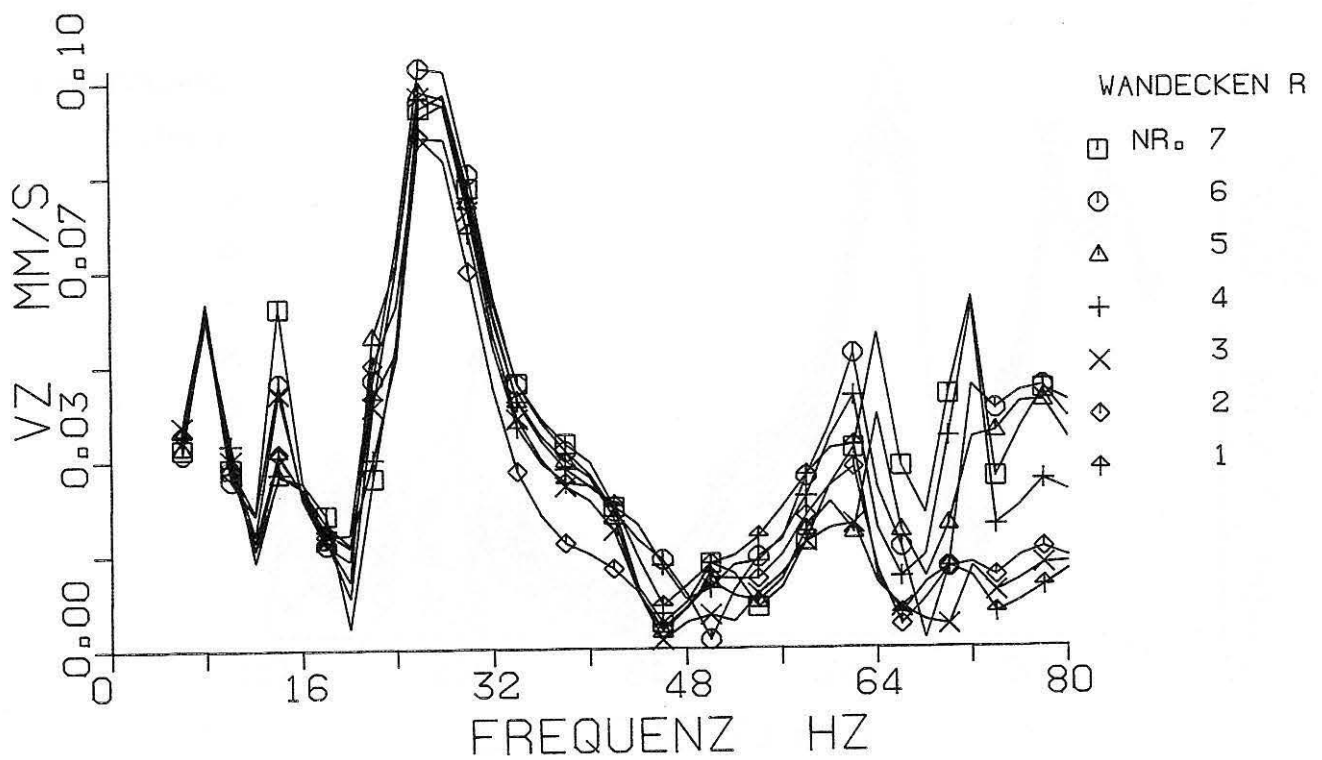
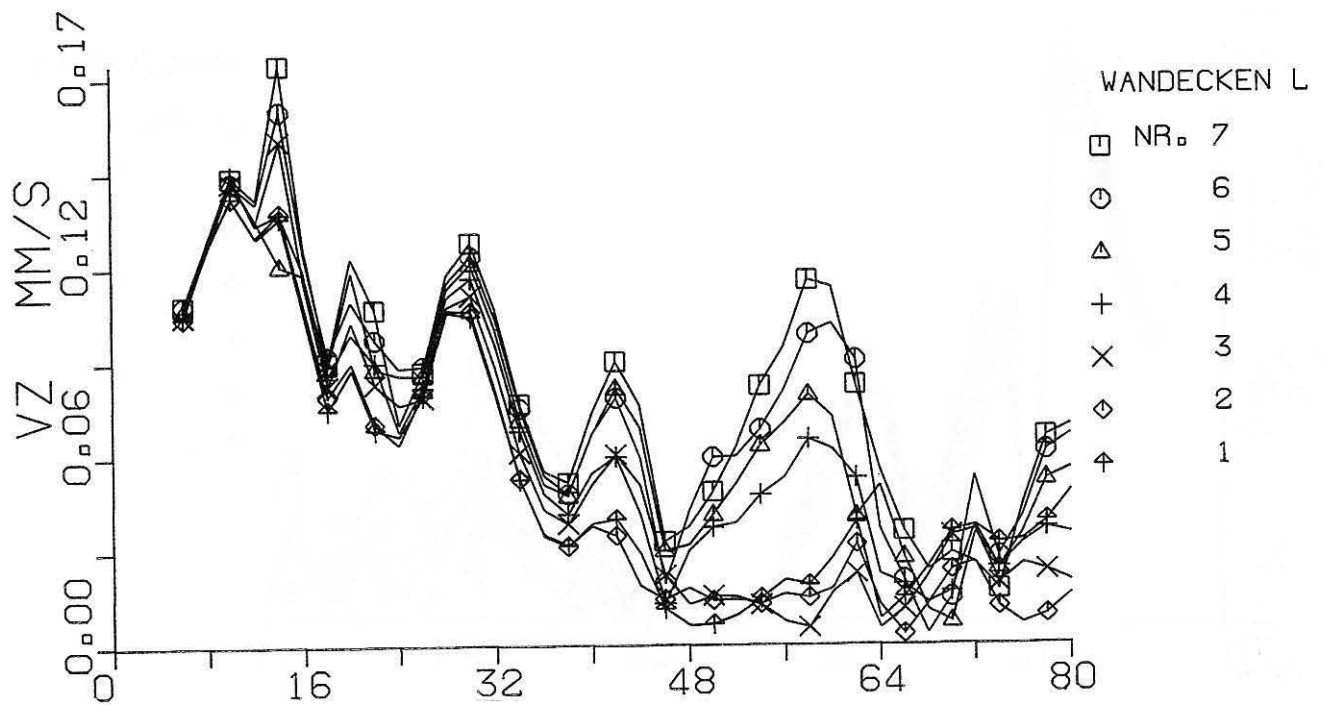


Bild 3.22  
Vertikale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 6

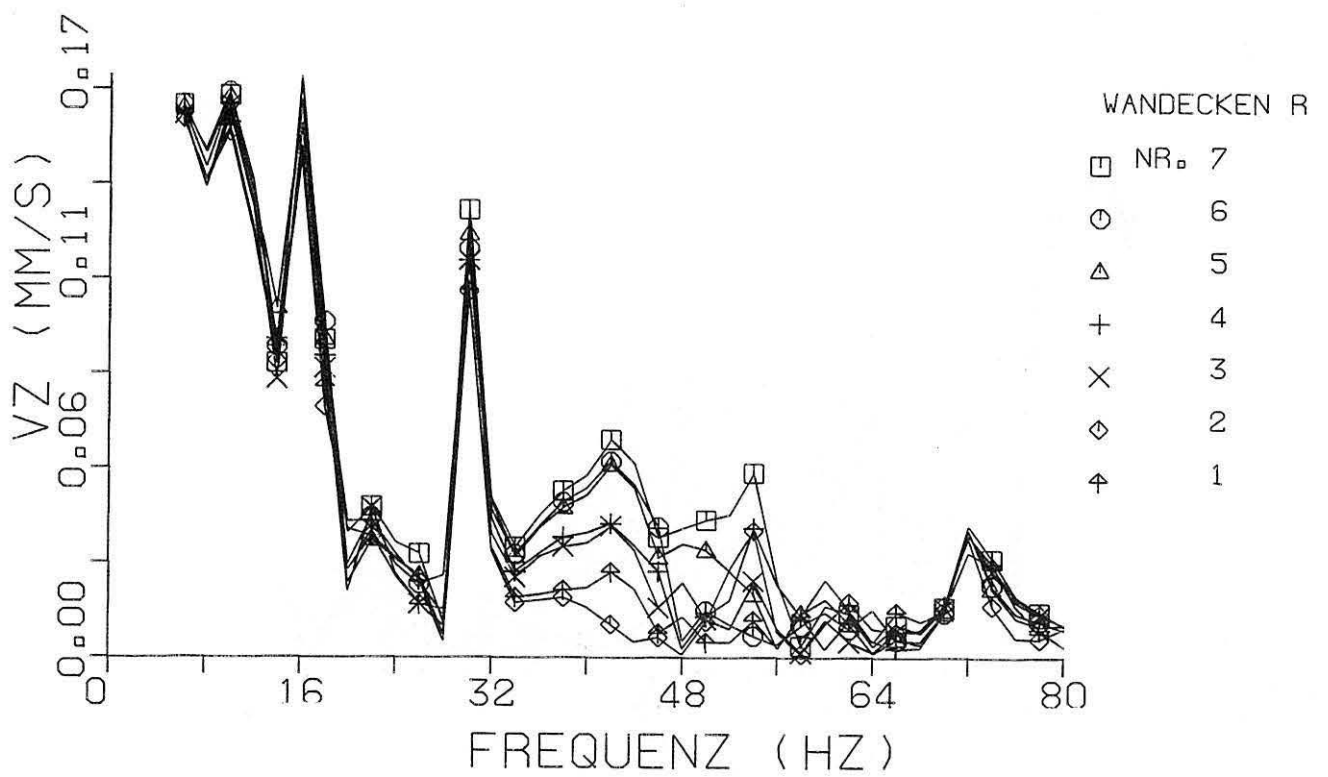
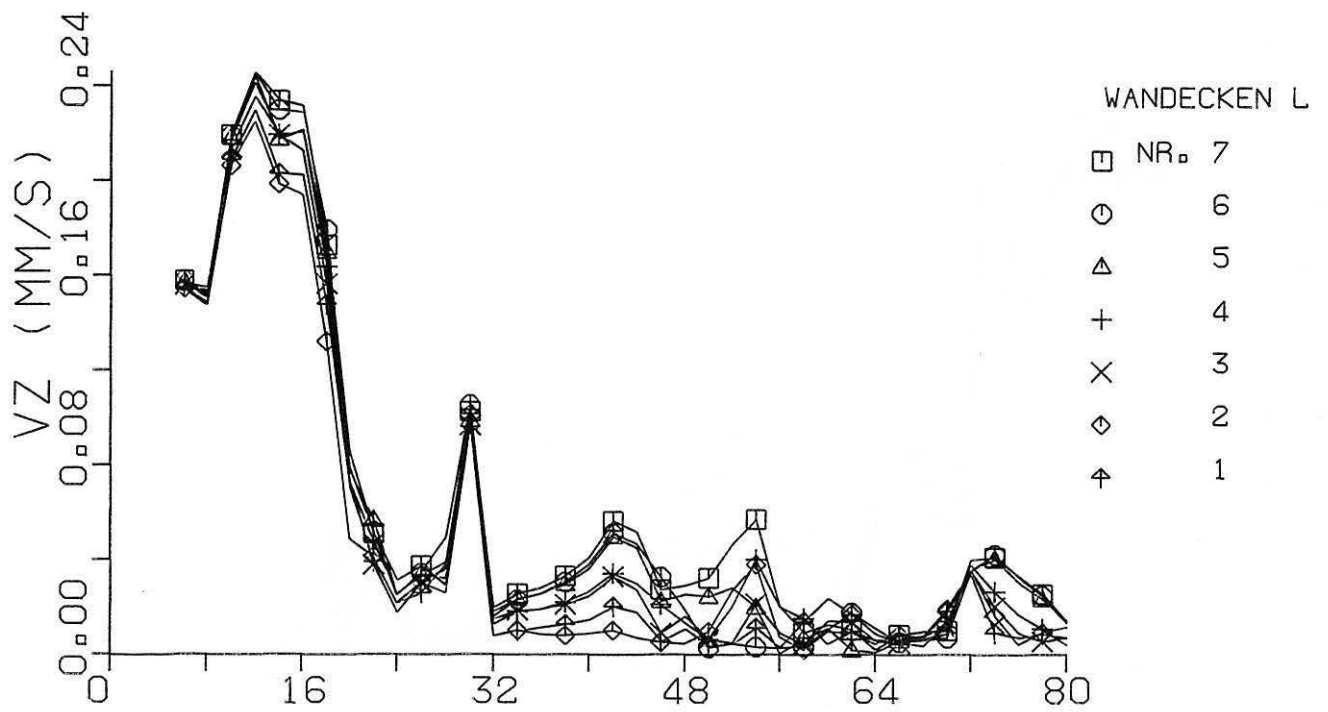


Bild 3.23  
Vertikale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 7

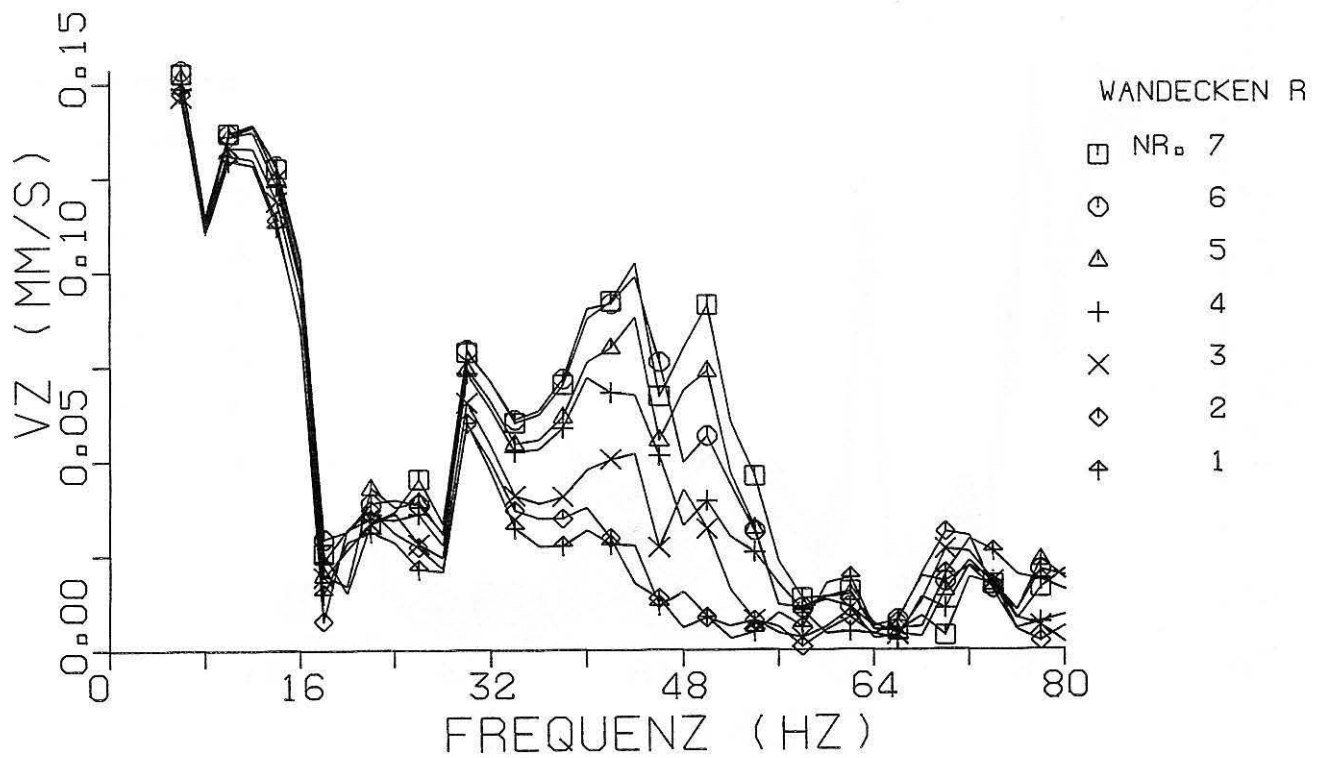
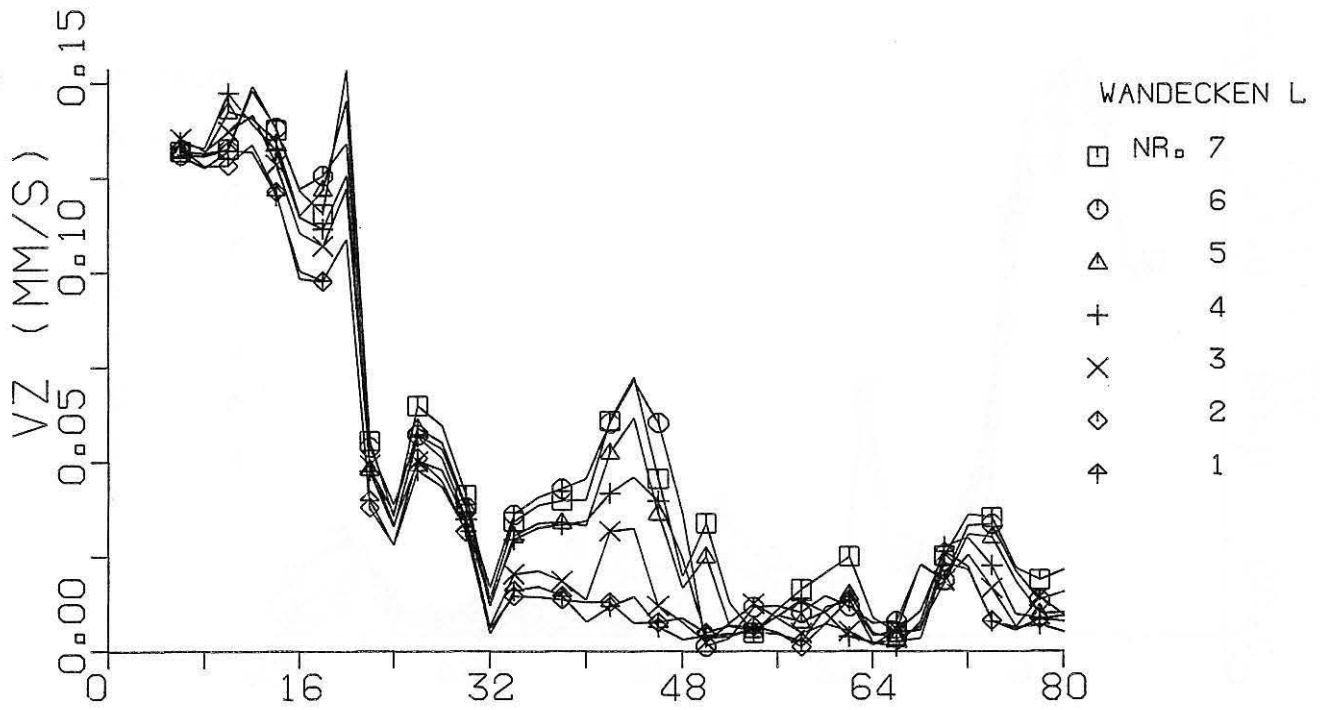


Bild 3.24  
Vertikale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 8

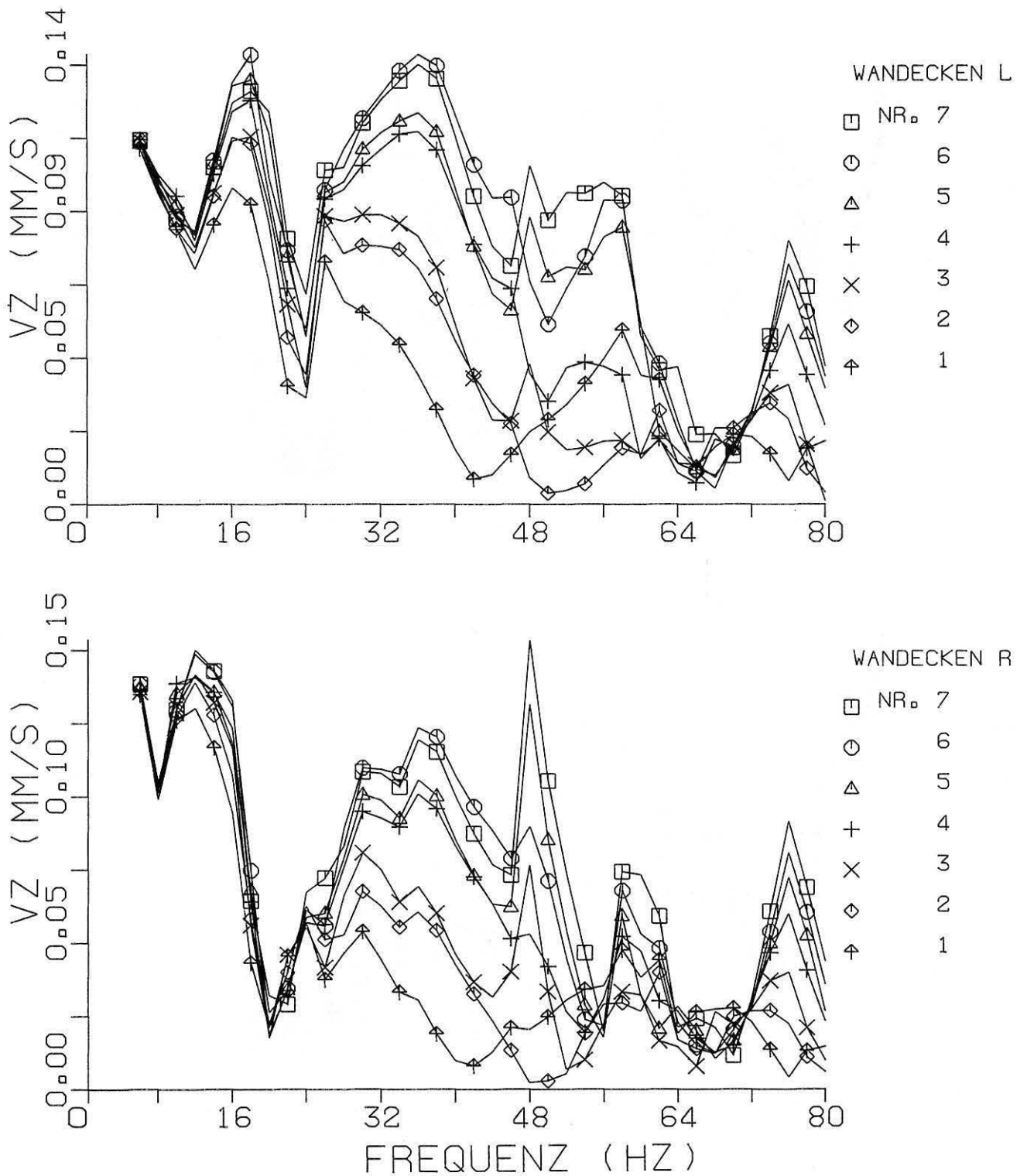


Bild 3.25  
Vertikale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 9



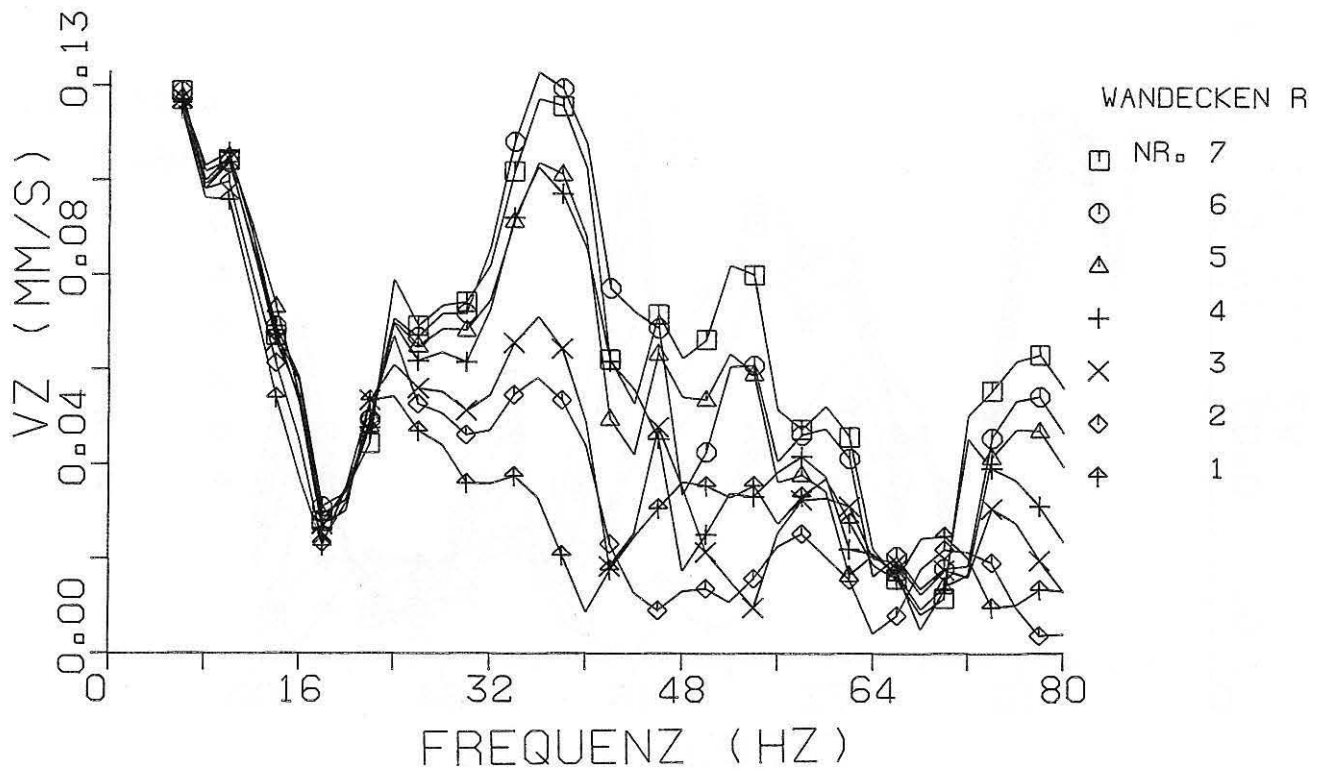
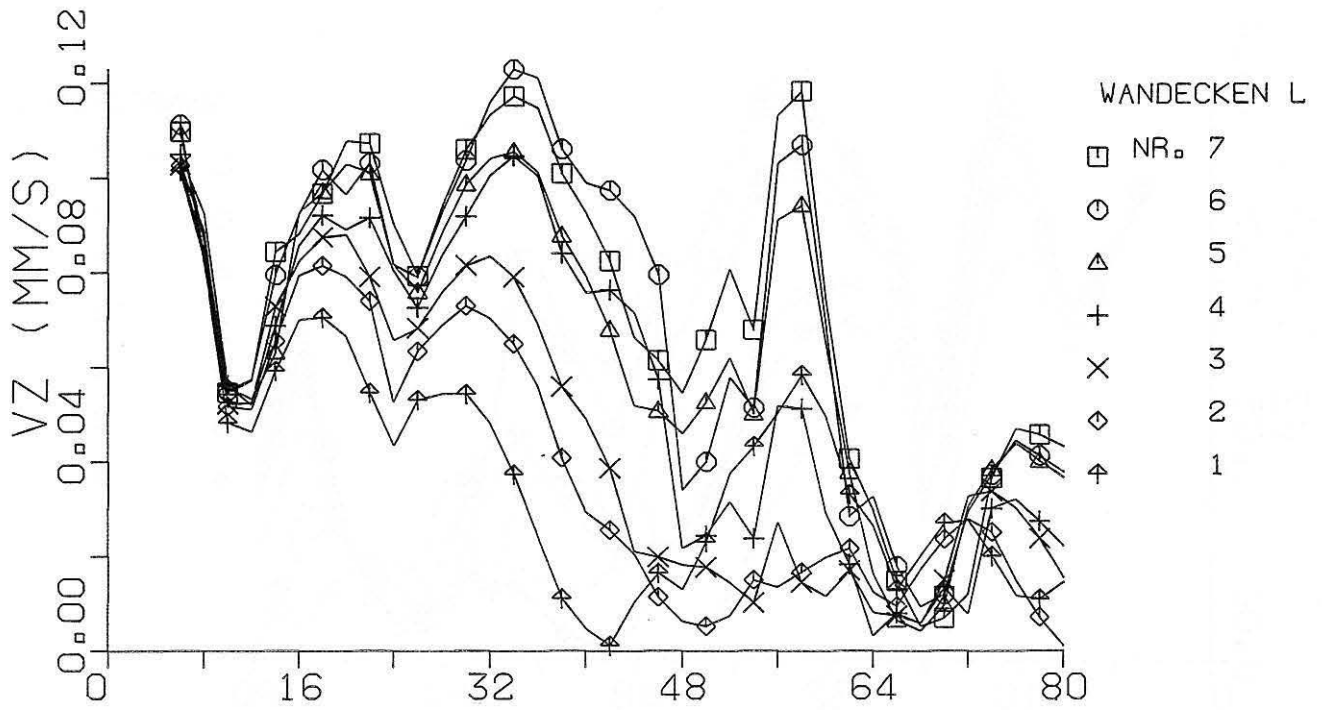


Bild 3.26  
Vertikale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 10

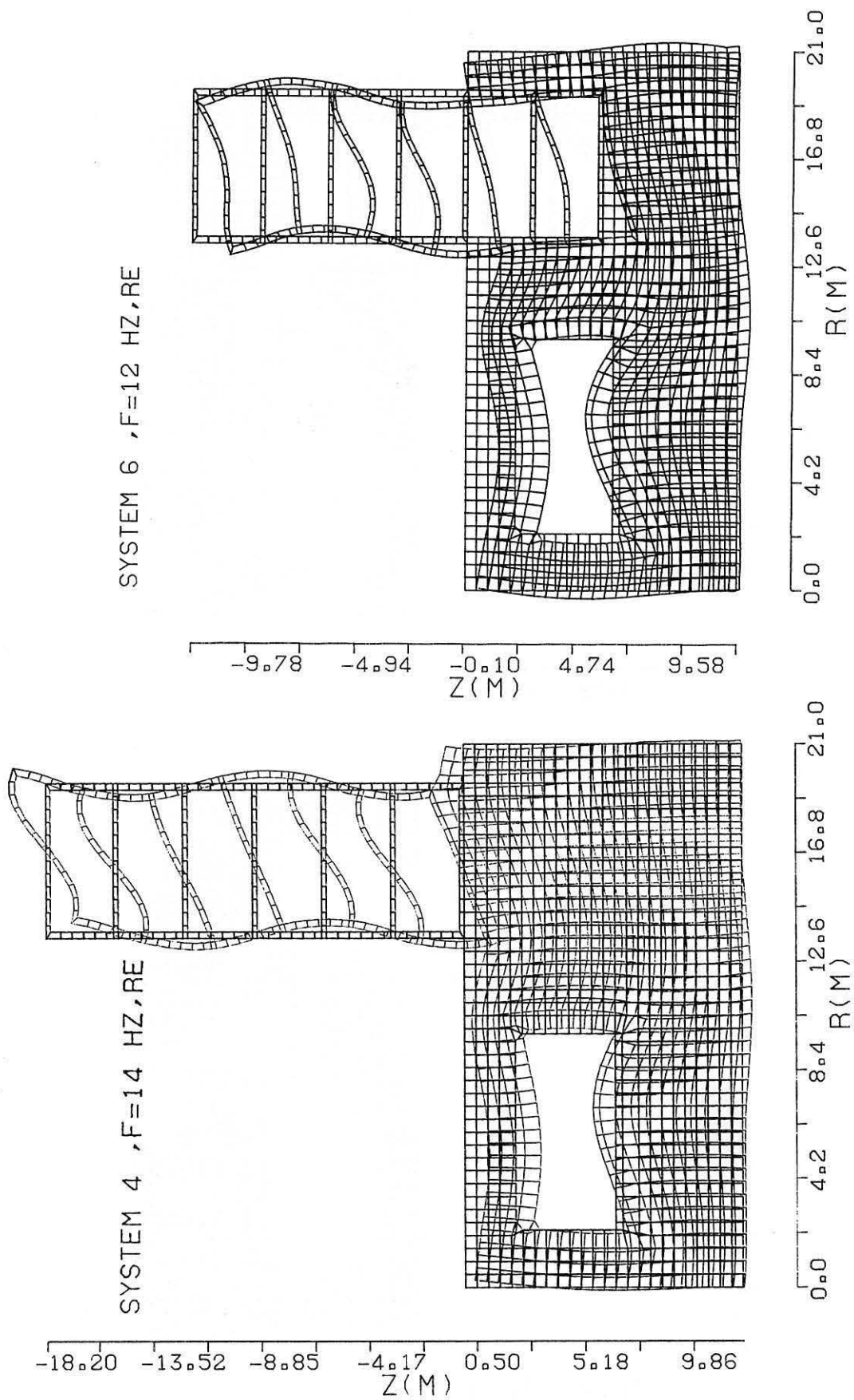
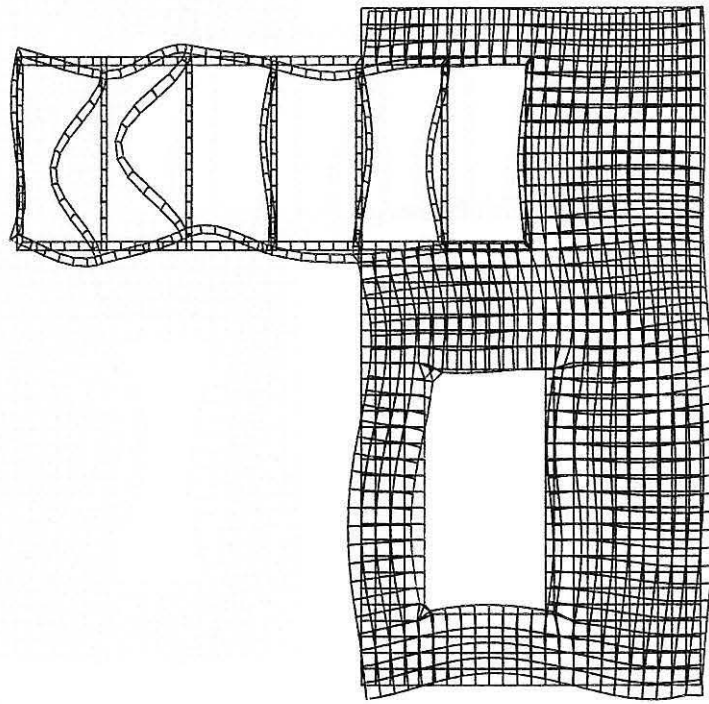


Bild 3.27  
Schwingungsbilder der Systeme 4 und 6 in den Frequenzen 14 und 12 Hz zur Darstellung des Einflusses der Wellenfeldanregung

SYSTEM 6 , F=22 HZ, RE

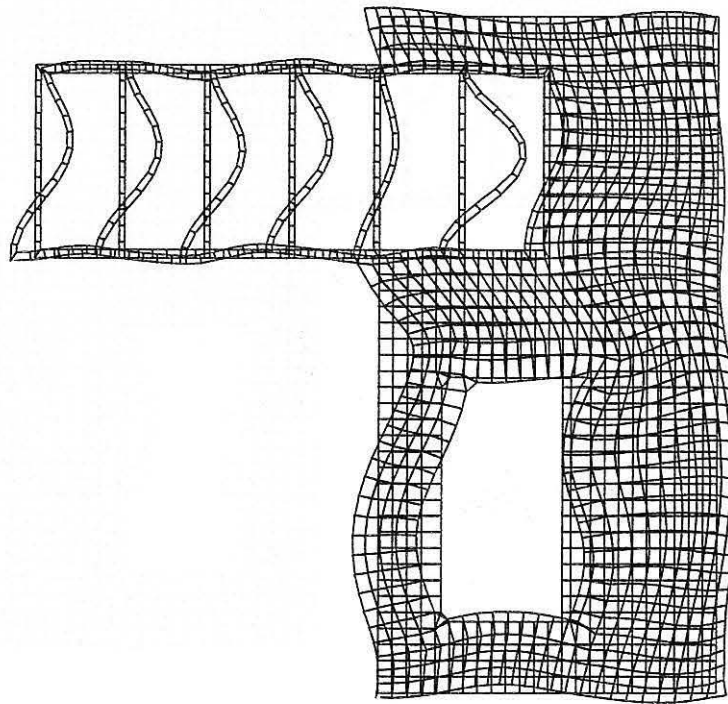
-9.78 -4.94 -0.10 4.74 9.58  
Z (M)



0.0 4.2 8.4 12.6 16.8 21.0  
R (M)

SYSTEM 6 , F=28 HZ, RE

-9.78 -4.94 -0.10 4.74 9.58  
Z (M)



0.0 4.2 8.4 12.6 16.8 21.0  
R (M)

Bild 3.28

Schwingungsbilder des Systemes 6 in den Frequenzen 22 und 28 Hz zur Darstellung des Einflusses der Wellenfeldanregung

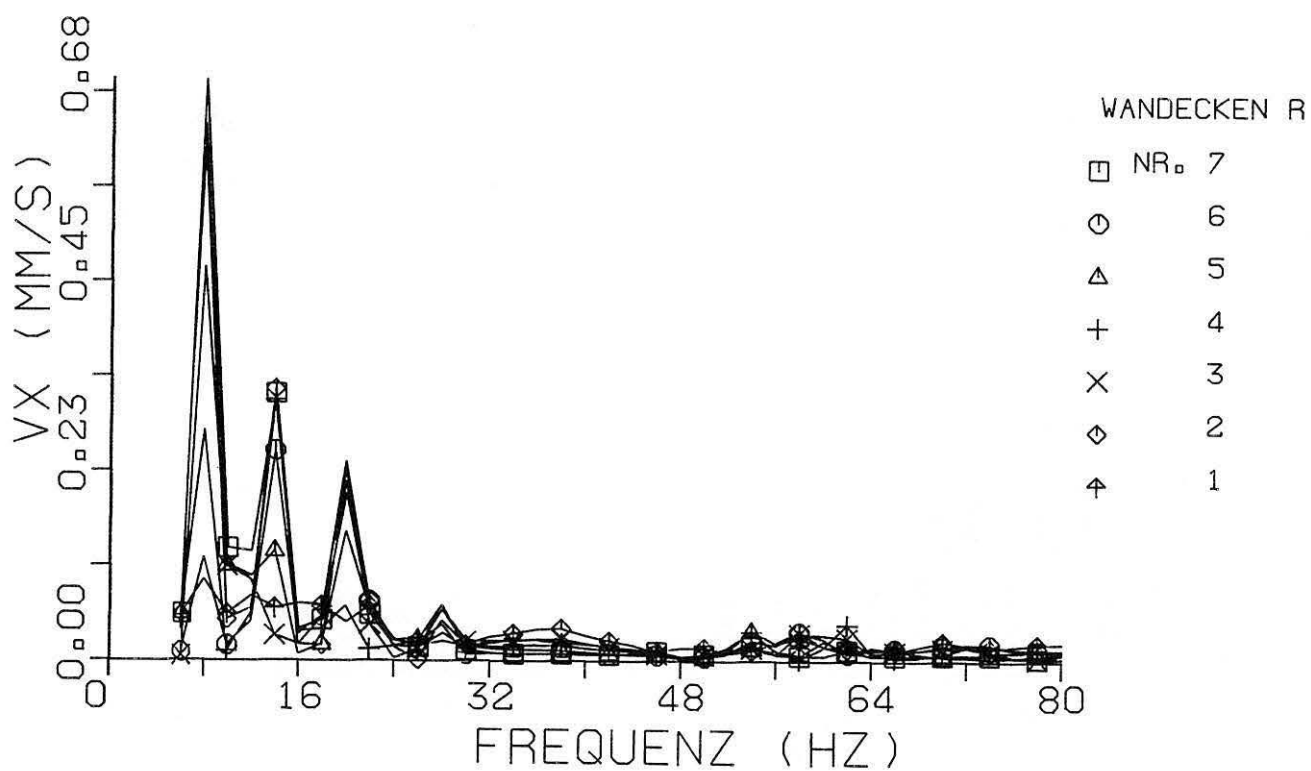
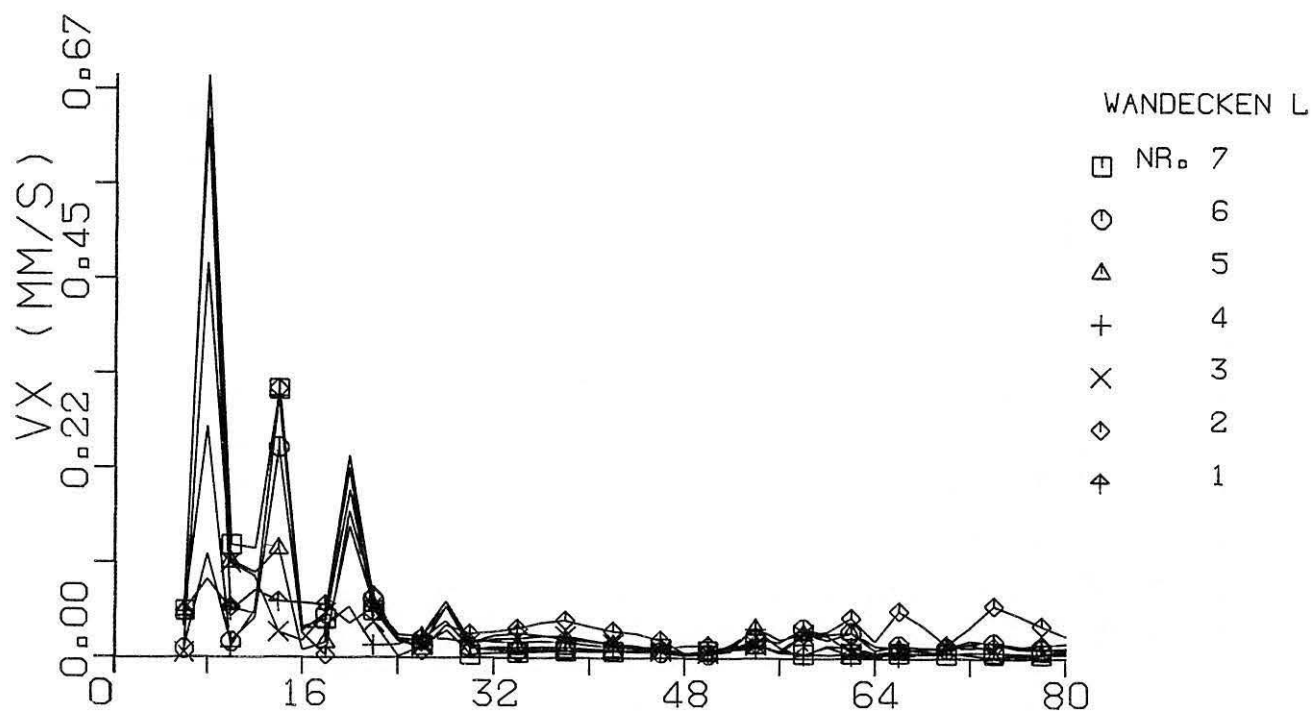


Bild 3.29  
Horizontale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 4

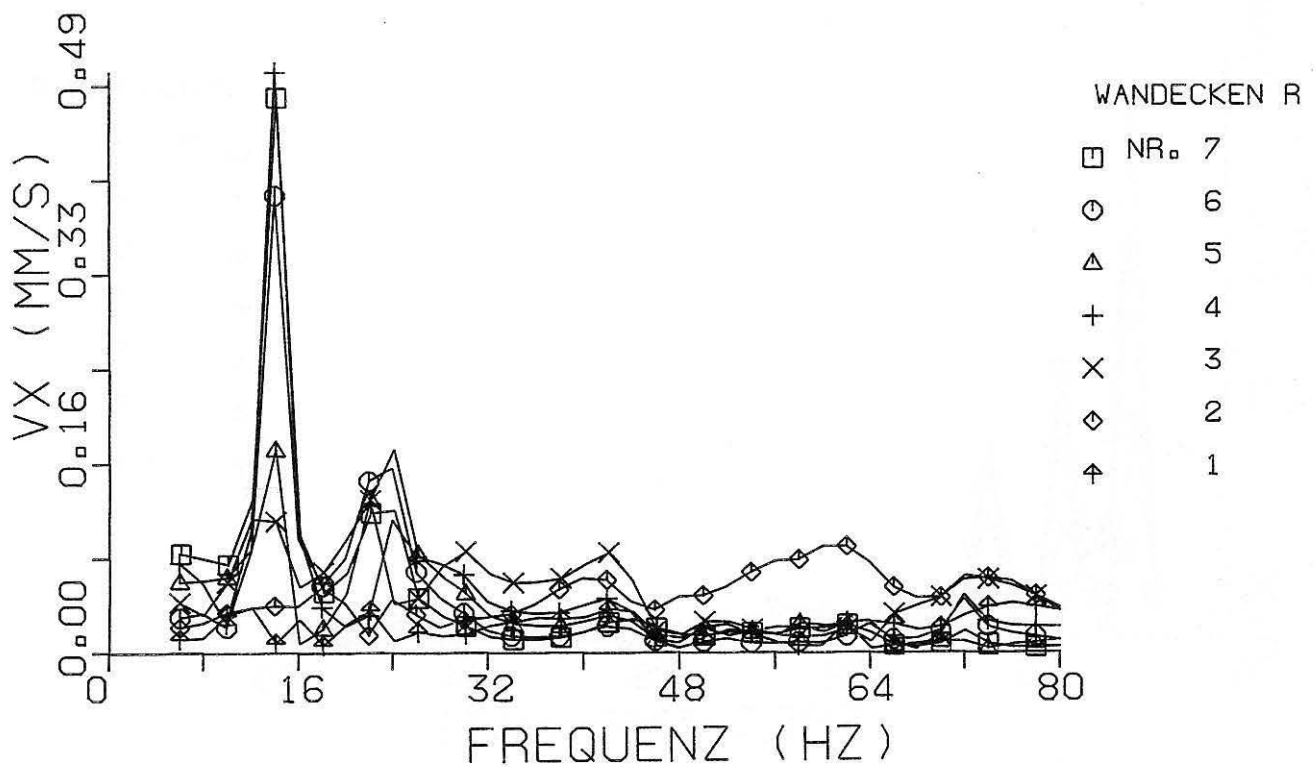
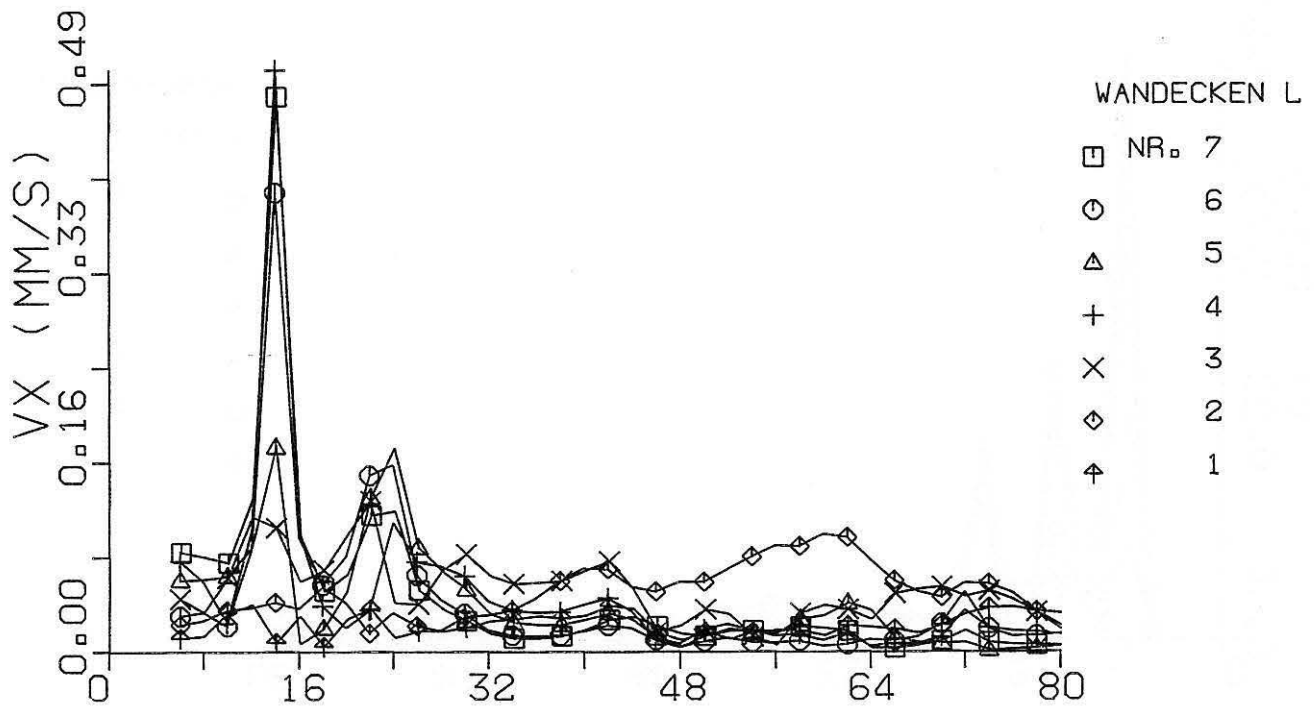


Bild 3.30  
Horizontale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 6



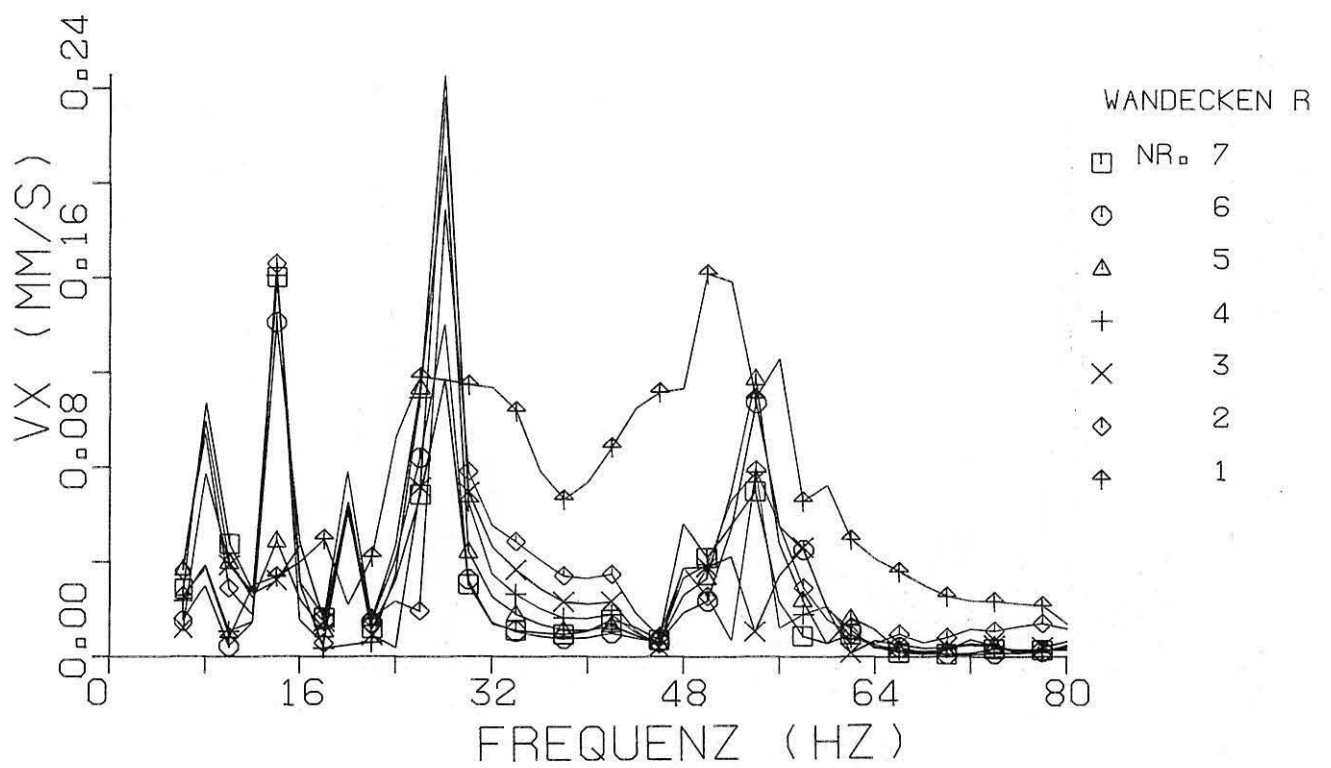
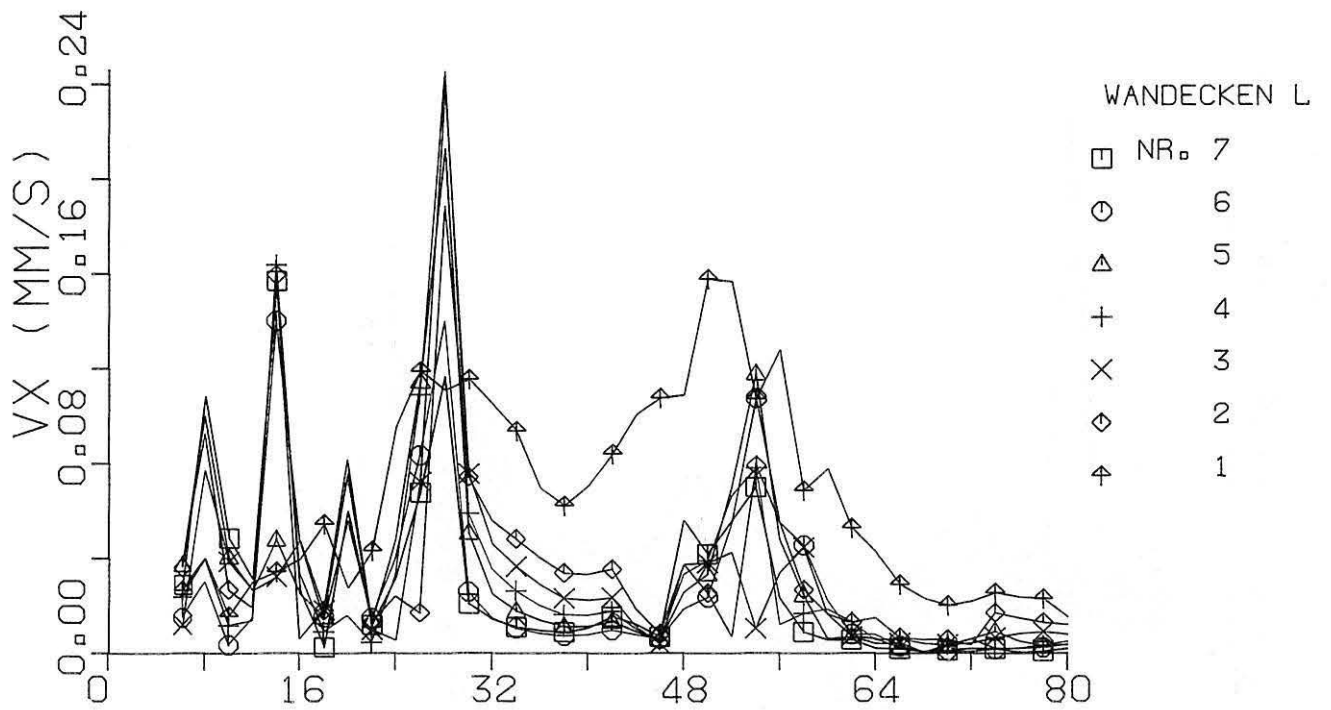


Bild 3.31  
Horizontale Amplitudenspektren der Wandfußpunkte, System 7

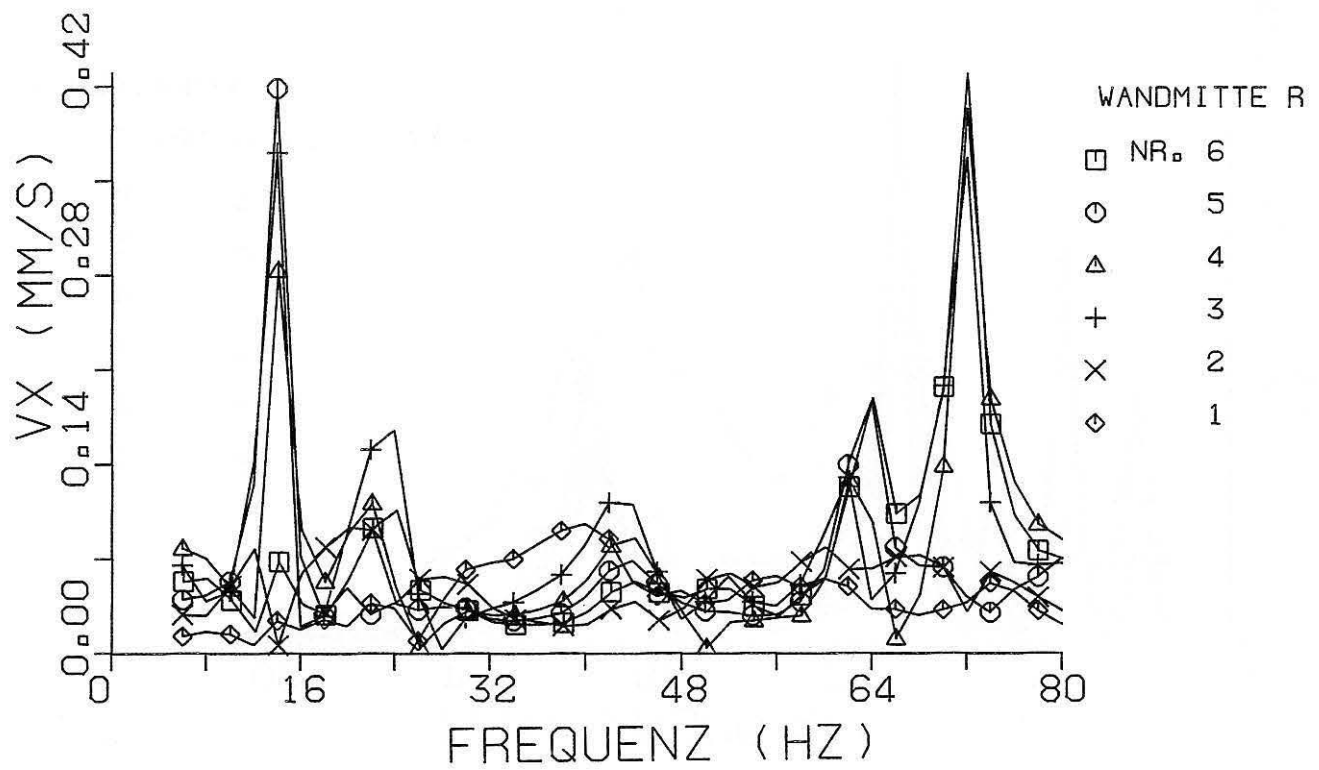
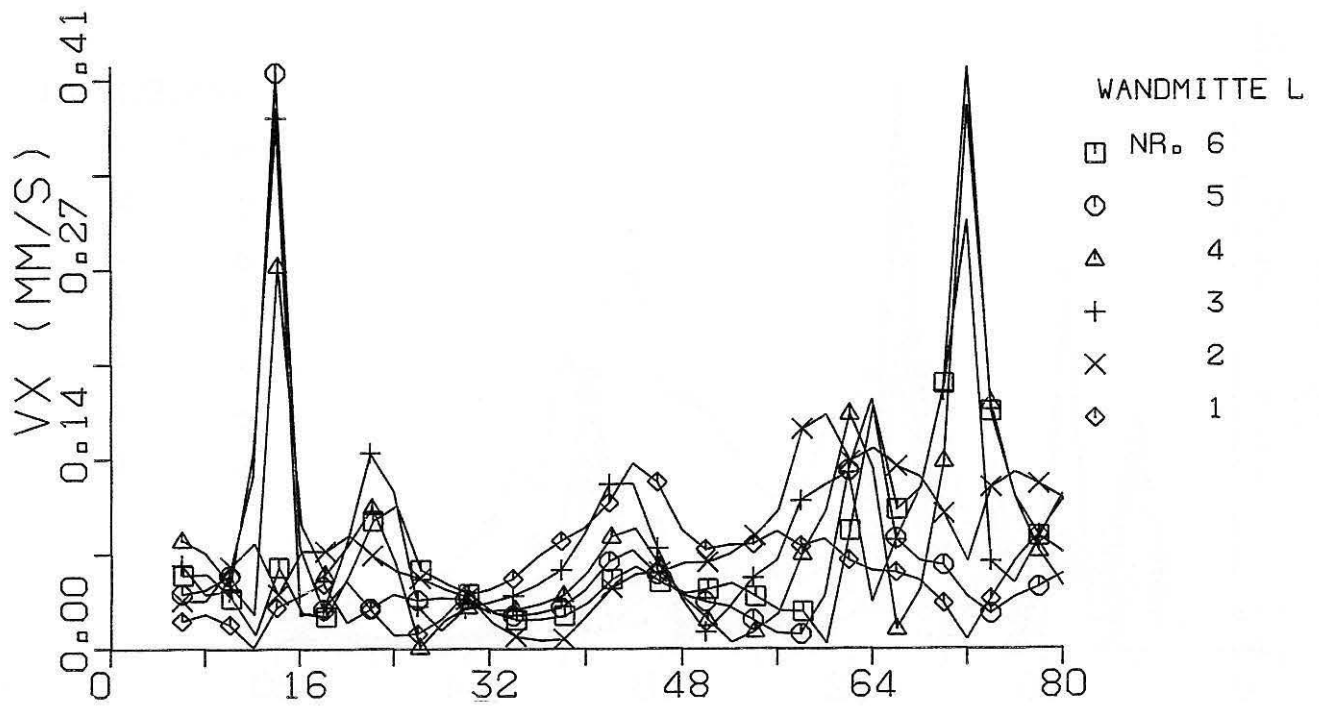


Bild 3.32  
Horizontale Amplitudenspektren der Wandmitten, System 6

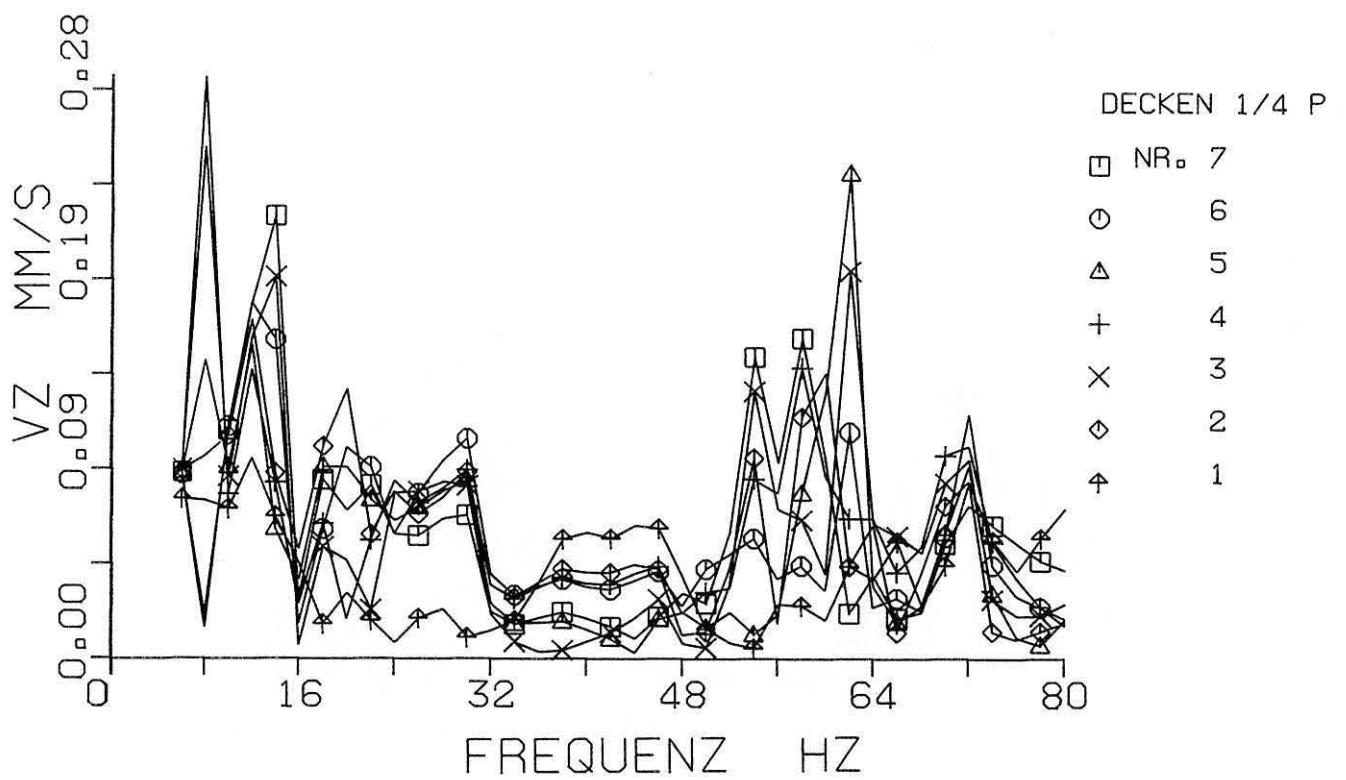
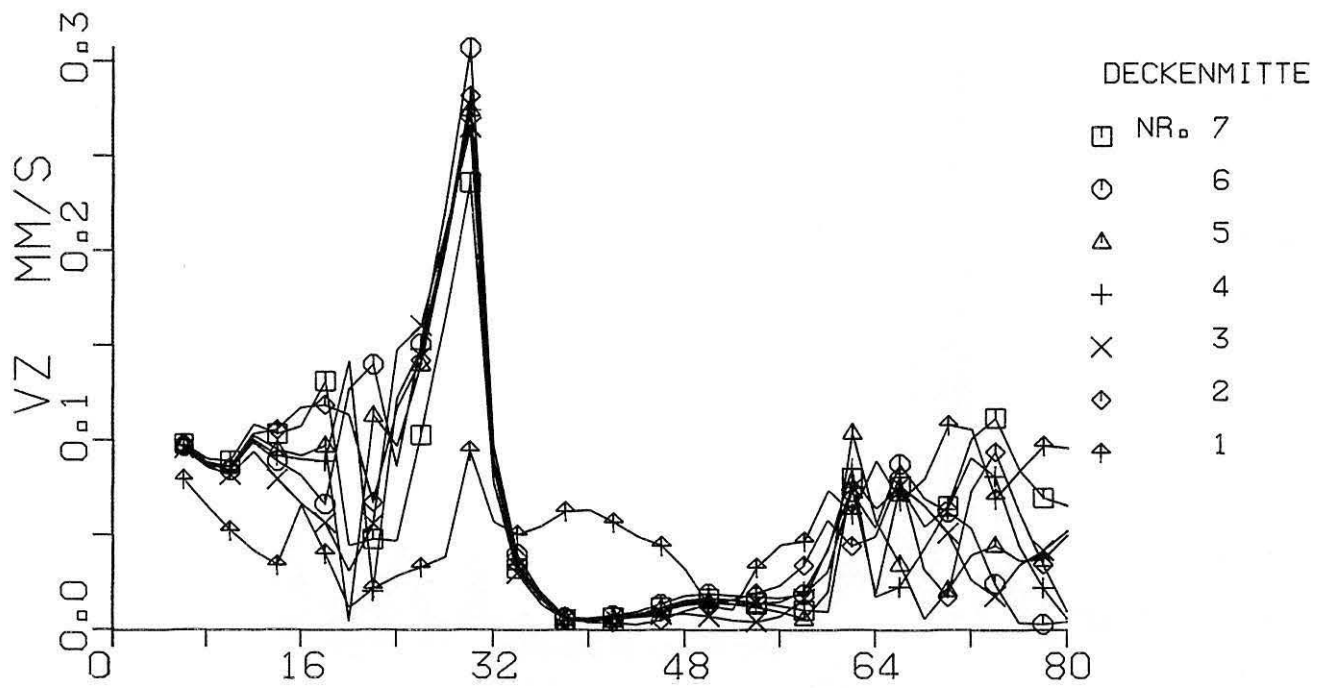


Bild 3.33  
Vertikale Amplitudenspektren der Deckenmitten und des Deckenviertelpunktes, System 4

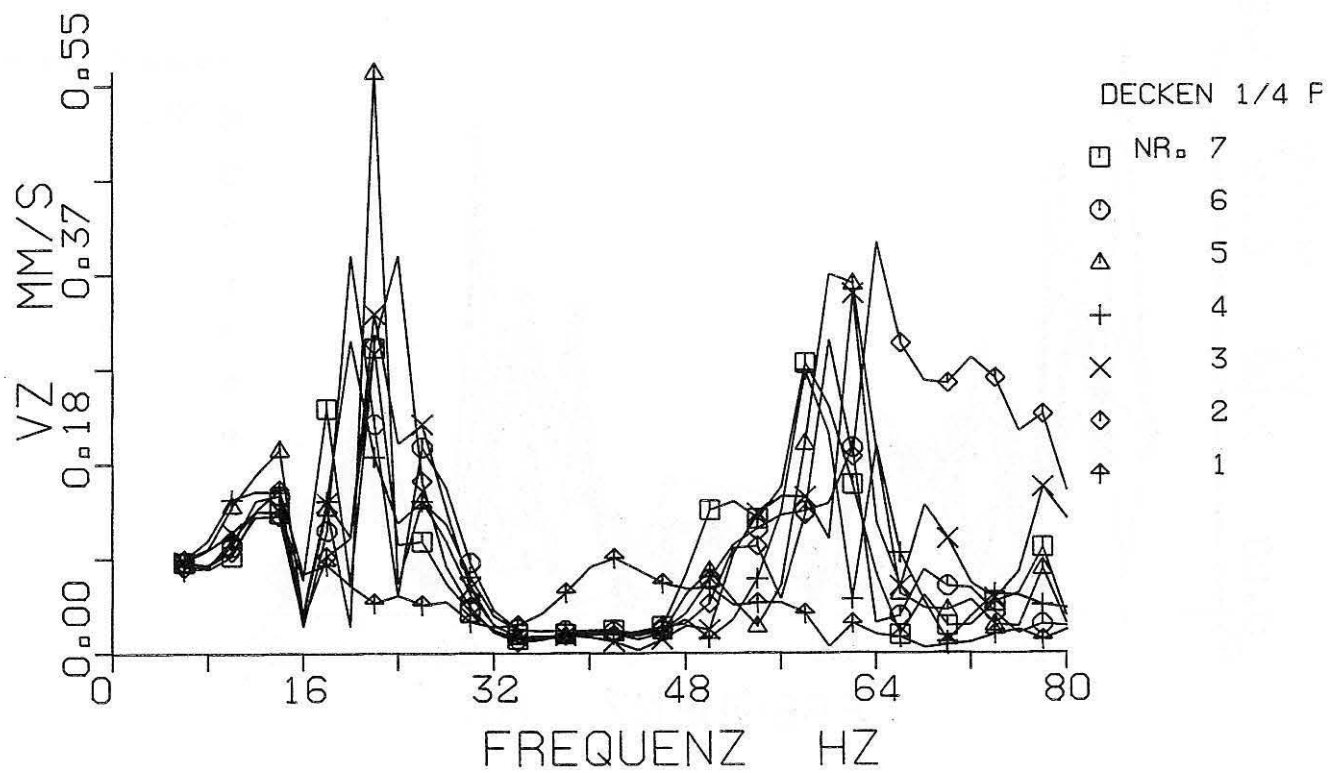
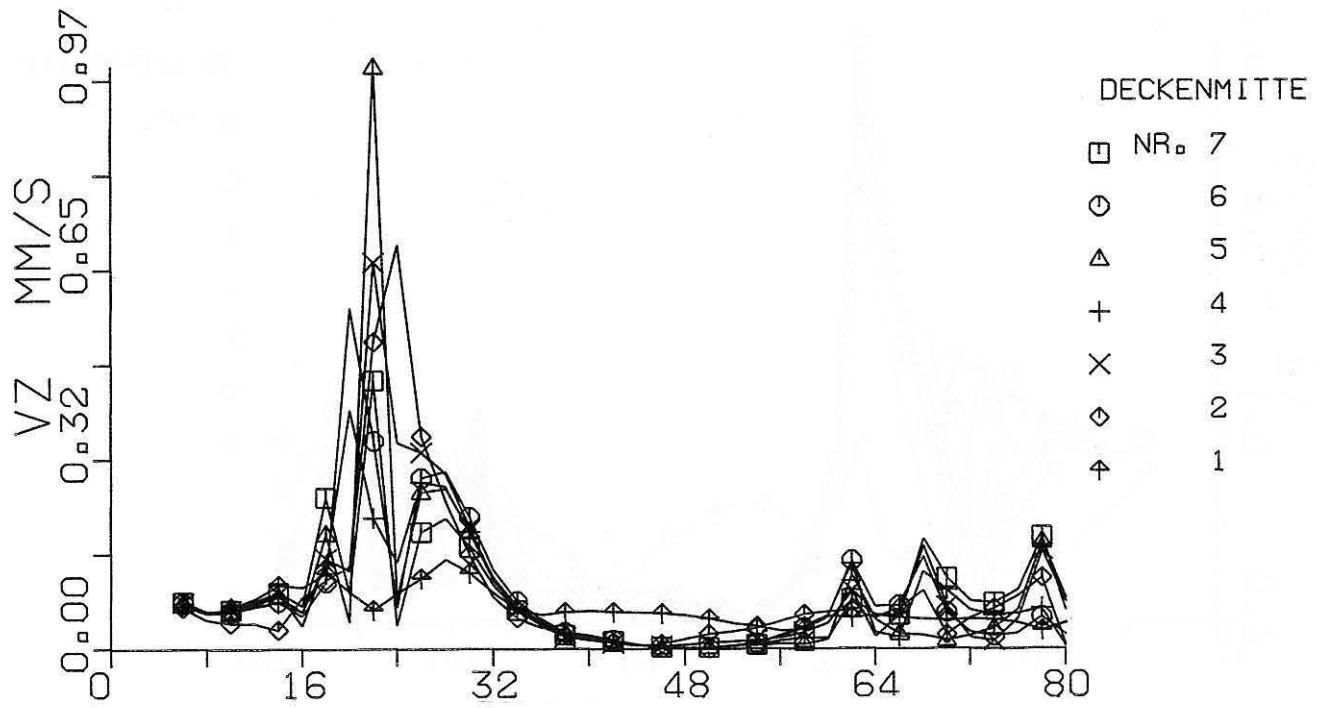


Bild 3.34  
Vertikale Amplitudenspektren der Deckenmitten und des Deckenviertelpunktes, System 5

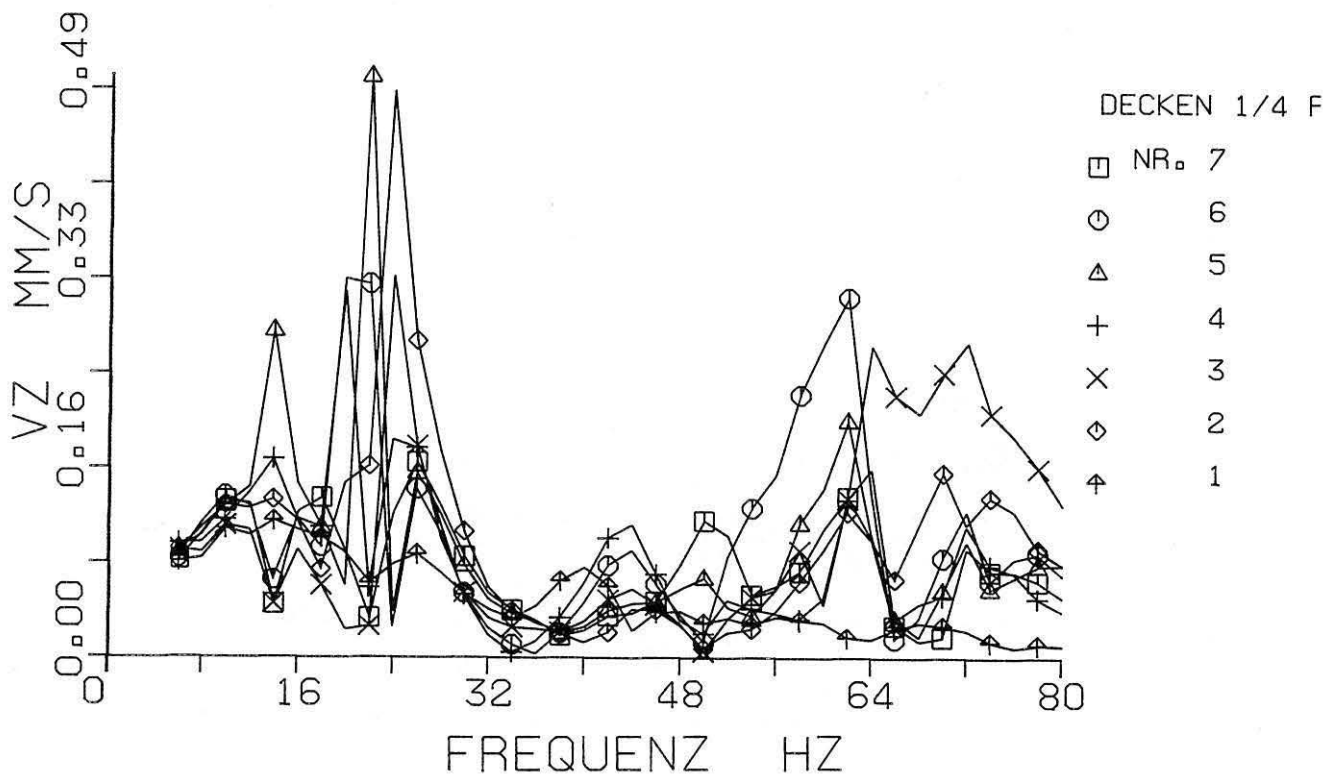
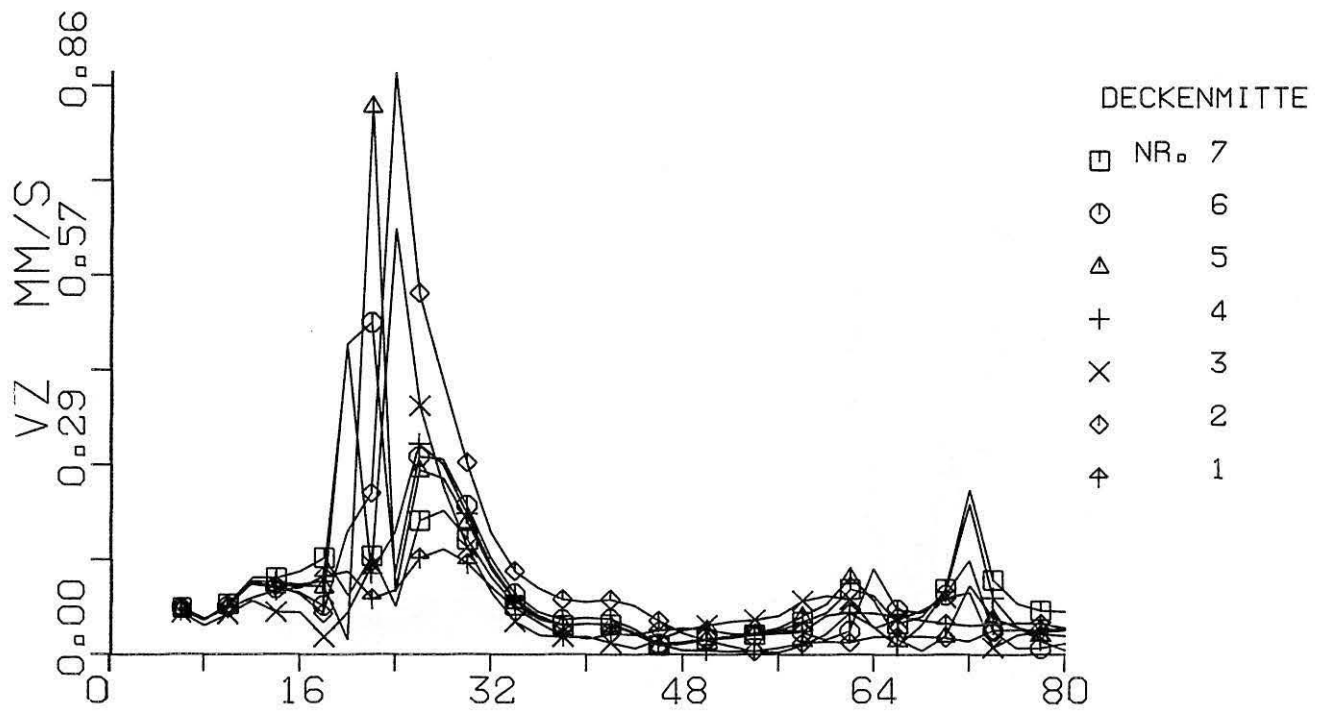


Bild 3.35  
Vertikale Amplitudenspektren der Deckenmitten und des Deckenviertelpunktes, System 6



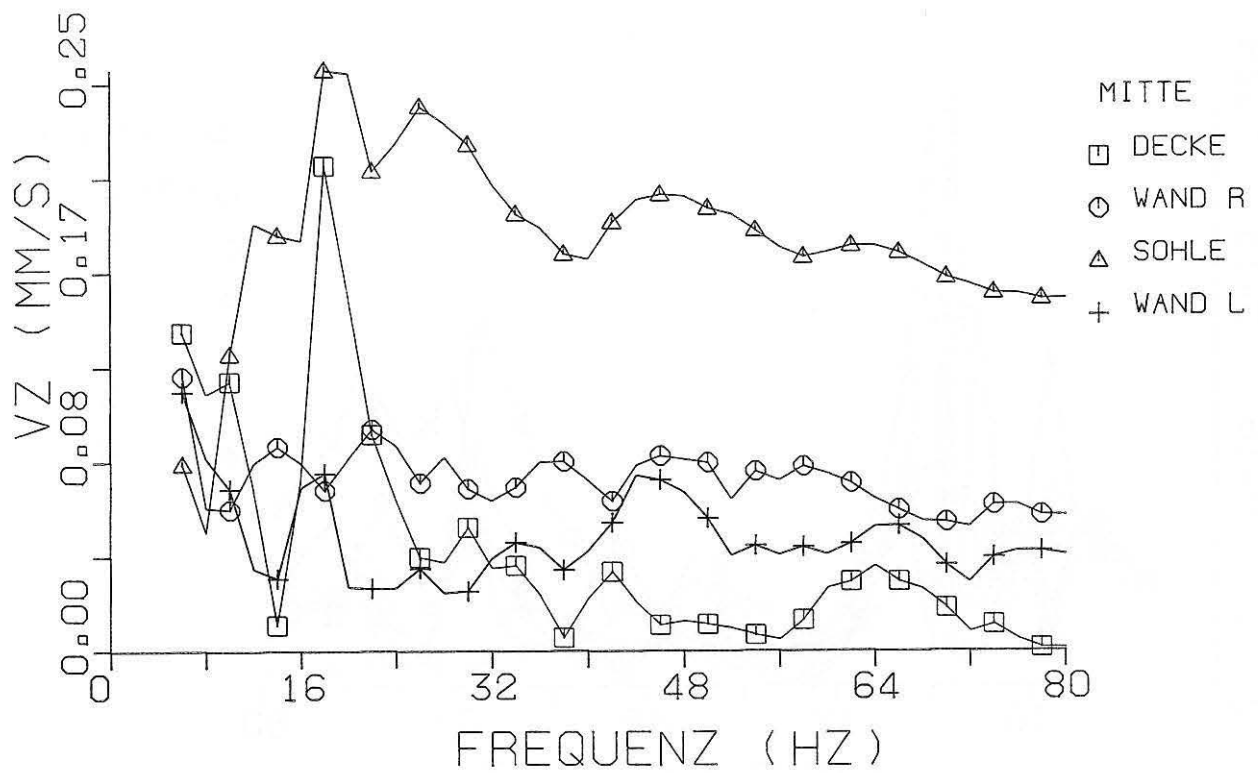
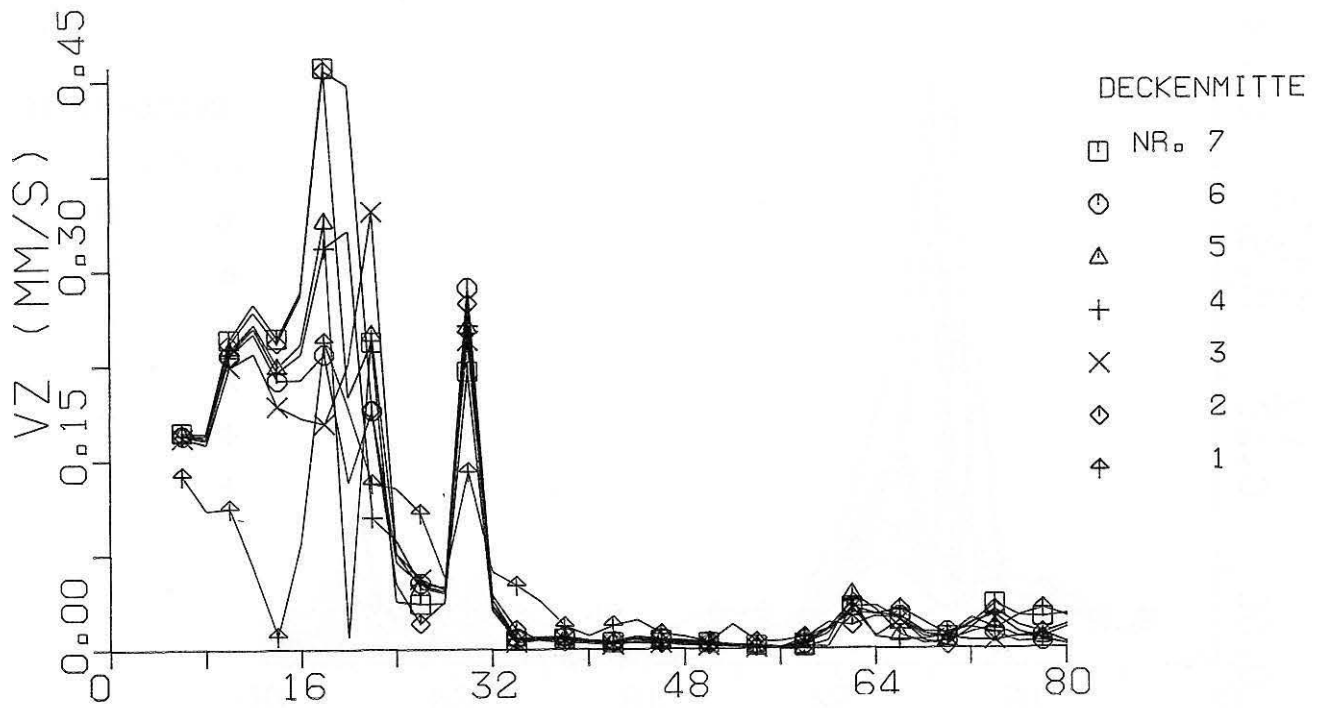


Bild 3.36  
Vertikale Amplitudenspektren der Deckenmitten und des Tunnels, System 7

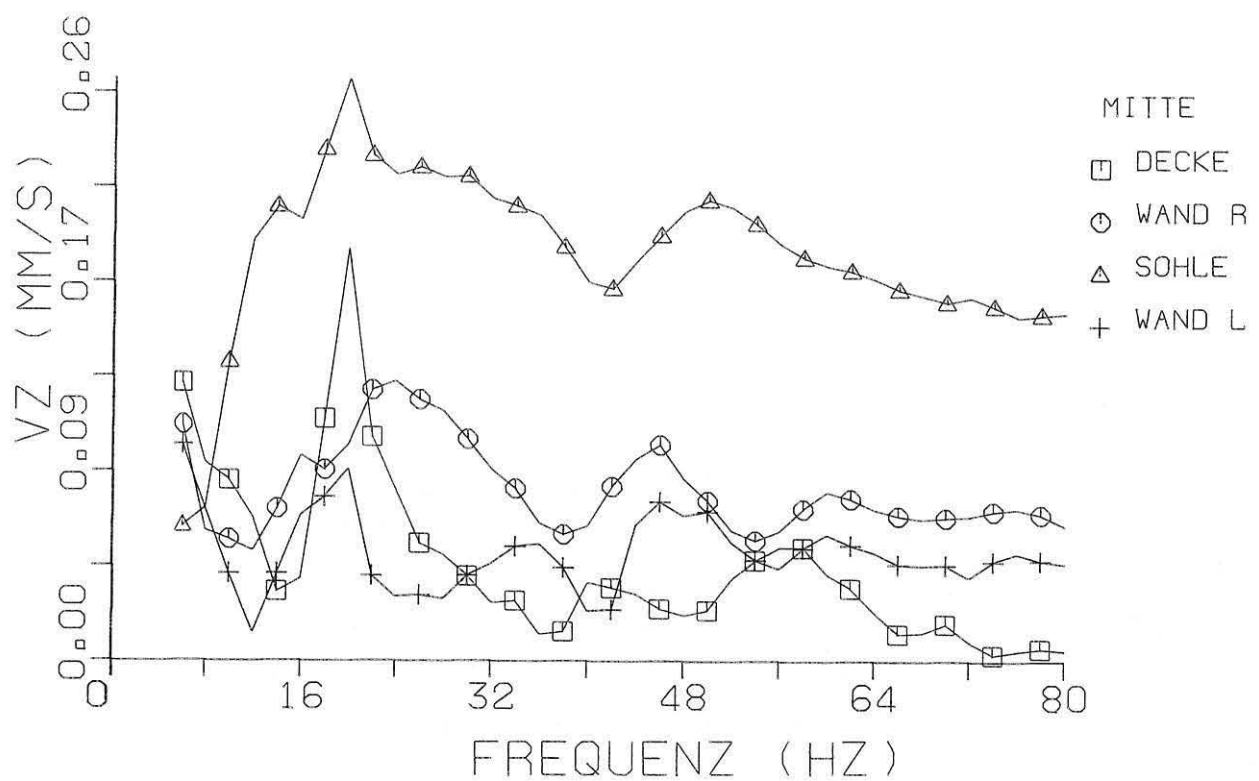
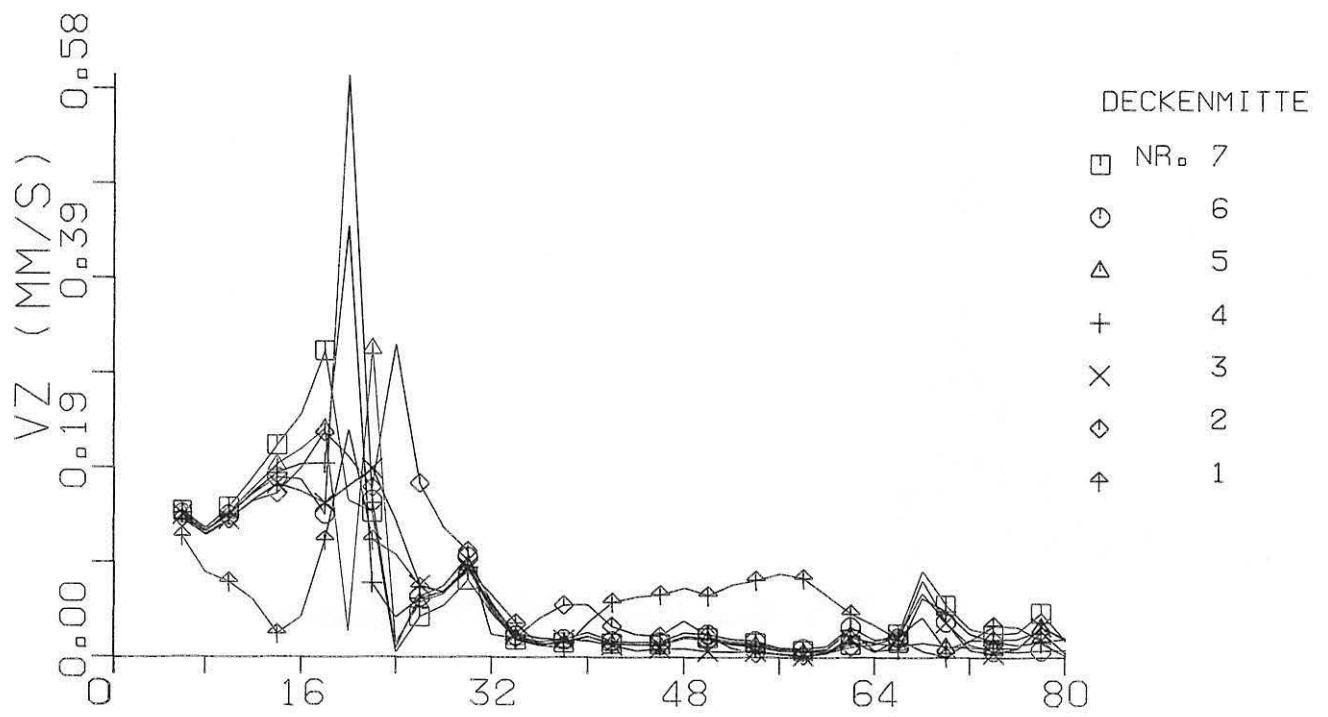


Bild 3.37  
Vertikale Amplitudenspektren der Deckenmitten und des Tunnels, System 8

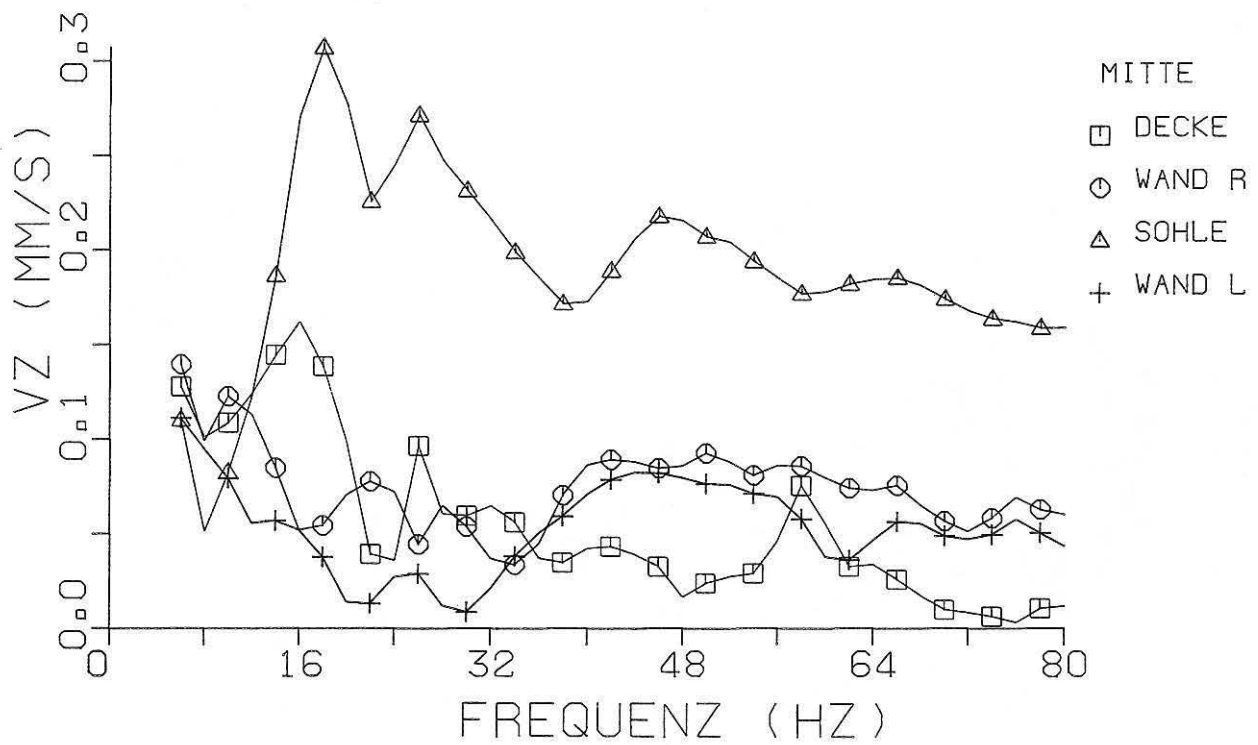
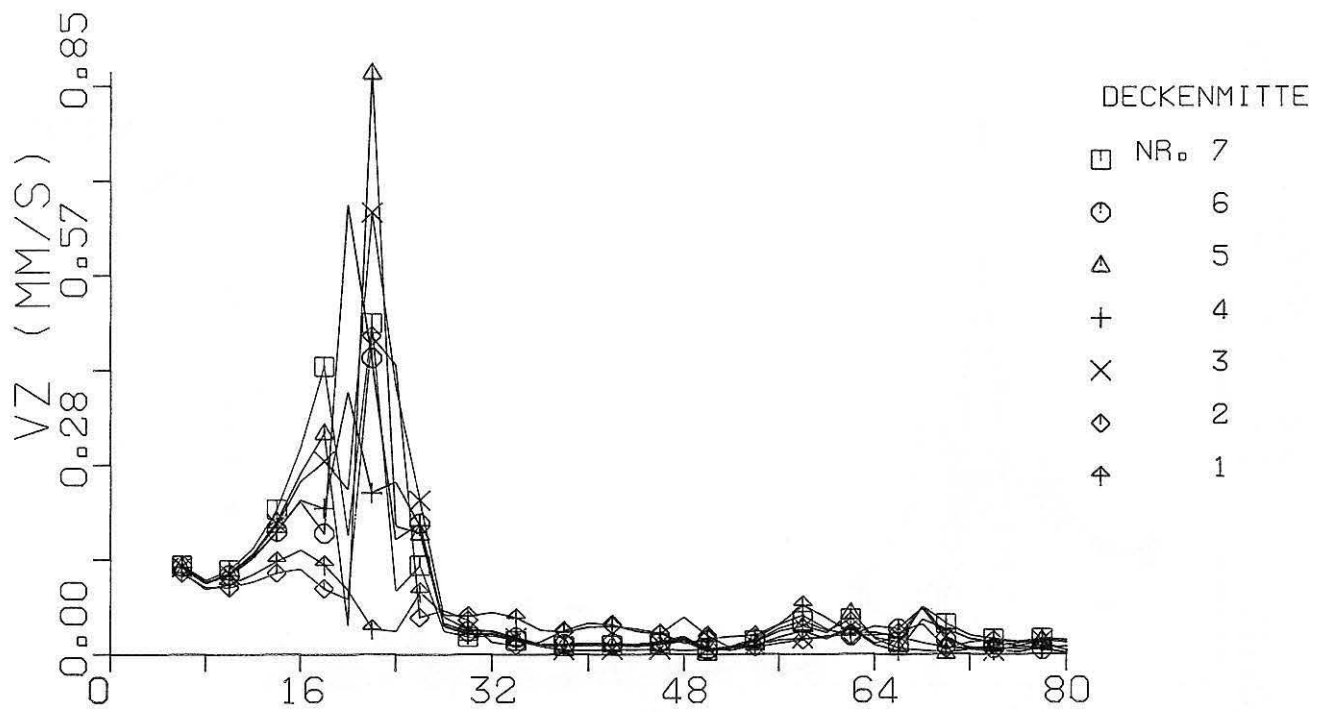


Bild 3.38  
Vertikale Amplitudenspektren der Deckenmitten und des Tunnels, System 9

# SYSTEM 10, GEBAEUDE

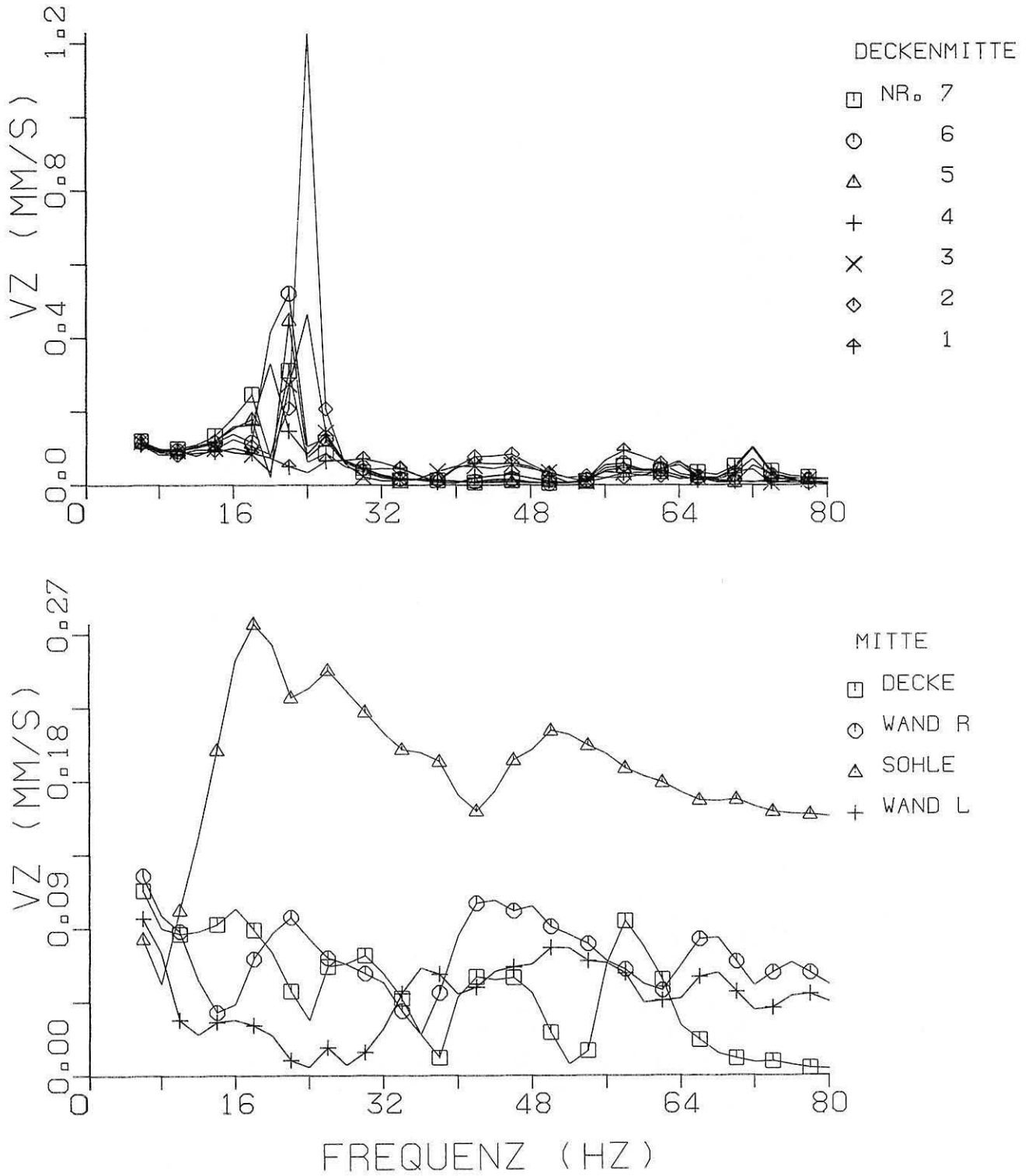


Bild 3.39  
Vertikale Amplitudenspektren der Deckenmitten und des Tunnels, System 10

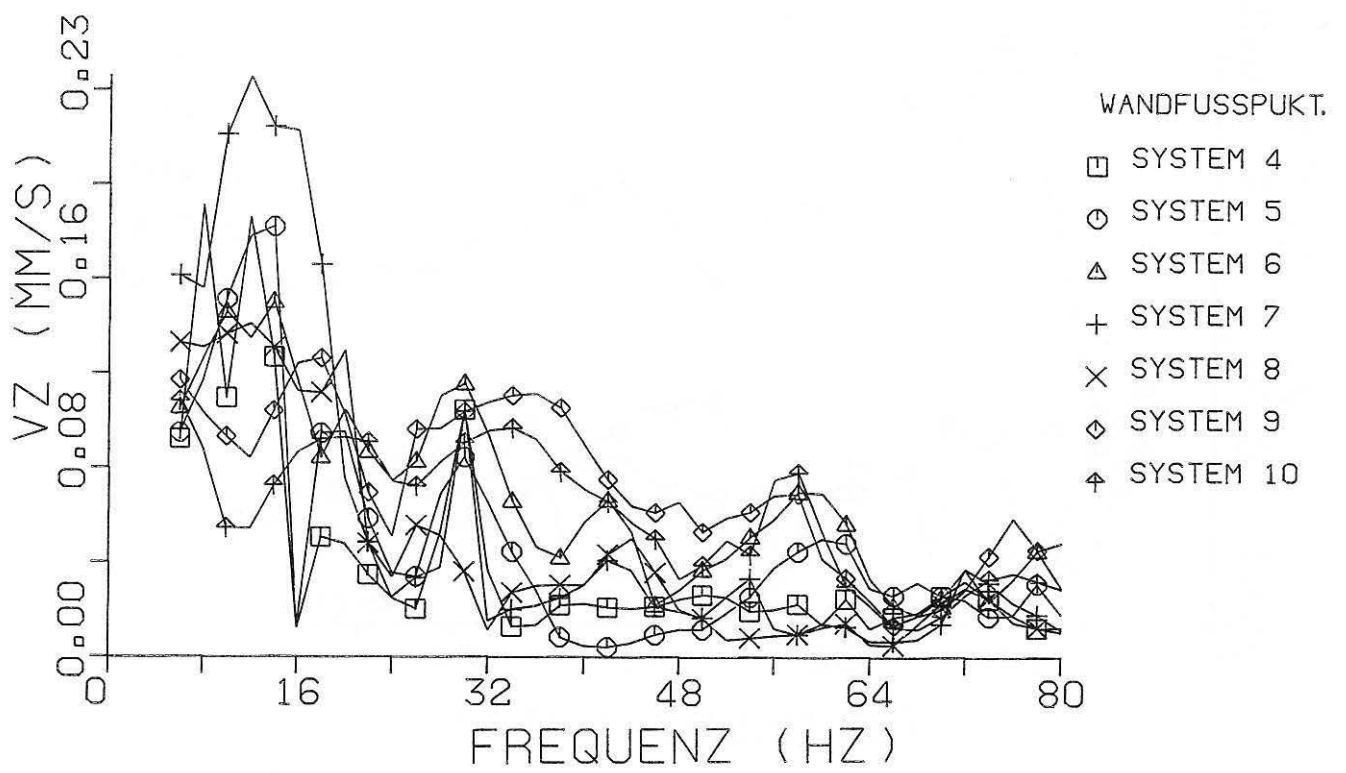
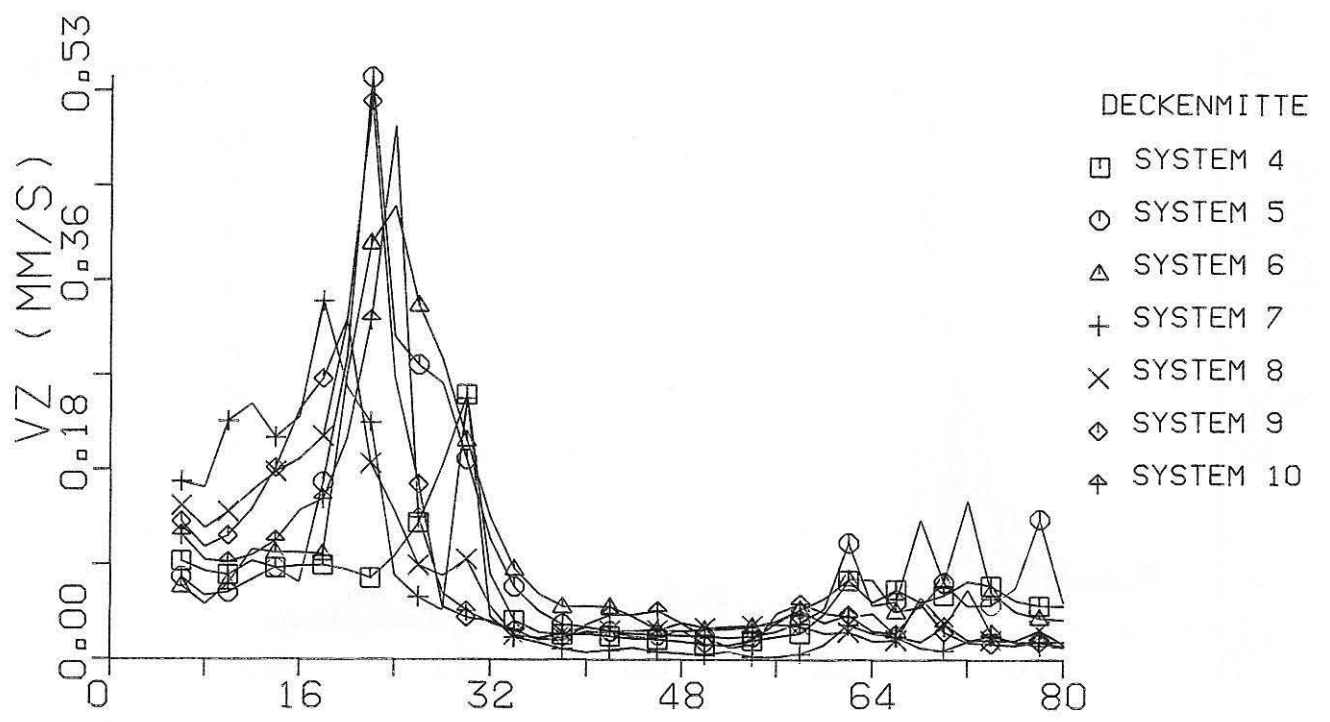


Bild 3.40  
 Vergleich der vertikalen Amplitudenspektren der Deckenmitten und der Wandfußpunkte, Systeme 4 bis 10



# 4 SCHWINGUNGS-MINDERNDE MAßNAHMEN

## 4.1 Allgemeines

In den vorigen Kapiteln wurden anhand von Ergebnissen numerischer Berechnungen die wichtigsten Effekte bei der Übertragung von U-Bahnschwingungen in dicht benachbarte Gebäude aufgezeigt. Mit diesen Ergebnissen kann eine bestimmte Situation mindestens qualitativ beurteilt werden. Neben dem für eine Prognose notwendigen prinzipiellen Verständnis des Schwingungsverhaltens der Struktur „Tunnel-Boden-Bauwerk“ und der wichtigsten Effekte sind in vielen Fällen auch Maßnahmen zur Schwingungsminderung notwendig. Da in der Praxis oftmals große Unklarheit über die Wirksamkeit einer bestimmten Maßnahme herrscht, sollen im weiteren einige schwingungsmindernde Maßnahmen untersucht und deren Wirksamkeit oder Unwirksamkeit nachgewiesen. Dies ist auch deshalb besonders wichtig, da nachträgliche Minderungsmaßnahmen oft sehr schwierig durchzuführen und ihre Ausführung sehr teuer ist.

Die untersuchten Minderungsmaßnahmen orientieren sich soweit wie möglich an der praktischen Durchführbarkeit, wobei im folgenden zunächst Maßnahmen im Übertragungsweg der Schwingungen zwischen Tunnel und Gebäude untersucht werden. Im einzelnen werden betrachtet:

- offene Schlitzte mit Tiefen zwischen 3 und 12 m
- Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Bauwerk
- (verlorener) Baugrubenverbau bei der Tunnelerstellung
- massive und schwere Platten auf der Bodenoberfläche.

Im weiteren werden Maßnahmen am Gebäude und am Tunnel untersucht und zwar:

- Wirkung von Lichtschächten bei seitlichem und zentralem Gebäude
- Einzelfundamente mit und ohne aussteifende Bodenplatte
- Tiefabstimmung des Gleises in verschiedenen Frequenzen
- Tiefabstimmung des Gebäudes in verschiedenen Frequenzen.

Für alle Untersuchungen wird als Ausgangssystem das System Nr. 6 verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Tunnel mit 1,5 m Überdeckung. Das Gebäude befindet sich 3 m seitlich neben dem Tunnel und ist 6 m eingebettet.

## 4.2 Offene Schlitzte

Das der Untersuchung zugrundeliegende System ist in Bild 4.1 dargestellt. Der 0,5 m breite offene Schlitz

befindet sich 1 m neben der Tunnelaußenwand und 1,5 m vom Gebäude entfernt. Variabel ist die Schlitztiefe. Folgende Tiefen wurden untersucht:

- 3 m, bis Tiefe erstes Kellergeschoß
- 6 m, bis Tiefe zweites Kellergeschoß
- 7,5 m Sohle Tunnel
- 9 m
- 12 m

In Bild 4.2 sind die Verschiebungsfelder für die Frequenzen 20, 40, 60 und 80 Hz. dargestellt. Die Schlitztiefe beträgt 7,50 m. Aus diesen Schwingungsbildern ist klar ersichtlich, daß ein offener Schlitz ein sehr gutes Verfahren zur Schwingungsminderung darstellt. Zwar führen die Decken des Bauwerks im unteren Frequenzbereich nach wie vor merkbare Schwingungen aus. Mit zunehmender Frequenz werden Schwingungen jedoch in zunehmenden Maße abgeschirmt. So werden die Bauwerkswände und in höheren Frequenzen auch die Stockwerksdecken im Gegensatz zu dem Kontrollsystem Nr. 6 kaum noch zu Schwingungen angeregt. Aus allen Schwingungsbildern ist jedoch auch klar zu erkennen, daß der Schlitz mindestens bis zur Tunnelsohle, eher noch einige Meter darüber hinaus reichen muß, damit das Gebäude wirksam geschützt ist. Ist dies nicht der Fall, dann werden die Schwingungen unter dem Schlitz durchgebeugt und erreichen sehr schnell wieder nahezu das vorherige Schwingungsniveau. Dieser Effekt tritt im übrigen stets ein, so daß generell gilt, daß ein Schlitz unmittelbar vor dem zu schützenden Objekt angeordnet werden muß, um wirksam zu sein.

In den Bildern 4.3 und 4.4 sind die Amplitudenfrequenzgänge der Bauwerksdecken und -wände sowie des U-Bahntunnels für verschiedene Schlitztiefen dargestellt. Die Frequenzgänge der Stockwerksdecken zeigen die große Abschirmwirkung der offenen Schlitzte quantitativ. Man erhält im Resonanzfall folgende Werte:

Tabelle 4.1  
Abschirmwirkung von Schlitzten verschiedener Tiefe

| Schlitztiefe [m] | 3    | 6   | 7,5  | 9   |
|------------------|------|-----|------|-----|
| Abschirmwirkung  | 0,56 | 0,3 | 0,25 | 0,2 |

Wie aus Tabelle 4.1 zu ersehen ist, reduziert ein 3 m tiefer Schlitz die Deckenamplituden schon auf etwa die Hälfte. Bei einem 9 m tiefen Schlitz sind nur noch 20 % der Amplituden ohne Schlitz vorhanden.

Im Gegensatz zu den Stockwerksdecken werden die Amplituden der Bauwerkswände im Bereich der kinematischen „Eigenfrequenz“ (siehe oben) um 12 Hz zunächst mit zunehmender Schlitztiefe verstärkt. Über etwa

16 Hz tritt dann aber auch hier eine generelle Abnahme ein.

Für den Tunnel selbst gibt es bis auf die Tunneldecke keine Rückwirkungen des Schlitzes. An der Tunneldecke werden die Amplituden mit zunehmender Schlitztiefe um etwa 50 % verstärkt.

Zusammenfassend ergibt sich eine sehr gute Abschirmwirkung eines offenen Schlitzes, wobei in der Praxis aber das Problem besteht, den Schlitz insbesondere mit zunehmender Tiefe, offenzuhalten. Aus diesem Grunde soll im folgenden u.a. die Wirkung einer Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Bauwerk sowie die Wirkung von Lichtschächten am Bauwerk untersucht werden.

### 4.3 Bodenverfestigung

Als Alternative zum offenen Schlitz soll zunächst eine Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Bauwerk untersucht werden. In Bild 4.5 ist das FE-System dargestellt. Die Bodenverfestigung mit einer Steifigkeit von  $v_s = 700$  m/s schließt unmittelbar an das Gebäude und die Tunnelaußenwand an und reicht bis zur Tunnelsohle ( $T=7,50$  m).

Bild 4.6 zeigt wiederum die Schwingungsformen für verschiedene Frequenzen. Der Vergleich mit Bild 3.15 des Systems 6 zeigt, daß durch die Bodenverfestigung sowohl im Untergrund wie auch im Bauwerk eine Beruhigung der Schwingungen eintritt. So sind die Schwingungen an der Bodenoberfläche wesentlich kleiner; aber auch die horizontalen Schwingungen des Gebäudes und in der Folge die vertikalen Deckenschwingungen werden reduziert. Die Wirkung der Bodenverfestigung ergibt sich somit als erschütterungsreduzierender Effekt im Ausbreitungsweg (größere Steifigkeit = kleinere Amplitude) wie auch als schwingungsbehindernder Effekt an den Kellerwänden.

Das in Bild 4.7 dargestellte Mittelwertsspektrum aller Stockwerksdecken und der Wände zeigt, daß die Bodenverfestigung hinsichtlich der vertikalen Schwingungen der Wände bis etwa 40 Hz mindestens eine gleich große, zum Teil sogar eine größere Abschirmwirkung als ein gleich tiefer Schlitz hat. Bezüglich der Deckenschwingungen ist die Abschirmwirkung jedoch nicht so groß. Während der Schlitz hier im Mittel über alle Decken im Resonanzfall die Schwingungen auf etwa 27 % abmindert, erreicht die Bodenverfestigung nur etwa 85 %. Dies ist wiederum eine Folge der mehr gleichphasigen Anregung der Gebäudefundamente im Falle der Bodenverfestigung. Insgesamt kann aber die Bodenverfestigung als durchaus wirksame schwingungsmindernde Maßnahme angesehen werden, wobei durch geeignete Gebäudegeometrie und Anordnung zum Tunnel eine Reduzierung erreicht werden kann, die im Bereich offener Schlitz liegt.

### 4.4 Baugrubenverbau, Lichtschächte und Bodenplatten

Im Sinne einer kompakten und übersichtlichen Darstellung werden die anderen untersuchten möglichen Minderungsmaßnahmen

- (verlorener) Baugrubenverbau bei der Tunnelerstellung
- massive und schwere Platten auf der Bodenoberfläche
- Lichtschächten bei seitlichem Gebäude
- Einzelfundamente mit und ohne aussteifende Bodenplatte
- Tiefabstimmung des Gleises in verschiedenen Frequenzen
- Tiefabstimmung des Gebäudes in verschiedenen Frequenzen

im folgenden jeweils in den gleichen Bildern gegenübergestellt. Davon abgewichen wird nur, wo auf Details hingewiesen werden soll. Dies ist im wesentlichen der Fall bei der Tiefabstimmung von Gleis und Gebäude.

In den Bildern 4.8 bis 4.13 sind die Verformungen des Gesamtsystems für einige ausgewählte Frequenzen dargestellt. Vergleicht man die Schwingungsbilder für das System mit Baugrubenverbau (Bild 4.8) mit den Schwingungsbildern des Systems 6, so erkennt man, daß sich zwar bei einigen Frequenzen eine Phasenumkehr von etwa 180 Grad einstellt, am generellen Schwingungsverhalten ändert sich aber wenig.

Für den Fall der beidseitigen Lichtschächte am Gebäude (Bild 4.9) ergeben sich dann jedoch größere Veränderungen. Zwar scheint das Bauwerk besonders im unteren Frequenzbereich bis etwa 20 Hz stärker zu schwingen. Danach sind die Schwingungen jedoch sowohl an der Bodenoberfläche wie auch im Gebäude erheblich kleiner als ohne Lichtschächte.

Die Anordnung einer versteifenden Fundamentbodenplatte (Bild 4.10) neben den Fundamenten bewirkt ebenfalls, bis auf Phasendrehungen, keine wesentlichen Änderungen im Schwingungsbild. Die Anordnung von steifen und schweren Platten auf der Bodenoberfläche (Bilder 4.11 und 4.12) bewirkt eine Beruhigung der Schwingungen im Erdreich. Demgegenüber scheint das Gebäude in einigen Frequenzen größere Schwingungen auszuführen.

Der Einbau von Feder-Masse unter dem Gleis im Tunnel (Bild 4.13) bewirkt eine generelle Verminderung der Schwingungen des Tunnels, des Bodens und des Bauwerks.

Diese kurze Darstellung des Schwingungsverhaltens ist hilfreich, wenn die Wirkungsweise von Abschirmmaßnahmen untersucht werden soll. Zur Beantwortung der Frage, welche Maßnahmen im konkreten Fall als sinn-

voll anzusehen sind, müssen die Abminderungsgrade über der Frequenz bekannt sein. Diese ergeben sich aus den nachfolgend dargestellten Frequenzspektren. Betrachtet man die in den Bildern 4.14 und 4.15 als Mittelwerte über alle Decken und Wände dargestellten Spektren, so lassen sich hieraus folgende Ergebnisse ablesen:

1. Ein Baugrubenverbau wirkt sich hinsichtlich des Antwortverhaltens eines benachbarten Gebäudes in keiner Weise aus. Die Antwortspektren sind praktisch identisch mit denjenigen des ungestörten Systems Nr. 6.
2. Seitliche Lichtschächte am Gebäude wirken sich hinsichtlich der Amplituden in der Deckenresonanz sehr günstig aus. Die Abminderung beträgt hier etwa 55 %. Die Anordnung von Lichtschächten bewirkt jedoch auch, daß sich die Wandresonanzfrequenzen bei etwa 14 Hz und bei 30 Hz verstärkt ausbilden können. An den Gebäudedecken treten in diesem Fall Amplituden auf, die sogar noch höhere Werte als die eigentliche Deckenresonanz aufweisen. Im Gegensatz zur Deckenresonanz ist die Resonanzbreite jedoch relativ gering. Ob die Anordnung von Lichtschächten eine schwingungsmindernde Maßnahme darstellt oder nicht, kann deshalb nur in Zusammenhang mit dem Anregungsspektrum entschieden werden. Enthält das Anregungsspektrum keine oder nur schwache Komponenten im Bereich der Wandresonanz um 30 Hz, dann stellen Lichtschächte eine gute schwingungsmindernde Maßnahme dar, andernfalls nicht.
3. Die Anordnung einer steifen Bodenplatte im Bereich der Fundamente stellt keine schwingungsmindernde Maßnahme dar. Die Ursache liegt darin, daß es im wesentlichen auf die Anregung der Fundamente im Bereich der aufgehenden Wände ankommt. Schwingungsmindernde Maßnahmen müssen deshalb unmittelbar am Fundament, etwa durch eine Vergrößerung der Fundamentfläche, ansetzen.
4. Eine steife Platte auf der Bodenoberfläche wirkt durchaus schwingungsmindernd. Allerdings ist der Effekt relativ gering. Es ergeben sich maximale Werte von etwa 12 bis 15 %. Eine steife und schwere Platte an der Bodenoberfläche wirkt demgegenüber eher schwingungsverstärkend. Die maximale Verstärkung liegt hier ebenfalls bei etwa 15 %.

## 4.5 Feder-Masse-Systeme

### 4.5.1 Im Tunnel

Zur Untersuchung der Wirkung von Feder-Masse-System im Tunnel wurden 4 Systeme mit Abstimmfrequenzen von > 80 Hz, 46 Hz, 26 Hz und 8 Hz untersucht. Zur Abwehr von Erschütterungen muß generell die Abstimmfrequenz möglichst tief gelegt werden. Prak-

tische Relevanz besitzt deshalb nur der untersuchte Fall mit einer Abstimmfrequenz von etwa 8 Hz. Da jedoch oftmals in der Praxis auch Systeme mit höherer Abstimmfrequenz absichtlich oder unabsichtlich eingebaut werden, soll die Auswirkung einer solchen Maßnahme auch hier gezeigt werden. Ergänzend sei hinzugefügt, daß die hier ebenfalls untersuchte Abstimmfrequenz von > 80 Hz nur im Falle der Abschirmung von Körperschall von Interesse ist.

Das Ergebnis der Berechnungen mit diesen Abstimmfrequenzen ist für die Bauwerksdecken und -wände in Bild 4.16 dargestellt. Wie zu erwarten, ergeben sich für Abstimmfrequenzen, die größer als etwa 10 Hz sind, - über 10 Hz liegen alle Gebäudeeigenfrequenzen - stets Verstärkungen. Besonders große Amplituden ergeben sich naturgemäß, wenn die Abstimmfrequenzen mit den Deckenfrequenzen zusammenfallen oder dicht benachbart sind. Dies ist hier bei einer Abstimmfrequenz von 26 Hz der Fall. Eine Abminderung kann nur erreicht werden, wenn die Abstimmfrequenz unterhalb aller relevanter Bauwerksfrequenzen liegt. Im vorliegenden Fall liegt die tiefste relevante Bauwerkeigenfrequenz bei etwa 14 Hz (im Falle des Systems 6). Wird das Gleis nun mit einer Frequenz von 8 Hz abgestimmt, dann ergeben sich im gesamten Frequenzbereich Abminderungen für alle Bauteile und für das gesamte Bauwerk.

### 4.4.2 Am Gebäude

Als letzte hier zu untersuchende Abschirmmaßnahme bleibt jetzt noch die Abstimmung des Gebäudes. In der Praxis wird dies dadurch durchgeführt, daß das gesamte Gebäude auf Feder-Dämpfer-Elemente bzw. auf Elastomere abgesetzt wird, wobei die Abstimmfrequenz möglichst tief gewählt wird, damit eine relevante Abminderungswirkung eintritt. Dem Wunsch, das Bauwerk möglichst tief abzustimmen, stehen statische Gesichtspunkte und aerodynamische Gesichtspunkte entgegen. Je tiefer ein System abgestimmt wird, desto größer ist der sogenannte statische Einfederungsweg. Einfederungswege ab einer bestimmten Größenordnung können aus statischen und konstruktiven Gesichtspunkten nicht akzeptiert werden. Damit ergeben sich in der Praxis oftmals notwendige Abstimmfrequenzen, die mindestens über 5 Hz liegen. Zum anderen kann es bei sehr tief liegenden Abstimmfrequenzen zu Resonanzanregung infolge Wind kommen, Dies ist aus dynamischen Gesichtspunkten ebenfalls auszuschließen.

Für die hier vorliegende Untersuchung wurden 2 Abstimmfrequenzen, nämlich 5 Hz und 2 Hz gewählt. Aus dem vorher gesagten ist klar, daß die praxisrelevante Abstimmfrequenz bei 5 Hz liegt. Die gewählte Abstimmung mit 2 Hz hat mehr extremalen Charakter. Die Untersuchung der Wirkung der Gebäudeabstimmung wird am System Nr. 9 (Gebäude direkt über Tunnel, Überdeckungshöhe 3m) durchgeführt, wobei die Wirkung von beiderseitigen Lichtschächten in die Untersuchung mit einbezogen wird.



In den Bildern 4.18 und 4.19 sind die Schwingungsbilder für System 13 - direkt auf der Tunneldecke aufgelagert, aber mit seitlichen Lichtschächten – und für System 13 A – abgestimmt auf 5 Hz, mit seitlichen Lichtschächten – dargestellt. Vergleicht man diese Schwingungsbilder mit denjenigen des Referenzsystems Nr. 9, so fällt zunächst sofort auf, daß bei Anordnung von Lichtschächten die Bauwerkswände, die Decken und der Untergrund nur relativ kleine Schwingungen ausführen. Die seitliche Abkoppelung des Bodens vom Gebäude scheint also zunächst hinsichtlich des Gesamtsystems schwingungsmindernd zu wirken. Vergleicht man die Schwingungsbilder bei einer Abfederung von 5 Hz mit denjenigen des Systems 13, dann stellt man fest, daß jetzt wieder sehr große Deckenschwingungen in einigen Frequenzbereichen auftreten. Trotz der Abstimmung des Gesamtgebäudes auf eine relativ niedrige Frequenz, weisen die Decken unter Umständen Schwingamplituden auf, die Werte erreichen, die denjenigen ohne jede Abschirmmaßnahme entsprechen. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, daß die Abstimmfrequenz von 5 Hz mit einer Starrkörpereigenfrequenz des Systems „Tunnel im Boden“ zusammenfällt (siehe auch Kapitel 3.6.1).

Betrachtet man nun die in den Bildern 4.20 und 4.21 dargestellten Frequenzspektren der Bauwerksdecken und Wandfußpunkte, dann ergeben sich folgende Verhältnisse:

- Die vertikalen Schwingungen der Wände sind im Falle mit oder Lichtschächte bis etwa 30 Hz von der gleichen Größenordnung. Danach nehmen im Fall des Bauwerks mit Lichtschächten die Amplituden stark ab. Die kleinsten Amplituden sind bei einer Abstimmung mit 5 Hz bzw 2 Hz vorhanden.
- Betrachtet man nun die Spektren der Decken, so stellt man fest, daß bei Anordnung von beidseitigen Lichtschächten die Abschirmwirkung in der Resonanzfrequenz nur sehr gering ist. Im Gegensatz zu dem „seitlichen“ Gebäude sind also bei direkter Auflagerung des Gebäudes Lichtschächte keine geeignete Abschirmmaßnahme.
- Die größte Abschirmwirkung erhält man wie erwartet, bei einer Tiefabstimmung mit 2 Hz. In der Resonanzfrequenz beträgt die Abschirmwirkung etwa 65 %.

## 4.6 Zusammenfassung

Die Kenntnis der Wirksamkeit und der Wirkungsweise von Abschirmmaßnahmen ist im Erschütterungsschutz von großer Bedeutung, da deren Einbau stets mit großen Kosten verbunden ist. Da in der Praxis oftmals große Unklarheit über die Wirksamkeit bestimmter Maßnahmen herrscht, wurde das Abschirmverhalten einiger praxisrelevanter Abschirmmaßnahmen rechnerisch untersucht. Im einzelnen wurden folgende Maßnahmen betrachtet:

- offene Schlitze mit Tiefen zwischen 3 und 12 m
- Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Bauwerk
- (verlorener) Baugrubenverbau bei der Tunnelerstellung
- massive und schwere Platten auf der Bodenoberfläche.
- Wirkung von Lichtschächten bei seitlichem und zentralem Gebäude
- Einzelfundamente mit und ohne aussteifende Bodenplatte
- Tiefabstimmung des Gleises in verschiedenen Frequenzen
- Tiefabstimmung des Gebäudes in verschiedenen Frequenzen.

Eine zusammenfassende Wertung aller untersuchten Minderungsmaßnahmen ergibt, daß folgende Maßnahmen als wirksam eingeschätzt werden können:

- Schlitze zwischen Tunnel und Gebäude
- Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Gebäude
- Feder-Masse-Systeme unter der Fahrbahn
- Bauwerksabstimmung mit niedrigen Abstimmfrequenzen (< 4 Hz)
- einseitige oder beidseitige Lichtschächte (nur bei seitlichem Gebäude)

Die einzelnen, als wirksam nachgewiesenen Maßnahmen weisen einen unterschiedlichen Wirkungsgrad auf, der bei manchen Maßnahmen auch frequenzabhängig ist. Hierauf ist bei der praktischen Auswahl zu achten.

Als nicht wirksam ergaben sich folgende Maßnahmen:

- (zurückgelassener) Baugrubenverbau
- steife Platte auf der Bodenoberfläche
- steife und schwere Platte auf der Bodenoberfläche
- Art der Fundament (Platte oder Einzelfundament)

## 4.7 Bauzustände

Im nächsten Kapitel werden Ergebnisse von Messungen präsentiert. Ein Meßziel bestand u.a. darin, das Wechselungsverhalten zwischen Untergrund und Bauwerk im Zuge der Erstellung eines Bauwerkes schrittweise zu erfassen. Hierbei wurde das Schwingungsverhalten gemessen, nachdem der Aushub für das Gebäude erfolgt war (Bauzustand 1, System 11), nach Erstellung der beiden Kellergeschoße (Bauzustand 2, System 12) und schließlich nach Fertigstellung des vollständigen 6-geschossigen Rohbaus (Bauzustand 3, System 6). Diese Bauzustände wurden auch im Modell erfaßt und die Ergebnisse sollen im nachfolgenden gezeigt und diskutiert werden.

Das Referenzsystem und gleichzeitig der 6-geschossige Rohbau wird durch System Nr. 6 dargestellt. Die Bilder 4.22 und 4.23 zeigen das Schwingungsverhalten in den beiden berechneten Bauphasen. Vergleicht man das

Schwingungsbild des Bauzustandes 1 mit dem des Systems 6, so stellt man auf den ersten Blick nur marginale Änderungen fest. Das liefert die für die Interpretation der Boden-Bauwerks-Wechselwirkung wichtige Erkenntnis, daß hier die Wechselwirkung weniger durch die Bauwerksmasse, sondern durch die kinematische Randbedingungen (geometrisch scharf begrenzter Bodenaushub) bestimmt wird. Hierbei ist von besonderem Interesse, daß nur die dem Tunnel zugewandte Baugrubenseite große Schwingungen ausführt. Dies ist ein Hinweis darauf, Lichtschächte nur einseitig auszuführen. Infolge der dadurch bedingten Unsymmetrie der Bauwerksanregung erhält man phasenungleiche Anregungen der Wände und Decken. Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, führt dies zu einer Verringerung der Deckenschwingungen.

Sind dann die beiden Kellergeschoße erstellt, dann ist das Schwingungsbild (Bild 4.23) dem des Systems 6 schon sehr ähnlich. Alle dort vorhandenen Eigenschwingungen von Tunnel und Bauwerksaußenwände entsprechen denen von System 6. Lediglich die Decken zeigen ein anderes Schwingungsverhalten. Die Ursache liegt in dem horizontalen Schwingverhalten der Wände.

In den Bildern 4.24 und 4.25 sind die Wandverschiebungen der linken Baugrubenseite für die Bauphasen 1 und 2 dargestellt. In Bauphase 1 erkennt man bei 18 Hz ein Amplitudenmaxima, das der Resonanzfrequenz der Tunneldecke entspricht. In Bauphase 2 zeigen alle Knotenpunkte ein einheitliches Verhalten, wobei nunmehr die horizontale Wandresonanz bei etwa 22 Hz liegt. Mit wachsender Bauhöhe wächst diese Resonanzfrequenz ebenfalls ständig an und liegt schließlich in Bauphase 3 bei 30 Hz. Die maximalen Wandamplituden nehmen mit zunehmendem Baufortschritt stetig ab. Es findet also eine stetige Versteifung des System statt.

Hinsichtlich der Decken können nur die Systeme 12 und 6 miteinander verglichen werden. Der in Bild 4.26 dargestellte Vergleich zeigt, daß die Deckenresonanz in Phase 2 etwa um 8 Hz niedriger ist als in Bauphase 3, wobei die Resonanzamplituden in Phase 2 etwa 30 % kleiner sind. Wie bei den Wänden gilt auch hier, daß das Deckenschwingverhalten mit zunehmender Bauhöhe steifer wird. Wie bereits oben besprochen liegt die Ursache zum einen in der Koppelung zwischen Wänden und Decken. Zum anderen erhöht sich die Einspannwirkung der unteren Decken mit zunehmender Bauhöhe.



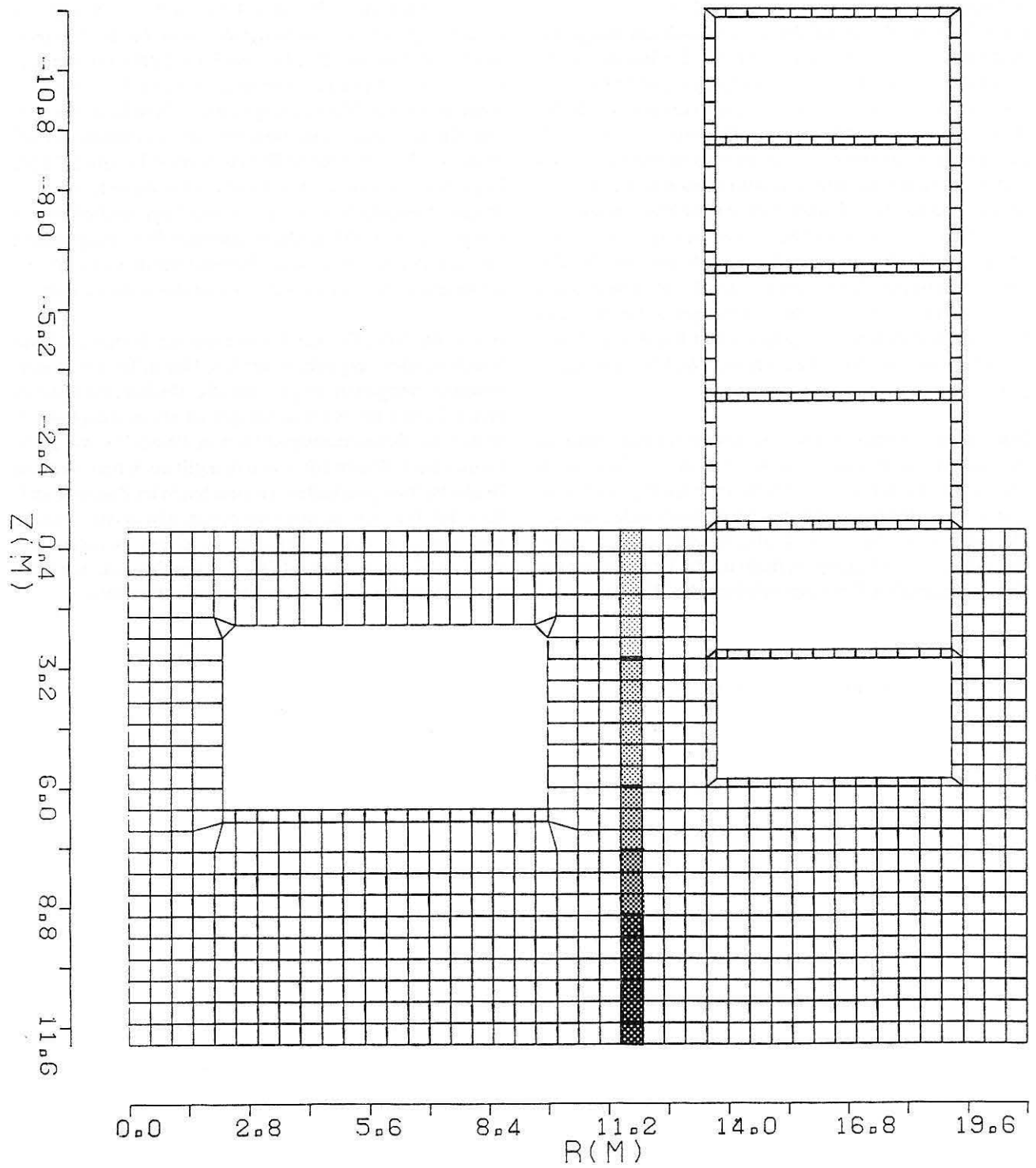


Bild 4.1  
 FE-System zur Untersuchung der Abschirmwirkung verschiedener Schlitztiefen

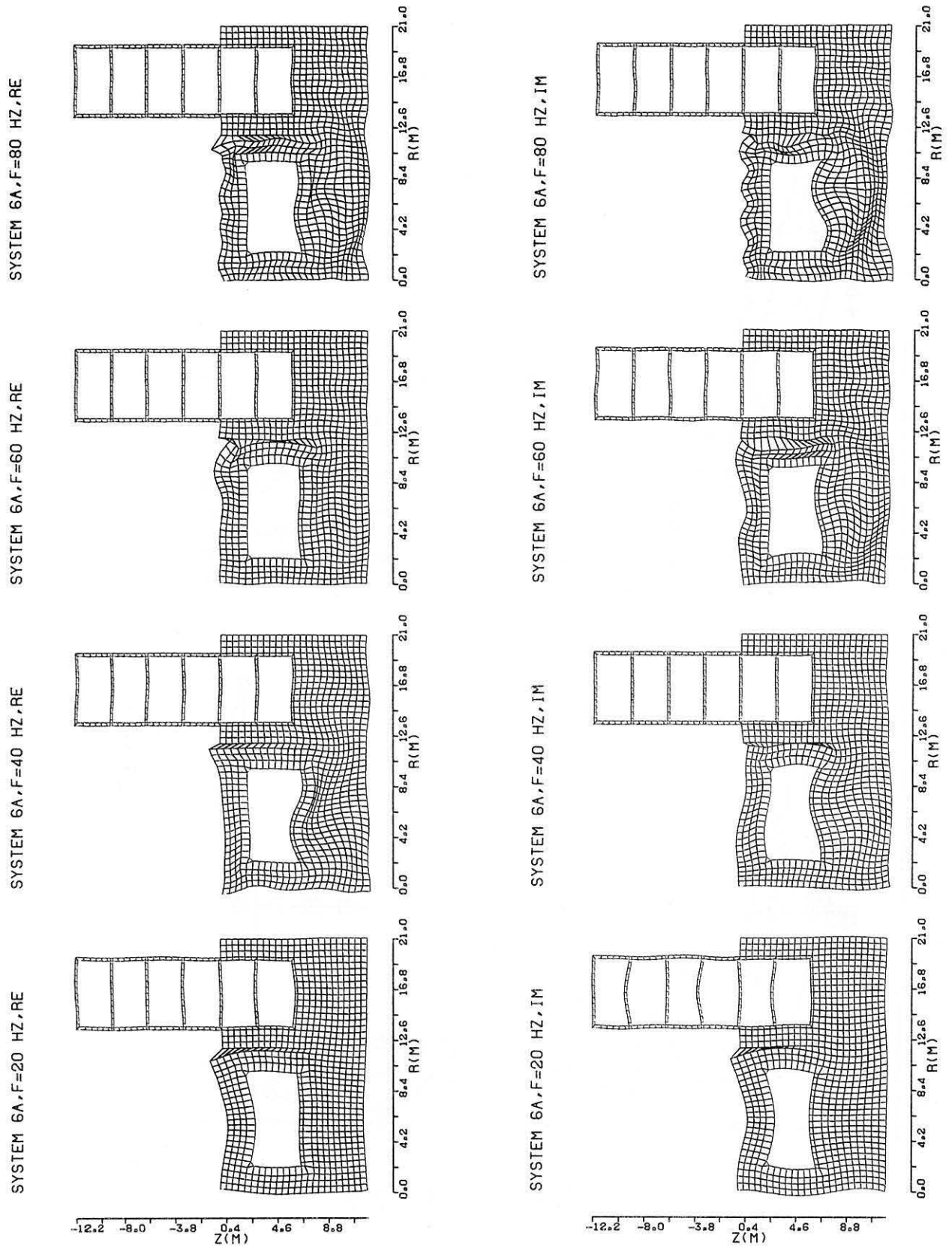


Bild 4.2  
Schwingungsbilder eines Systems mit einem offenen Schlitz mit einer Tiefe von 7,50 m

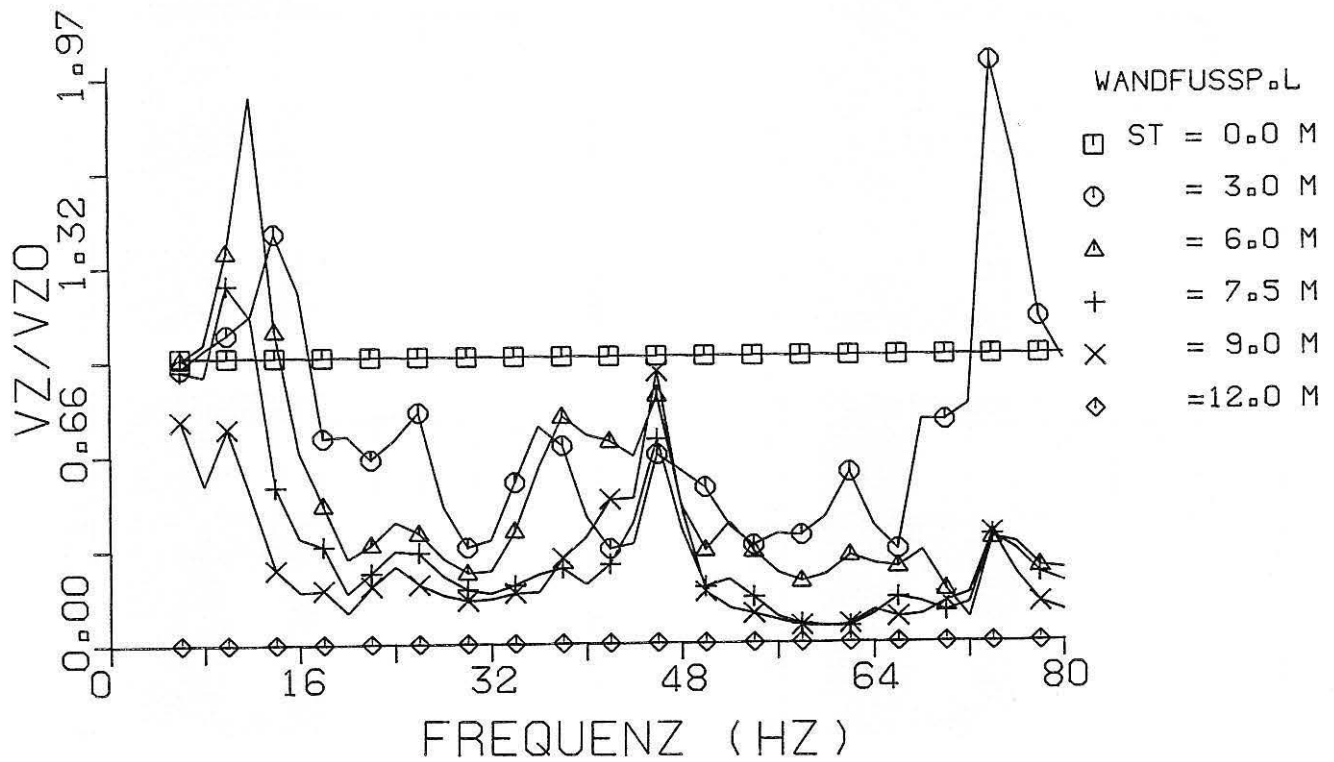
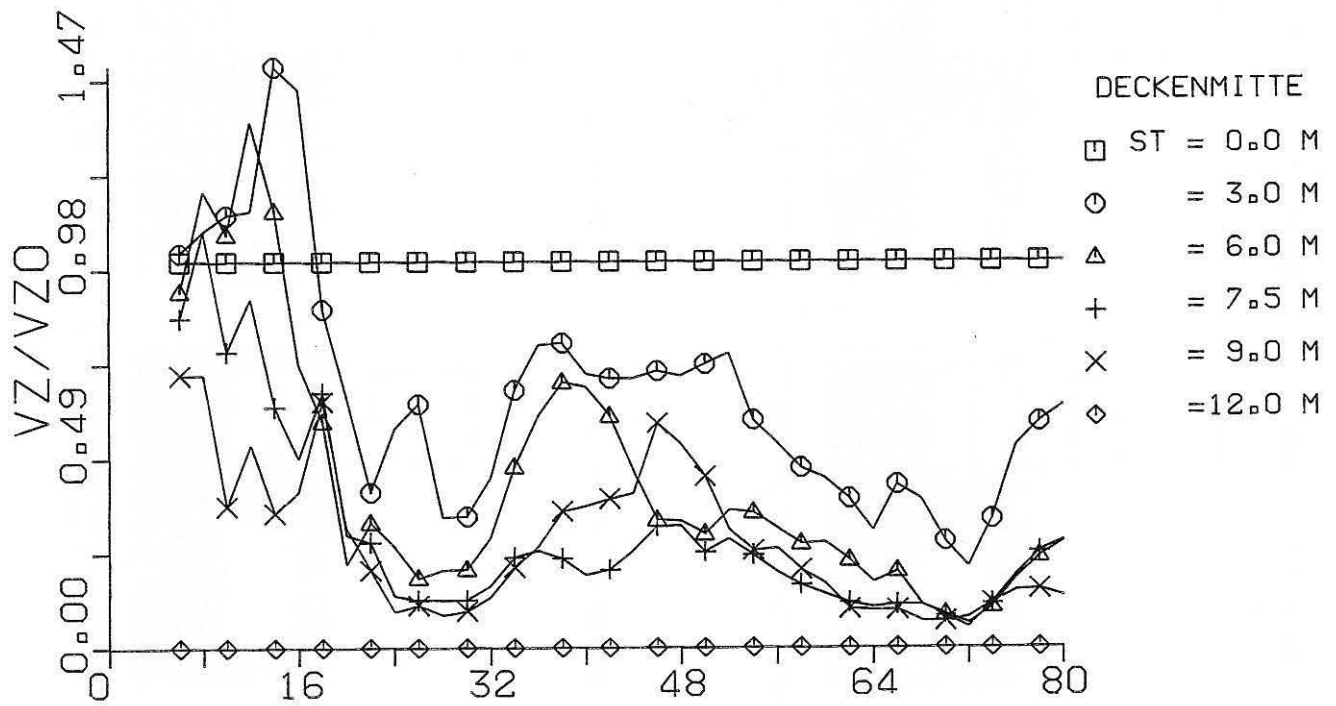


Bild 4.3  
Vergleich der bezogenen Spektren der Deckenmitte und der Wandfußpunkte für Systeme mit verschiedenen Schlitziefen

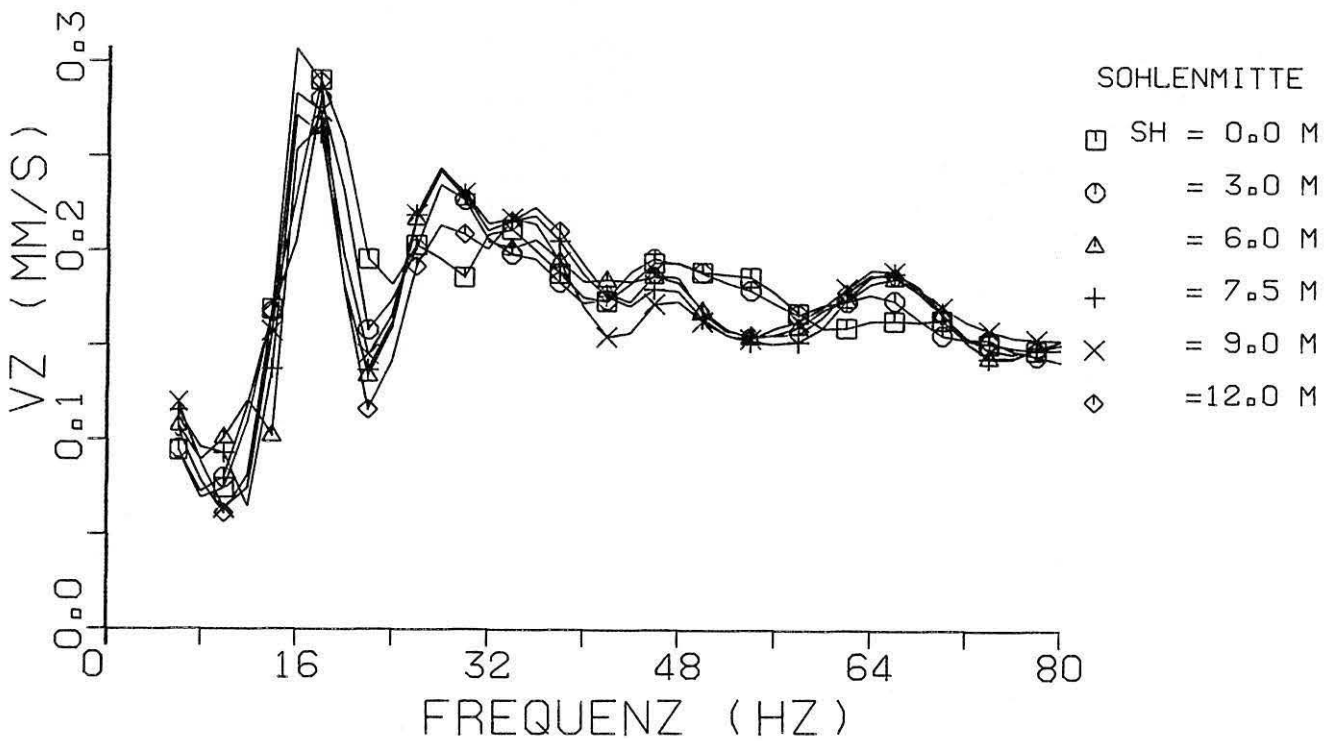
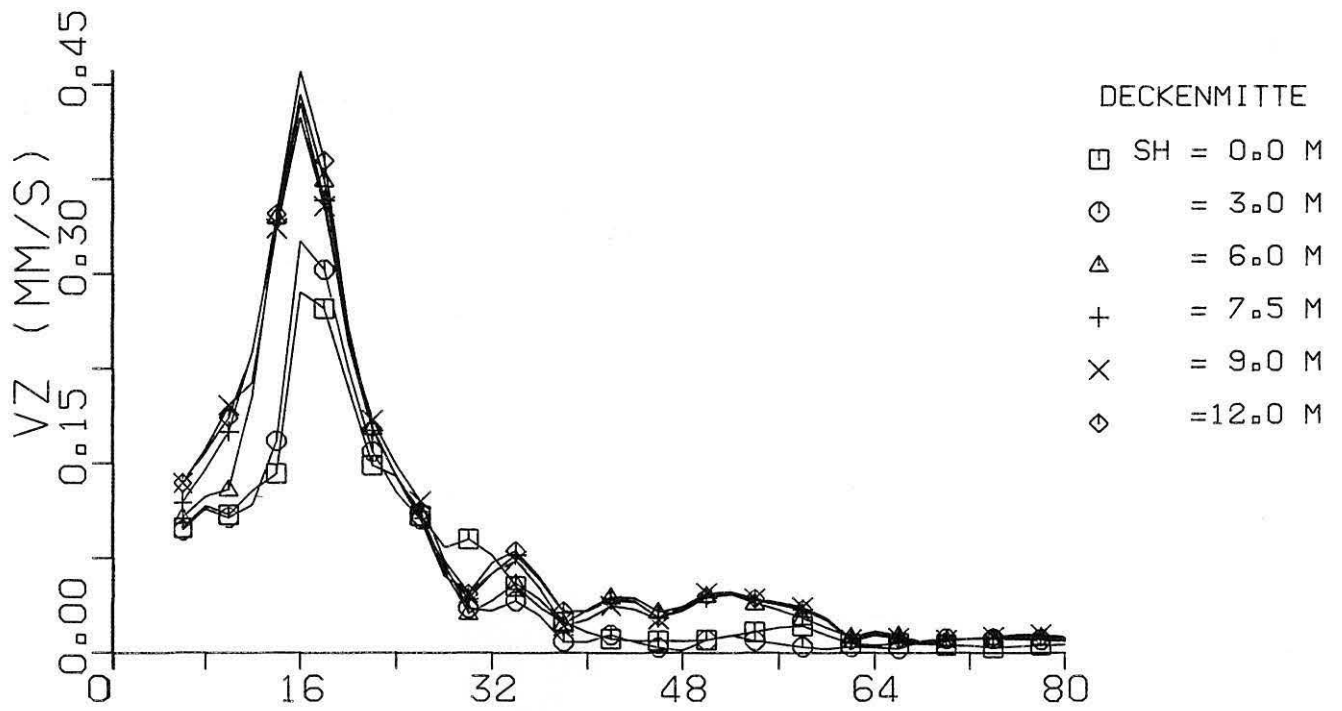


Bild 4.4  
Spektren der Tunneldecke und -Sohle für verschiedene Schlitziefen

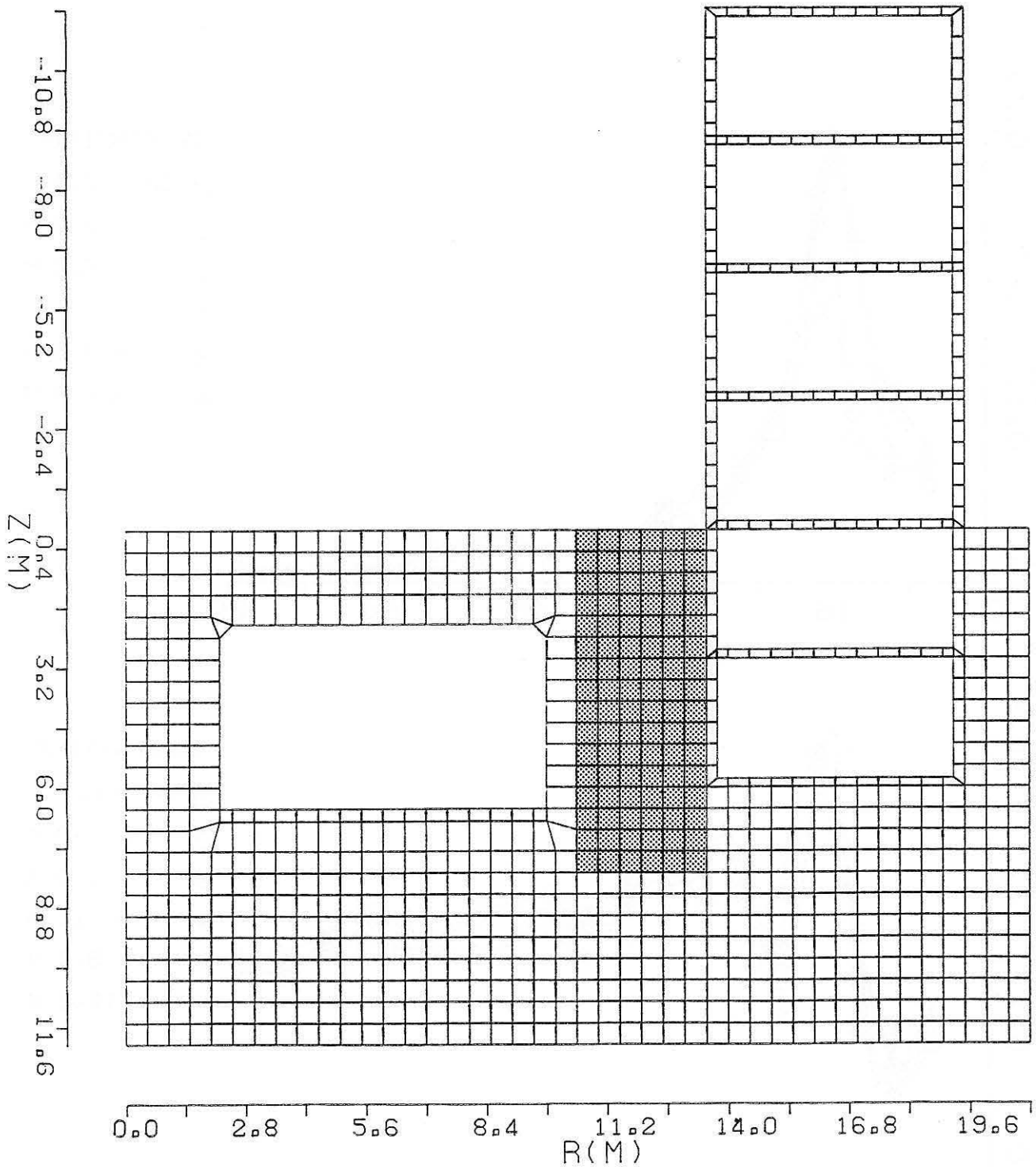
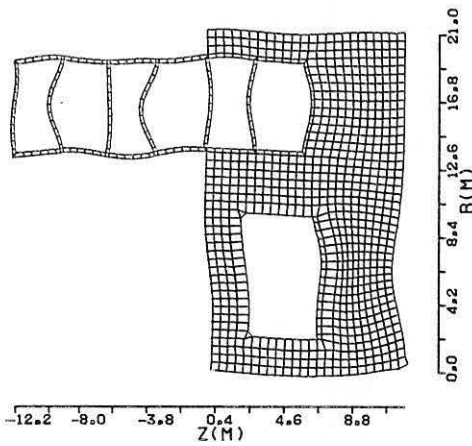
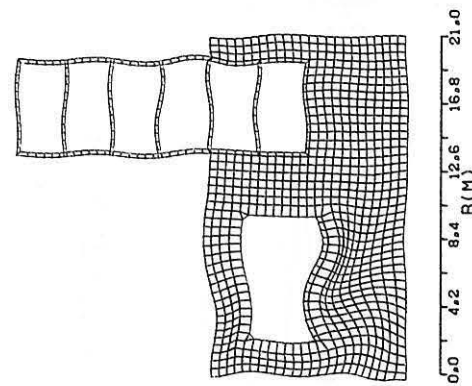


Bild 4.5  
 FE-System zur Untersuchung der Abschirmwirkung einer Bodenverfestigung

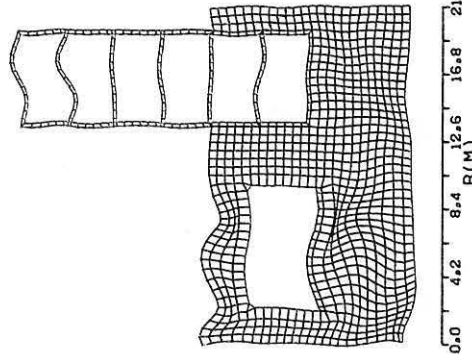
SYSTEM 6B,F=20 HZ,RE



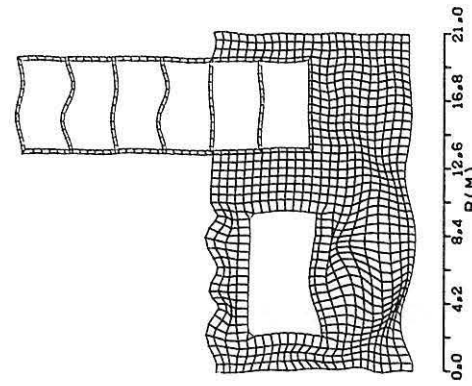
SYSTEM 6B,F=40 HZ,RE



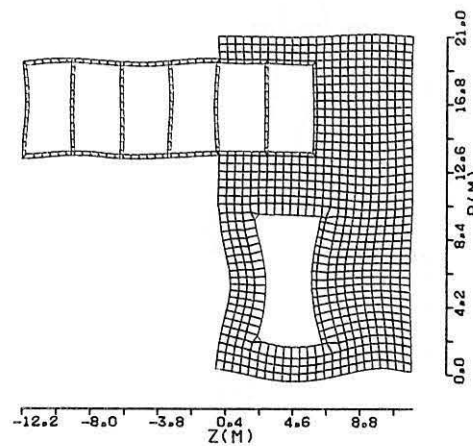
SYSTEM 6B,F=60 HZ,RE



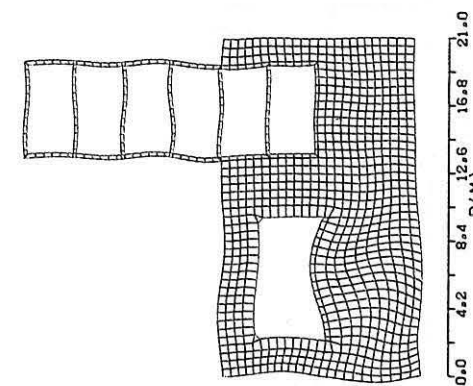
SYSTEM 6B,F=80 HZ,RE



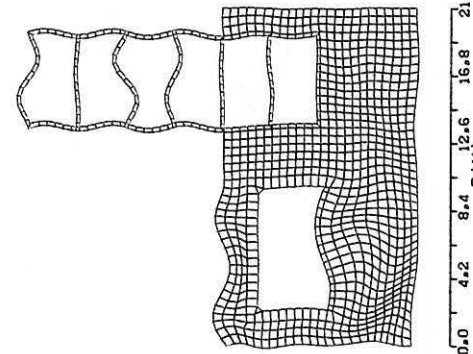
SYSTEM 6B,F=20 HZ,IM



SYSTEM 6B,F=40 HZ,IM



SYSTEM 6B,F=60 HZ,IM



SYSTEM 6B,F=80 HZ,IM

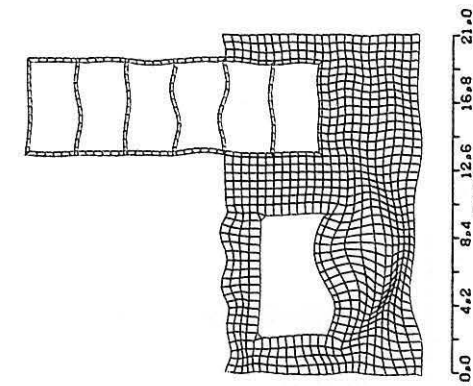


Bild 4.6

Schwingungsbild des Systems mit Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Gebäude



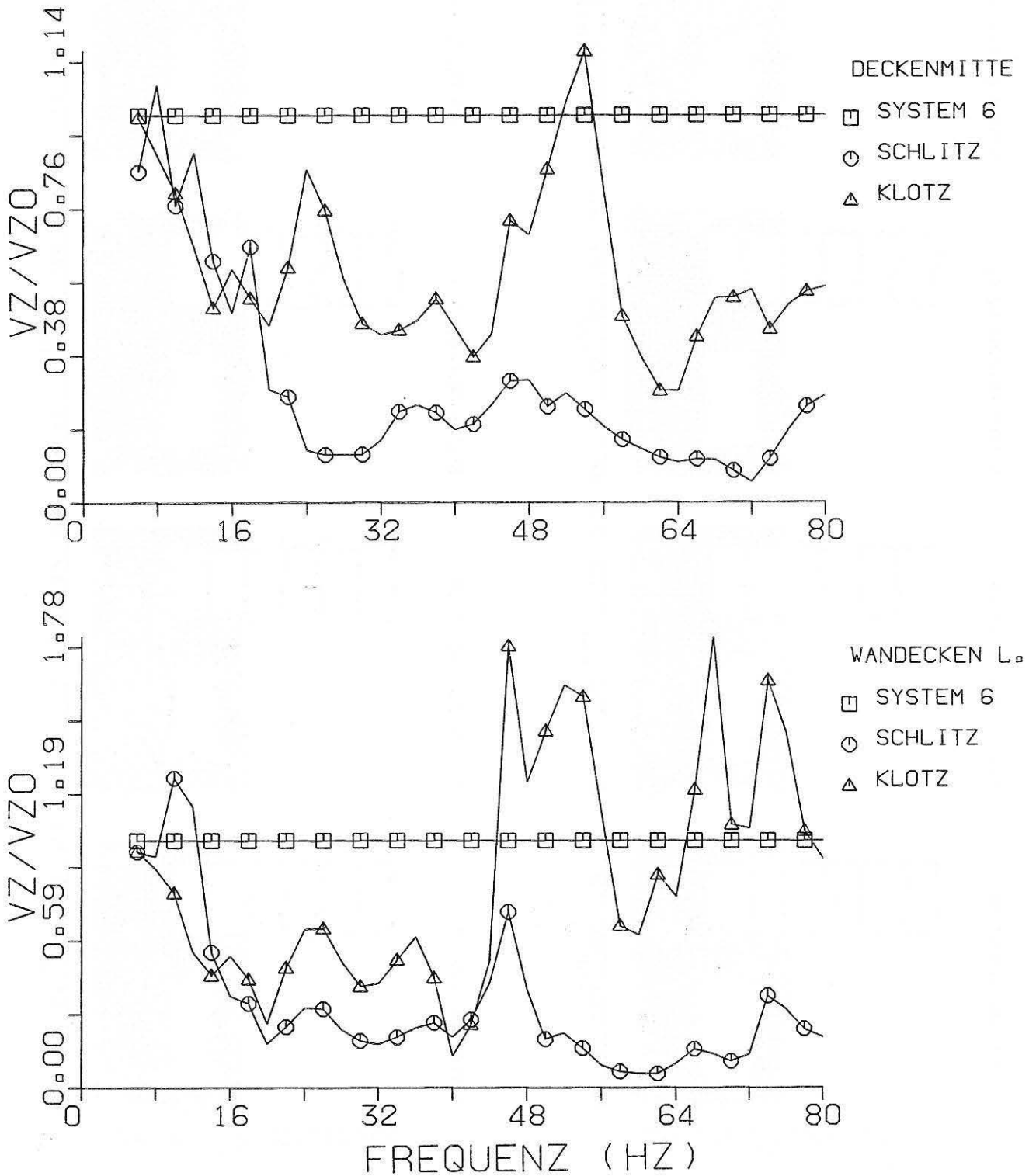


Bild 4.7

Vergleich der Spektren der Deckenmitten und der Wandfußpunkte für die Abschirmmaßnahmen Schlitz ( $T = 7,50$  m) und Bodenverfestigung

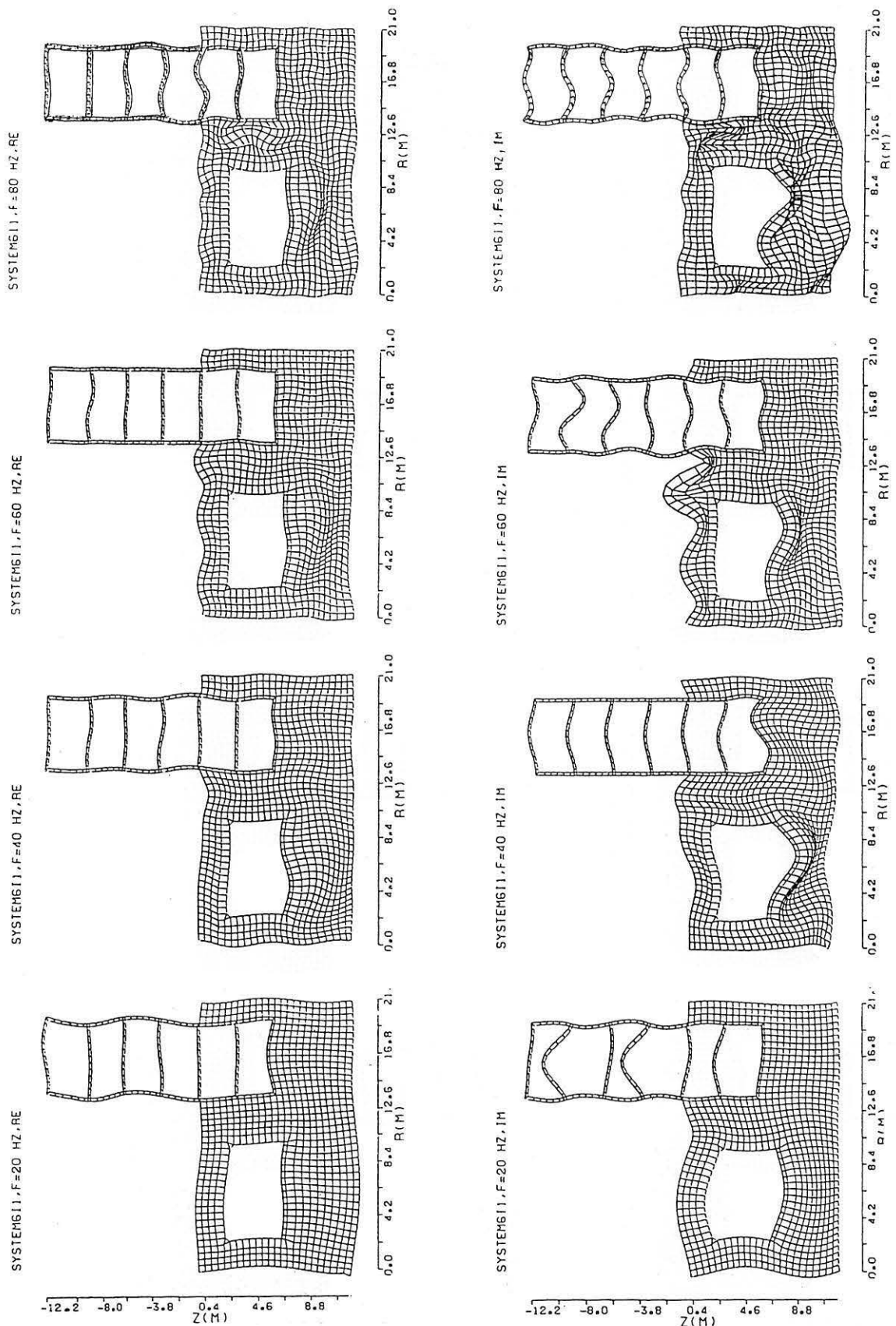


Bild 4.8  
Schwingungsbilder der Abschirmmaßnahme „Baugrubenverbau“

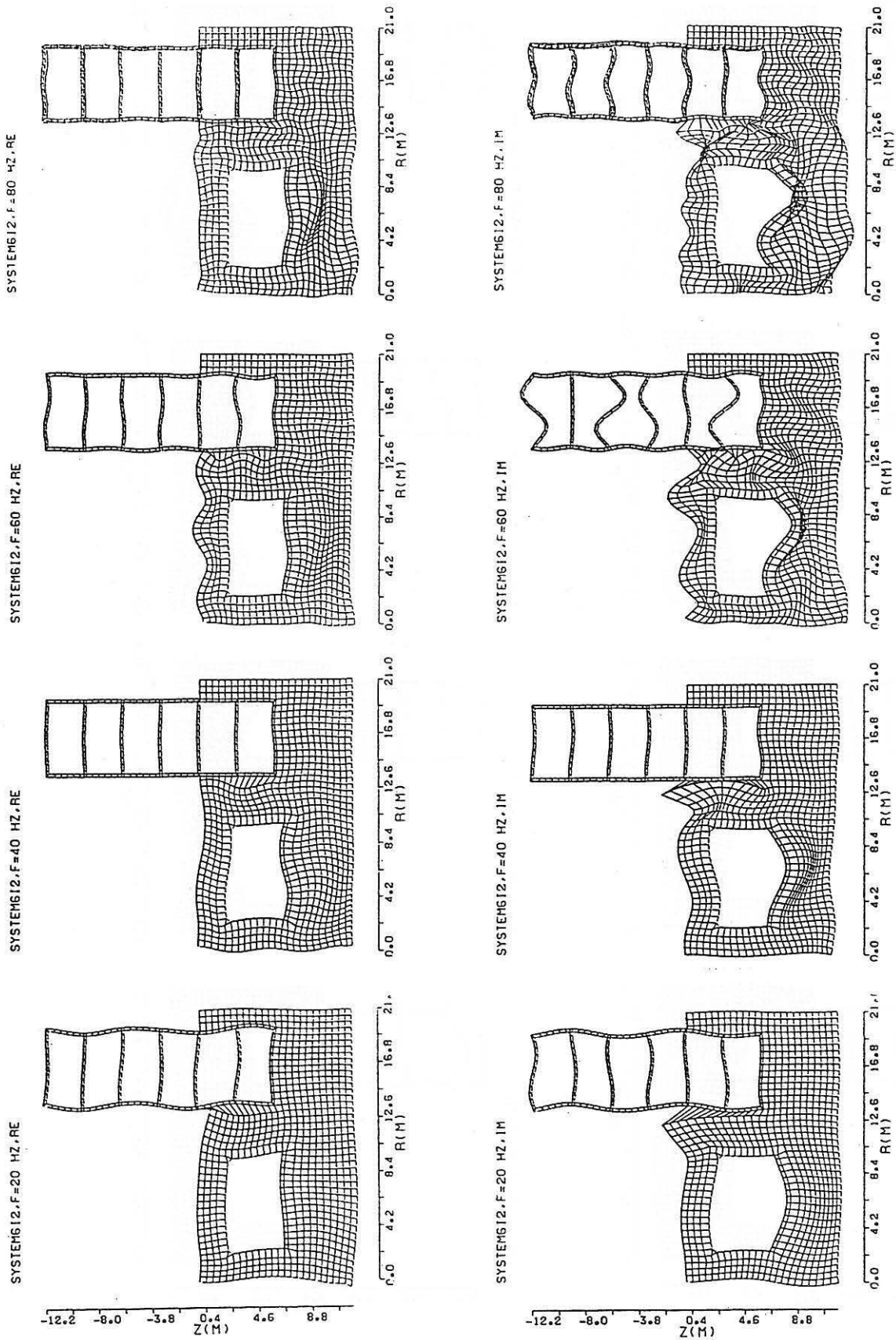


Bild 4.9  
Schwingungsbilder der Abschirmmaßnahme „Lichtschächte“

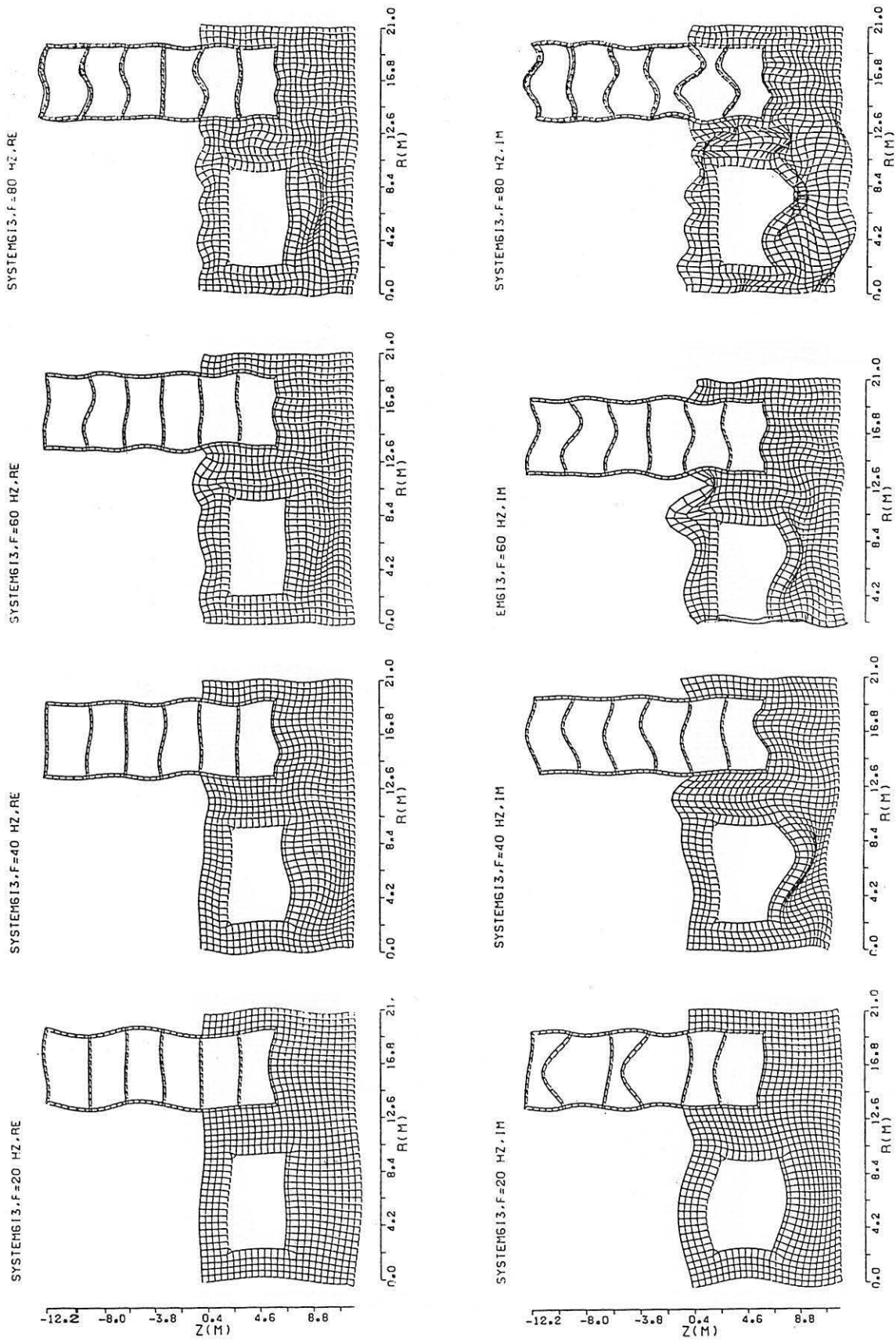


Bild 4.10  
 Schwingungsbilder der Abschirmmaßnahme „starre Fundamentplatte“

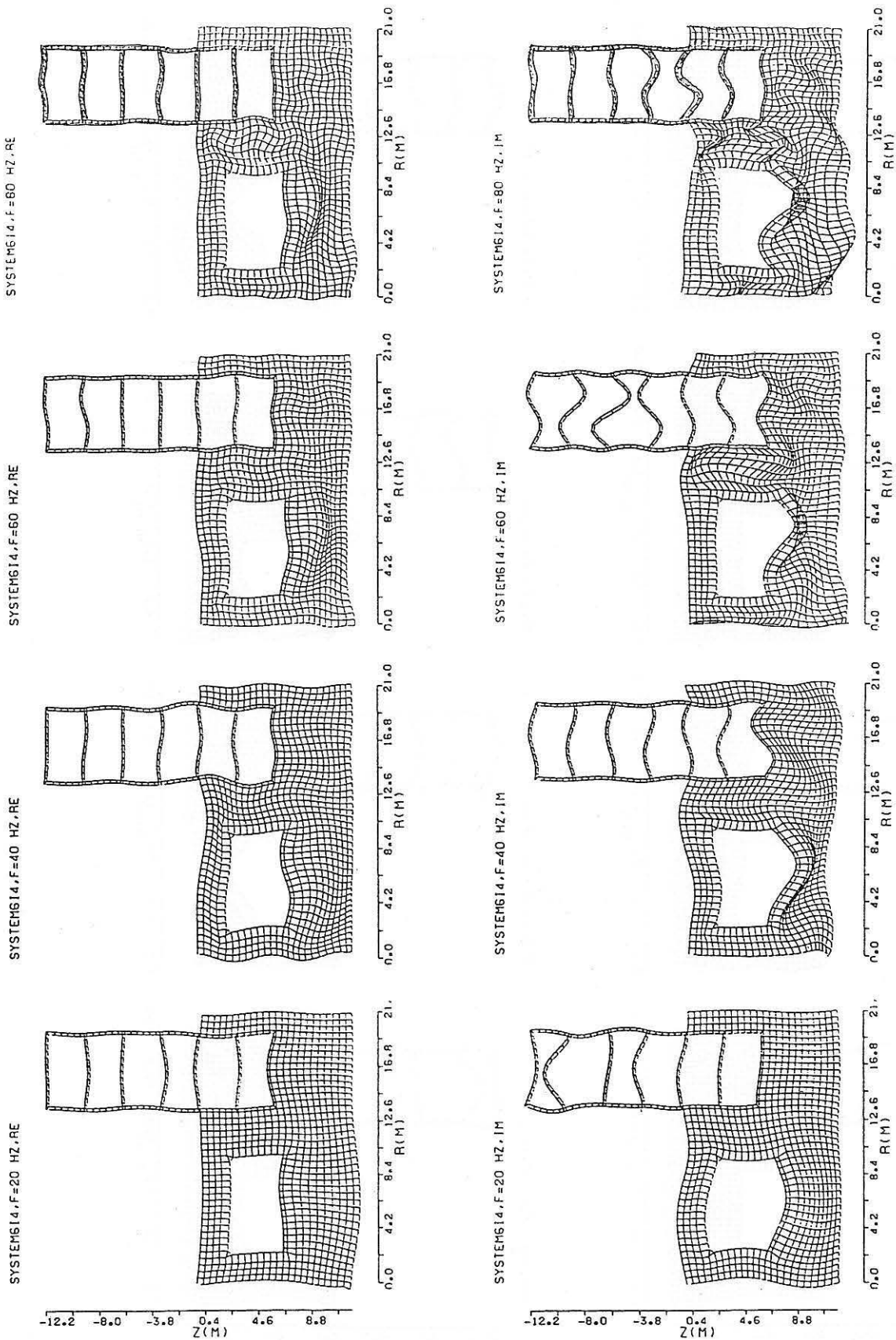


Bild 4.11  
Schwingungsbilder der Abschirmmaßnahme „Betonplatte auf Bodenoberfläche“

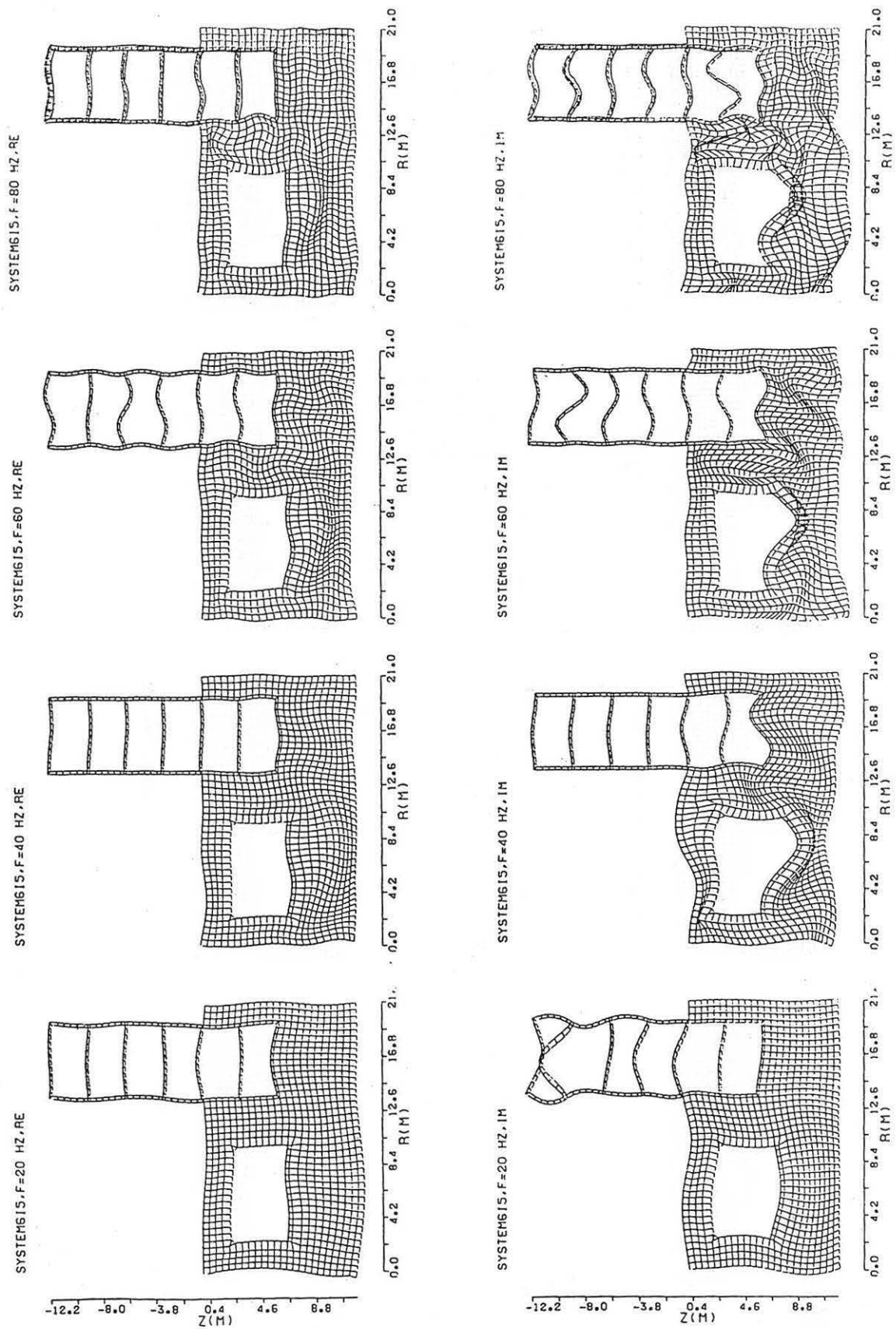


Bild 4.12 Schwingungsbilder der Abschirmmaßnahme „schwere Betonplatte auf Bodenoberfläche“



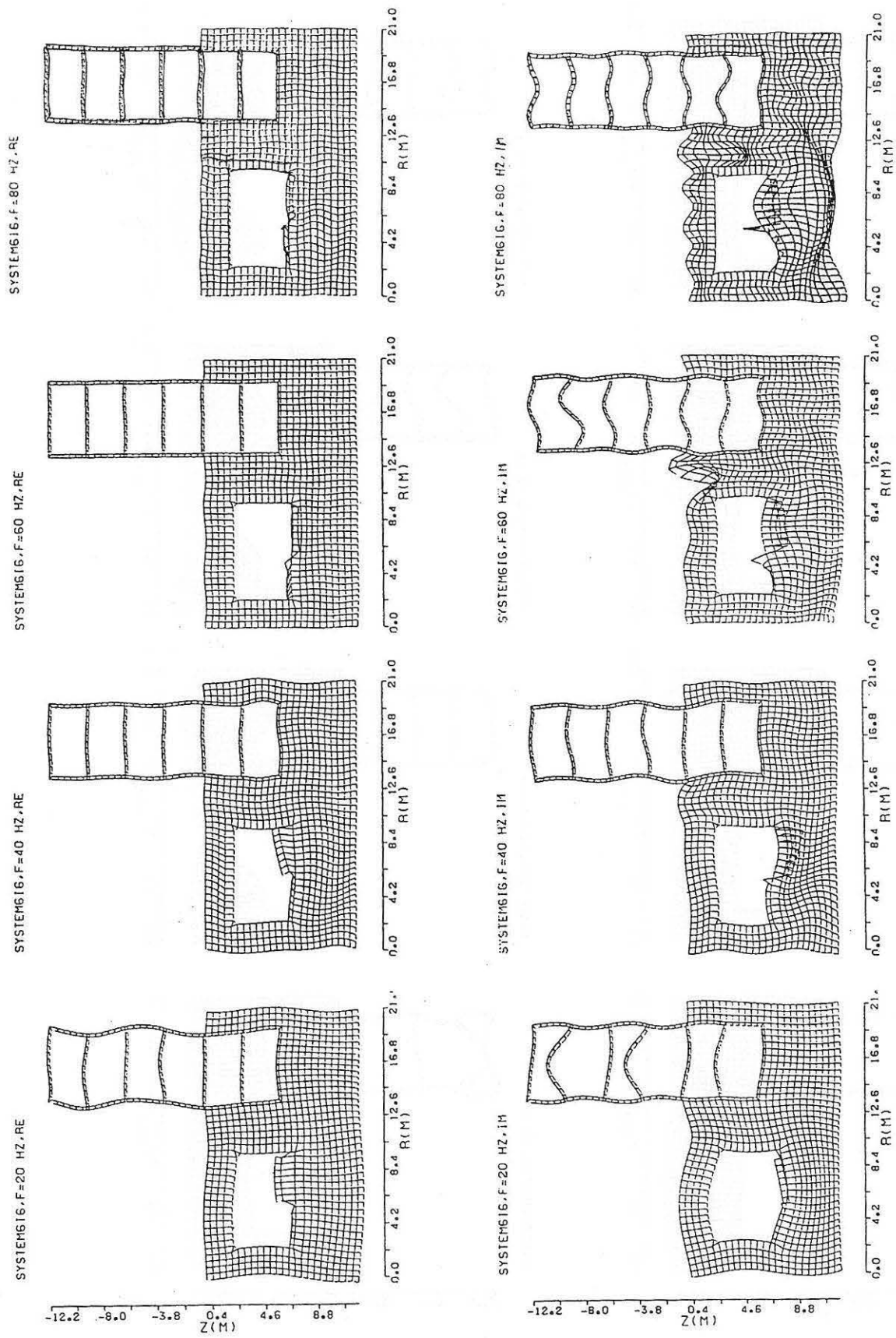


Bild 4.13  
Schwingungsbilder der Abschirmmaßnahme „Feder-Masse System“

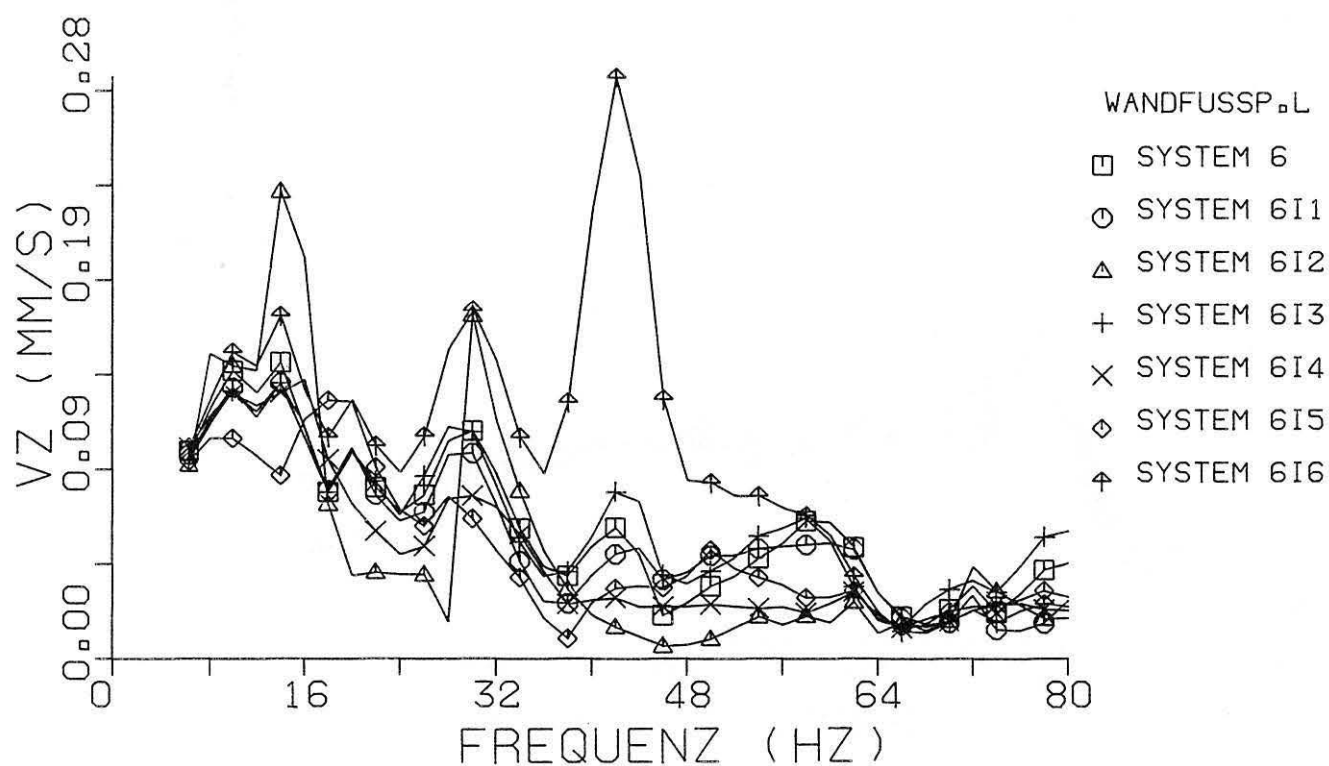
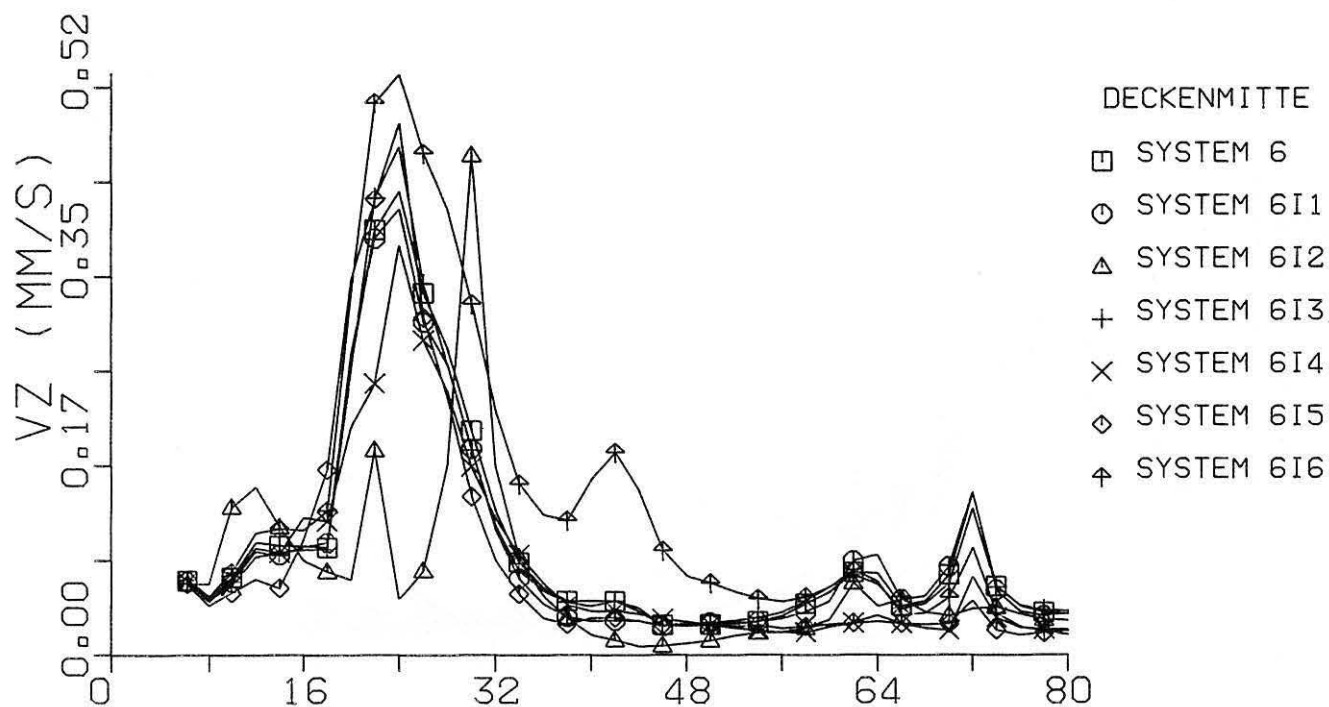


Bild 4.14  
 Vergleich der Spektren an Deckenmitte und Wandfußpunkt für die untersuchte Abschirmmaßnahmen  
 (Systeme s. Tabelle 3.1)

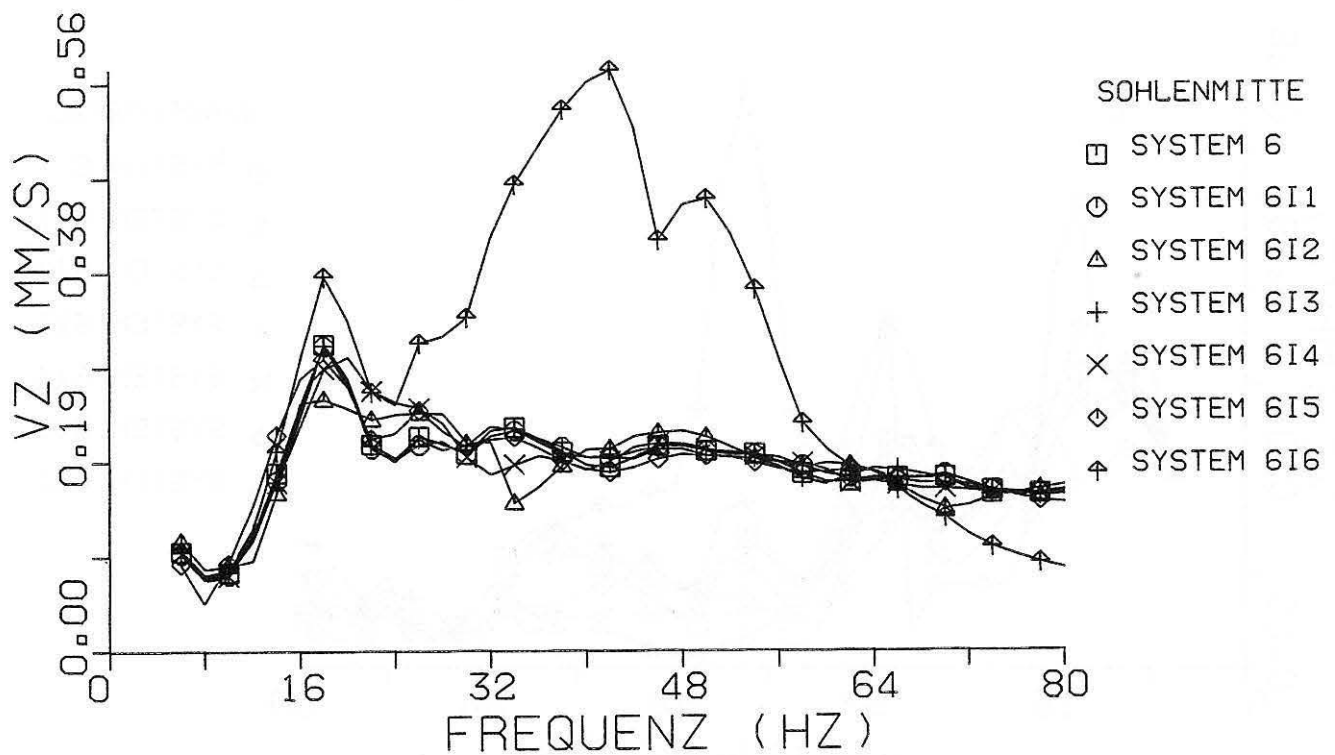
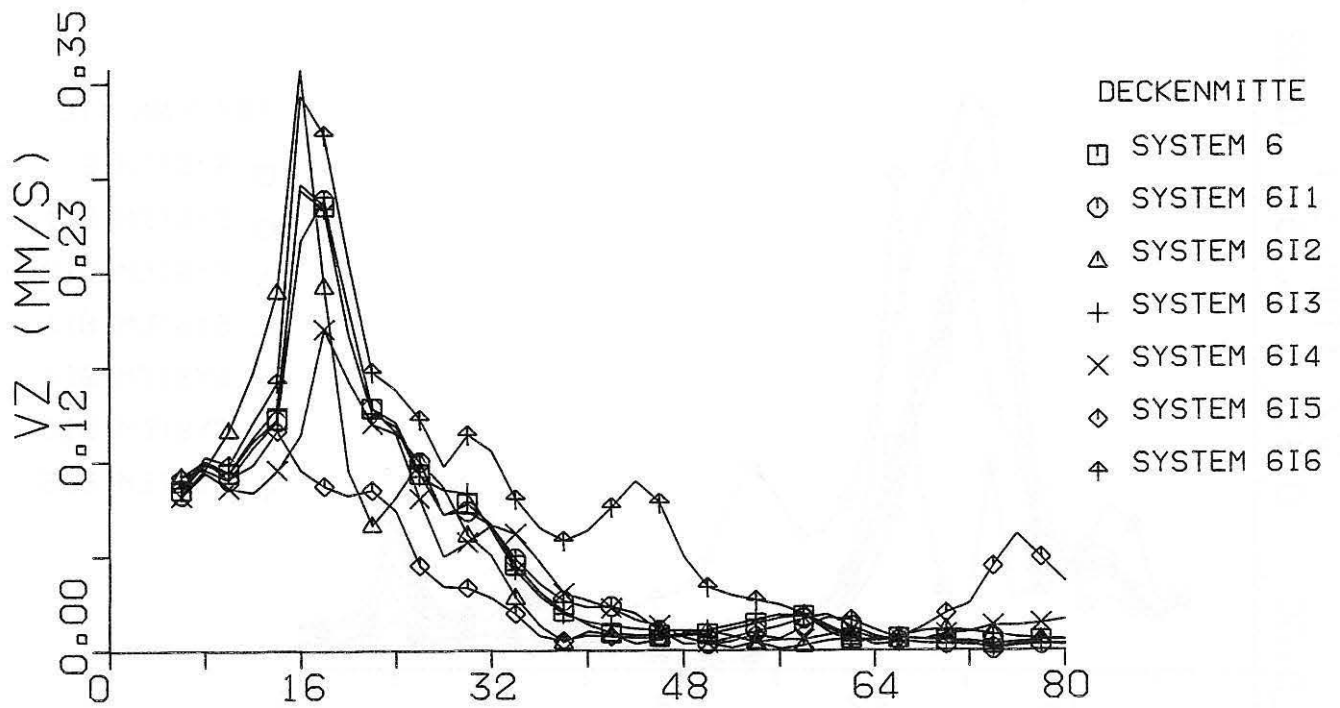


Bild 4.15  
 Vergleich der Spektren des Tunnels für die untersuchten Abschirmmaßnahmen (Systeme s. Tabelle 3.1)

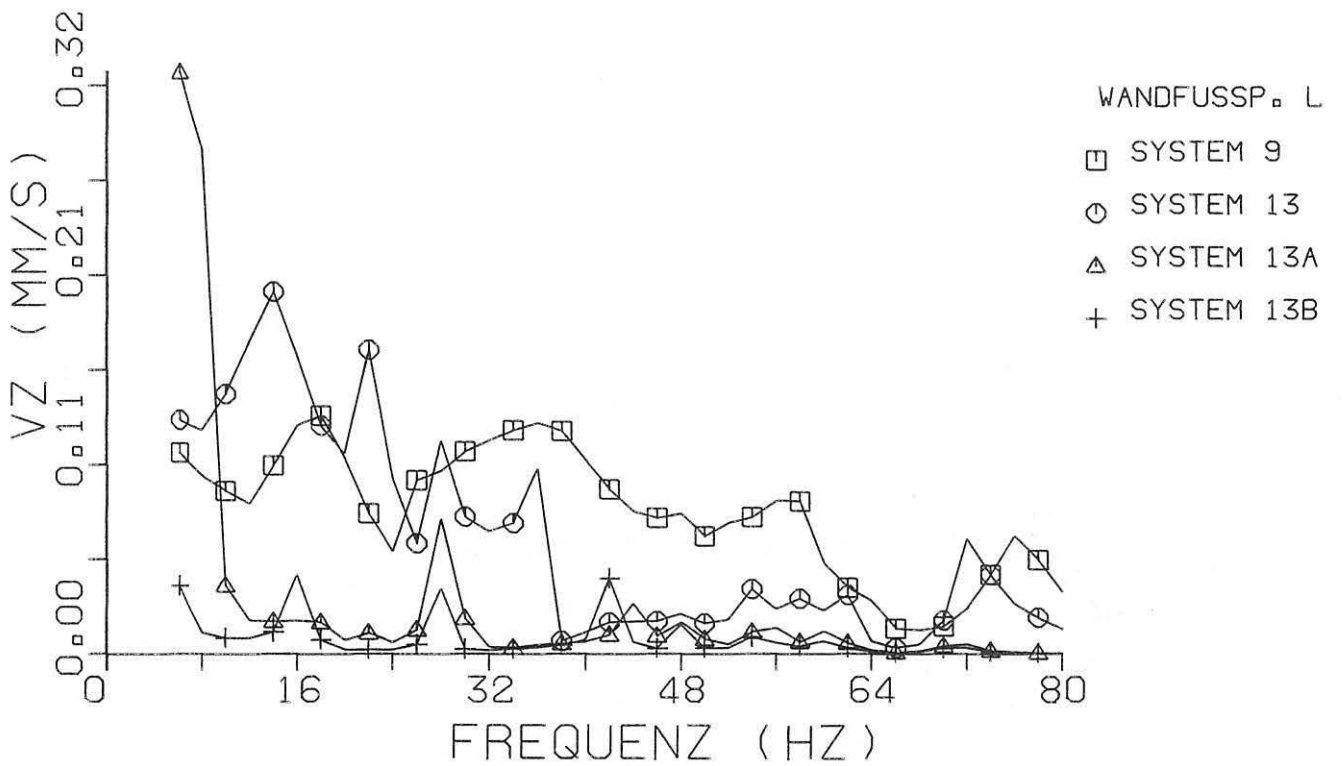
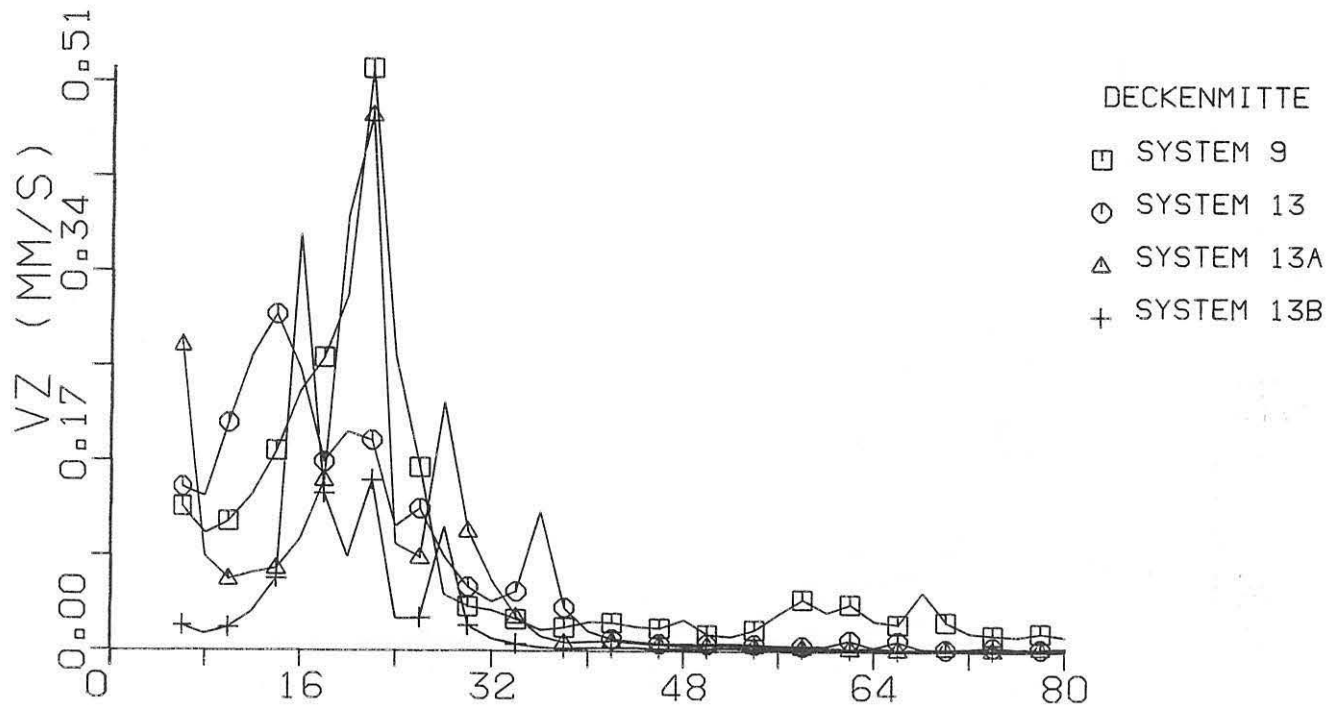


Bild 4.16  
 Vergleich der Spektren von Deckenmitte und Wandfußpunkt für verschiedene Gebäudeabstimmfrequenzen  
 (Systeme s. Tabelle 3.1)

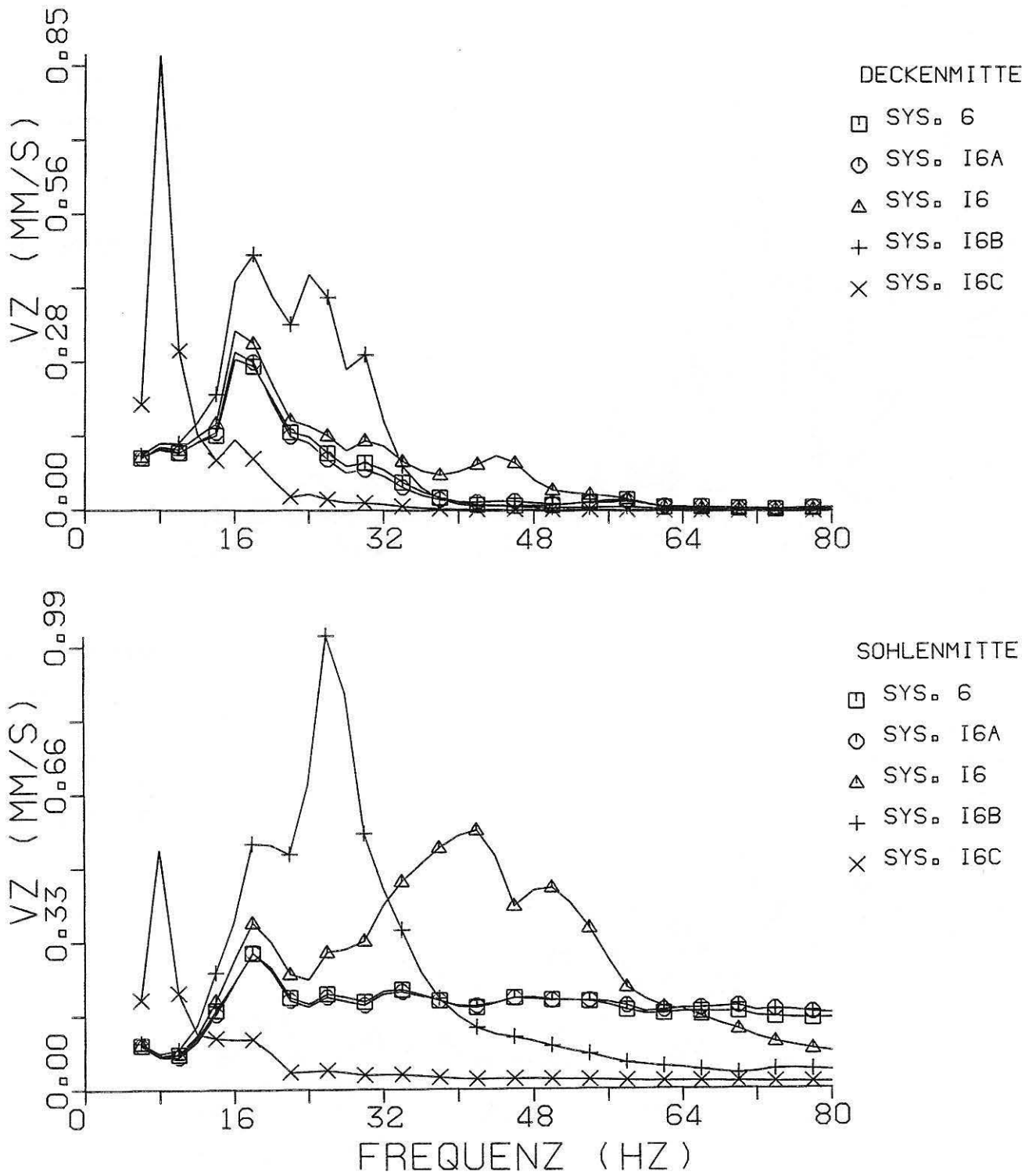
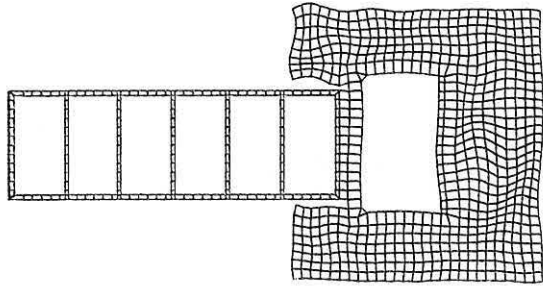
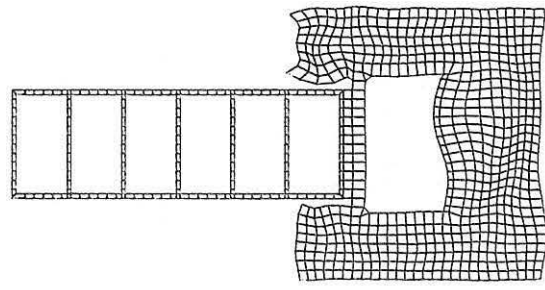


Bild 4.17  
 Vergleich der Spektren des Tunnels für verschiedene Gebäudeabstimmfrequenzen (Systeme s. Tabelle 3.1)

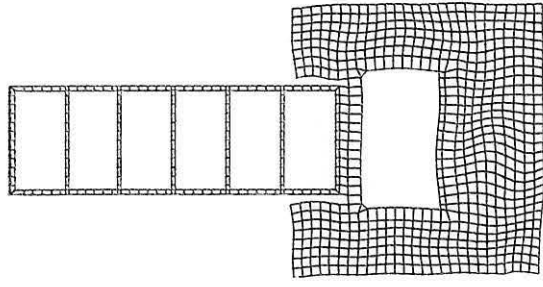
SYSTEM 13, F=80 HZ, RE



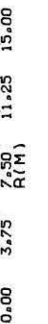
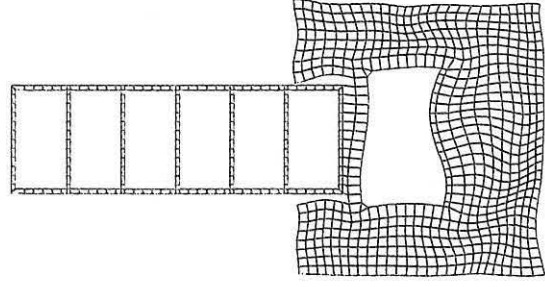
SYSTEM 13, F=80 HZ, IM



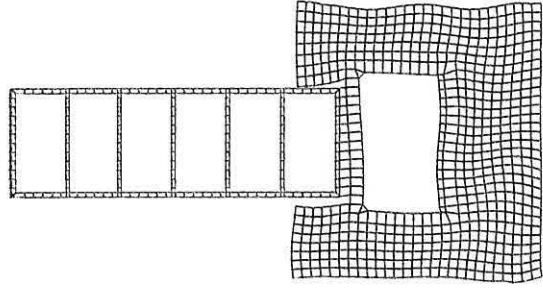
SYSTEM 13, F=60 HZ, RE



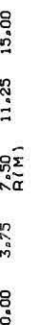
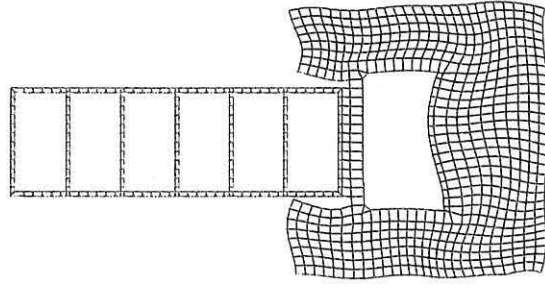
SYSTEM 13, F=60 HZ, IM



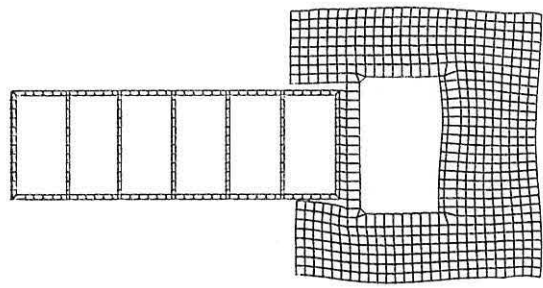
SYSTEM 13, F=40 HZ, RE



SYSTEM 13, F=40 HZ, IM



SYSTEM 13, F=20 HZ, RE



SYSTEM 13, F=20 HZ, IM

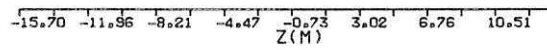
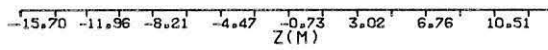
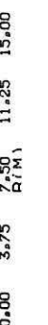
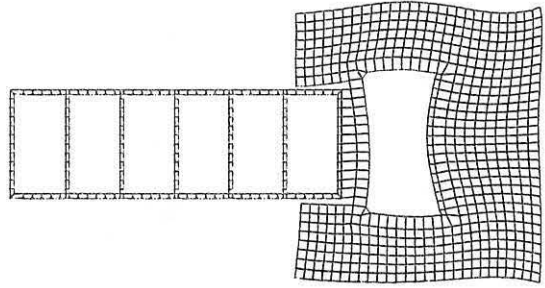


Bild 4.18

Schwingungsbilder des Systems 13 mit Lichtschächten neben dem Gebäude



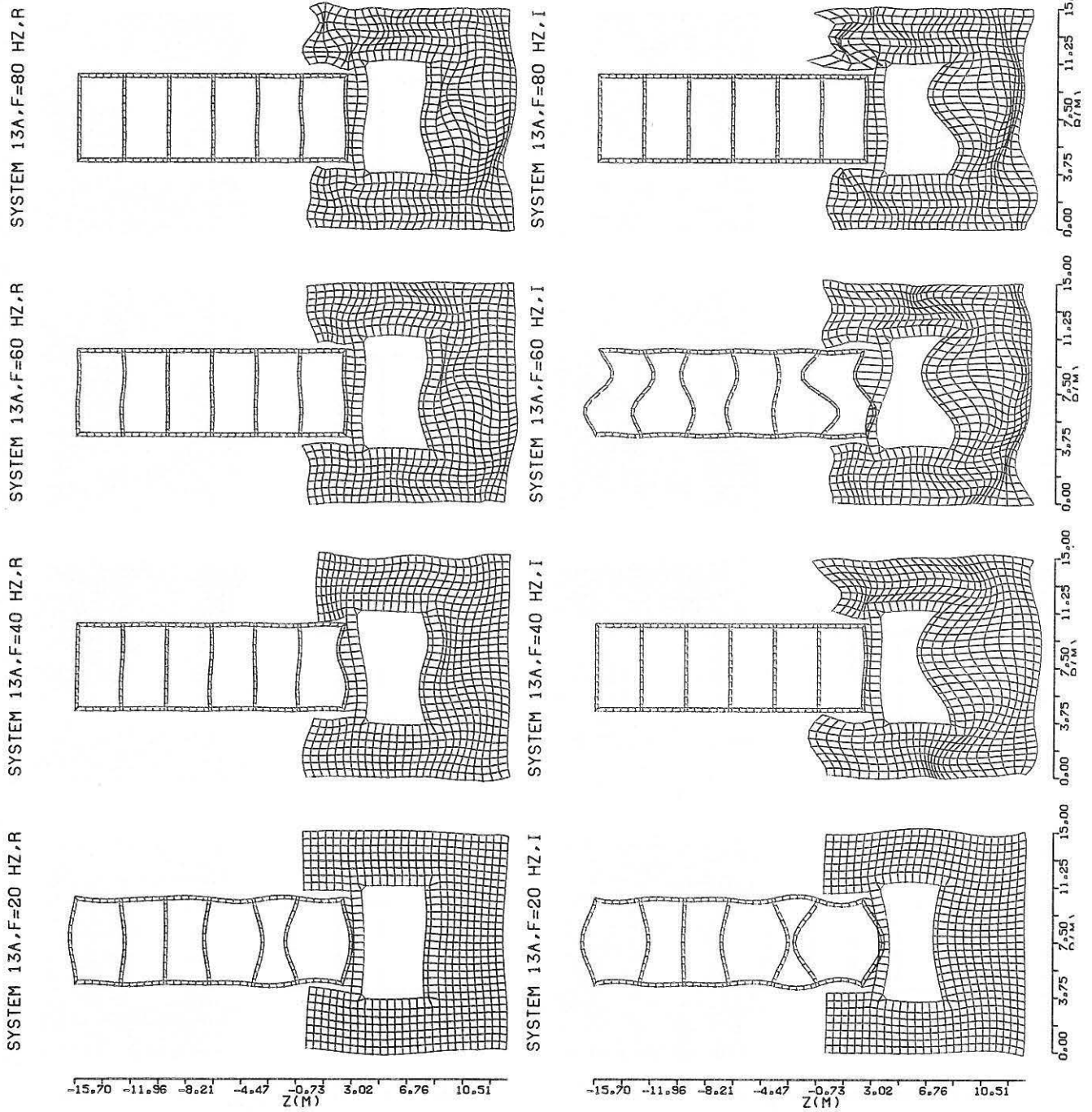


Bild 4.19  
Schwingungsbilder des Systems 13, mit Lichtschächten und Gebäudeabstimmfrequenz  $f=5$  Hz

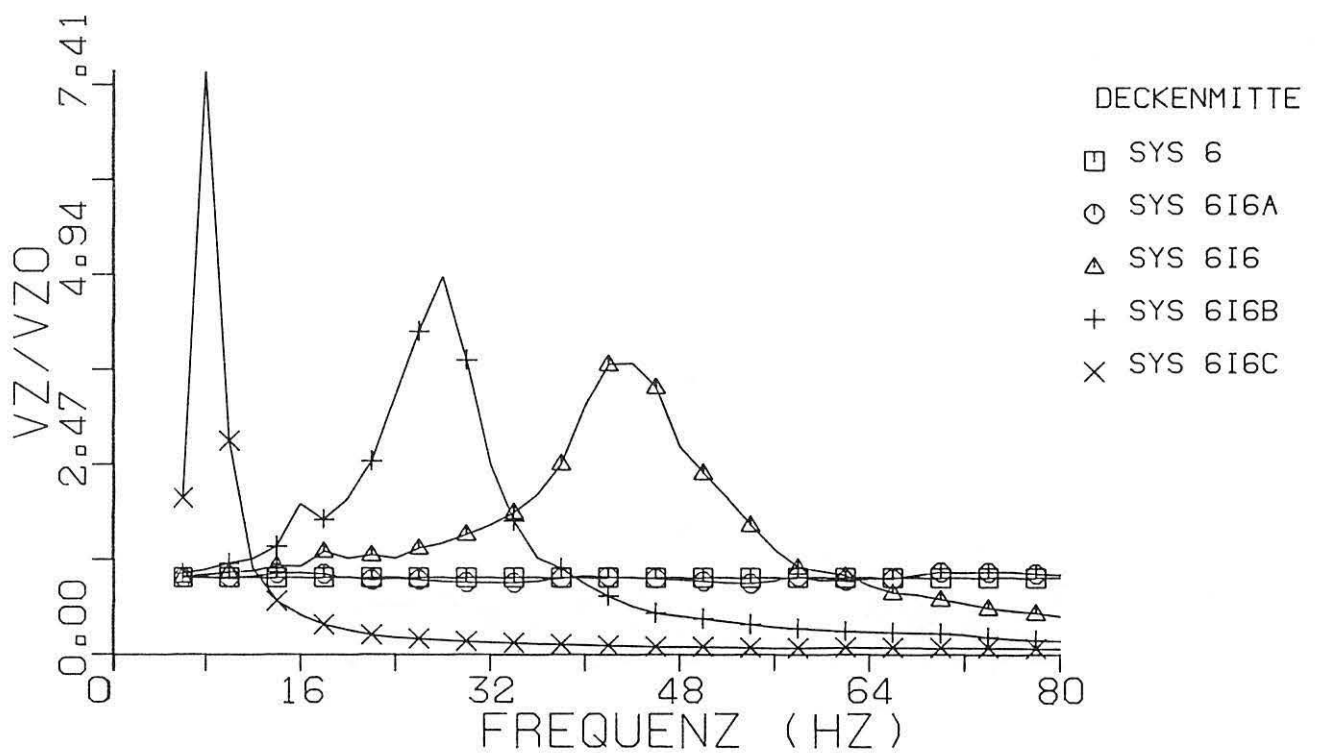
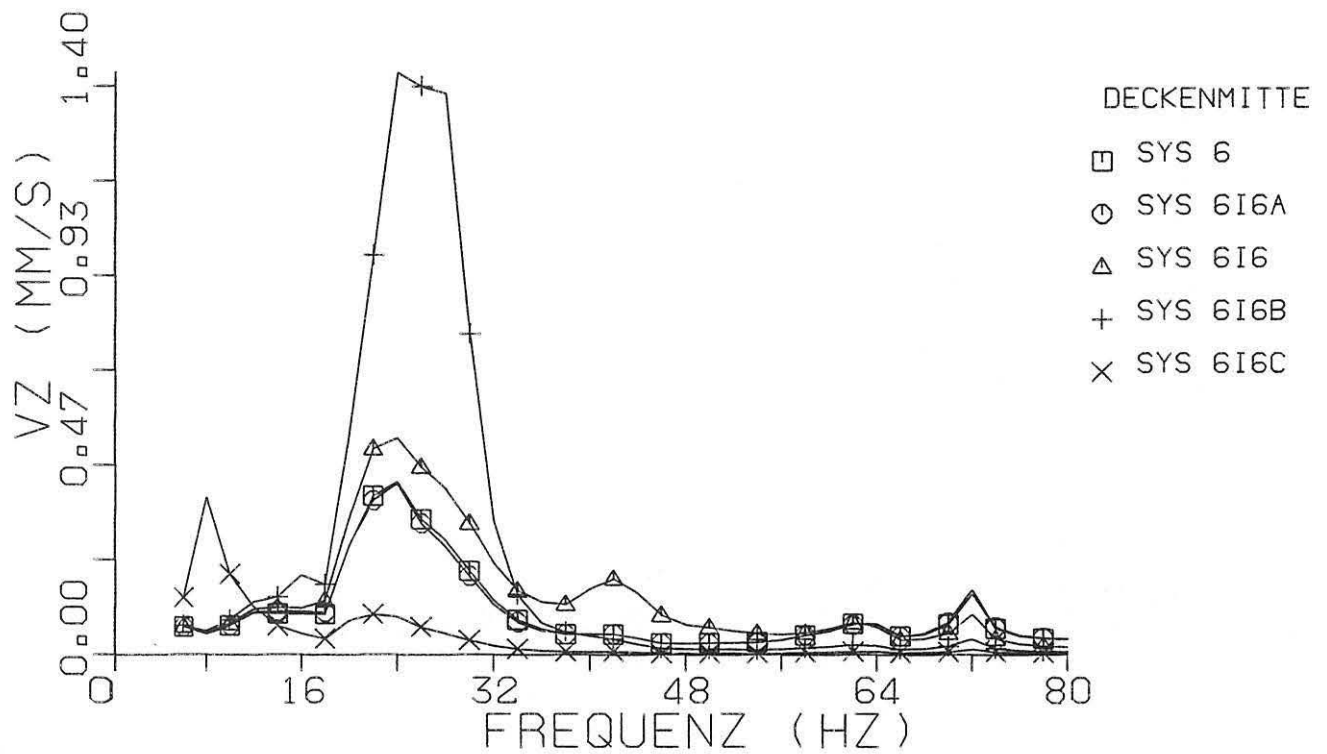


Bild 4.20  
 Vergleich der Spektren der Wandfußpunkte bei zentralem Gebäude bei verschiedenen Abschirmmaßnahmen  
 (Systeme s. Tabelle 3.1)

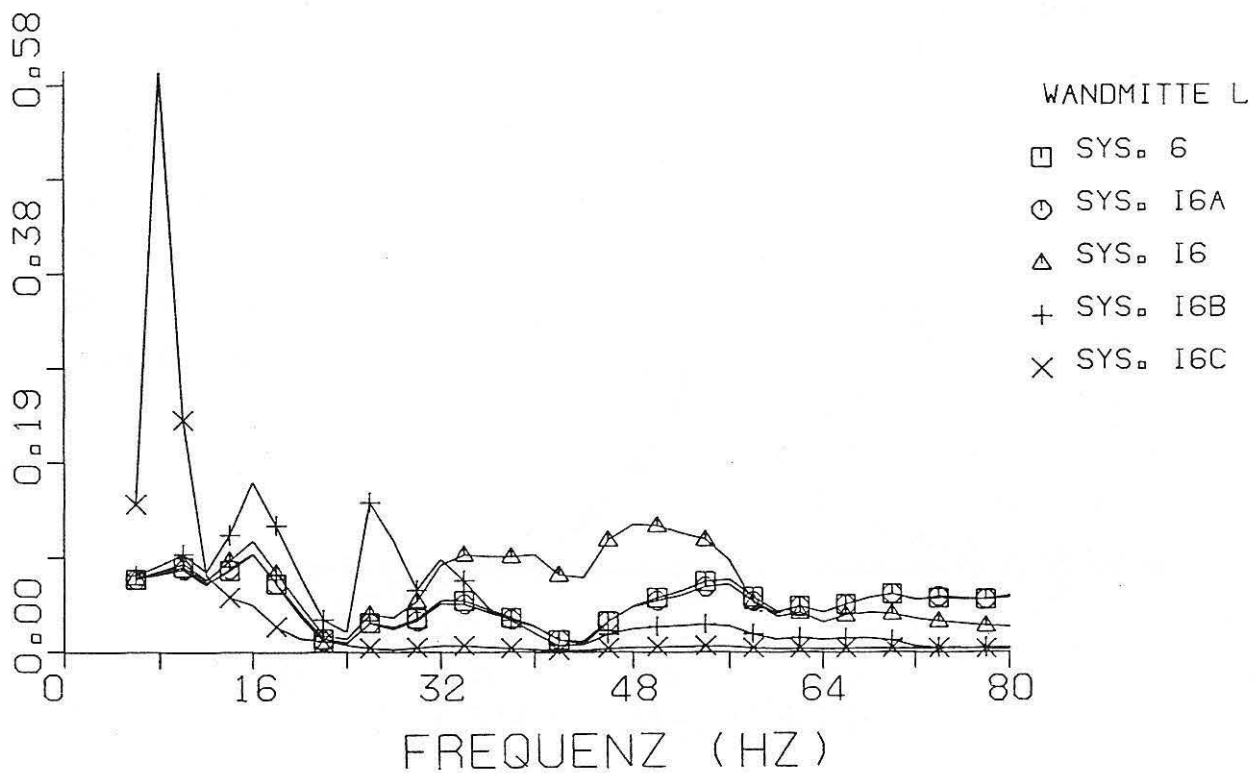
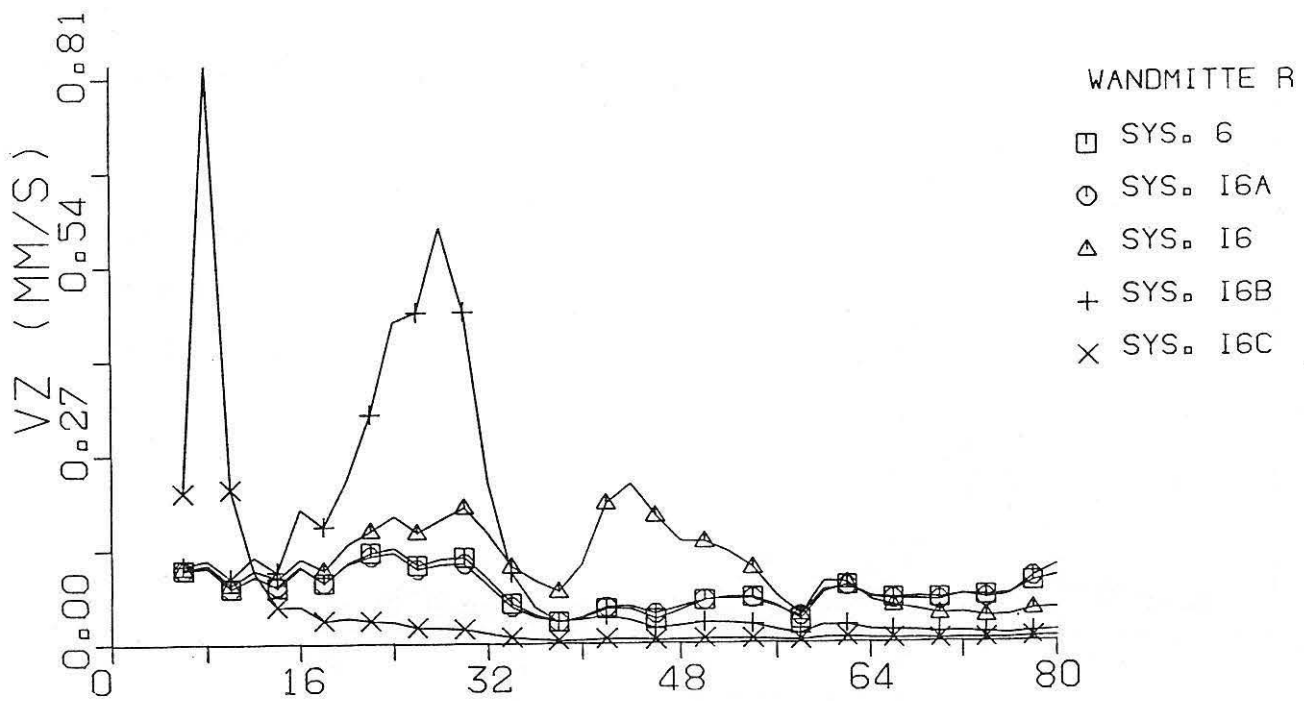


Bild 4.21  
 Vergleich der Spektren der Decken bei zentralem Gebäude bei verschiedenen Abschirmmaßnahmen  
 (Systeme s. Tabelle 3.1)

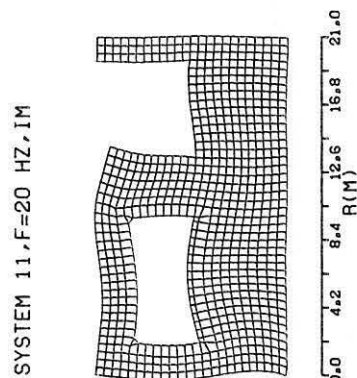
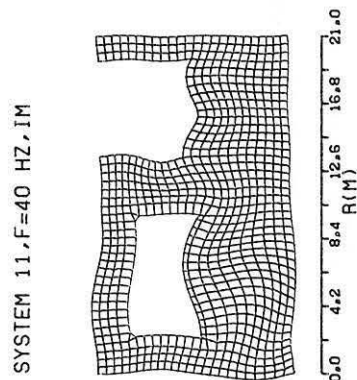
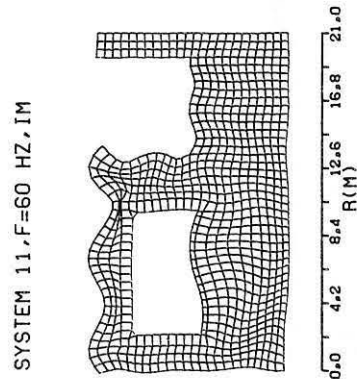
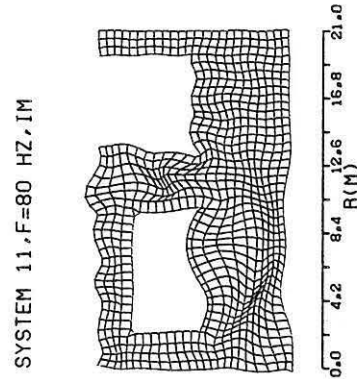
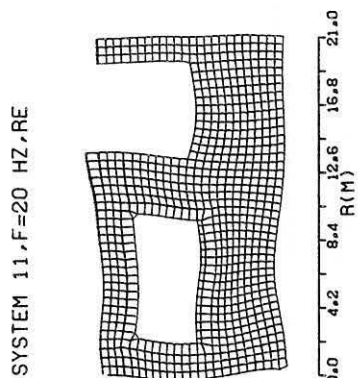
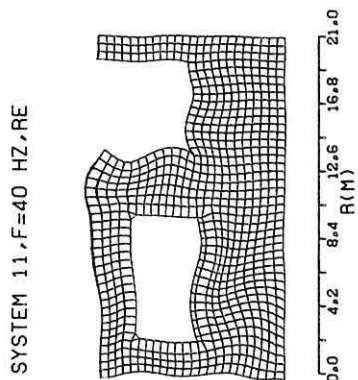
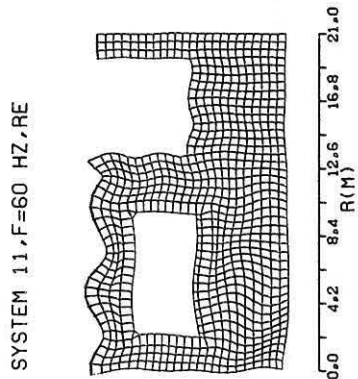
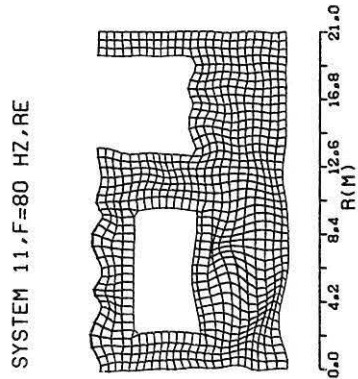


Bild 4.22  
Schwingungsbilder des Systems 11, Bauphase 1, Bodeneinfluß

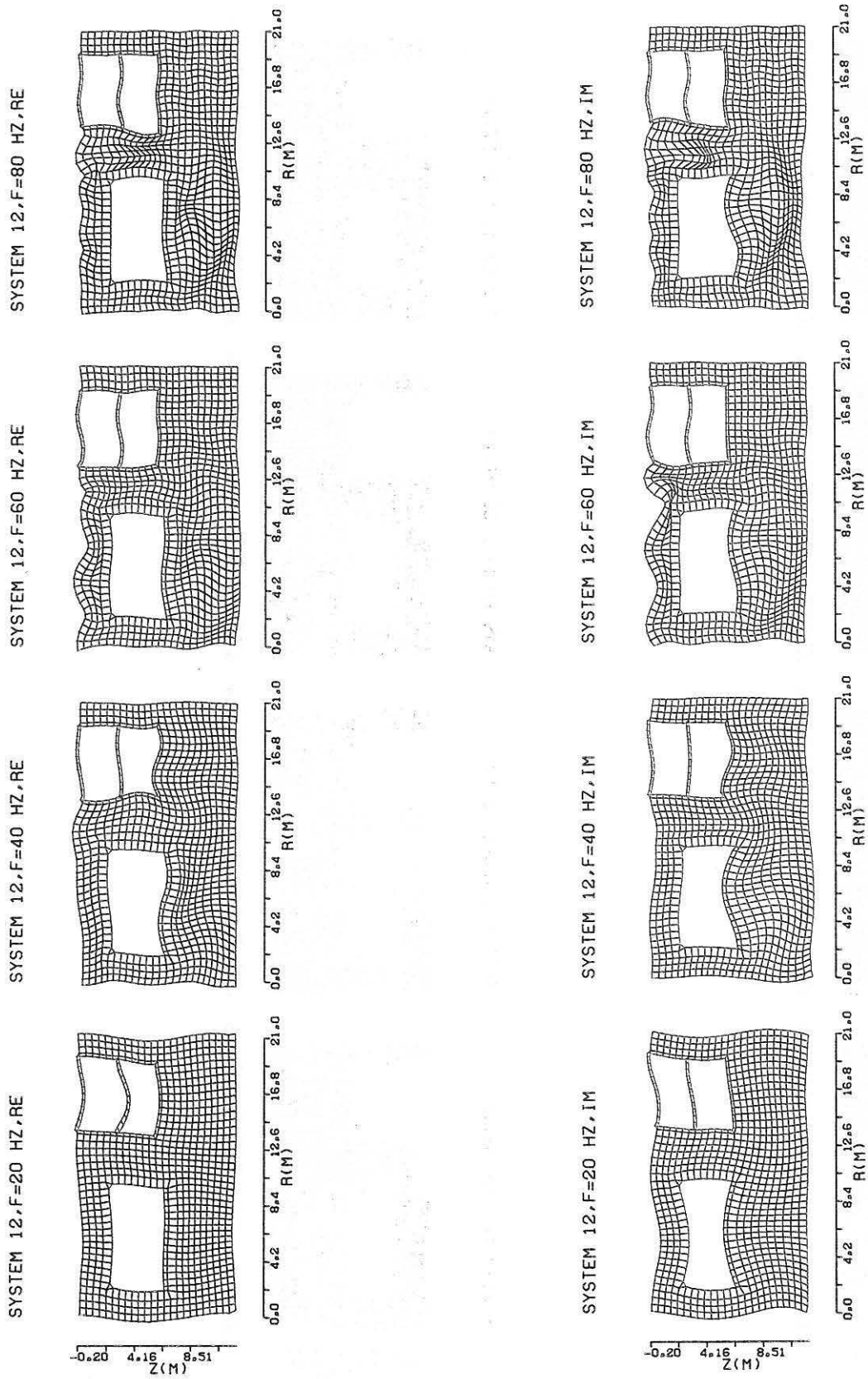


Bild 4.23  
Schwingungsbilder des Systems 12, Bauphase 2, Keller und Erdgeschoß dargestellt

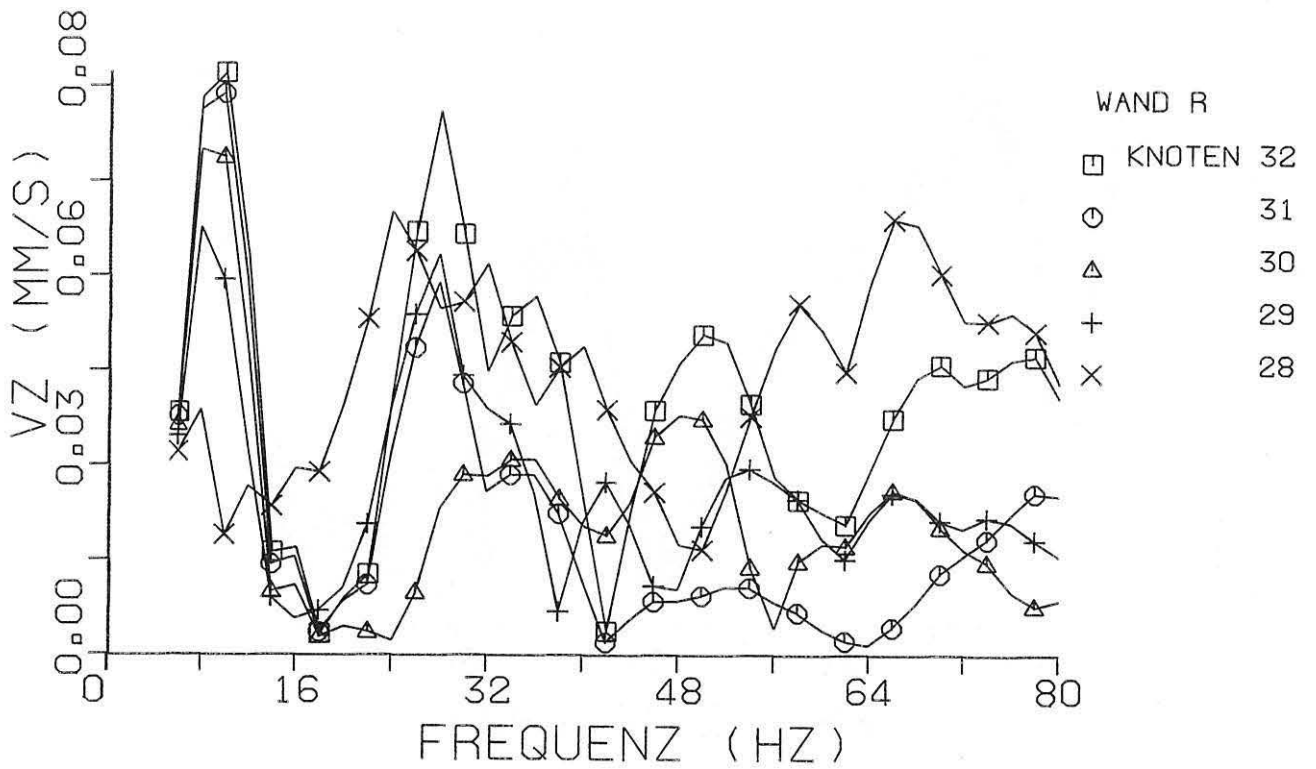
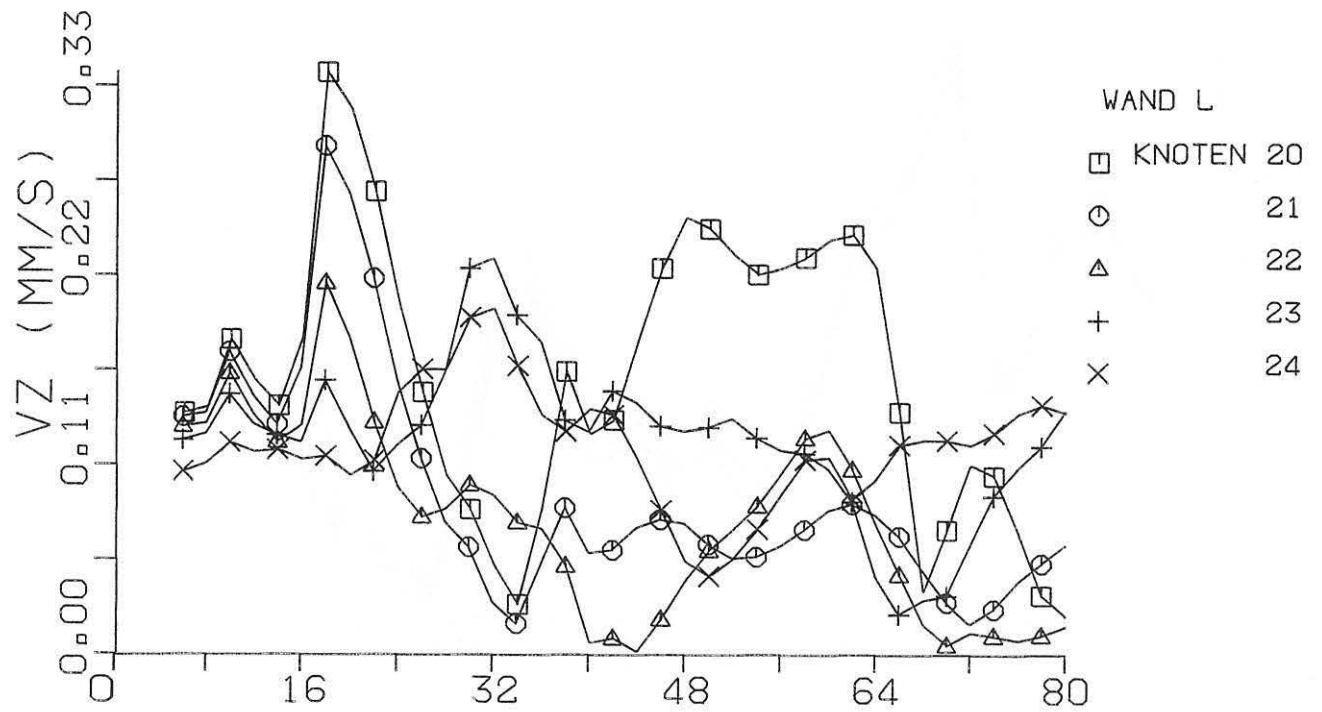


Bild 4.24

Spektren des Bodens auf der linken bzw. rechten Baugrubenseite, Bauphase I

Knotenlage in Z-Richtung: K 20, K 32 in 0,0 m (Bodenoberfläche)

K 21, K 31 in 1,5 m

K 22, K 30 in 3,0 m

K 23, K 29 in 4,5 m

K 24, K 28 in 6,0 m



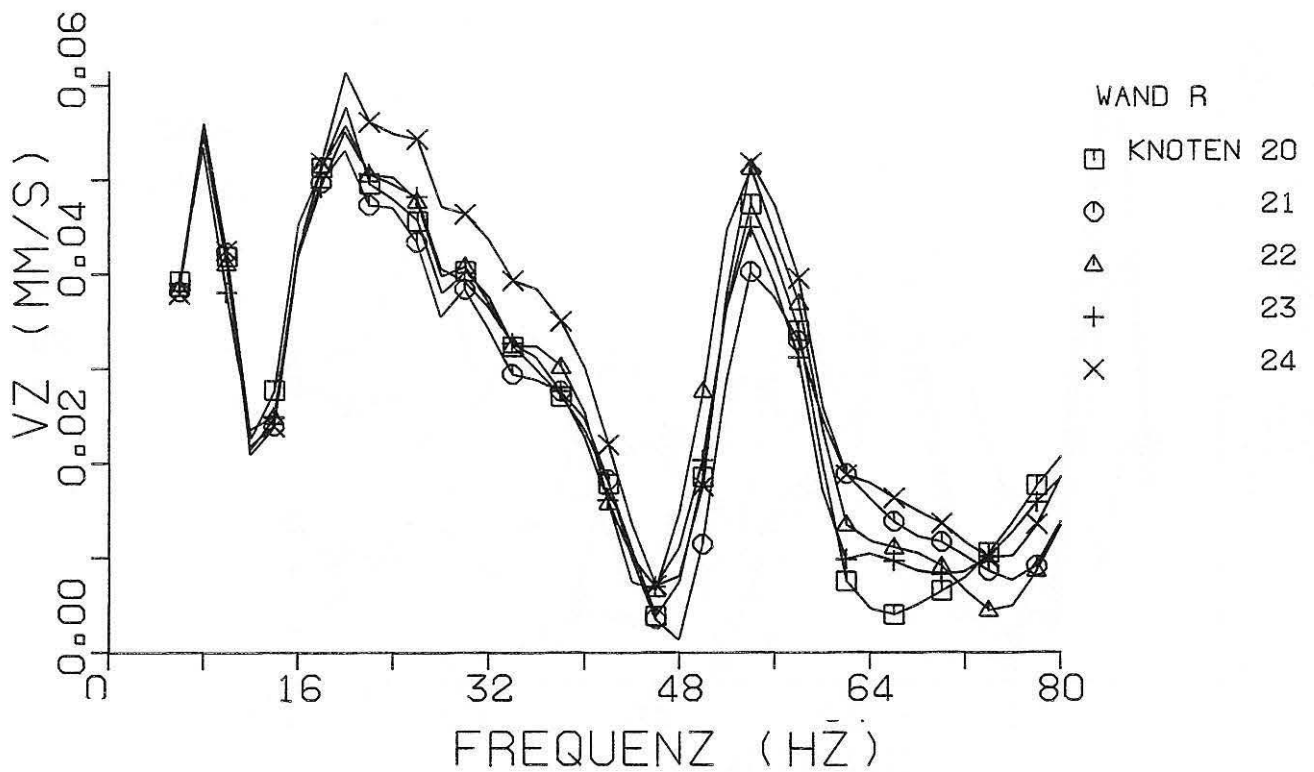
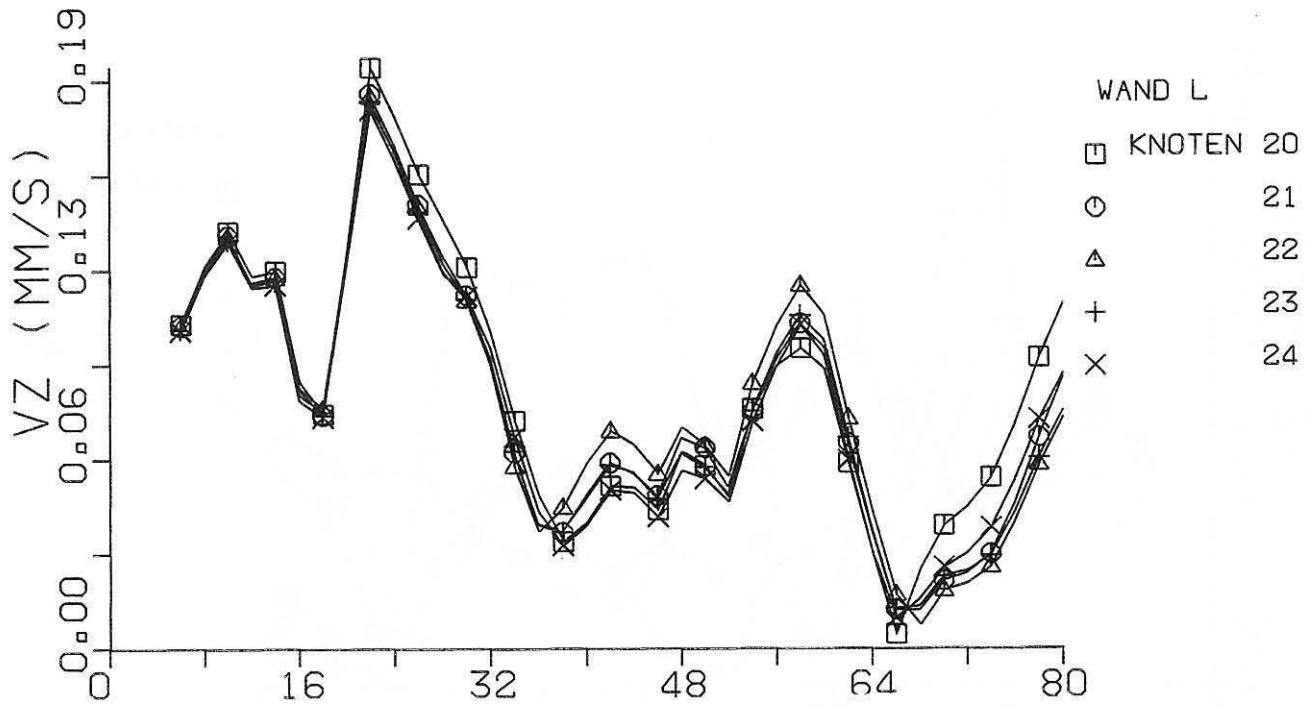


Bild 4.25  
 Spektren der linken bzw. rechten Gebäudewand, Bauphase 2  
 Knotenlage in Z-Richtung: K 20 in 0,0 m (Bodenoberfläche)  
 K 21 in 1,5 m  
 K 22 in 3,0 m  
 K 23 in 4,5 m  
 K 24 in 6,0 m

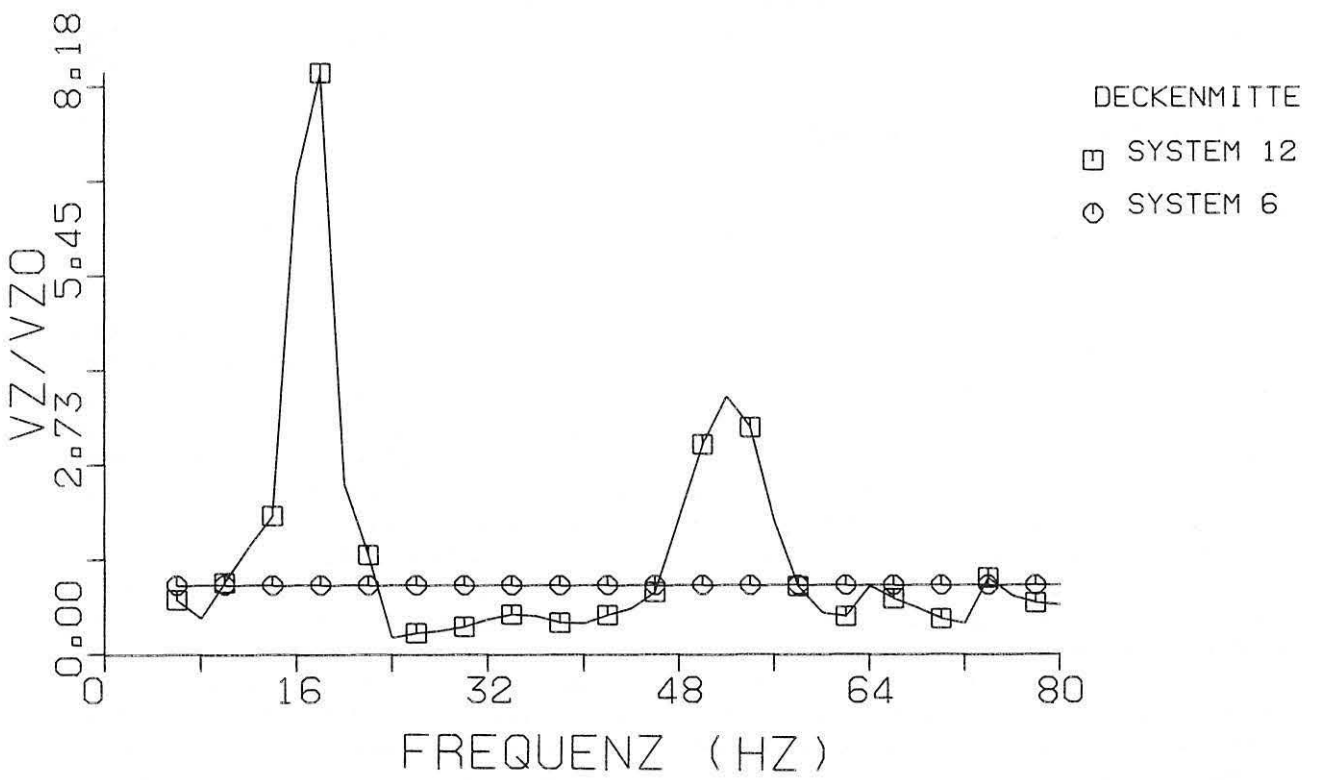
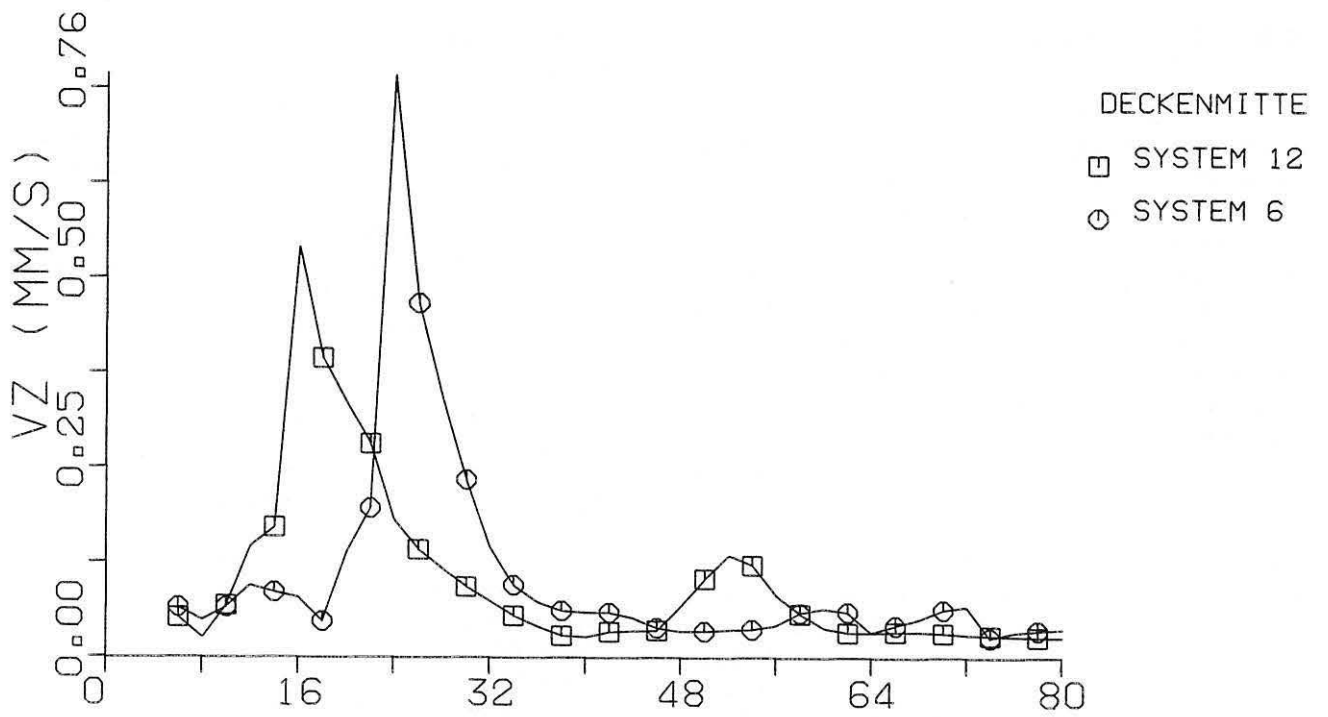


Bild 4.26  
 Vergleich der Spektren der Decke zwischen Bauphase 2 und Bauphase 3

# 5 MESSUNGEN

## 5.1 Allgemeines

Die oben beschriebenen theoretischen Untersuchungen sollen durch Messungen begleitet und überprüft werden. Für die Messungen wurden zwei unterschiedliche Bauwerke ausgewählt. Das Meßziel beim ersten ausgewählten Bauwerk, dem Technischen Zentrum der Sparkasse Berlin war, die Veränderung des Wechselwirkungsverhalten zwischen Untergrund und Bauwerk im Zuge der Erstellung eines Bauwerkes schrittweise zu erfassen. Durch diese Messungen sollten auch die theoretischen Erkenntnisse hinsichtlich der Verteilung der Schwingungsgrößen über die Gebäudehöhe sowie die Minderwirkung eines steifen, schweren Kellergeschoßes überprüft werden.

Das zweite vollständig ausgemessene Bauwerk, die Paul Löbe Oberschule ist ein Beispiel für ein sehr leichtes, sehr schwingungsfähiges Bauwerk. Neben der Ermittlung der Schwingungsübertragung zwischen U-Bahn-Tunnel und Bauwerk bestand hier ein wesentliches Meßziel darin, das Eigenschwingungsverhalten sowie die oben im theoretischen Teil beschriebene Koppelung zwischen Wand- und Deckenresonanzen zu untersuchen.

## 5.2 Beschreibung der Messobjekte

Im folgenden, sollen die beiden ausgewählten Meßobjekte, die Paul Löbe Oberschule und das Technische Zentrum der Sparkasse Berlin hinsichtlich ihrer baulichen Gegebenheiten genauer beschrieben werden.

### 5.2.1 Paul Löbe Oberschule

Die Paul Löbe Oberschule liegt an der Lindauer Allee in Berlin-Reinikendorf, etwa 38 m von der U-Bahn-Linie 8 entfernt. Es handelt sich um ein vier-geschoßiges, nicht unterkellertes Schulgebäude, dessen Grundfläche ca. 35 x 15 m beträgt (siehe Bild 5.1). Das gesamte Gebäude wurde mit Ausnahme der Fundamente in Stahlbetonfertigteilen erstellt. Die Decken sind kreuzweise gespannte Rippendecken und liegen auf Unterzügen und Wänden auf. Die Wände stehen auf Banketten und die Stützen sind Pendelstützen, die auf Einzelfundamenten aufsetzen. Zur Aufnahme der Windkräfte (Aussteifung) werden die Giebelwände sowie die Treppenhauswände herangezogen. Der anstehende Boden unter dem Gebäude ist Mittel- bis Feinsand, der in diesem Bereich eine Mächtigkeit von mehr als 10 m hat. Das Grundwasser steht 2 m unter Geländeoberfläche an. Die Gebäudeabmessungen können der nachfolgenden Tabelle 5.1 entnommen werden.

Bei dem Tunnelbauwerk handelt es sich um einen rechteckigen Tunnelquerschnitt mit einer Mittelstütze, der im

Zuge der Erweiterung der Linie 8 zwischen den U-Bahnhöfen Paracelus Bad und Residenzstraße (Streckenkilometer 12.5 und 12.6) erstellt wurde. Die Mittelstützen haben in Längsrichtung eine Breite von 40 cm und liegen im Abstand 1.60 m voneinander entfernt. Der Grundwasserspiegel liegt bei 1,5 m unter Oberkante Gelände, so daß sich der ganze Tunnelquerschnitt im Grundwasser befindet. Bild 5.1 zeigt einen Querschnitt des Tunnels. Aus diesem Bild können auch die weiteren Abmessungen entnommen werden.

*Tabelle 5.1  
Geometrie und Materialkennwerte des Meßobjektes Paul Löbe Oberschule*

|                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| <b>Länge</b>                  | <b>34,80 m</b>             |
| <b>Breite</b>                 | <b>14,68 m</b>             |
| <b>Höhe</b>                   | <b>15,03 m</b>             |
| <b>Stockwerkshöhe</b>         | <b>3,66 m</b>              |
| <b>Deckenlänge</b>            | <b>8,27 m</b>              |
| <b>Deckenbreite</b>           | <b>6,80 m</b>              |
| <b>Deckendicke</b>            | <b>0,10 m</b>              |
| <b>Steghöhe (Rippendecke)</b> | <b>0,48 m</b>              |
| <b>Deckeneigengewicht</b>     | <b>5,35 kN/m</b>           |
| <b>Baustoffe</b>              |                            |
| <b>Für Decken und Wände:</b>  | <b>Beton B 300 - B 600</b> |
| <b>Für Fundamente:</b>        | <b>Beton B 225 - B 300</b> |
| <b>Betonstahl:</b>            | <b>I, IIIb, IVb</b>        |

### 5.2.2 Technisches Zentrum der Sparkasse Berlin

Bei dem Bauwerk handelt es sich um den Rohbau des Technischen Zentrums der Sparkasse von Berlin in der Berlinerstraße in Berlin-Wilmersdorf. Das Gebäude umfaßt 4 Obergeschoße, ein Erdgeschoß und ein Keller-geschoß. Es ist in Stahlbetonskelettbau ausgeführt. Die Stützen in den oberen Geschoßen sind Sichtbetonstützen, die in einem Raster von 5.0 x 5.0 m bzw. 5.0 x 7.5 m stehen. Sie sind monolithisch ausgeführt und binden direkt ohne Unterzug oder Pilzausführung in die Deckenplatten (Flachdecke) ein. Quer zu den Stützen im Keller, die als richtungsneutrale Rundstützen mit den Durchmessern 0.6 bzw. 0.45 m ausgeführt wurden, verlaufen flache Unterzüge. Die Treppenhäuser und Fahrstuhl-schächte sind als torsionssteife Kerne ausgeführt, wobei die Wandscheiben bis auf die Grundplatte heruntergeführt sind. Die Außenwände sind auf Banketten gegründet und die Stützen stehen auf Einzelfundamenten. Die Decken der oberen Geschoße und die des Erdgeschoßes wurden als kreuzweise bewehrte Flachdecken in einer Dicke von 0.28 m ausgeführt.

Der U-Bahn-Tunnel der benachbarten Linie 8 besitzt einen rechteckigen Querschnitt. Der Tunnel ist mit einer Stütze, etwa im Verhältnis 2/3 in 2 Fahrbahnen unterteilt. Die Mittelstützen haben in Längsrichtung eine

Breite von 0.7 m und liegen im Abstand von 1.30 m voneinander entfernt. Die Tunneloberkante befindet sich in 6.7 m unter Oberkante Gelände, der Grundwasserspiegel ist in 6.0 m Tiefe, so daß sich der gesamte Tunnelquerschnitt im Grundwasser befindet (Bild 5.2).

## 5.3 Erregerquellen

### 5.3.1 Paul Löbe Oberschule

Zur Schwingungsanregung des Gebäudes wurden 3 verschiedene Mechanismen eingesetzt:

Mittels eines künstlichen Impulses an Decken und Wänden wurden die Eigenfrequenzen und die Dämpfung ermittelt.

Das Übertragungsverhalten zwischen Tunnel und Gebäude wurde mit Hilfe eines im Tunnel installierten Hydropulses ermittelt. Die genaue Spezifikation und weitere Ergebnisse sind in dem Bericht des TÜV/Rheinlands beschrieben. Der TÜV/Rheinland installierte auch den Hydroimpuls im Tunnel und gab uns die Erlaubnis, in dem Schulgebäude während ihrer Versuche mitzumessen. Der Hydropuls besteht aus 2 Zylindern, die die Tunnelsohle und Tunneldecke vertikal in Erregung versetzen. Die maximal mögliche Kraft jedes Zylinders beträgt 100 kN. Die Erregung wurde innerhalb einer Zeitdauer von 10 Sekunden im Frequenzbereich 2 bis 150 Hz durchfahren.

Während den vom TÜV/Rheinland durchgeführten Versuchen wurden die Schwingungen im Gebäude während des Hochfahrens des Hydropulses von 2 auf 150 Hz und auch während des Heruntersweepens von 150 auf 0 Hz mehrfach registriert.

Neben diesen beiden künstlichen Anregungsformen wurden auch die Gebäudeschwingungen durch U-Bahn-Verkehr gemessen. Der U-Bahnzug bestand bei allen Messungen aus einem 4-Wagen-Zug. Die Zuglänge betrug etwa 90 m. Die Fahrgeschwindigkeit der registrierten Fahrten lag zwischen 27 und 52 km/h. Bei den U-Bahnwagen handelte es sich stets um gleichartige Einheiten. Die durch den Zug in das Tunnelbauwerk eingeleitete ortsveränderliche Kraft kann damit näherungsweise als konstant längs der Einleitungsstrecke angesehen werden.

### 5.3.2 Technisches Zentrum

Bei den Messungen am Technischen Zentrum der Sparkasse Berlin ging es im wesentlichen darum, das Verhalten einzelner Bauteile und des Bauwerks während verschiedener Bauphasen zu ermitteln. Deshalb wird hier als einzige Anregungsquelle nur der U-Bahn-Verkehr eingesetzt. Es wurden zwar auch Versuche durchgeführt, Eigenfrequenzen des Bauwerks durch direkte

Impulsbelastung zu ermitteln. Infolge der großen Masse und Steifigkeit des Bauwerks konnte dies jedoch nur mit ungenügendem Erfolg durchgeführt werden. Die Eigenfrequenzen einzelner Stockwerksdecken wurden jedoch auf diese Weise ermittelt.

Die Messungen wurden in verschiedenen Phasen des Baufortschritts vorgenommen. Die erste Messung erfolgte direkt nach den Aushubarbeiten in der Baugrube, die zweite Messung nach Fertigstellung der Kellerschoße und die dritte Messung nach Fertigstellung des gesamten Rohbaus.

Die U-Bahn fuhr bei allen Messungen mit 6 Wagen. Dies entspricht einer Zuglänge von ca. 120 m. Die registrierten Fahrgeschwindigkeiten lagen bei den Messungen der 1. Bauphase zwischen 40 und 56 km/h, bei den der 2. Bauphase zwischen 45 und 55 km/h und bei der 3. Bauphase zwischen 48 und 58 km/h. Die Messung der 1. Bauphase wurde vor Errichtung des Gebäudes vorgenommen, damit hier tatsächlich die Freifeldschwingungen gemessen wurden, die als Anregung des Gebäudes wirken. Um zu kontrollieren, daß die Anregung durch die Züge sich bei den späteren Messungen nicht wesentlich geändert hat, wurde sowohl bei der Messung während der 2. als auch bei der 3. Bauphase ein zusätzlicher Freifeldmeßpunkt als Referenzmeßpunkt installiert.

## 5.4 Meßpunkte

### 5.4.1 Paul Löbe Oberschule

Tabelle 5.2

Bezeichnung, Meßrichtung und Lage der Meßaufnehmer, Paul Löbe Oberschule

| Meßpunkt | Richtung   | Ort                          |
|----------|------------|------------------------------|
| V3D      | vertikal   | 3. Obergeschoß, Deckenmitte  |
| V2D      | vertikal   | 2. Obergeschoß, Deckenmitte  |
| V1D      | vertikal   | 1. Obergeschoß, Deckenmitte  |
| VED      | vertikal   | Erdgeschoß, Deckenmitte      |
| V3W      | vertikal   | 3. Obergeschoß, Wandfußpunkt |
| V2W      | vertikal   | 2. Obergeschoß, Wandfußpunkt |
| V1W      | vertikal   | 1. Obergeschoß, Wandfußpunkt |
| VEW      | vertikal   | Erdgeschoß, Wandfußpunkt     |
| H3W      | horizontal | 3. Obergeschoß, Wandmitte    |
| H2W      | horizontal | 2. Obergeschoß, Wandfußpunkt |
| H1W      | horizontal | 1. Obergeschoß, Wandfußpunkt |
| HEW      | horizontal | Erdgeschoß, Wandfußpunkt     |
| HEW      | horizontal | 3. Obergeschoß, Wandmitte    |
| VFUN     | vertikal   | Fundament                    |
| HFUN     | horizontal | Fundament                    |
| VF3      | vertikal   | Freifeld, 3 m vor Gebäude    |
| VF10     | vertikal   | Freifeld, 10 m vor Gebäude   |

Bei allen Anregungen und Messungen wurden Aufnehmer an insgesamt 16 Meßpunkten installiert, die während der Gesamtdauer der Messungen an ihren Standorten verblieben. Bei den Messungen unter Impuls- und Hydropulsbelastung wurden an 6 Messpunkten und bei der Messung der U-Bahnerschütterungen an 5 Meßpunkten die horizontale Komponente der Schwinggeschwindigkeit gemessen, während an den restlichen Meßpunkten ausschließlich die vertikale Komponente aufgezeichnet wurde. Die horizontalen Meßaufnehmer wurden mit 2-Komponenten-Kleber befestigt. Die vertikalen Aufnehmer im Gebäude wurden auf einem Dreibein befestigt und so unmittelbar auf die Stockwerksdecken gestellt. Zur Anbringung der Aufnehmer im Boden wurden ca. 20 cm lange Spieße verwendet, die in den Boden gedrückt wurden. Die Anordnung der einzelnen Meßpunkte ist den Bildern 5.3 und 5.4 sowie der Tabelle 5.2 zu entnehmen.

### 5.4.2 Technisches Zentrum

Die Lage der einzelnen Meßpunkte in allen Bauphasen ist in den Bildern 5.5 bis 5.9 dargestellt. Bei den Messungen während der 1. Bauphase wurden die Aufnehmer ausschließlich im gewachsenen Erdreich installiert (Bild 5.5). Insgesamt wurden hier 7 vertikale und 1 horizontaler Meßaufnehmer verwendet. Bei den Messungen während der 2. und 3. Bauphase wurden die horizontalen Meßaufnehmer am Bauwerk mit 2-Komponenten Kleber befestigt und die vertikalen Aufnehmer im Gebäude auf einem Dreibein befestigt und aufgestellt. Bei den Messungen während der 2. Bauphase wurden 11 Meßpunkte (Keller 6, Erdgeschoß 4, Freifeld 1) installiert (Bilder 5.6 und 5.7). Im einzelnen waren dies:

Tabelle 5.3  
Bezeichnung, Meßrichtung und Lage der Meßaufnehmer, Technisches Zentrum

|      |             |   |
|------|-------------|---|
| VFF  | vertikal,   | Freifeld, etwa 6 m vom Gebäude entfernt |
| VED  | vertikal,   | Erdgeschoß, Deckenmitte                 |
| VEW  | vertikal,   | Erdgeschoß, Wand vorn                   |
| VES  | vertikal,   | Erdgeschoß, Stütze Nr.1                 |
| VEWS | vertikal,   | Erdgeschoß, Seitenwand                  |
| VKWS | vertikal,   | Kellergeschoß, Seitenwand               |
| HKWV | horizontal, | Kellergeschoß, Wand vorn                |
| VKWV | vertikal,   | Kellergeschoß, Wand vorn                |
| VKS1 | vertikal,   | Kellergeschoß, Stütze Nr.1              |
| VKS2 | vertikal,   | Kellergeschoß, Stütze Nr.2              |
| VKWH | vertikal,   | Kellergeschoß, Wand hinten              |

Bei den Messungen während der 3. Bauphase (Rohbau vollständig erstellt) wurden in jedem Geschoß mindestens 3 Meßgeophone aufgestellt, die die Erschütterungen jeweils am Wandfußpunkt bzw. an Fußpunkten der Fassadenstützen in vertikaler und horizontaler Richtung und an den Deckenmitten registrierten. Zusätzlich wurden im Kellergeschoß und im 1. Obergeschoß Meßpunkte an der mittleren Stütze angebracht, so daß die Erschütte-

rungen insgesamt an 24 Punkten gleichzeitig gemessen wurden (Bilder 5.8 und 5.9). Die Bezeichnung der einzelnen Meßpunkte folgt folgender Konvention:

Das erste Zeichen gibt die Meßrichtung an, mit  
V vertikal,  
H horizontal.

Das zweite Zeichen bezeichnet den Ort, wobei gilt  
F Freifeld,  
E Erdgeschoß,  
K Keller,  
1..4 Geschoß.

Der dritte Buchstabe markiert das Bauteil mit  
D Decke,  
W Wand,  
S Stütze.

Das Vierte Zeichen gibt die Lage des Bauteils im Bauwerk an:

V vorn,  
H hinten,  
S Seite,  
M Mitte,  
1 Nr.1 etc..

## 5.5 Meßeinrichtung

Meßaufnehmer:

elektrodynamische Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer Typ HS-1  
Eigenfrequenz 4.5 Hz  
Meßempfindlichkeit 14 mV/mm/s  
linearer Arbeitsfrequenzbereich mit einer Genauigkeit von < 4 % im Bereich  $6 < f < 1000$  Hz

Beschleunigungsaufnehmer des Typs PCB 308 B  
Empfindlichkeit 100 mV/g  
Frequenzbereich 1 bis 2500 Hz

Registrierung:

4 PCM-Modulatoren TM 8K10 mit insgesamt 32 Meßkanälen  
Abtastrate Kanal 1904 Punkte/sec  
Grenzfrequenz 500 Hz  
Datenwort 10 Bit  
Speicherung digital auf Magnetband  
zusätzliche Speicherung von externer Zeitinformation und Vorverstärkereinstellungen  
Überwachung der Messung mit 4-Kanal-Speicheroszilloskop und gleichzeitige grafische Darstellung durch Lichtpunktschreiber

Auswertung:

Digital mit Rechner HP 1000E und PEPVME 68020  
Universelle Auswertesoftware  
(Fourier, Korrelation, Modalanalyse, Statistik, Bewertung ...)



Für die Registrierung der Schwingungen im Untergrund und an den Bauwerken wurden nach dem elektrodynamischen Prinzip arbeitende Schwingungsgeschwindigkeitsaufnehmer, sogenannte Geophone, der Firma Geo-Space eingesetzt. Die von den Meßaufnehmern abgegebene Meßspannung, die der gemessenen Schwingungsgeschwindigkeit proportional ist, wird mit einem Meßverstärker verstärkt und dann auf ein PCM-System mit 4 Modulatoren des Typs 8K10 geleitet. Die Modulatoren tasten das analoge Signal in äquidistanten Zeitintervallen  $\delta t$  ab, wandeln den Augenblickswert in ein digitales 10-Bit-Datenwort um und speichern das Ergebnis in binärer Form auf Magnetband. Da die Abtastrate zwischen 1/1850 sec und 1/1900 sec schwanken kann, ist für die Zeitwerte mit einem Fehler von 3% zu rechnen. Die systembedingten maximalen Fehler bei den Schwingungsgeschwindigkeiten liegen für Signale mit  $3 \text{ Hz} \leq f \leq 6 \text{ Hz}$  bei etwa 10%, für Signale mit  $f > 8 \text{ Hz}$  bei 1%. Gleichzeitig mit den Meßdaten werden auf dem Magnetband eine mitlaufende Echtzeit sowie die am Meßverstärker eingestellten Verstärkerstufen mitaufgezeichnet. Bei der Registrierung vor Ort wird im allgemeinen zur optischen Kontrolle der Meßsignale zusätzlich ein Oszilloskop in die Meßkette geschaltet. Bild 5.10 stellt die gesamte Meßkette im Blockschaltbild dar.

## 5.6 Ergebnisauswertung und -darstellung

Alle an beiden Bauwerken durchgeführten Messungen werden stets in gleicher Weise ausgewertet und dargestellt. Aus den oftmals länger andauernden Messungen werden zunächst diejenigen Zeitabschnitte ausgewählt, die genauer analysiert werden sollen. Als Auswahlkriterium dient dabei im allgemeinen die Größe der Amplituden. Für alle Messungen bei Anregung durch U-Bahnverkehr werden stets Zeitabschnitte mit einer Länge von  $T = 4,3$  Sekunden ausgewählt. Für die an der Paul Löbe Oberschule durchgeführten Hydropulsversuche werden Zeitfensterlängen von  $T = 10,75$  Sekunden gewählt. Dies entspricht auch in etwa der Sweepdauer. Die ungeraden Zeitlängen ergeben sich aus der wählbaren Abtastfrequenz des PCM-Systems und der maximalen Blocklänge von 4096 Werten pro Zeitsignal im Auswerterechner. Nach der Übertragung der Zeitsignale auf den Rechner erfolgt üblicherweise eine frequenzabhängige Auswertung mit Hilfe der sogenannten Fast Fourier Transformation. Diese liefert das Fourierspektrum, wobei bei der Auswertung stets mit einem Rechteckfenster gearbeitet wurde. Mit den obigen Zeitfensterlängen ergeben sich damit Frequenzauflösungen von  $df = 1/4,3 = 0,23 \text{ Hz}$  für die Impulsversuche und U-Bahnerschütterungen und von  $df = 0,093 \text{ Hz}$  für die Schwingungen unter Hydropulsbelastung. Zusätzlich werden bei der Auswertung der U-Bahnvorbeifahrten noch RMS-Spektren mit einer Frequenzbandbreite von 2 Hz gebildet. Mit dieser Prozedur erreicht man zum einen eine Mittelwertbildung der unterschiedlichen U-Bahnvorbeifahrten. Zum anderen werden die Spektren infolge der Zusammenfas-

sung mehrerer Spektrallinien innerhalb einer Bandbreite von 2 Hz geglättet. Danach wird die Interpretation und Darstellbarkeit verbessert, ohne daß der Informationsgehalt über z.B. die genaue Lage von Resonanzfrequenzen in entscheidender Weise wie beim Terzspektrum verlorengeht.

Alle so ausgewerteten Meßsignale werden dann in folgender Weise dargestellt: zunächst werden auf der linken Seite jedes Blattes die zeitlichen Verläufe der Schwingungsgeschwindigkeiten gezeichnet. Jeweils rechts daneben befindet sich das Amplitudenfouierspektrum, das die im zeitlichen Verlauf enthaltenen harmonischen Anteile wiedergibt. Während die zeitlichen Verläufe jeweils für die gesamte Übertragungszeit dargestellt werden, werden die Spektren nur bis zu einer oberen Grenzfrequenz gezeichnet. Für die Wahl dieser Grenzfrequenz gelten folgende Überlegungen: Bei der Ausbreitung von Erschütterungen im Untergrund werden diese mit zunehmender Entfernung relativ stark gedämpft. Hierbei ist die Dämpfung bei höheren Frequenzen größer als bei niedrigen. Erfahrungsgemäß ist deshalb von dem gesamten Anregungsspektrum der U-Bahnerschütterungen nur der Frequenzbereich zwischen 0 - 80 Hz von Bedeutung. Ein zweiter Grund besteht darin, daß Bauwerke mit einer hohen Masse im allgemeinen relativ kleine Antworten in höheren Frequenzbereichen aufweisen. Aus diesen Gründen wird der Frequenzbereich der einzelnen Messungen wie folgt festgelegt:

|                        |   |
|------------------------|---|
| – Impulsbelastung      | bis 100 Hz  |
| – Hydropuls            | bis 80 Hz   |
| – U-Bahn-Erschütterung | einzelne Spektren bis 100 Hz<br>gemittelte Spektren bis 81 Hz |

## 5.7 Meßergebnisse

### 5.7.1 Paul Löbe Oberschule

#### 5.7.1.1 Impulse

Die in Bild 5.11 dargestellten zeitlichen Verläufe für die 3 Stockwerksdecken zeigen – infolge der benachbarten Eigenfrequenzen – keine klare Abklingkurve. Die Ermittlung aus der sogenannten Halbwertsbreite ergibt einen Wert von ca. 5%. Dieser Wert steht in guter Übereinstimmung mit dem mit der Abklingmethode (logarithmisches Dekrement) ermittelten Wert von 5,3% für die Dämpfung der horizontalen Schwingungen der Stockwerkswände. Die aus den Spektren ablesbaren, klar getrennten Resonanzfrequenzen ergeben sich zu 12 Hz, 20 Hz und 38 Hz. Aus den an den Decken gemessenen Spektren läßt sich eine weitere Resonanz bei etwa 23 Hz ablesen.

Daß es sich bei diesem Gebäude um eine sehr stark schwingungsfähige Konstruktion handelt, zeigen die nächsten beiden Bilder 5.12 und 5.13. Hier sind die Zeitverläufe und die Spektren von Deckenmitte und



Deckenrand bei Impulsbelastung auf dem Erdreich vor dem Gebäude (Hüpfen) dargestellt. So zeigen alle Punkte über die gesamte Gebäudehöhe praktisch das gleiche Amplitudenniveau. Die Frequenzspektren der Stockwerksdecken ergeben dieselben Resonanzfrequenzen wie bei direkter Impulsbelastung, wobei die am Deckenrand gemessenen Spektren eher noch mehr Details zeigen. Die horizontalen Wandschwingungen werden hier nur schwach angeregt, wobei jedoch die oben ermittelte Frequenz von etwa 38 Hz in die Deckenschwingungen relativ stark eingekoppelt ist. Wie bereits bei den Berechnungen dargestellt, handelt es sich hierbei um die Koppelung der Deckenschwingungen mit den horizontalen Schwingungen des Gesamtbauwerkes.

### 5.7.1.2 Hydropuls

Aus den in den Bildern 5.14 bis 5.17 dargestellten Zeitverläufen und Frequenzspektren der einzelnen Meßpunkte bei Anregung des Tunnels mit dem Hydropuls lassen sich folgende Tendenzen herauslesen:

Alle oberen Decken zeigen ein ausgeprägtes Resonanzverhalten, wobei das Verhältnis der Amplituden von Decke zu Fundament im Resonanzbereich etwa 4 zu 1 beträgt. Bei allen Decken dominiert die 1. Eigenfrequenz bei etwa 12 Hz, obgleich bei allen Decken sowohl im Zeitverlauf wie auch im Spektrum die 2. Resonanzfrequenz im Bereich um 20 Hz gut zu erkennen ist.

An den Deckenauflagern (Bild 5.15) sind verschiedene Resonanzbereiche klar zu erkennen, wobei die Hauptresonanz bei 28 Hz liegt. Darüber hinaus gibt es weitere Amplitudenmaxima bei 12 Hz und bei 48 Hz. Auch hier zeigt sich wieder, wie bei Impulsbelastung vor dem Gebäude, das aus den Berechnungen bekannte Verhalten der starken Koppelung zwischen Decken und globalen Wandschwingungen.

Im Gegensatz zu den Decken werden die Schwingungen bei der Weiterleitung vom Fundament über die einzelnen

Stockwerke jedoch nur schwach verstärkt. Aus den in den Bildern 5.16 und 5.17 dargestellten zeitlichen Verläufen wie aus den Frequenzspektren für die horizontalen Wandschwingungen ist zu erkennen, daß an den Wandfußpunkten eine Vielzahl von Resonanzen auftreten, während die Wandmitte (Meßpunkt H3WM) im wesentlichen nur mit einer Frequenz von ca. 12 Hz, wie die Decke, schwingt. Diese Frequenz tritt, neben vielen anderen, auch bei den Wandfußpunkten auf, wobei eine besonders starke Kopplung bei den Decken im 2. und 1. Obergeschoß zu erkennen ist. Schließlich erkennt man auch die 1. horizontale Bauwerksresonanz, die bei 3,5 Hz liegt, an den mit der Stockwerkszahl größer werdenden Amplituden.

Abschließend sollen in den nachfolgenden Tabellen noch einige Einzahlgrößen angegeben werden. Angegeben werden die Maximalwerte aus dem Zeitbereich  $\max x(t)$ , dem Frequenzbereich  $\max x(f)$  sowie der RMS-Wert (Effektivwert). Schließlich werden die Maximalwerte noch auf den RMS-Wert bezogen. Tabelle 5.4 enthält diese Einzahlgrößen in reiner Form, in Tabelle 5.5 erfolgt ein Bezug auf die entsprechenden Werte des Meßpunktes VF10 (Erdreich 10 m vor dem Gebäude) und in Tabelle 5.6 werden alle Werte auf einen über alle Meßpunkte gemittelten RMS-Wert bezogen. Obgleich diese Form der Darstellung keine Details erkennen läßt, lassen sich trotzdem folgende Tendenzen erkennen:

- An den Decken sind die auf den Freifeldmeßpunkt bezogenen RMS-Werte sowohl im Zeitbereich und noch klarer im Frequenzbereich stets größer als Eins. Beim Übergang der Schwingungen vom Boden zu den Decken findet also immer eine Verstärkung statt.
- Bis auf die horizontalen Wandschwingungen sind die Verhältniszahlen an allen anderen Meßpunkten stets kleiner als Eins. Die vertikalen Schwingungen der Wände und Stützen erfahren also im Durchschnitt eine Abminderung, obgleich selbstverständlich in einzelnen Frequenzen Verstärkungen auftreten können.

| Projekt: Paul-Löbe-Oberschule Hydropulserregung |          |       |          |              |
|---|----------|-------|----------|--------------|
| Meßpunktbezeichnung                             | MAX V(T) | RMS   | MAX V(F) | MAX V(T)/RMS |
| V3D   | 0,287    | 0,044 | 0,007    | 6,501        |
| V2D   | 0,424    | 0,065 | 0,010    | 6,263        |
| VED   | 0,131    | 0,029 | 0,002    | 4,501        |
| V3W   | 0,099    | 0,016 | 0,001    | 6,226        |
| V2W   | 0,135    | 0,019 | 0,002    | 7,294        |
| V1W   | 0,122    | 0,020 | 0,002    | 6,184        |
| VEW   | 0,090    | 0,018 | 0,001    | 5,003        |
| H3W   | 0,048    | 0,010 | 0,001    | 5,023        |
| H2W   | 0,113    | 0,013 | 0,001    | 8,646        |
| H1Ww  | 0,081    | 0,016 | 0,001    | 5,238        |
| HEW   | 0,071    | 0,015 | 0,001    | 4,758        |
| H3WM  | 0,235    | 0,045 | 0,009    | 5,159        |
| VFUN  | 0,104    | 0,017 | 0,001    | 6,210        |
| VF3   | 0,098    | 0,024 | 0,001    | 4,061        |
| VF10  | 0,317    | 0,090 | 0,005    | 3,484        |

Tabelle 5.4  
Gemittelte Einzahlgrößen  
aller Messungen

| Projekt: Paul-Löbe-Oberschule Hydropulserregung |          |       |          |              |
|---|----------|-------|----------|--------------|
| Meßpunkt-bezeichnung                            | MAX V(T) | RMS   | MAX V(F) | MAX V(T)/RMS |
| V3D   | 0,904    | 0,491 | 1,537    | 1,866        |
| V2D   | 1,337    | 0,727 | 2,166    | 1,798        |
| V1D   | 1,039    | 0,536 | 1,635    | 1,958        |
| VED   | 0,413    | 0,325 | 0,407    | 1,292        |
| V3W   | 0,312    | 0,178 | 0,305    | 1,804        |
| V2W   | 0,427    | 0,210 | 0,392    | 2,094        |
| V1W   | 0,384    | 0,221 | 0,469    | 1,775        |
| VEW   | 0,283    | 0,200 | 0,252    | 1,436        |
| H3W   | 0,152    | 0,108 | 0,197    | 1,442        |
| H2W   | 0,355    | 0,143 | 0,285    | 2,482        |
| H1W   | 0,255    | 0,174 | 0,294    | 1,503        |
| HEW   | 0,223    | 0,168 | 0,172    | 1,366        |
| H3WM  | 0,739    | 0,502 | 1,813    | 1,481        |
| VFUN  | 0,328    | 0,186 | 0,193    | 1,783        |
| VF3   | 0,308    | 0,272 | 0,260    | 1,166        |
| VF10  | 1,000    | 1,000 | 1,000    | 1,000        |

Tabelle 5.5  
Auf den Freifeldmeßpunkt VF10 bezogene Einzahlgrößen

Tabelle 5.6  
Auf den mittleren RMS-Wert bezogene Einzahlgrößen

| Projekt: Paul-Löbe-Oberschule Hydropulserregung |                         |            |            |            |            |
|---|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Meßpunkt-bezeichnung                            | $\overline{\text{RMS}}$ | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | 4. Messung |
| V3D   | 0,044                   | 0,90       | 1,18       | 1,15       | 1,02       |
| V2D   | 0,065                   | 0,65       | 0,61       | 1,27       | 1,18       |
| V1D   | 0,048                   | 1,10       | 1,12       | 1,09       | 0,98       |
| VED   | 0,029                   | 1,04       | 1,04       | 1,03       | 1,02       |
| V3W   | 0,016                   | 1,01       | 1,14       | 1,08       | 1,02       |
| V2W   | 0,019                   | 1,00       | 1,08       | 1,07       | 1,04       |
| V1W   | 0,020                   | 1,04       | 1,15       | 0,99       | 1,02       |
| VEW   | 0,018                   | 1,02       | 1,05       | 1,03       | 1,00       |
| H3W   | 0,010                   | 1,08       | 1,15       | 1,01       | 0,99       |
| H2W   | 0,013                   | 1,05       | 1,13       | 1,03       | 1,02       |
| H1W   | 0,016                   | 1,04       | 1,12       | 1,04       | 1,04       |
| HEW   | 0,015                   | 1,03       | 1,05       | 1,02       | 1,02       |
| H3WM  | 0,045                   | 0,87       | 1,05       | 1,13       | 1,13       |
| VFUN  | 0,017                   | 1,03       | 1,04       | 1,01       | 1,01       |
| VF3   | 0,024                   | 1,05       | 1,06       | 1,06       | 1,02       |
| VF10  | 0,090                   | 0,79       | 0,77       | 1,08       | 1,11       |

| Meßpunkt-bezeichnung | 5. Messung | 6. Messung | 7. Messung | 8. Messung |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| V3D                  | 1,03       | 1,05       | 1,05       | 0,40       |
| V2D                  | 1,16       | 1,17       | 1,20       | 0,22       |
| V1D                  | 1,03       | 1,06       | 1,03       | 0,37       |
| VED                  | 1,01       | 1,01       | 1,02       | 0,81       |
| V3W                  | 1,05       | 1,04       | 1,06       | 0,40       |
| V2W                  | 1,04       | 1,06       | 1,05       | 0,54       |
| V1W                  | 1,02       | 1,07       | 1,05       | 0,52       |
| VEW                  | 1,03       | 1,04       | 1,04       | 0,73       |
| H3W                  | 0,99       | 0,96       | 0,98       | 0,81       |
| H2W                  | 1,02       | 0,96       | 1,07       | 0,63       |
| H1W                  | 1,00       | 0,99       | 1,01       | 0,70       |
| HEW                  | 1,02       | 1,02       | 1,02       | 0,81       |
| H3WM                 | 1,11       | 1,04       | 1,03       | 0,47       |
| VFUN                 | 1,01       | 1,02       | 1,05       | 0,81       |
| VF3                  | 0,97       | 0,99       | 1,00       | 0,83       |
| VF10                 | 1,08       | 1,09       | 1,10       | 0,90       |

- Die Crestfaktoren  $\max x(t)/\text{RMS}$  sind relativ hoch. Sie liegen im Mittel zwischen 5 und 6. Für ein reines Sinussignal liegt der Crestfaktor bei 1.41.
- Die in Tabelle 5.6 gegebenen Verhältniszahlen erlauben eine Charakterisierung der einzelnen Messungen hinsichtlich der in das Bauwerk eingeleiteten Gesamtenergie. Im vorliegenden Fall ergibt sich, daß die Anregung durch den Hydropuls bei nahezu allen Messungen (bis auf die 8. Messung) hinsichtlich der Energie sehr ähnlich war und damit alle Messungen gleiche Aussagekraft besitzen.

### 5.7.1.3 U-Bahn-Erschütterungen

Die Bilder 5.18 bis 5.20 zeigen die zeitlichen Verläufe aller Meßpunkte über eine Dauer von 4 Sekunden sowie die zugehörigen Frequenzspektren im Bereich von 0 bis 100 Hz. Zusätzlich sind in den Bildern 5.21 bis 5.25 die

Spektren der Decken, Wände und des Fundamentes mit Freifeld getrennt dargestellt, wobei zum besseren Erkennen des Übertragungsverhalten zusätzlich ein Bezug auf die Spektren des Freifeldmeßpunktes VF10 bzw. auf die untersten horizontalen Wandschwingungen HEW erfolgte.

#### Amplitudenverhalten

Wie bei den Messungen unter Hydropulsbelastung wurden auch hier für alle Meßpunkte die oben beschriebenen Einzahlgrößen gebildet und in den Tabellen 5.7 bis 5.9 zusammengefaßt. Aus den Tabellen lassen sich folgende Tendenzen herauslesen:

- Der Crestfaktor liegt etwa bei 3. Dies ist ein Wert, den man für U-Bahnerschütterungen sehr häufig erhält.
- Die aus dem Zeitbereich wie aus dem Frequenzbereich ermittelten Maximalwerte der Stockwerks-

| Projekt: Paul-Löbe-Oberschule U-Bahnerregung |          |       |          |              |
|--|----------|-------|----------|--------------|
| Meßpunkt-bezeichnung                         | MAX V(T) | RMS   | MAX V(F) | MAX V(T)/RMS |
| V3D  | 0,246    | 0,083 | 0,034    | 3,241        |
| V2D  | 0,182    | 0,060 | 0,019    | 3,347        |
| V1D  | 0,194    | 0,067 | 0,023    | 3,082        |
| VED  | 0,078    | 0,023 | 0,009    | 3,504        |
| V3W  | 0,084    | 0,027 | 0,010    | 3,400        |
| V2W  | 0,098    | 0,034 | 0,010    | 3,276        |
| V1W  | 0,085    | 0,027 | 0,010    | 3,261        |
| VEW  | 0,057    | 0,017 | 0,005    | 3,582        |
| H3W  | 0,045    | 0,017 | 0,007    | 3,022        |
| H2W  | 0,048    | 0,016 | 0,007    | 3,132        |
| H1W  | 0,039    | 0,012 | 0,004    | 3,328        |
| HEW  | 0,022    | 0,006 | 0,002    | 3,588        |
| H3WM   | 0,158    | 0,050 | 0,016    | 3,246        |
| VFUN   | 0,053    | 0,015 | 0,004    | 3,592        |
| VF3  | 0,126    | 0,037 | 0,013    | 3,461        |
| VF10   | 0,184    | 0,050 | 0,019    | 3,746        |

Tabelle 5.7  
Gemittelte Einzahlgrößen aller Messungen

| Projekt: Paul-Löbe-Oberschule U-Bahnerregung |          |       |          |              |
|--|----------|-------|----------|--------------|
| Meßpunkt-bezeichnung                         | MAX V(T) | RMS   | MAX V(F) | MAX V(T)/RMS |
| V3D  | 1,335    | 1,655 | 1,827    | 0,865        |
| V2D  | 0,990    | 1,201 | 0,999    | 0,894        |
| V1D  | 1,054    | 1,332 | 1,244    | 0,823        |
| VED  | 0,423    | 0,457 | 0,453    | 0,936        |
| V3W  | 0,456    | 0,533 | 0,549    | 0,908        |
| V2W  | 0,534    | 0,666 | 0,553    | 0,875        |
| V1W  | 0,460    | 0,546 | 0,504    | 0,871        |
| VEW  | 0,309    | 0,329 | 0,253    | 0,956        |
| H3W  | 0,245    | 0,329 | 0,389    | 0,807        |
| H2W  | 0,258    | 0,322 | 0,372    | 0,836        |
| H1w  | 0,213    | 0,241 | 0,219    | 0,888        |
| HEW  | 0,117    | 0,121 | 0,096    | 0,985        |
| H3WM   | 0,589    | 0,989 | 0,842    | 0,867        |
| VFUN   | 0,288    | 0,304 | 0,225    | 0,959        |
| VF3  | 0,682    | 0,737 | 0,670    | 0,924        |
| VF10   | 1,000    | 1,000 | 1,000    | 1,000        |

Tabelle 5.8  
Auf den Freifeldmeßpunkt VF10 bezogene Einzahlgrößen

Tabelle 5.9

Auf den mittleren RMS-Wert bezogene Einzählgrößen

| Projekt: Paul-Löbe-Oberschule U-Bahnerregung |       |            |            |            |            |            |
|--|-------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung                     | RMS   | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | 4. Messung | 5. Messung |
| V3D  | 0,083 | 0,32       | 0,87       | 0,93       | 1,40       | 0,86       |
| V2D  | 0,060 | 0,51       | 1,55       | 0,85       | 2,05       | 0,78       |
| V1D  | 0,067 | 0,57       | 1,12       | 0,84       | 1,83       | 0,91       |
| VED  | 0,023 | 0,62       | 0,83       | 1,05       | 1,33       | 0,94       |
| V3W  | 0,027 | 0,43       | 0,92       | 0,93       | 1,51       | 0,87       |
| V2W  | 0,034 | 0,70       | 1,11       | 0,89       | 2,12       | 0,84       |
| V1W  | 0,027 | 0,74       | 1,20       | 0,87       | 1,69       | 0,91       |
| VEW  | 0,017 | 0,64       | 1,15       | 0,93       | 1,49       | 0,91       |
| H3W  | 0,017 | 0,46       | 0,90       | 1,23       | 0,52       | 0,96       |
| H2W  | 0,016 | 0,64       | 0,76       | 1,17       | 0,59       | 0,99       |
| H1W  | 0,012 | 0,72       | 0,91       | 1,13       | 0,88       | 0,95       |
| VEW  | 0,006 | 0,70       | 0,86       | 1,05       | 1,30       | 1,00       |
| H3WM   | 0,050 | 0,83       | 1,86       | 1,00       | 0,88       | 0,96       |
| VFUN   | 0,015 | 0,65       | 1,22       | 0,94       | 1,42       | 0,92       |
| VF3  | 0,037 | 0,59       | 0,79       | 1,08       | 1,02       | 1,00       |
| VF10   | 0,050 | 0,62       | 0,75       | 1,16       | 1,05       | 0,96       |

| Meßpunkt-<br>bezeichnung | 6. Messung | 7. Messung | 8. Messung | 9. Messung | 10. Messung | 11. Messung |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| V30                      | 1,87       | 0,71       | 1,12       | 0,63       | 1,12        | 0,65        |
| V2D                      | 1,46       | 0,69       | 0,83       | 0,59       | 0,98        | 0,74        |
| V1D                      | 1,31       | 0,87       | 0,94       | 0,60       | 0,93        | 1,13        |
| VED                      | 1,32       | 0,92       | 1,15       | 0,66       | 1,16        | 0,79        |
| V3W                      | 1,84       | 0,80       | 1,07       | 0,58       | 1,06        | 0,66        |
| V2W                      | 1,58       | 0,78       | 0,84       | 0,59       | 1,02        | 0,60        |
| V1W                      | 1,29       | 0,91       | 0,91       | 0,54       | 0,90        | 1,36        |
| VEW                      | 1,50       | 1,00       | 0,98       | 0,62       | 1,07        | 0,92        |
| H3W                      | 0,46       | 0,80       | 1,55       | 0,67       | 1,29        | 0,55        |
| H2W                      | 0,57       | 0,83       | 1,46       | 0,76       | 1,23        | 0,78        |
| H1W                      | 0,81       | 0,71       | 1,33       | 0,80       | 1,16        | 0,80        |
| HEW                      | 0,95       | 0,99       | 1,13       | 0,74       | 1,07        | 0,90        |
| H3WM                     | 0,71       | 0,82       | 1,09       | 1,09       | 0,90        | 0,91        |
| VFUN                     | 1,43       | 1,04       | 0,98       | 0,63       | 1,03        | 0,97        |
| VF3                      | 0,92       | 1,07       | 1,21       | 0,61       | 1,10        | 0,98        |
| VF10                     | 1,02       | 1,05       | 1,16       | 0,63       | 1,13        | 0,96        |

| Meßpunkt-<br>bezeichnung | 12. Messung | 13. Messung | 14. Messung | 15. Messung | 16. Messung | 17. Messung |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| V3D                      | 0,93        | 0,95        | 0,79        | 0,86        | 1,02        | 0,82        |
| V2D                      | 0,67        | 0,84        | 0,85        | 0,96        | 0,91        | 0,80        |
| V1D                      | 0,84        | 0,89        | 0,95        | 0,72        | 0,87        | 0,93        |
| VED                      | 0,99        | 0,93        | 0,96        | 0,82        | 1,00        | 0,96        |
| V3W                      | 0,89        | 1,02        | 0,81        | 0,88        | 0,92        | 0,82        |
| V2W                      | 0,75        | 0,97        | 0,76        | 0,73        | 0,84        | 0,79        |
| V1W                      | 0,85        | 0,97        | 0,92        | 0,79        | 0,81        | 0,93        |
| VEW                      | 0,78        | 1,01        | 0,95        | 0,88        | 0,84        | 0,82        |
| H3W                      | 1,25        | 0,82        | 0,76        | 0,87        | 1,50        | 1,11        |
| H2W                      | 1,20        | 0,87        | 0,85        | 0,91        | 1,41        | 1,12        |
| H1W                      | 1,16        | 0,90        | 0,88        | 0,89        | 1,32        | 1,11        |
| HEW                      | 0,93        | 1,03        | 1,04        | 0,96        | 1,04        | 1,01        |
| H3WM                     | 1,02        | 0,87        | 0,75        | 0,72        | 1,06        | 1,06        |
| VFUN                     | 0,77        | 1,00        | 0,99        | 0,88        | 0,84        | 0,86        |
| VF3                      | 1,03        | 1,14        | 1,04        | 1,00        | 0,99        | 0,98        |
| VF10                     | 1,05        | 0,96        | 1,08        | 0,89        | 1,12        | 1,01        |

decken ergeben eine Verstärkung hinsichtlich des Freifeldmeßpunktes. Die größte Verstärkung ergibt sich naturgemäß aus den frequenzabhängigen Maximalwerten mit einem Faktor von etwa 1,6.

- Im Vergleich der RMSwerte untereinander ergeben sich folgende Verhältnisse:

RMS(V3D)»RMS(V2D)» RMS(V1D)» 3\*RMS(VE)  
 RMS(V3W)»RMS(V2W)»RMS(V1W)» 2\*RMS(VEW)  
 RMS(H3W)»RMS(H2W)»RMS(H1W)» 2\*RMS(HEW)

Hinzuzufügen ist hier, daß bei den horizontalen Wandfußpunkten der Hauptanteil der Erregung aus der Windbelastung resultiert. Die RMSwerte sind deshalb deutlich größer als aus U-Bahnanregung allein.

- Schließlich zeigt die große Schwankungsbreite der in Tabelle 5.9 dargestellten bezogenen RMSwerte (z.B. bei Meßpunkt V3D zwischen 0.32 und 1.87) daß U-Bahnerschütterungen stark regellose Vorgänge sind. Bei einer Bewertung solcher Schwingungen z.B. nach DIN 4150 sollte deshalb stets eine statistische Angabe erfolgen.

#### Frequenzverhalten

In den in Bild 5.25 dargestellten Frequenzspektren der Freifeldmeßpunkte erkennt man bei allen untersuchten Vorbeifahrten 2 Hauptfrequenzbereiche der Erregung. Der erste Bereich umfaßt Erregerfrequenzen zwischen 16.5 und 21 Hz. Diese Frequenzen nehmen linear mit der Fahrgeschwindigkeit zu.

Der zweite Bereich umfaßt fahrgeschwindigkeitsunabhängige Frequenzen zwischen 60 und 75 Hz. Während bei den fahrgeschwindigkeitsabhängigen Frequenzen die zugeordnete Spitze in den Fourierspektren bei allen vertikalen Meßpunkten gut abzulesen ist, ist sie bei allen horizontalen Meßpunkten wegen der Dominanz der durch den Wind angeregten ersten Kippeigenfrequenz nur im Frequenzspektrum des Erdgeschoßes festzustellen. Die fahrgeschwindigkeitsunabhängigen Frequenzen sind nur in den Spektren des Freifelds, des Fundamentes und des Erdgeschosses vorhanden.

Tabelle 5.10  
 Eigenfrequenzen von Decke und Wand

| Decken<br>vertikal | Wandmitte<br>horizontal | Wandfußpunkte |             |
|--------------------|-------------------------|---------------|-------------|
|                    |                         | vertikal      | horizontal  |
| 12 Hz              | 3,5 Hz                  | 3,5 Hz        | 3,5 Hz      |
| 20 Hz              | 12 Hz                   | 4 bis 24 Hz   | 5 bis 20 Hz |
| 24 Hz              |                         |               |             |

Neben den anregungsspezifischen Frequenzen antwortet das Bauwerk auf die U-Bahnanregung ebenfalls in seinen Eigenfrequenzen, falls in der Anregung in diesen Bereichen Anteile vorhanden sind. Die Auswertung der

Fourieramplitudenspektren ergibt folgende Eigenfrequenzen. (siehe Tabelle 5.10)

Diese Werte sind mit den vorher mittels Impulsbelastung und Hydropulsanregung ermittelten Werten identisch.

#### Übertragungsverhalten

Bild 5.21 zeigt im oberen Teil die Fourierspektren aller Deckenmeßpunkte und den im weiteren als Bezugsmeßpunkt genutzten Freifeldmeßpunkt VF10. Im unteren Teil des Bildes sind die Spektren der Deckenmeßpunkte auf das Spektrum des Meßpunktes VF10 bezogen.

Aus der direkten spektralen Darstellung ergeben sich 2 Hauptantwortbereiche. Diese liegen bei etwa 12 Hz und bei etwa 20 Hz. Wie bereits mehrfach ausgeführt, handelt es sich hierbei um die beiden ersten Eigenfrequenzen der Stockwerksdecken. Da jetzt jedoch die sogenannte Schwellenfachfrequenz  $f = v/a$ , wobei  $v$  die Fahrgeschwindigkeit und  $a$  der Schwellenabstand mit der 2. Resonanzfrequenz i.M. übereinstimmt, liegen die Hauptantworten im Gegensatz zu vorher bei etwa 20 Hz. Dies ist auch die Erklärung für die in den vorigen Bildern stark hervorgetretene Komponente in dieser Frequenz.

Zwar ergibt sich im vorliegenden Fall die Maximalamplitude auf der Stockwerksdecke im letzten (3.) Vollgeschoß, eine eindeutige Zunahme mit der Stockwerkszahl ist jedoch nicht festzustellen. Dies steht in Übereinstimmung mit den in Kapitel 3. präsentierten Rechenergebnissen.

Betrachtet man die um unteren Bildteil des Bildes 5.21 dargestellten bezogenen Amplituden, so erkennt man auf den ersten Blick das bei den Rechnungen besprochene grundsätzliche Bauwerksverhalten, nämlich: Das Übertragungsverhalten entspricht dem eines Einmassenschwingers, dem zusätzliche Eigenfrequenzen aus dem Eigenschwingverhalten der Decken und gegebenenfalls der Wände überlagert sind. Die Resonanzfrequenz dieses Einmassenschwingers ergibt sich (siehe auch Kapitel 2) aus der Bodensteifigkeit und der Gesamtmasse des Bauwerks. Die Lage dieser Eigenfrequenz (bei 3,5 Hz) ist hier nicht klar ersichtlich, da die 1. Deckenresonanz dominiert. Dementsprechend liegt in den bezogenen Amplituden das Maximum des Übertragungsverhältnisses mit einem Wert von ca. 3,75 bei etwa 12 Hz. Danach fallen die Amplituden entsprechend dem Verhalten eines Einmassenschwingers quadratisch mit der Frequenz ab, wobei nur noch in der 2. Deckenresonanz Verstärkungsfaktoren mit einem Wert von etwa 3,0 erreicht werden.

In gleicher Weise wie bei den Decken zeigt Bild 5.22 die Amplitudenspektren der vertikalen Schwingungen der Wandfußpunkte. Maximale Amplituden treten nur im Frequenzbereich um 20 Hz auf. In den bezogenen Spektren zeigt sich nun klar die Boden-Bauwerks-Resonanz,



die bei etwa 3,5 Hz liegt. Danach nehmen die bezogenen Amplituden i.M. stetig ab, wobei sich wiederum nur leichte Verstärkungen mit einem maximalen Wert von etwa 1,4 in der Nähe der Deckenresonanzen ergeben.

Bei den horizontalen Schwingungen an den Wandfußpunkten (Bild 5.23) dominiert die durch den Wind stark angeregte erste Gebäudeeigenfrequenz. Der Hauptanteil der durch den U-Bahnverkehr angeregten Frequenzen liegt zwischen 16 und 21 Hz. Die Amplituden sind in diesem Frequenzbereich um 1/5 kleiner als die Vertikal-amplituden der Wandfußpunkte. Erwartungsgemäß zeigen die auf die horizontalen Wandfußpunktschwingungen bezogenen Amplituden der oberen Stockwerke über den gesamten Frequenzbereich eine Verstärkung mit einem mittleren Wert von etwa 3.

Die in Bild 5.24 dargestellten Spektren der horizontalen Schwingungen in Wandmitte zeigen, daß die Hauptantwort bei etwa 13 Hz liegt. Darüber hinaus gibt es noch Maximalwerte bei 3,5 Hz und bei etwa 38 Hz. Die Antwort mit einer Frequenz von 3,5 Hz folgt aus den Grundschiebungen des Gebäudes, bei 13 Hz liegt vermutlich eine Resonanzschwingung der Wand. Darauf deuten auch die bezogenen Amplituden hin, in denen in dieser Frequenz eine etwa 25-fache Verstärkung auftritt.

Schließlich zeigen die in Bild 5.25 dargestellten Antworten am Fundament und am Freifeld zum einen die beiden Hauptfrequenzbereiche der U-Bahnanregung mit Frequenzen um 20 Hz und bei etwa 65 Hz. In den bezogenen Amplituden ergeben sich, wie im Rechenmodell prognostiziert, nur Verstärkungen in der Boden-Bauwerks-Resonanzfrequenz mit einem Faktor von etwa 2,4.

Die Ergebnisse können zusammengefaßt werden zu:

- beim Übergang vom Boden zum Bauwerk werden Schwingungen mit Frequenzen bis zum 2-fachen der Boden-Bauwerksresonanzfrequenz verstärkt, danach abgemindert. Der Verstärkungsfaktor liegt etwa zwischen 2 bis 3. Wie die Rechenergebnisse zeigen, hängt der Faktor jedoch stark von der Baugrundsteifigkeit in der Weise ab, daß er mit zunehmender Baugrundsteifigkeit zunimmt.
- Starke Resonanzen treten in vertikaler Richtung an den Stockwerksdecken und in horizontaler Richtung an den Stockwerkswänden auf. Hierbei sind die horizontalen Schwingungen der Stockwerkswände über das gesamte Bauwerk stark mit den Deckenschwingungen gekoppelt.
- Die vertikalen Schwingungen der Wände werden über die einzelnen Stockwerke eher abgemindert als verstärkt.
- Der Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Schwingungsverhalten ergibt volle Übereinstimmung hinsichtlich der auftretenden Effekte.

## 5.7.2 Technisches Zentrum Sparkasse Berlin

### 5.7.2.1 Zeit und Amplitudenverhalten

In den Bildern 5.26 bis 5.36 sind die zeitlichen Verläufe und die daraus berechneten Fourierspektren für alle Meßpunkte in allen gemessenen Bauphasen dargestellt. Diese Bilder dienen zur Illustration und Dokumentation der Meßergebnisse. Wie die Zeitverläufe und Spektren zeigen, sind die U-Bahnerschütterungen in allen Bauphasen an allen Meßpunkten sehr breitbandig, wobei zwei Hauptfrequenzbereiche um 15 bis 25 und zwischen 60 und 70 Hz herausragen. Aus diesen Schwingungen wurden in einem ersten Schritt die gleichen Einzählgrößen wie oben berechnet. Diese werden in den nachfolgenden Tabellen 5.11 bis 5.14 wiedergegeben. Insgesamt lassen sich aus den Tabellen folgende Ergebnisse ableiten:

#### 1. Bauphase

- Die im Freifeld gemessenen Bodenschwingungen (Meßpunkte 1V bis 7V) zeigen keine Abnahme mit der Entfernung. Hier scheinen sich die quasi-ebenen Ausbreitungsverhältnisse dicht neben U-Bahn-Tunneln wiederzuspiegeln.

- Der Crestfaktor hat einen Wert von i.M. 3,7.

- Die Schwankung der RMS-Werte der einzelnen Messungen ist bis auf wenige Ausnahmen relativ gering.

#### 2. Bauphase

- Die Freifeldamplituden sind hier um etwa 25% größer als die gemittelten Werte der 1. Bauphase.

- Der Crestfaktor hat wiederum einen mittleren Wert von ca. 3,7 für alle Meßpunkte.

- Die Decke im Erdgeschoß (Meßpunkt VED) weist doppelt so große Werte auf wie die Amplituden der vorderen Wände und Stützen in beiden Geschoßen (EG und KG).

- Die Schwingamplituden an den seitlichen und hinteren Wänden sind um 1/3 kleiner als an den vorderen Wänden.

#### 3. Bauphase

- Die Freifeldamplituden sind hier noch größer als bei der 2. Bauphase.

- Der Crestfaktor zeigt jetzt größere Schwankungen. Es ergeben sich Werte zwischen ca. 3,0 bis 4,5.

- Die vertikalen Amplituden von Decken und Wänden nehmen mit der Stockwerkszahl zu.



Tabelle 5.11  
 Gemittelte bzw. bezogene Einzelgrößen der 1. Bauphase

| Sparkasse 1. Bauphase    |          |       |          |          |
|--------------------------|----------|-------|----------|----------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | MAX X(T) | RMS   | MAX X(F) | MAXT/RMS |
| 1V                       | 0,222    | 0,062 | 0,011    | 3,609    |
| 2V                       | 0,157    | 0,043 | 0,009    | 3,747    |
| 3V                       | 0,185    | 0,053 | 0,012    | 3,585    |
| 4V                       | 0,222    | 0,060 | 0,011    | 3,732    |
| 5V                       | 0,186    | 0,510 | 0,011    | 3,779    |
| 6V                       | 0,181    | 0,480 | 0,010    | 3,814    |
| 7V                       | 0,208    | 0,056 | 0,012    | 3,847    |
| 8H                       | 0,239    | 0,066 | 0,013    | 3,644    |

| Sparkasse 1. Bauphase    |          | Bezogen auf Freifeld |          |          |
|--------------------------|----------|----------------------|----------|----------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | MAX X(T) | RMS                  | MAX X(F) | MAXT/RMS |
| 1V                       | 1,000    | 1,000                | 1,000    | 1,000    |
| 2V                       | 0,705    | 0,688                | 0,844    | 1,038    |
| 3V                       | 0,835    | 0,855                | 1,129    | 0,993    |
| 4V                       | 1,000    | 0,970                | 1,037    | 1,034    |
| 5V                       | 0,839    | 0,822                | 1,011    | 1,047    |
| 6V                       | 0,815    | 0,778                | 0,905    | 1,057    |
| 7V                       | 0,937    | 0,904                | 1,131    | 1,066    |
| 8H                       | 1,076    | 1,066                | 1,192    | 1,010    |

| Sparkasse 1. Bauphase    |       |            |            |            |            |            |
|--------------------------|-------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | RMS   | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | 4. Messung | 5. Messung |
| 1V                       | 0,062 | 1,26       | 0,69       | 0,93       | 0,96       | 1,04       |
| 2V                       | 0,043 | 1,22       | 0,66       | 0,92       | 1,37       | 0,93       |
| 3V                       | 0,053 | 1,31       | 0,65       | 0,93       | 0,81       | 0,87       |
| 4V                       | 0,060 | 1,23       | 0,70       | 0,96       | 0,91       | 0,90       |
| 5V                       | 0,051 | 1,25       | 0,64       | 0,87       | 1,25       | 0,64       |
| 6V                       | 0,048 | 1,27       | 0,62       | 0,89       | 0,97       | 0,96       |
| 7V                       | 0,056 | 1,15       | 0,54       | 0,77       | 1,12       | 0,85       |
| 8H                       | 0,066 | 1,23       | 0,68       | 0,99       | 1,23       | 0,90       |

| Meßpunkt-<br>bezeichnung | 6. Messung | 7. Messung | 8. Messung | 9. Messung | 10. Messung | 11. Messung |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1V                       | 1,15       | 1,08       | 0,97       | 1,00       | 0,72        | 1,05        |
| 2V                       | 0,99       | 0,88       | 1,07       | 1,02       | 0,84        | 0,92        |
| 3V                       | 1,06       | 1,22       | 1,09       | 1,11       | 0,64        | 1,08        |
| 4V                       | 1,13       | 1,10       | 1,08       | 1,04       | 0,86        | 0,97        |
| 5V                       | 1,00       | 0,97       | 1,19       | 1,01       | 0,77        | 0,93        |
| 6V                       | 1,14       | 1,05       | 1,07       | 1,07       | 0,89        | 0,94        |
| 7V                       | 1,08       | 0,93       | 0,96       | 1,22       | 1,14        | 1,03        |
| 8H                       | 1,08       | 1,14       | 0,97       | 0,91       | 0,80        | 0,92        |

Tabelle 5.12

Gemittelte bzw. bezogene Einzählgrößen der 2.Bauphase

| Sparkasse 2. Bauphase    |          |       |          |          |
|--------------------------|----------|-------|----------|----------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | MAX X(T) | RMS   | MAX X(F) | MAXT/RMS |
| VFF                      | 0,266    | 0,073 | 0,014    | 3,695    |
| VED                      | 0,092    | 0,027 | 0,005    | 3,595    |
| VEW                      | 0,041    | 0,012 | 0,002    | 3,610    |
| VES                      | 0,048    | 0,013 | 0,003    | 3,703    |
| VEWS                     | 0,029    | 0,007 | 0,001    | 4,214    |
| VKWS                     | 0,035    | 0,009 | 0,002    | 3,836    |
| HKWV                     | 0,050    | 0,012 | 0,002    | 4,361    |
| VKWV                     | 0,046    | 0,012 | 0,003    | 3,862    |
| VKS1                     | 0,044    | 0,012 | 0,003    | 3,563    |
| VKS2                     | 0,047    | 0,012 | 0,003    | 3,934    |
| VKWH                     | 0,038    | 0,008 | 0,002    | 4,965    |

| Sparkasse 2. Bauphase    |          | Bezogen auf Freifeld |          |          |
|--------------------------|----------|----------------------|----------|----------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | MAX X(T) | RMS                  | MAX X(F) | MAXT/RMS |
| VFF                      | 1,000    | 1,000                | 1,000    | 1,000    |
| VED                      | 0,344    | 0,368                | 0,337    | 0,973    |
| VEW                      | 0,153    | 0,160                | 0,169    | 0,977    |
| VES                      | 0,181    | 0,182                | 0,193    | 1,002    |
| VEWS                     | 0,107    | 0,094                | 0,098    | 1,140    |
| VKWS                     | 0,130    | 0,126                | 0,134    | 1,038    |
| HKWV                     | 0,187    | 0,167                | 0,172    | 1,180    |
| VKWV                     | 0,172    | 0,169                | 0,185    | 1,045    |
| VKS1                     | 0,164    | 0,170                | 0,191    | 0,694    |
| VKS2                     | 0,177    | 0,165                | 0,188    | 1,064    |
| VKWH                     | 0,143    | 0,108                | 0,122    | 1,343    |

| Sparkasse 2. Bauphase    |                         |            |            |            |             |             |
|--------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | $\overline{\text{RMS}}$ | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | 4. Messung  | 5. Messung  |
| VFF                      | 0,073                   | 0,89       | 1,05       | 0,80       | 0,85        | 1,05        |
| VED                      | 0,027                   | 1,05       | 0,86       | 0,65       | 0,69        | 0,80        |
| VEW                      | 0,012                   | 0,77       | 0,87       | 0,77       | 0,71        | 1,22        |
| VES                      | 0,013                   | 1,09       | 0,92       | 0,65       | 0,72        | 1,08        |
| VEWS                     | 0,007                   | 1,04       | 0,86       | 1,04       | 0,78        | 1,06        |
| VKWS                     | 0,009                   | 0,90       | 0,88       | 0,86       | 0,72        | 1,27        |
| HKWV                     | 0,012                   | 0,94       | 0,90       | 0,47       | 0,80        | 0,92        |
| VKWV                     | 0,012                   | 0,76       | 0,86       | 0,75       | 0,71        | 1,18        |
| VKS1                     | 0,012                   | 0,95       | 0,93       | 0,79       | 0,67        | 1,24        |
| VKS2                     | 0,012                   | 1,07       | 1,00       | 0,72       | 0,70        | 1,12        |
| VKWH                     | 0,008                   | 1,17       | 0,83       | 0,85       | 0,70        | 1,12        |
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | 6. Messung              | 7. Messung | 8. Messung | 9. Messung | 10. Messung | 11. Messung |
| VFF                      | 0,85                    | 0,91       | 1,11       | 1,09       | 1,24        | 1,05        |
| VED                      | 0,77                    | 0,91       | 1,39       | 0,92       | 1,59        | 0,94        |
| VEW                      | 1,02                    | 0,87       | 0,98       | 0,94       | 1,45        | 1,16        |
| VES                      | 0,83                    | 1,13       | 1,24       | 0,97       | 1,15        | 1,04        |
| VEWS                     | 0,99                    | 0,99       | 1,10       | 0,86       | 0,98        | 1,23        |
| VKWS                     | 1,07                    | 0,93       | 0,98       | 0,85       | 1,12        | 1,25        |
| HKWV                     | 0,78                    | 1,18       | 1,47       | 0,95       | 1,08        | 1,16        |
| VKWV                     | 0,97                    | 0,93       | 1,11       | 0,93       | 1,41        | 1,15        |
| VKS1                     | 0,93                    | 0,99       | 1,02       | 0,96       | 1,15        | 1,21        |
| VKS2                     | 0,89                    | 1,12       | 1,20       | 0,95       | 1,07        | 1,04        |
| VKWH                     | 0,80                    | 1,20       | 1,31       | 0,90       | 1,09        | 0,85        |

Tabelle 5.13

Gemittelte bzw. bezogene Einzählgrößen der 3.Bauphase

| Sparkasse 3. Bauphase    |          |                      |          |          |
|--------------------------|----------|----------------------|----------|----------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | MAX X(T) | RMS                  | MAX X(F) | MAXT/RMS |
| VFF                      | 0,349    | 0,088                | 0,013    | 4,050    |
| HKWV                     | 0,097    | 0,023                | 0,005    | 4,208    |
| VKWV                     | 0,039    | 0,010                | 0,002    | 3,846    |
| VKSM                     | 0,049    | 0,013                | 0,002    | 3,914    |
| VKSH                     | 0,028    | 0,008                | 0,001    | 3,568    |
| HEWV                     | 0,019    | 0,005                | 0,001    | 3,560    |
| VEWV                     | 0,044    | 0,010                | 0,002    | 4,520    |
| VED                      | 0,095    | 0,024                | 0,004    | 4,086    |
| H1WV                     | 0,023    | 0,006                | 0,001    | 3,556    |
| V1WV                     | 0,042    | 0,010                | 0,002    | 4,094    |
| V1DM                     | 0,092    | 0,028                | 0,008    | 3,382    |
| V1SM                     | 0,030    | 0,008                | 0,002    | 3,608    |
| V1WH                     | 0,033    | 0,007                | 0,001    | 4,618    |
| H2WV                     | 0,033    | 0,007                | 0,002    | 4,553    |
| V2WV                     | 0,055    | 0,012                | 0,003    | 4,398    |
| V2DM                     | 0,081    | 0,028                | 0,005    | 2,915    |
| H3WV                     | 0,020    | 0,006                | 0,001    | 3,667    |
| V3WV                     | 0,053    | 0,016                | 0,004    | 3,483    |
| V3DM                     | 0,107    | 0,033                | 0,009    | 3,325    |
| H4WV                     | 0,025    | 0,007                | 0,001    | 3,487    |
| V4WV                     | 0,067    | 0,020                | 0,005    | 3,435    |
| V4DM                     | 0,135    | 0,045                | 0,011    | 3,183    |
| V4SM                     | 0,058    | 0,018                | 0,004    | 3,300    |
| Sparkasse 3. Bauphase    |          | Bezogen auf Freifeld |          |          |
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | MAX X(T) | RMS                  | MAX X(F) | MAXT/RMS |
| VFF                      | 1,000    | 1,000                | 1,000    | 1,000    |
| HKWV                     | 0,277    | 0,265                | 0,381    | 1,039    |
| VKWV                     | 0,112    | 0,118                | 0,136    | 0,950    |
| VKSM                     | 0,139    | 0,143                | 0,148    | 0,966    |
| VKSH                     | 0,080    | 0,090                | 0,091    | 0,881    |
| HEWV                     | 0,055    | 0,062                | 0,071    | 0,879    |
| VEWV                     | 0,126    | 0,114                | 0,134    | 1,116    |
| VED                      | 0,274    | 0,271                | 0,335    | 1,009    |
| H1WV                     | 0,065    | 0,074                | 0,106    | 0,878    |
| V1WV                     | 0,121    | 0,114                | 0,160    | 1,011    |
| V1DM                     | 0,265    | 0,323                | 0,593    | 0,835    |
| V1SM                     | 0,086    | 0,095                | 0,123    | 0,891    |
| V1WH                     | 0,093    | 0,075                | 0,096    | 1,140    |
| H2WV                     | 0,094    | 0,080                | 0,115    | 1,124    |
| V2WV                     | 0,158    | 0,140                | 0,225    | 1,086    |
| V2DM                     | 0,232    | 0,319                | 0,415    | 0,720    |
| H3WV                     | 0,059    | 0,066                | 0,085    | 0,905    |
| V3WV                     | 0,153    | 0,177                | 0,313    | 0,860    |
| V3DM                     | 0,307    | 0,381                | 0,668    | 0,821    |
| H4WV                     | 0,071    | 0,084                | 0,102    | 0,861    |
| V4WV                     | 0,193    | 0,228                | 0,405    | 0,848    |
| V4DM                     | 0,386    | 0,509                | 0,845    | 0,786    |
| V4SM                     | 0,166    | 0,207                | 0,298    | 0,815    |

Tabelle 5.14

Auf den mittleren RMS-Wert bezogene Einzählgrößen der 3. Bauphase

| Sparkasse 3. Bauphase    |                         |            |            |            |            |            |            |
|--------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Meßpunkt-<br>bezeichnung | $\overline{\text{RMS}}$ | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | 4. Messung | 5. Messung | 6. Messung |
| VFF                      | 0,088                   | 1,13       | 0,97       | 1,20       | 0,90       | 0,96       | 1,07       |
| HKWV                     | 0,023                   | 1,17       | 1,07       | 1,07       | 0,90       | 1,09       | 1,06       |
| VKWV                     | 0,010                   | 1,25       | 0,92       | 1,20       | 0,92       | 0,86       | 0,93       |
| VKSM                     | 0,013                   | 1,17       | 0,95       | 1,18       | 0,85       | 0,87       | 1,03       |
| VKSH                     | 0,008                   | 1,19       | 0,97       | 1,23       | 0,87       | 0,86       | 1,02       |
| HEWV                     | 0,005                   | 1,35       | 0,94       | 1,14       | 0,93       | 0,86       | 1,04       |
| VEWV                     | 0,010                   | 1,40       | 0,92       | 1,10       | 0,93       | 0,82       | 0,96       |
| VED                      | 0,024                   | 1,22       | 1,01       | 1,16       | 0,84       | 1,04       | 1,02       |
| H1WV                     | 0,006                   | 1,28       | 0,91       | 1,22       | 0,94       | 0,73       | 1,06       |
| V1WV                     | 0,010                   | 1,36       | 0,86       | 1,18       | 0,91       | 0,71       | 0,90       |
| V1DM                     | 0,028                   | 1,24       | 1,06       | 1,23       | 0,65       | 0,74       | 1,06       |
| V1SM                     | 0,008                   | 1,28       | 0,90       | 1,26       | 0,86       | 0,82       | 0,94       |
| V1WH                     | 0,007                   | 1,40       | 0,95       | 1,25       | 0,89       | 0,80       | 0,98       |
| H2WV                     | 0,007                   | 1,25       | 0,87       | 1,29       | 0,82       | 0,75       | 1,13       |
| V2WV                     | 0,012                   | 1,32       | 0,97       | 1,21       | 0,90       | 0,72       | 1,09       |
| V2DM                     | 0,028                   | 0,88       | 1,01       | 1,06       | 0,86       | 0,98       | 1,02       |
| H3WV                     | 0,006                   | 1,43       | 0,82       | 1,15       | 0,82       | 0,74       | 0,94       |
| V3WV                     | 0,016                   | 1,20       | 1,04       | 1,29       | 0,78       | 0,72       | 1,02       |
| V3DM                     | 0,033                   | 1,46       | 0,88       | 0,91       | 0,99       | 0,80       | 1,04       |
| H4WV                     | 0,007                   | 1,19       | 0,85       | 1,11       | 0,86       | 0,72       | 0,86       |
| V4WV                     | 0,020                   | 1,27       | 1,07       | 1,31       | 0,75       | 0,73       | 1,06       |
| V4DM                     | 0,045                   | 1,57       | 0,85       | 0,89       | 1,03       | 0,84       | 0,93       |
| V4SM                     | 0,018                   | 1,66       | 0,85       | 1,01       | 1,01       | 0,81       | 0,80       |

| Meßpunkt-<br>bezeichnung | 7. Messung | 8. Messung | 9. Messung | 10. Messung | 11. Messung | 12. Messung |
|--------------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| VFF                      | 0,85       | 1,20       | 0,91       | 0,83        | 0,87        | 1,02        |
| HKWV                     | 0,95       | 0,94       | 0,96       | 0,77        | 0,60        | 1,25        |
| VKWV                     | 0,84       | 1,18       | 0,96       | 0,82        | 0,87        | 1,10        |
| VKSM                     | 0,82       | 1,14       | 0,90       | 0,86        | 1,03        | 1,10        |
| VKSH                     | 0,92       | 1,07       | 0,90       | 0,84        | 1,00        | 1,03        |
| HEWV                     | 0,88       | 1,06       | 1,01       | 0,77        | 0,87        | 1,03        |
| VEWV                     | 0,95       | 1,17       | 0,93       | 0,77        | 0,90        | 0,97        |
| VED                      | 0,95       | 0,98       | 0,95       | 0,80        | 0,78        | 1,13        |
| H1WV                     | 0,91       | 1,12       | 0,99       | 0,77        | 1,02        | 0,88        |
| V1WV                     | 0,92       | 1,23       | 0,99       | 0,82        | 1,04        | 0,89        |
| V1DM                     | 0,71       | 0,81       | 1,41       | 0,81        | 0,99        | 0,97        |
| V1SM                     | 0,92       | 1,07       | 0,86       | 0,82        | 1,02        | 1,10        |
| V1WH                     | 0,97       | 1,00       | 0,88       | 0,79        | 0,97        | 0,94        |
| H2WV                     | 0,85       | 1,17       | 0,94       | 0,83        | 1,12        | 0,77        |
| V2WV                     | 0,93       | 1,11       | 1,06       | 0,80        | 1,06        | 0,82        |
| V2DM                     | 1,08       | 0,94       | 1,03       | 0,92        | 0,91        | 1,17        |
| H3WV                     | 0,98       | 1,33       | 0,93       | 0,80        | 1,01        | 0,79        |
| V3WV                     | 0,82       | 1,09       | 1,13       | 0,84        | 1,11        | 0,80        |
| V3DM                     | 0,86       | 1,39       | 0,90       | 0,77        | 0,96        | 0,75        |
| H4WV                     | 1,00       | 1,28       | 0,98       | 0,77        | 1,01        | 0,78        |
| V4WV                     | 0,75       | 1,05       | 1,14       | 0,81        | 1,07        | 0,78        |
| V4DM                     | 0,89       | 1,24       | 0,92       | 0,78        | 1,02        | 0,73        |
| V4SM                     | 1,00       | 1,13       | 0,79       | 0,77        | 0,99        | 0,84        |

- Die horizontalen Wandamplituden sind bei allen Geschoßen mit Ausnahme des Kellergeschoßes etwa gleich groß. Sie erreichen maximale Werte von etwa 30 % der vertikalen Wandamplituden.

Vergleicht man die Werte der drei Tabellen miteinander, dann ist folgendes festzustellen:

- Die Freifeldamplituden nehmen mit dem Baufortschritt zu.
- Die Amplituden sämtlicher Bauteile (Wände, Decken, Säulen) im Kellergeschoß und im 1. Obergeschoß sind bei den Bauphasen 2 und 3 in etwa gleich.
- Die horizontalen Amplituden der vorderen Wand sind in der 3. Bauphase etwa doppelt so groß wie in der 2. Bauphase.
- Die Crestfaktoren liegen bei beiden Bauphasen i. M. bei etwa 3,7 wobei in der 3. Bauphase die Streuung der einzelnen Werte größer ist.

### 5.7.2.2 Frequenzverhalten

Im folgenden wird das Frequenz- und Übertragungsverhalten des Technischen Zentrums der Sparkasse Berlin in verschiedenen Bauphasen dargestellt. Zur Darstellung des Übertragungsverhaltens werden die Meßpunkte auf einen relevanten Freifeldmeßpunkt bezogen. Dies ist im allgemeinen der Meßpunkt VFF, der sich im Freifeld in etwa 6 m Entfernung vom Gebäude befindet (siehe auch Bild 5.5). Zum Vergleich der Schwingungen in den einzelnen Bauphasen ist ein Bezug auf diesen Meßpunkt jedoch ungeeignet, da er nur für die Messungen in der Bauphase 3 gilt. Aus diesem Grunde wird ein mittlerer Wert VFM gebildet, indem die während der Bauphase 1 (kein Gebäude, nur Aushub) gemessenen vertikalen Freifeldschwingungen linear gemittelt werden. Zur Beschreibung der Veränderung des Schwingungsverhaltens in den verschiedenen Bauphasen werden die Bauwerkschwingungen auf diesen mittleren Freifeldwert bezogen.

Um zunächst die Deckeneigenfrequenzen zu ermitteln, wurden begleitend zu den Messungen der U-Bahnvorbeifahrten Impulsmessungen vorgenommen. Bei diesen Messungen wurden sämtliche Decken nacheinander durch einen künstlichen Impuls in Deckenmitte angeregt und die Eigenfrequenzen aus dem Fourierspektrum ermittelt. Es ergaben sich folgende Werte:

|       |              |         |
|-------|--------------|---------|
| Decke | EG.          | ≈ 34 Hz |
| Decke | 1.OG.        | ≈ 23 Hz |
| Decke | 2. bis 4.OG. | ≈ 14 Hz |

Die Dämpfung der Decken wurde aus den Schwingungen im 1.OG zu  $D \approx 4.2\%$  ermittelt.

Die erregerspezifischen Frequenzen lassen sich am besten aus den Freifeldmeßpunkten erkennen, da diese von

den Gebäudeeigenschaften am wenigsten beeinflusst werden. Aus den in Bild 5.37 für die Bauphase 1 dargestellten Spektren lassen sich 2 Hauptfrequenzbereiche der U-Bahnerregung angeben. Der erste Bereich liegt zwischen 16 und 22 Hz. Diese Frequenzen sind fahrgeschwindigkeitsabhängig und entsprechen der sogenannten Schwellenfachfrequenz. Der zweite, von den Fahrgeschwindigkeiten unabhängige Bereich, liegt zwischen 55 und 75 Hz.

In den in den weiteren Bildern dargestellten Frequenzspektren der Gebäudemesspunkte ist die erste Anregungsfrequenz bei allen Meßpunkten klar ausgebildet, während der zweite Frequenzbereich nur an den Meßpunkten des KG, EG und des 1. Obergeschoßes gut zu erkennen ist.

Neben den oben angegebenen Deckeneigenfrequenzen und den Anregungsfrequenzen lassen sich aus den dargestellten Spektren weitere relevante Frequenzbereiche ablesen. Diese sind:

- in den vertikalen Schwingungen aller Wände und Stützen in allen Geschoßen eine Frequenz im Bereich von  $\approx 3$  Hz.
- in den horizontalen Schwingungen aller Wände und Stützen in allen Geschoßen eine Frequenz zwischen 5 und 10 Hz. Die zugehörigen Amplituden nehmen mit der Stockwerkszahl zu.
- in den vertikalen Schwingungen der Decke im 1. Obergeschoß neben der Deckenresonanz bei 23 Hz ein weiteres Amplitudenmaxima bei  $\approx 34$  Hz. Hier scheint eine Koppelung mit der Eigenfrequenz der Decke im EG vorzuliegen.

### 5.7.2.3 Übertragungsverhalten

#### 1. Bauphase

Hier wurden nur Messungen im Freifeld durchgeführt. In Bild 5.37 sind im oberen Teil die Fourierspektren und im unteren Teil die auf den Mittelwert bezogenen Spektren dargestellt. Im wesentlichen zeigen sich hier die Gebirge der beiden Erregerfrequenzbereiche. Aus den bezogenen Amplituden ist zu ersehen, daß die Amplituden in der Schwellenfachfrequenz praktisch über alle Meßpunkte nahezu konstant sind, während sich im höheren Frequenzbereich durch die Dämpfung erklärbar Abminderungen bemerkbar machen. Erstaunlicherweise verläuft diese Abminderung jedoch nicht stetig.

#### 2. Bauphase

Die beiden nächsten Bilder 5.38 und 5.39 zeigen die Amplitudenspektren der vertikalen Schwingungen der Meßpunkte im Keller (VKxx) und im Erdgeschoß (VExx), wobei die Spektren in Bild 5.39 auf die Amplituden des Freifeldmeßpunktes VFF bezogen sind. Aus dieser Dar-



stellung kann direkt das Übertragungsverhalten mit folgenden Ergebnissen abgelesen werden:

- Die Wände und Stützen im Kellergeschoß zeigen hinsichtlich der Frequenzverteilung fast identische Spektren, wobei die Hauptantwort bei etwa 22 Hz liegt und der Bereich zwischen 45 und 75 Hz stark abgemindert ist. Nur bei dem Meßpunkt an der Stütze Nr. 1 (VKS1) ist ein Bereich um 60 Hz hervorgehoben. Die Antworten werden hier also vollständig von dem Frequenzinhalt der Anregung bestimmt. Im Mittel liegen die Amplituden an der hinteren Wand (VKWH) um etwa 30 % unter den Amplituden im vorderen Bereich.
- Die Wände im Erdgeschoß zeigen prinzipiell das gleiche Übertragungsverhalten wie diejenigen im Keller, wobei die spektralen Amplituden i.M. um etwa 20 % größer sind.
- Die Decke im Erdgeschoß antwortet neben den Erregerfrequenzen zusätzlich in ihrer Eigenfrequenz im Bereich um 34 Hz. Hier treten auch die Amplitudenmaxima auf.
- In der auf den Freifeldmeßpunkt bezogenen Darstellung erkennt man das bereits bei den Rechnungen und bei der Paul Löbe Oberschule besprochene prinzipielle Übertragungsverhalten eines Gebäudes, nämlich: Bis zur Boden-Bauwerkseigenfrequenz die hier zwischen 3 und 5 Hz liegt, werden die Amplituden beim Übergang vom Boden ins Gebäude verstärkt, danach abgemindert. Die einzelnen Bauteile antworten dann mit Amplitudenmaxima in relevanten Erregerbereichen und in ihren Eigenfrequenzen. Aus Bild 5.39 ist zu erkennen, daß alle Wände und Stützen über das gesamte Bauwerk (xxxV = Vorne, xxxS = seitlich, xxxH = hinten) zusätzlich im Bereich um 24 Hz ein Amplitudenmaxima besitzen. Die Hauptantwort der Decke ist bei etwa 32 Hz wobei der maximale Verstärkungsfaktor 1!! beträgt. Daneben zeigen sich aber eine Reihe weiterer Amplitudenmaxima bei 24 Hz, 42 Hz und 48 Hz. Die Übereinstimmung der Frequenzen mit Amplitudenmaxima von Decke und Wand bestätigt wiederum das in den Rechnungen prognostizierte Verhalten der Koppelwirkung von Wand- und Deckenschwingungen.

Schließlich zeigt Bild 5.40 noch die auf den Mittelwert VFM der während Phase 1 gemessenen Bodenschwingungen bezogenen Bauwerksamplituden. Generell ergibt sich das gleiche oben diskutierte Verhalten. Bis auf die Decke im EG besitzen jedoch alle bezogenen Größen Werte die kleiner als 1 sind. Das heißt, daß sich mit zunehmendem Baufortschritt eine Amplitudenreduzierung einstellt.

### 3. Bauphase

Die Amplitudenspektren aller Meßpunkte im Gebäude sind in den Bildern 5.41 bis 5.46 dargestellt.

Im oberen Teil von Bild 5.41 sind die Spektren aller Deckenmeßpunkte zu sehen, die im unteren Bildteil auf den gemittelten Freifeldmeßpunkt bezogen wurden. Es sind 4 Hauptantwortfrequenzbereiche zu erkennen. Diese liegen bei 14 Hz, 23 Hz, 34 Hz und zwischen 60 und 75 Hz. Wie aus den oben mitgeteilten Ergebnissen der Impulsversuche ersichtlich, handelt es sich bei der Schwingung mit 14 Hz um die 1. Eigenfrequenz der Decken im 2. bis 4. Obergeschoß. Dementsprechend zeigen auch nur diese Decken Amplitudenmaxima in dieser Frequenz. Diese Decken weisen ein zusätzliches Amplitudenmaxima bei etwa 22 Hz auf. Hierbei handelt es sich um die Anregung durch die Schwellenfrequenz, wobei gleichzeitig die Eigenfrequenz der Decke im 1.OG in diesem Bereich liegt. Bei 34 Hz, hier liegt die Eigenfrequenz der Decke im EG, sind Amplitudenmaxima der Decke im 1.OG und der Decke im EG zu erkennen. Hier bildet sich wieder die bereits mehrfach besprochene Koppelung der Schwingungen benachbarter Bauteile aus. Die auf den Freifeldmeßpunkt bezogenen Werte zeigen Maxima an den gleichen Frequenzen, wobei die größte Verstärkung mit einem Wert von ca 4.5 an den Decken im 2. bis 4. OG auftritt.

Die Wände (Bild 5.42) im Gesamtbauwerk antworten in den Frequenzen 14 Hz, 22 Hz und zwischen 60 und 75 Hz. Das Amplitudenmaxima liegt bei 22 Hz, wobei die Amplituden mit der Stockwerkszahl anwachsen. Die auf den mittleren Freifeldmeßwert VFM bezogenen Spektren zeigen eine Erhöhung nur im Bereich der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz. Danach nehmen die Amplituden i.M. stetig ab.

Die tatsächlichen Verstärkungsfaktoren der Wände und Decken lassen sich aus den in Bild 5.43 dargestellten, auf den Meßpunkt VFF bezogenen Amplituden ablesen. Für die Wände ergibt sich folgendes Übertragungsverhalten: Frequenzen bis etwa 10 Hz werden ungemindert übertragen. Im Bereich der Deckenresonanzen um 20 Hz beträgt die Abminderung i.M. 50 %. Mit höher werdender Frequenz werden die Amplituden dann bis zu 90 % abgemindert. Die Decken zeigen Verstärkungen im Bereich der Resonanzfrequenz der Decken im 2. bis 4. OG (14 Hz) und bei der Decke im EG. Die Verstärkungsfaktoren liegen etwa bei 2,0. Erstaunlicherweise zeigt die Decke im 1. OG, dessen Resonanzfrequenz mit der Schwellenfach-Anregungsfrequenz zusammenfällt, keinerlei Resonanzen.

In Bild 5.44 sind die horizontalen Bauwerksschwingungen über die gesamte Bauwerkshöhe dargestellt. Die Amplitudenmaxima liegen bei 22 Hz und zwischen 60 und 77 Hz und sind damit durch die Anregungsfrequenzen bedingt. Die im unteren Bildteil dargestellten bezogenen Amplituden ergeben Verstärkungen im Bereich bis 10 Hz, wobei die Amplituden mit der Bauwerkshöhe stetig zunehmen. Hierbei handelt es sich um erste horizontale Eigenfrequenzen des Gesamtbauwerks, die aber im Antwortspektrum keine Rolle spielen.

Bild 5.45 zeigt die Spektren der Stützen in der Mitte des



Bauwerks für Keller, 1.OG und 4.OG. Bis auf die Stütze im 4.OG sind die Amplitudenspektren sowohl hinsichtlich der Frequenzen wie auch der Amplituden ziemlich ähnlich. Die Stütze im 4. OG weist die größten Amplituden auf, wobei die Amplitudenmaxima bei 14 Hz und 23 Hz, den Deckenresonanzen, liegen. Hier zeigt sich wieder die Koppelung von Wänden und Stützen mit den Decken.

In Bild 5.46 sind die Spektren der Wände und Stützen über die Tiefe des Bauwerks im 1.OG dargestellt. Man erkennt, daß die Amplituden mit zunehmender Tiefe des Bauwerks und damit Entfernung zur Erregerquelle ste-

tig abnehmen. Die Abnahmeverhältnisse liegen bei etwa 70 % und 50 %.

Die Bilder 5.47 bis 5.49 zeigen einen Vergleich der Spektren relevanter Meßpunkte im Freifeld (Bild 5.47), der Decken (Bild 5.48) und der Wände (Bild 5.49). Im ersten Anschein zeigen alle Meßpunkte eine Abhängigkeit derart, daß die Amplituden mit zunehmender Fertigstellung des Gebäudes kleiner werden. Bezieht man jedoch die Spektren auf die zugehörigen Freifeldmeßpunkte, so ergibt sich nahezu keine Abhängigkeit der Amplituden vom Fertigstellungszustand des Gebäudes.

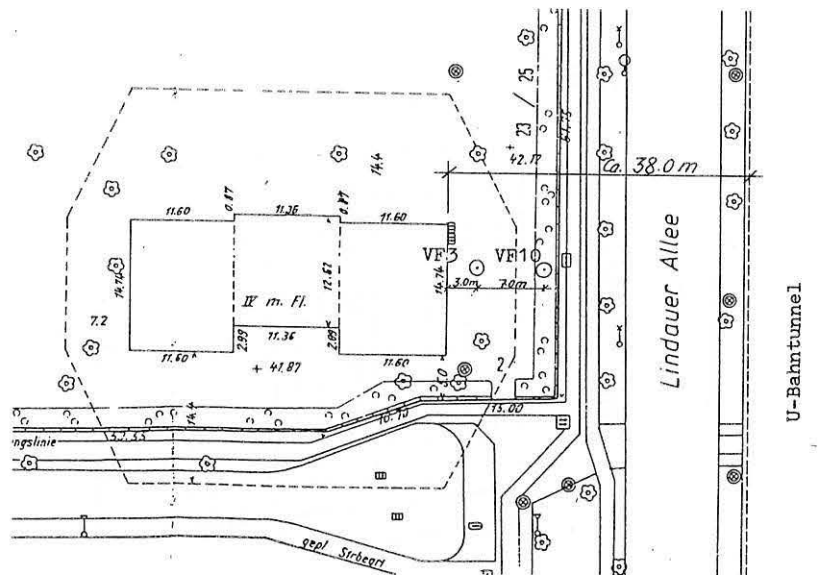
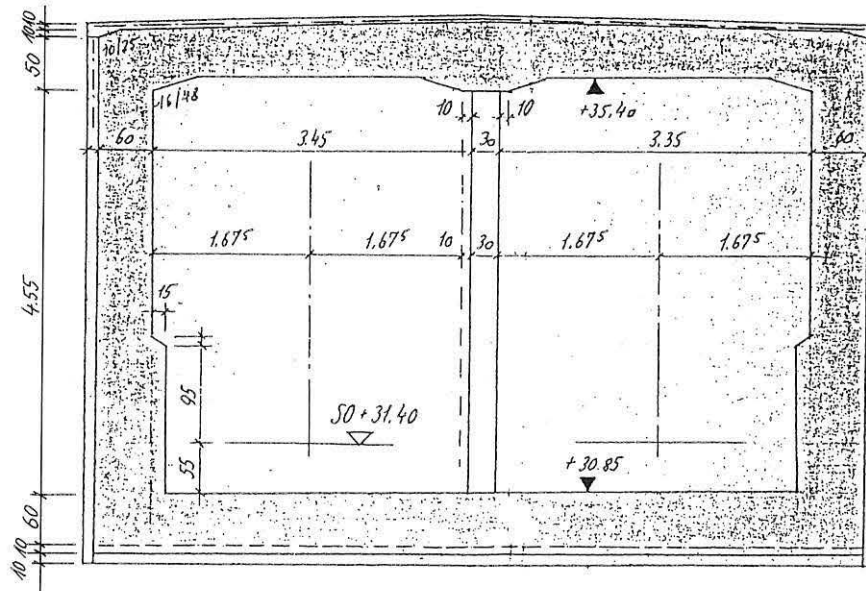


Bild 5.1

Projekt: Paul Löbe Oberschule

Bild oben: Tunnelquerschnitt

Bild unten: Lageplan der Freifeldmeßpunkte

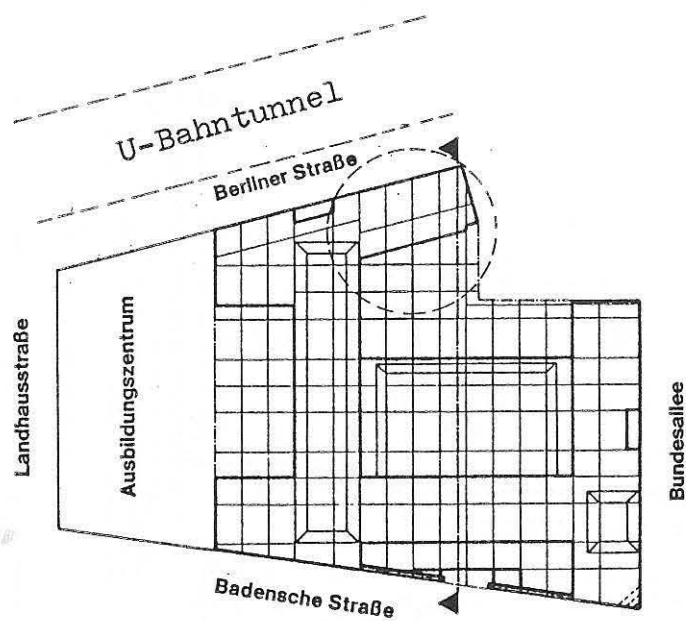
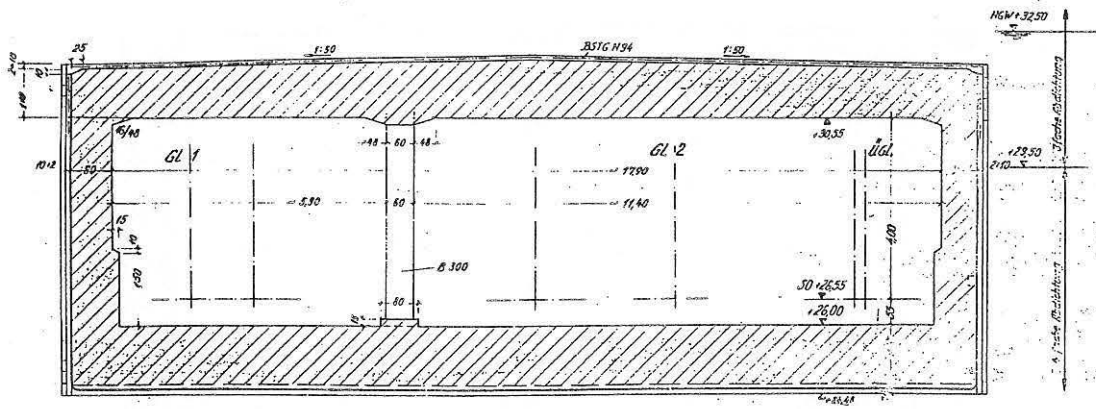


Bild 5.2

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

Bild oben: Tunnelquerschnitt

Bild unten: Lageplan des Rechenzentrums

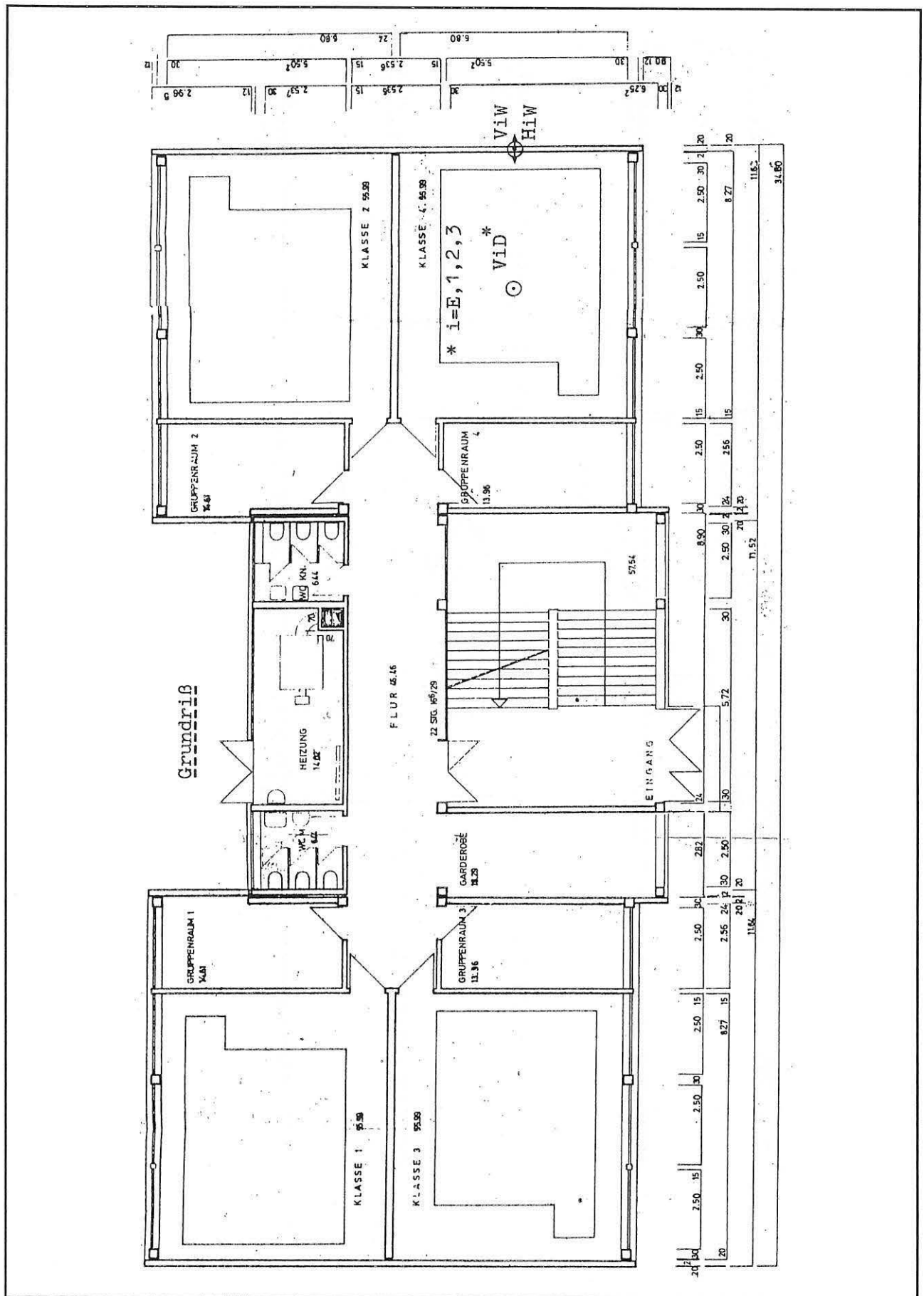


Bild 5.3  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Lageplan der Meßpunkte im Grundriß

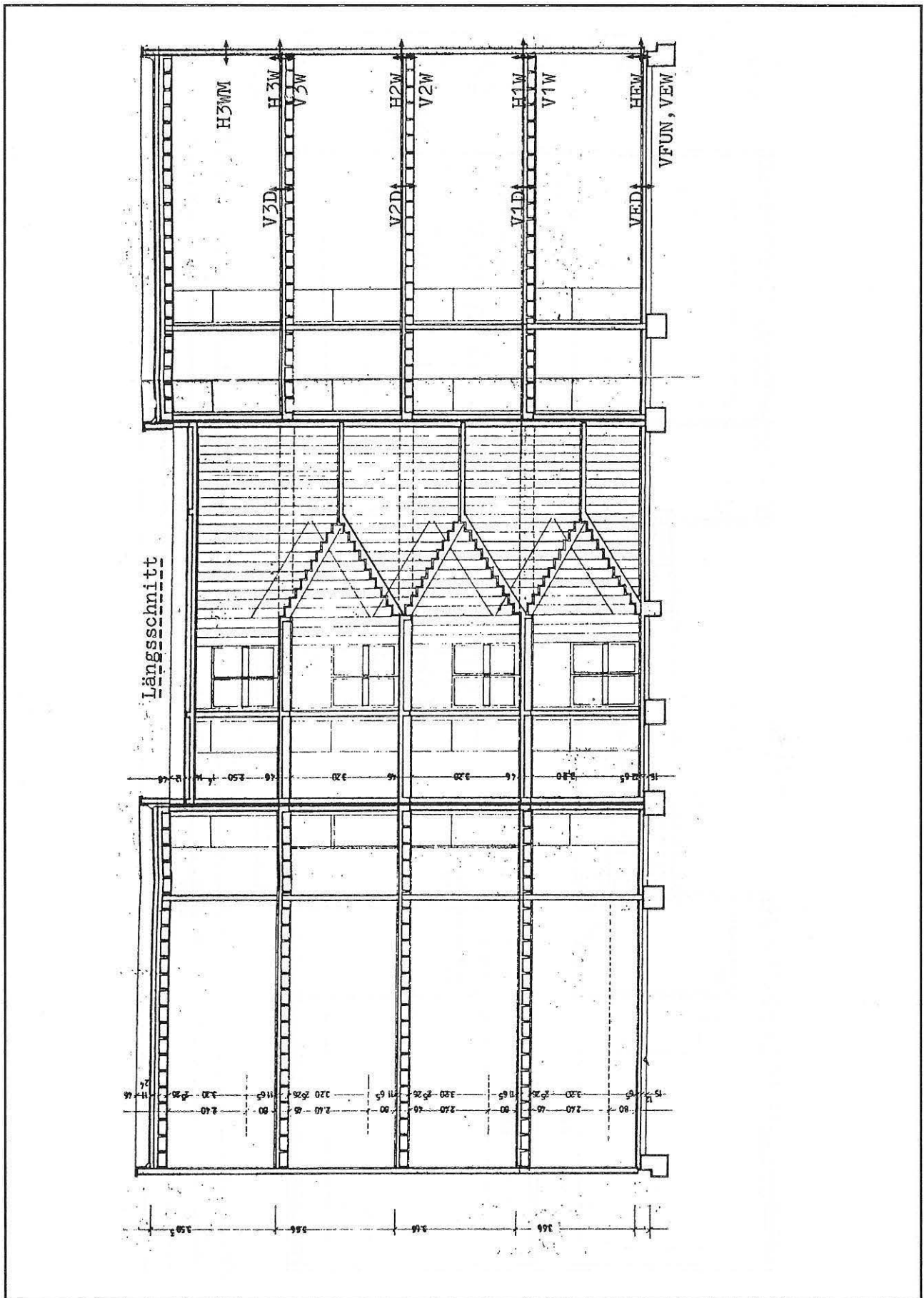


Bild 5.4  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Lageplan der Meßpunkte im Längsschnitt

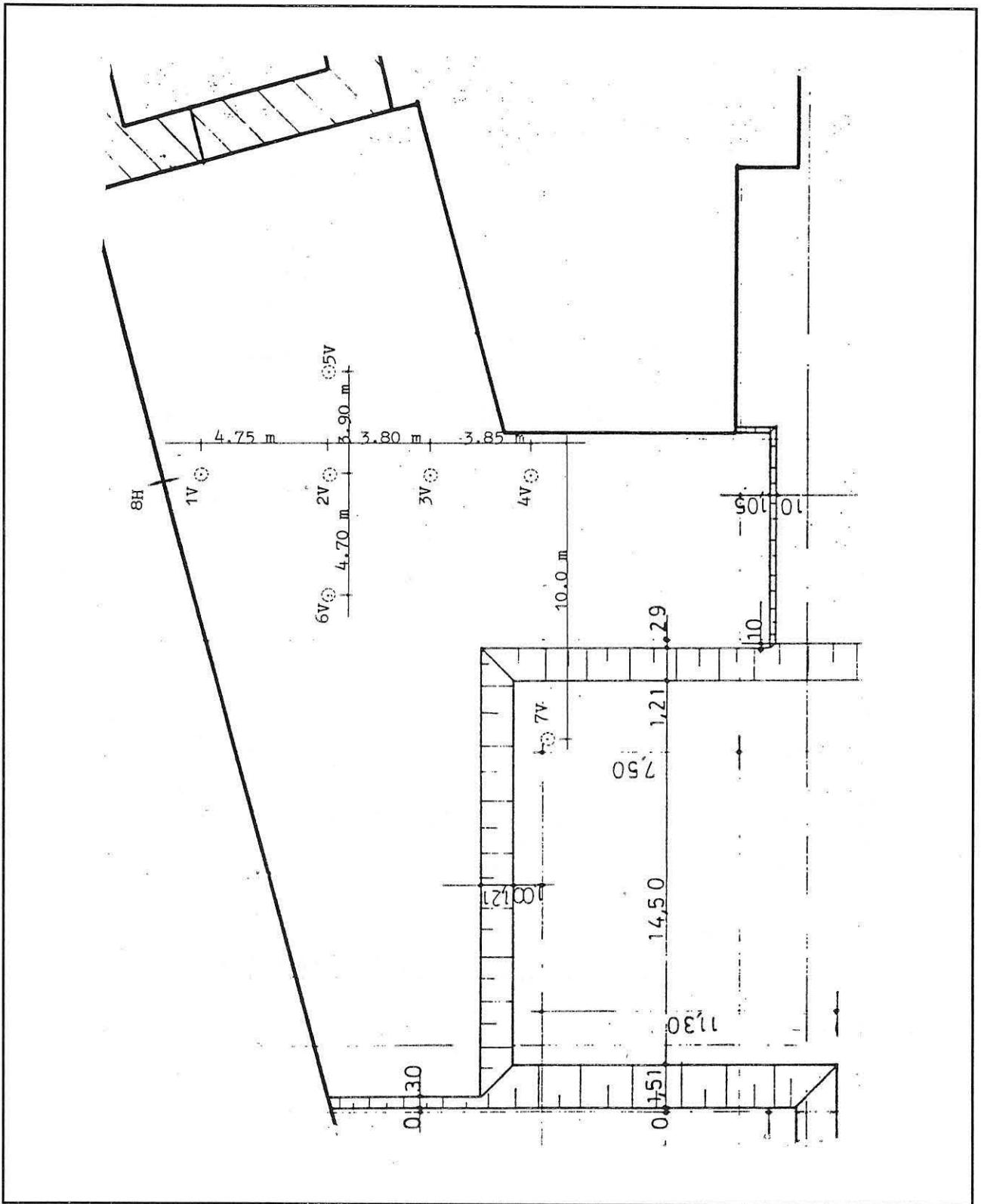


Bild 5.5  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 Lageplan der Meßpunkte in der 1. Bauphase



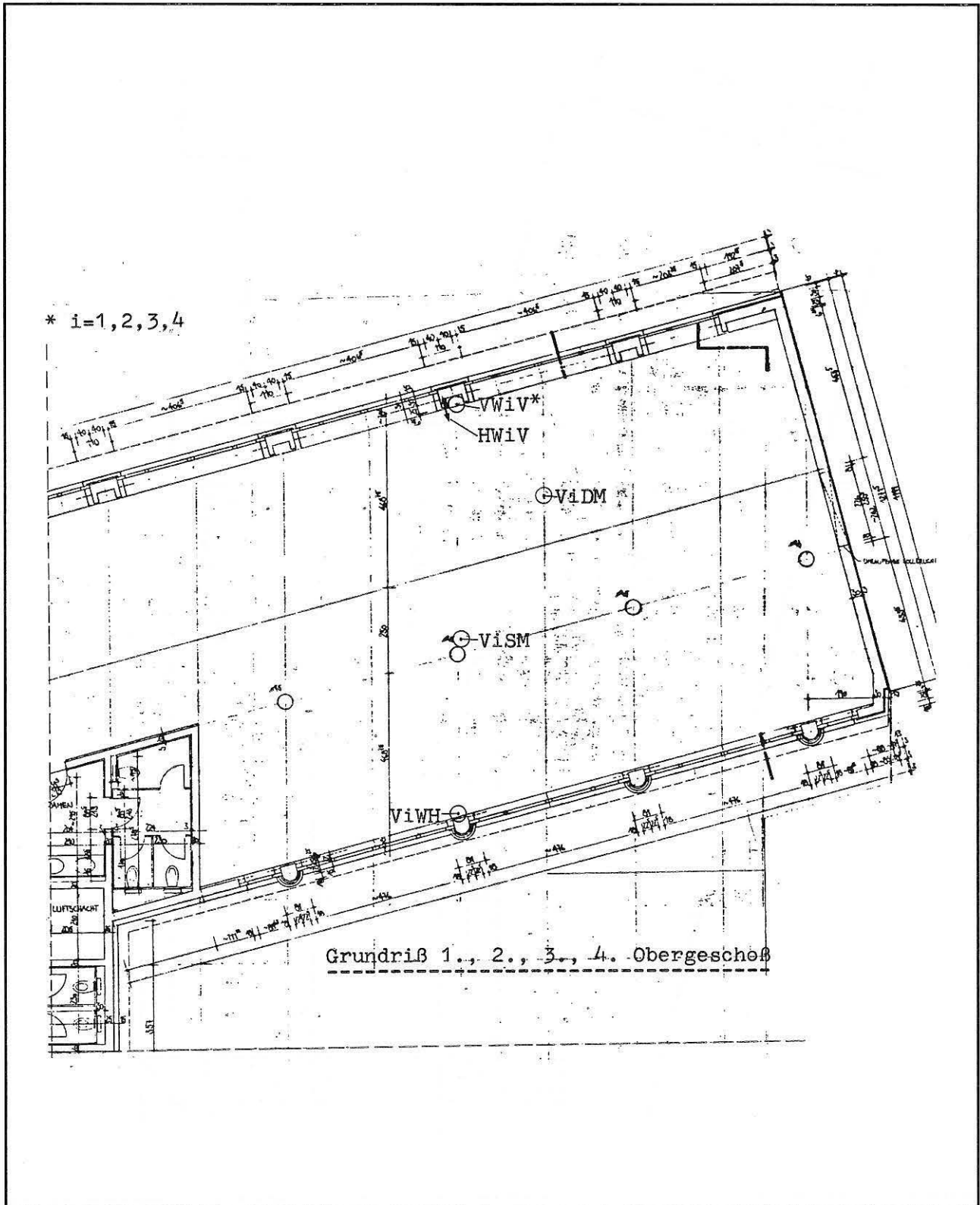


Bild 5.6  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 Lageplan der Meßpunkte der oberen 4 Geschosse in der 3. Bauphase

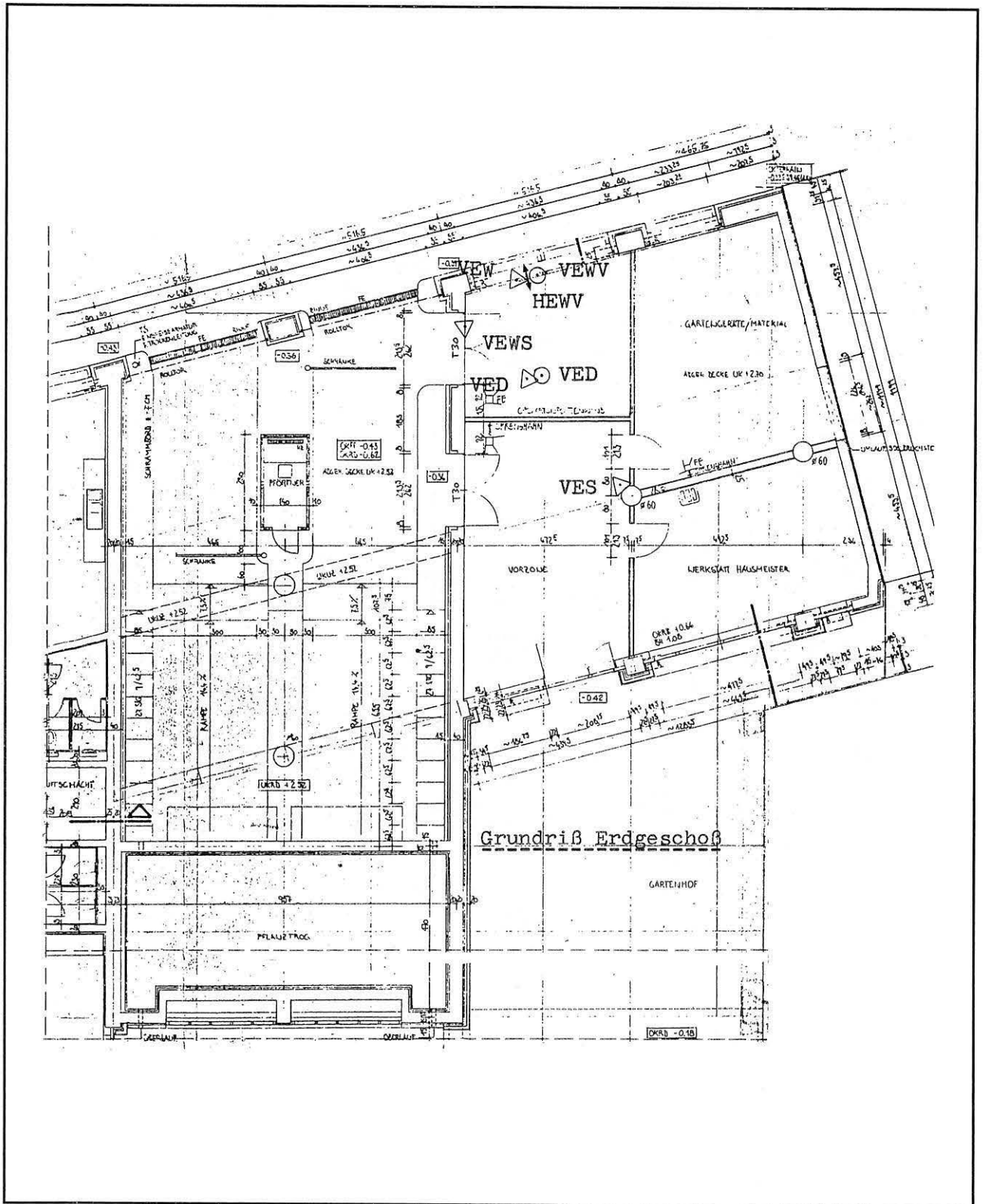


Bild 5.7  
 Projekt: .Technisches Zentrum der Sparkasse  
 Lageplan der Meßpunkte des Erdgeschosses in der 2. und 3. Bauphase



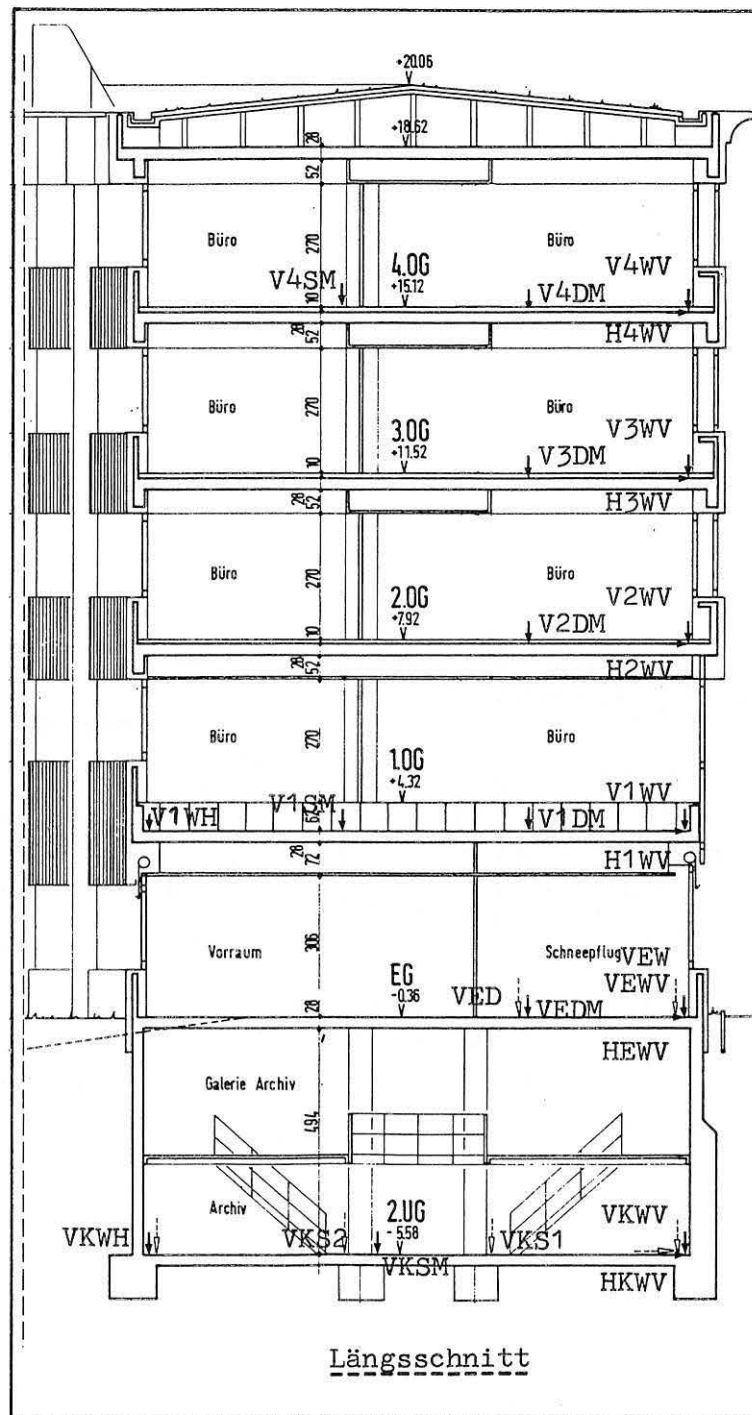


Bild 5.9  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 Lageplan der Meßpunkte im Längsschnitt in der 2. und 3. Bauphase

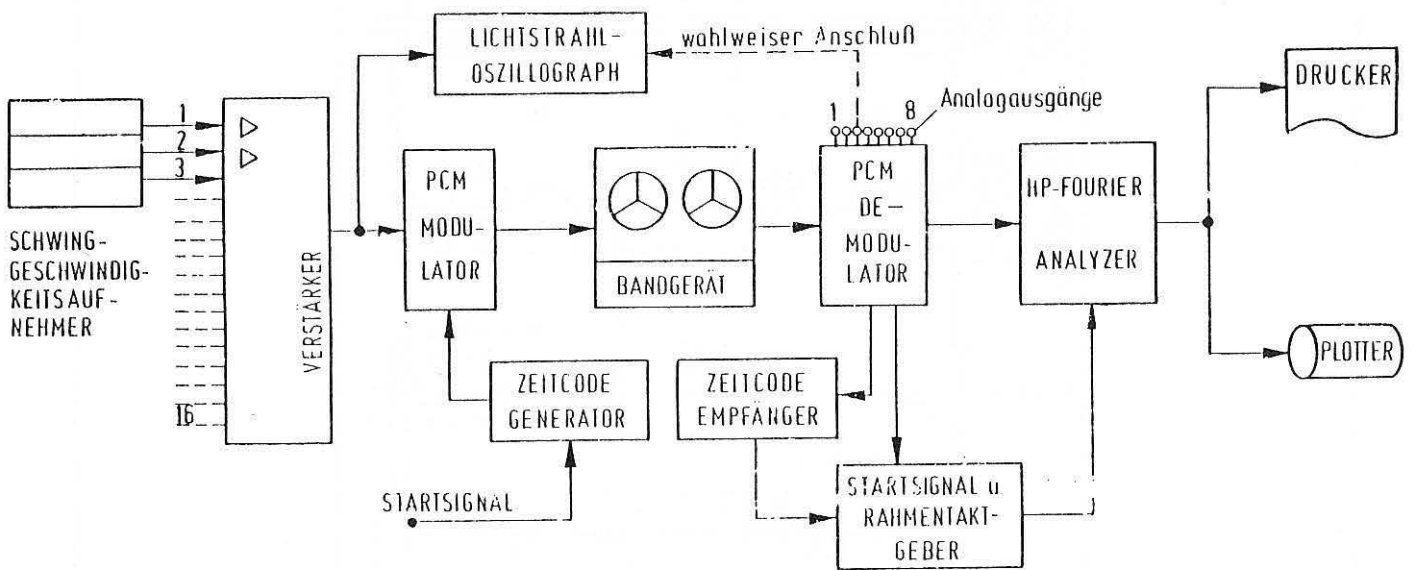


Bild 5.10  
 Blockschaltbild für Messung und Auswertung einer Schwingungsaufzeichnung

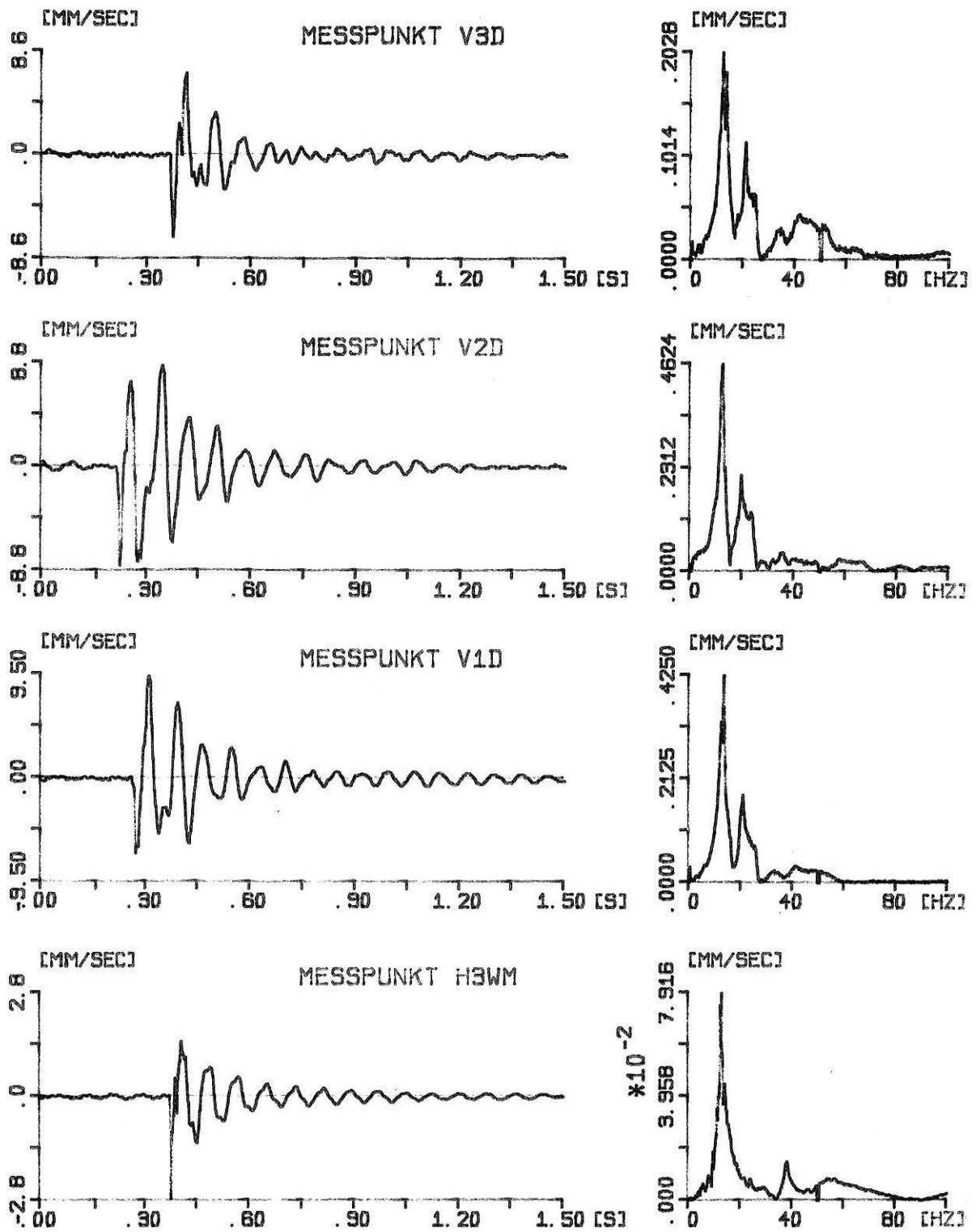


Bild 5.11

Projekt: Paul Löbe Oberschule

Anregung: Impuls

Zeitverläufe und Frequenzspektren beim Einleiten eines Impulses auf die jeweilige Decke bzw. Wand



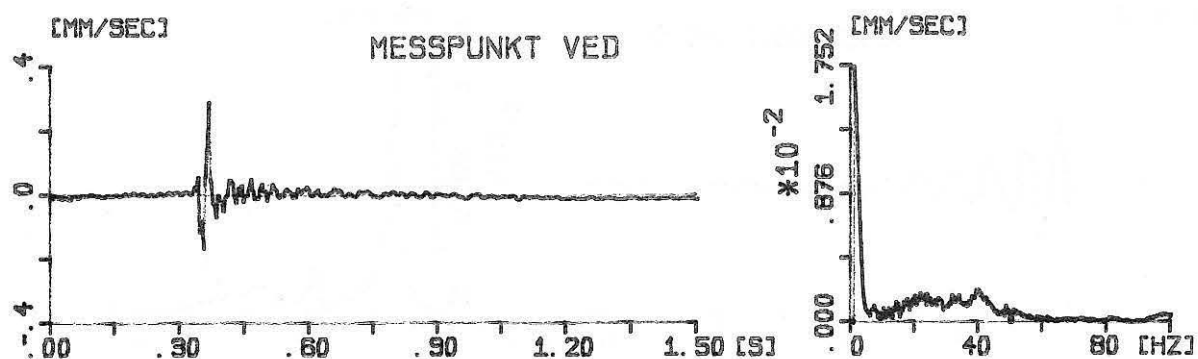
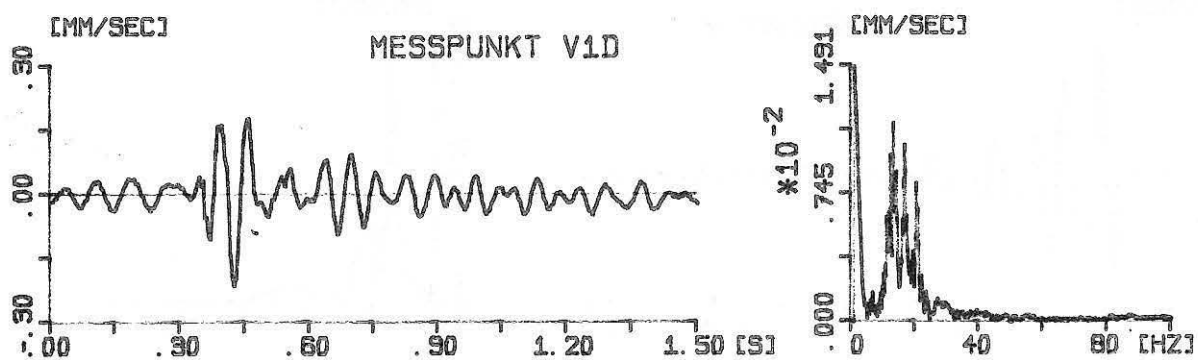
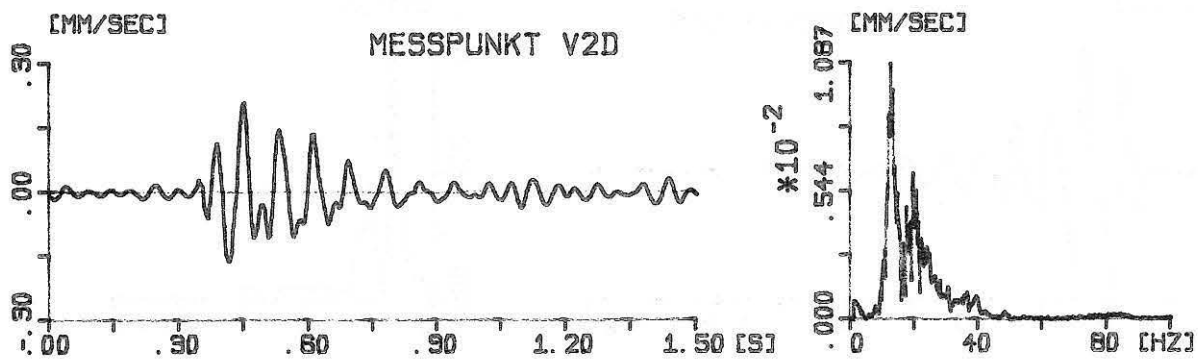
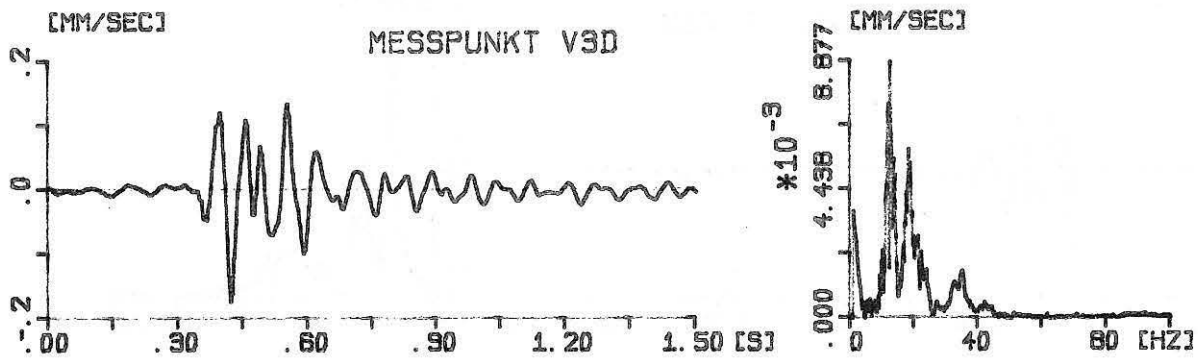


Bild 5.12  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: Impuls  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Decken beim Einleiten eines Impulses im Boden in ca. 3 m Entfernung vom Gebäude

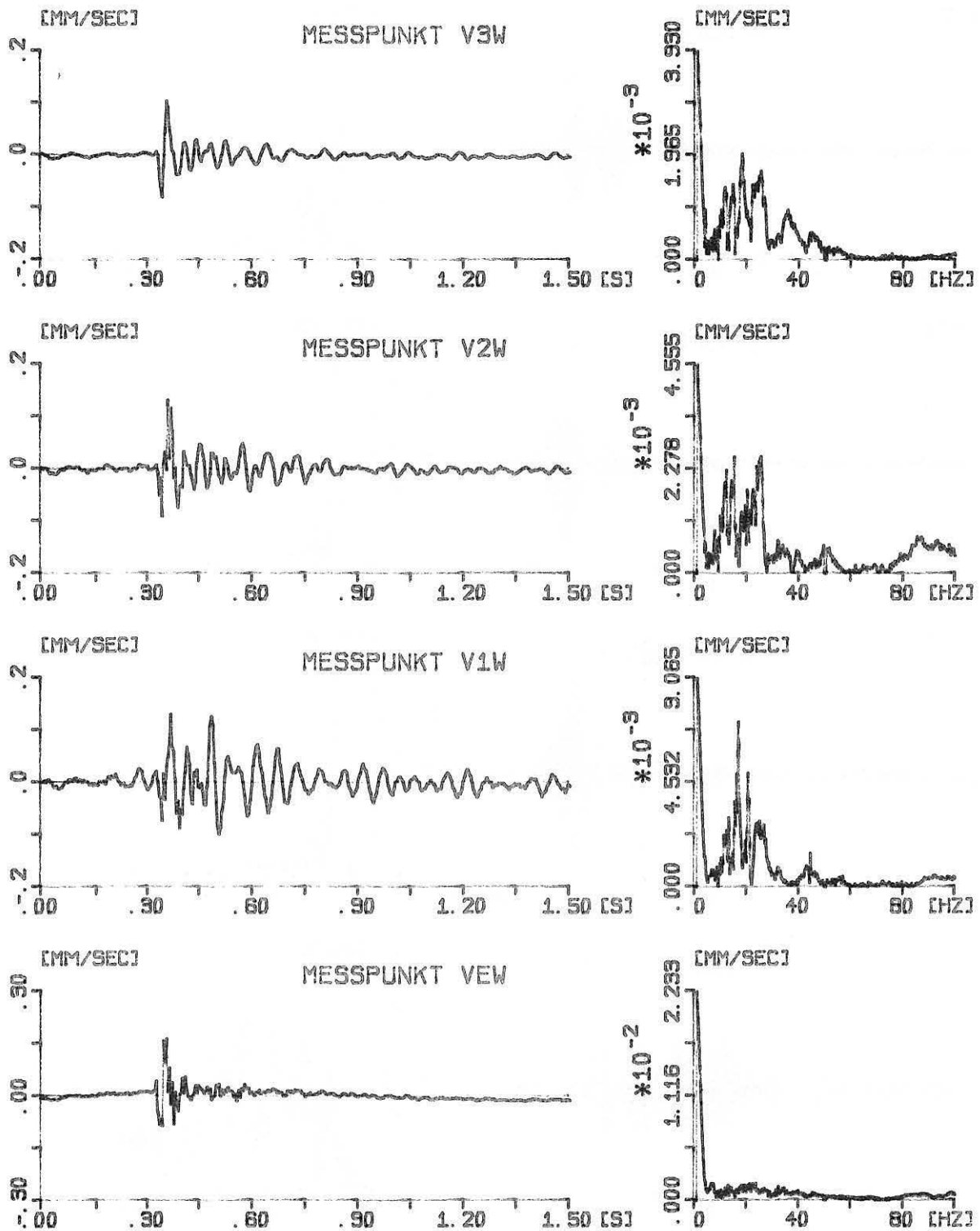


Bild 5.13

Projekt: Paul Löbe Oberschule

Anregung: Impuls

Zeitverläufe und Frequenzspektren der Wandfußpunkte beim Einleiten eines Impulses im Boden in ca. 3 m Entfernung vom Gebäude

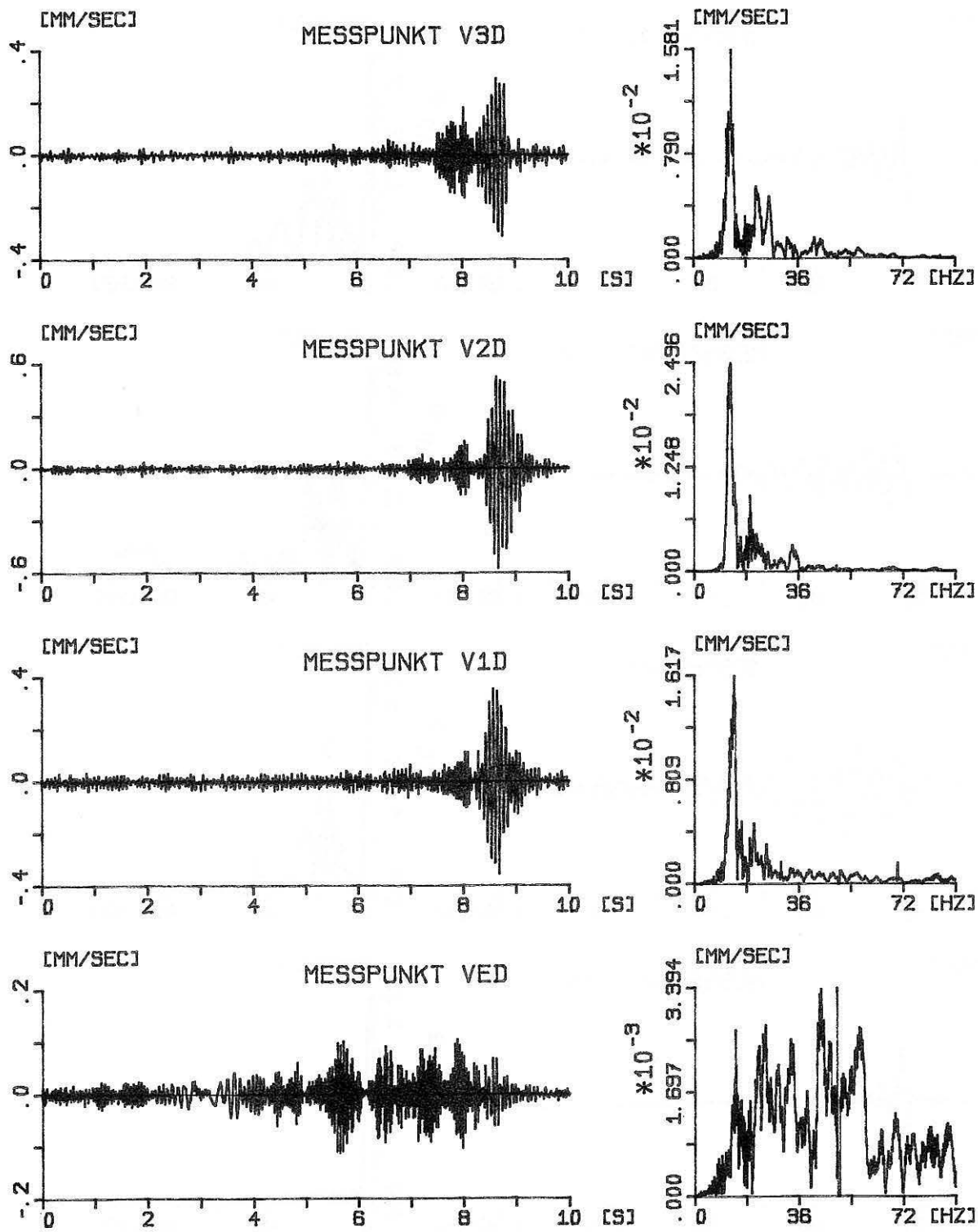


Bild 5.14  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: Hydropuls  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Decken

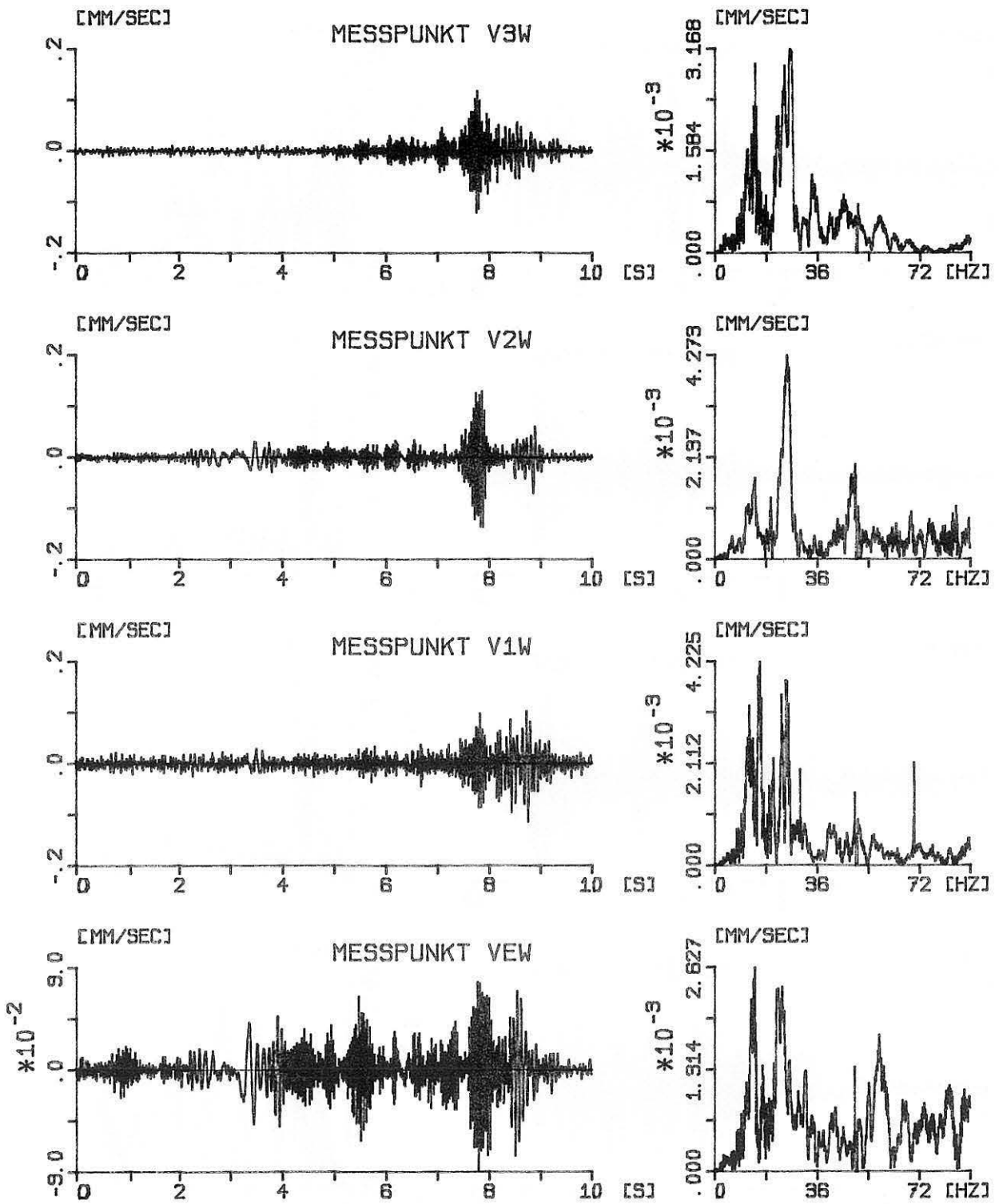


Bild 5.15  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: Hydropuls  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Wandfußpunkte (vertikal)

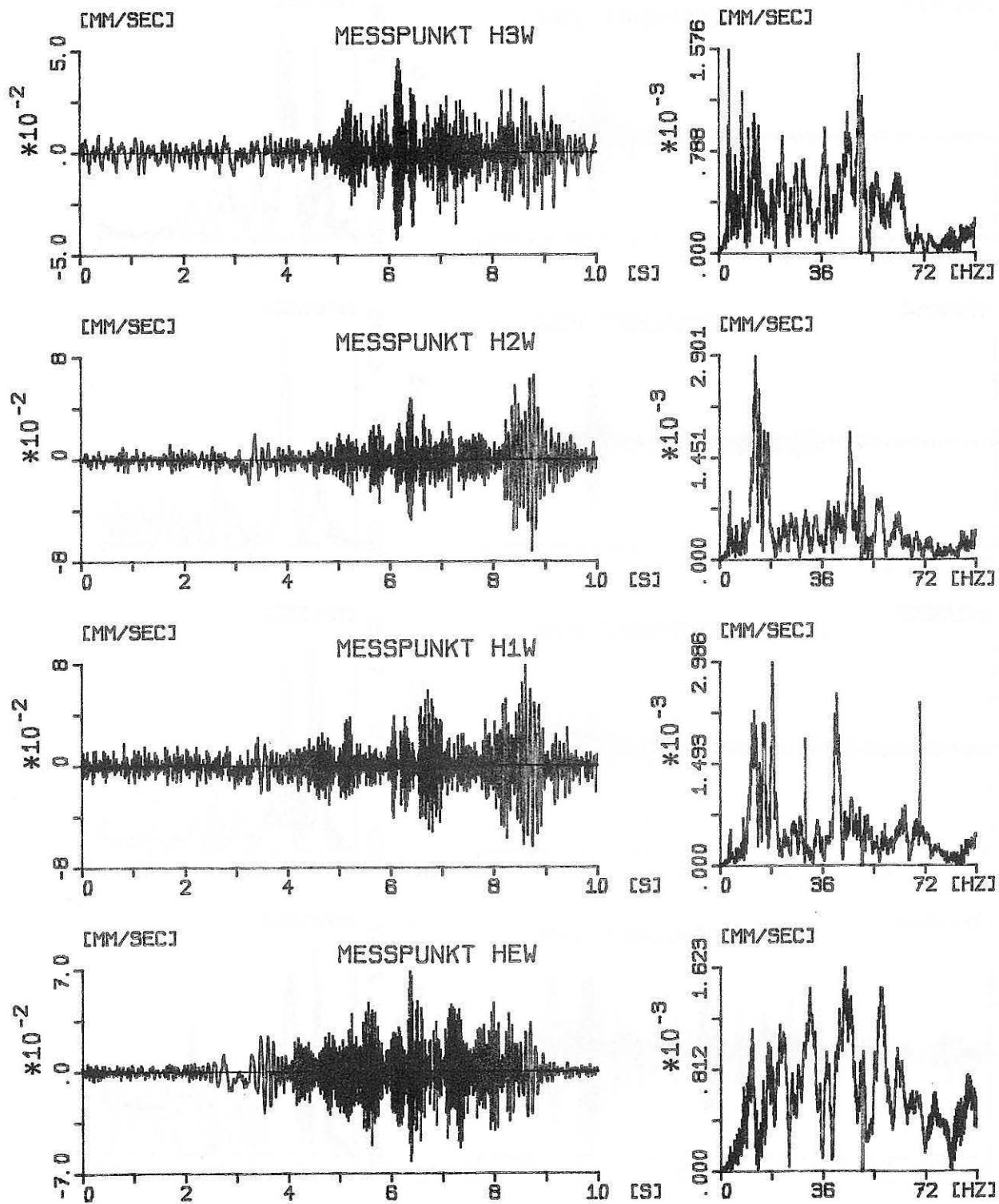


Bild 5.16  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: Hydropuls  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Wandfußpunkte (horizontal)

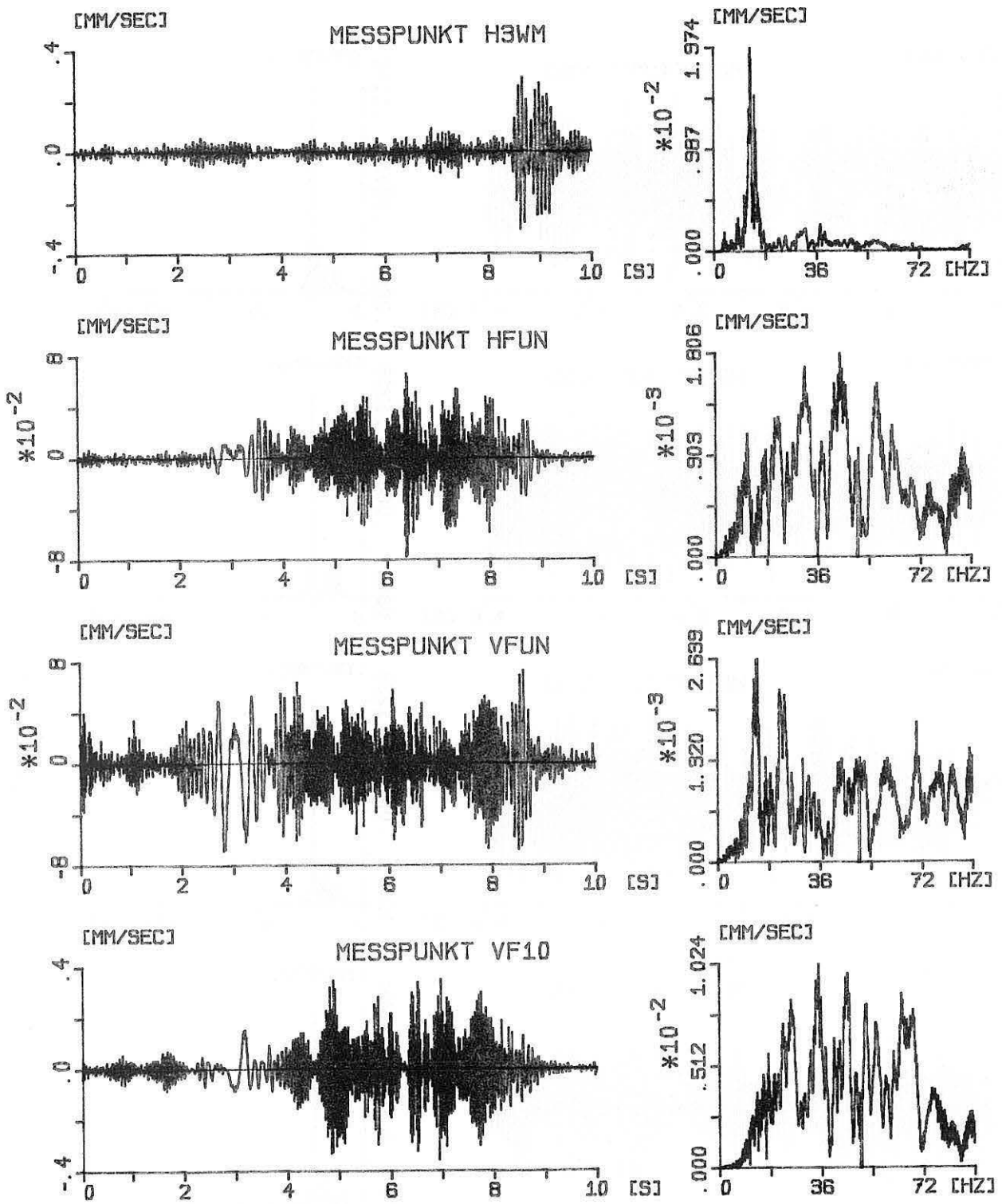


Bild 5.17

Projekt: Paul Löbe Oberschule

Anregung: Hydropuls

Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte am Fundament im Freifeld und an der Wandmitte



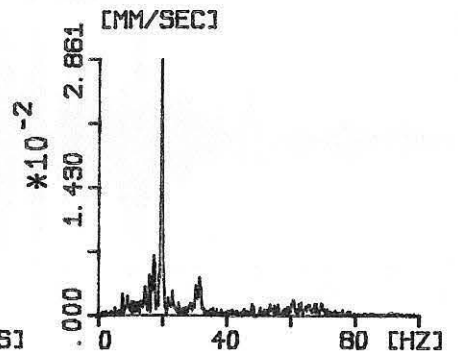
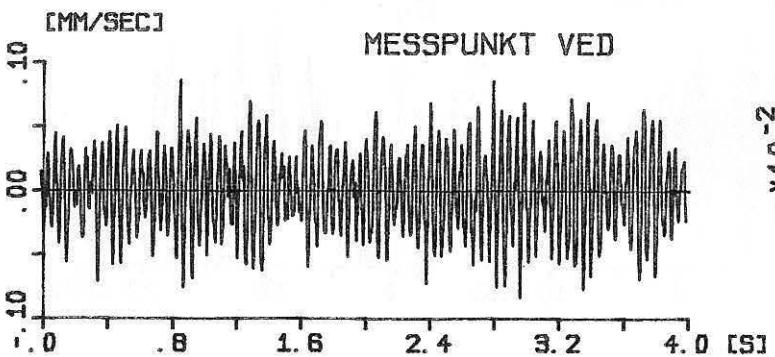
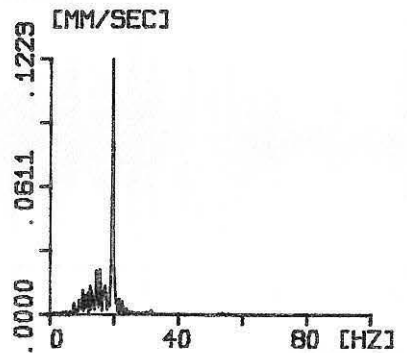
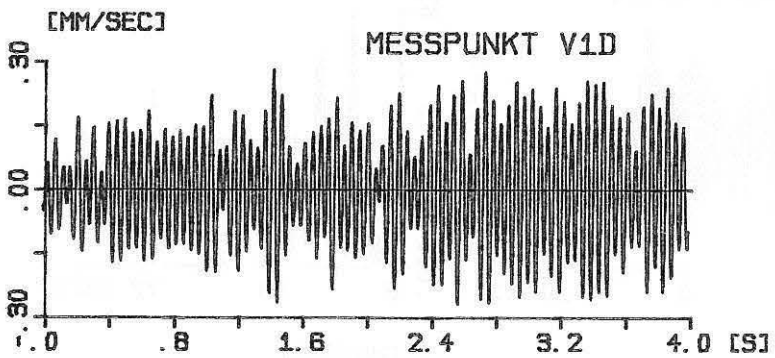
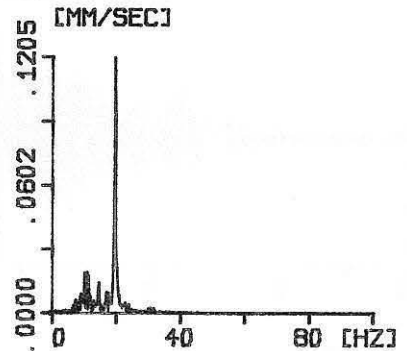
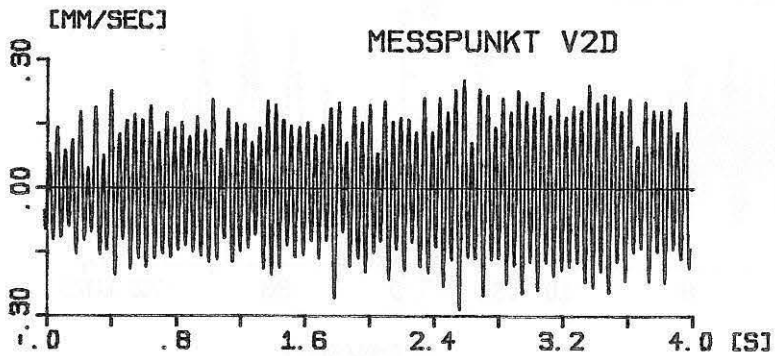
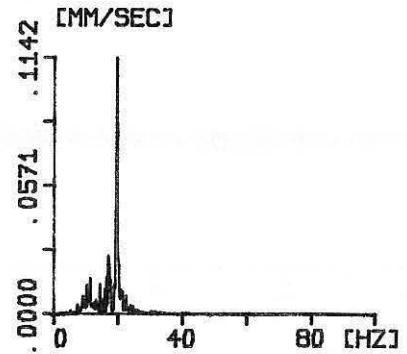
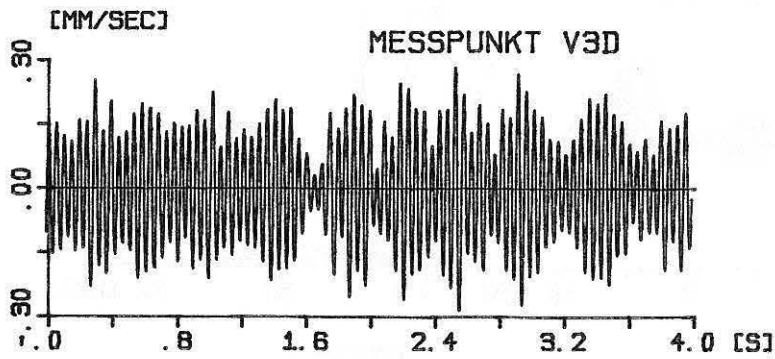


Bild 5.18  
 Projek: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: U-Bahn-Erschütterungen  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Decken bei einer U-Bahn-Vorbeifahrt

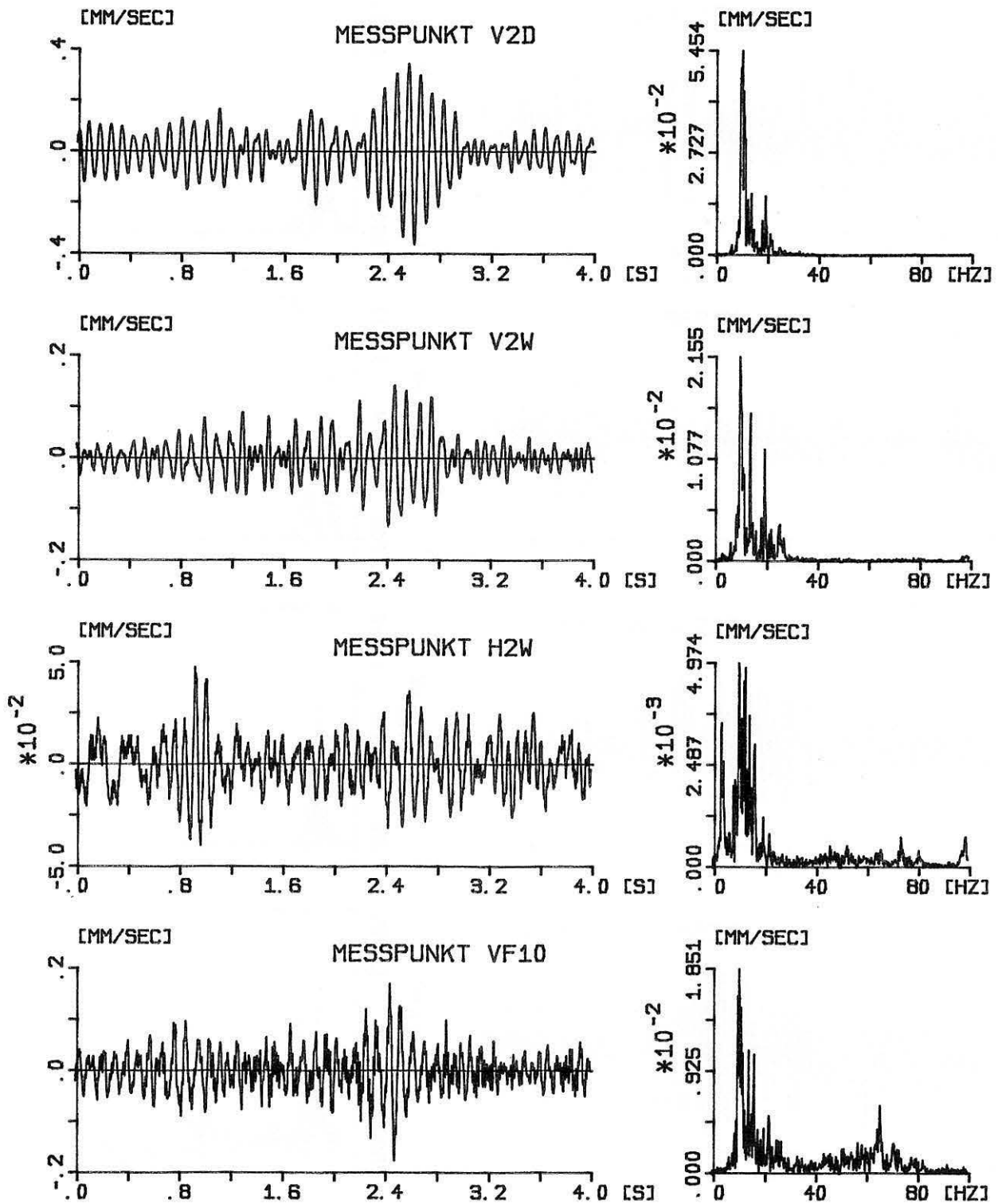


Bild 5.19  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: U-Bahn-Erschütterungen  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren verschiedener Meßpunkte

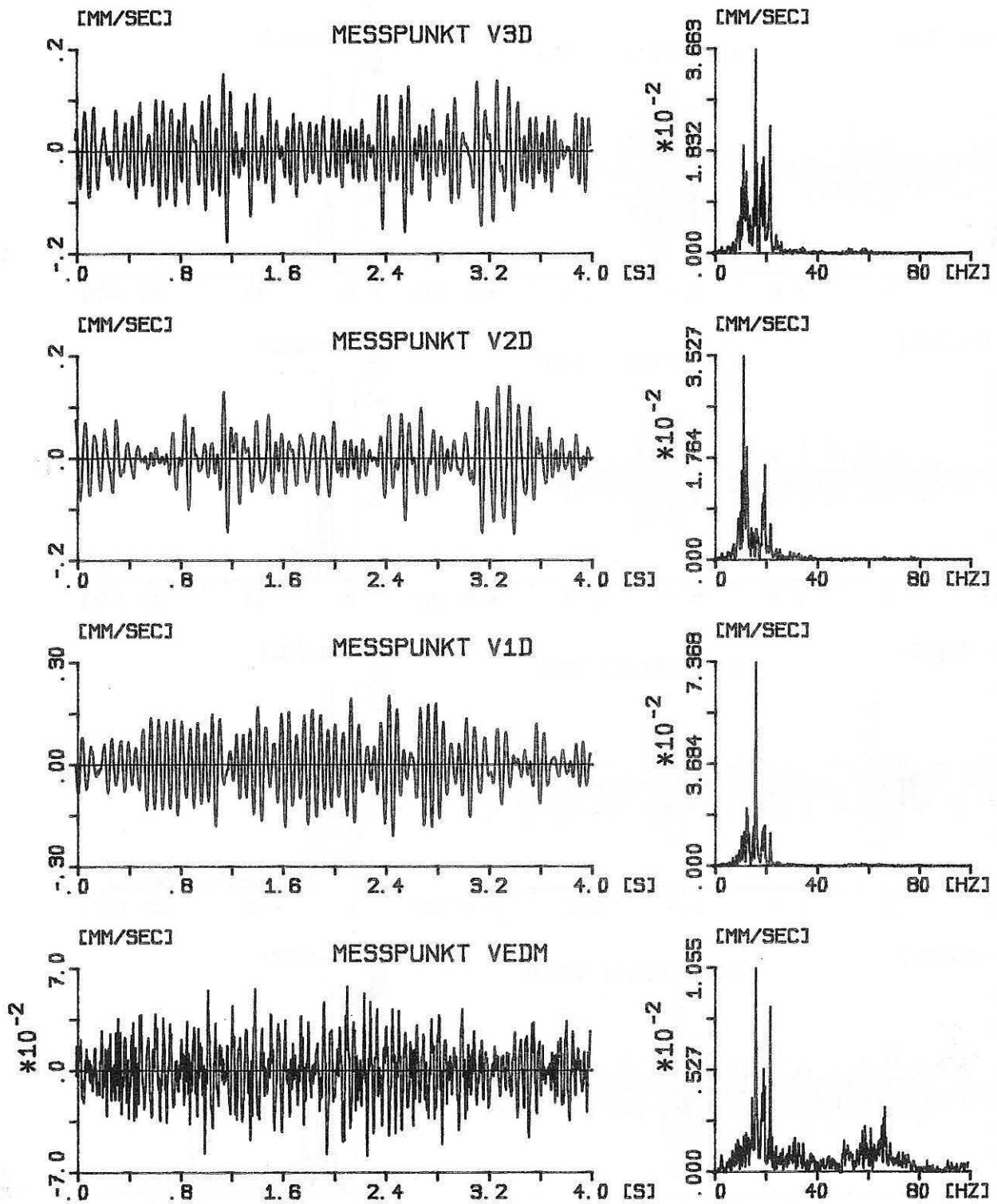


Bild 5.20  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: U-Bahn-Erschütterungen  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Decken bei einer 2. U-Bahn-Vorbeifahrt

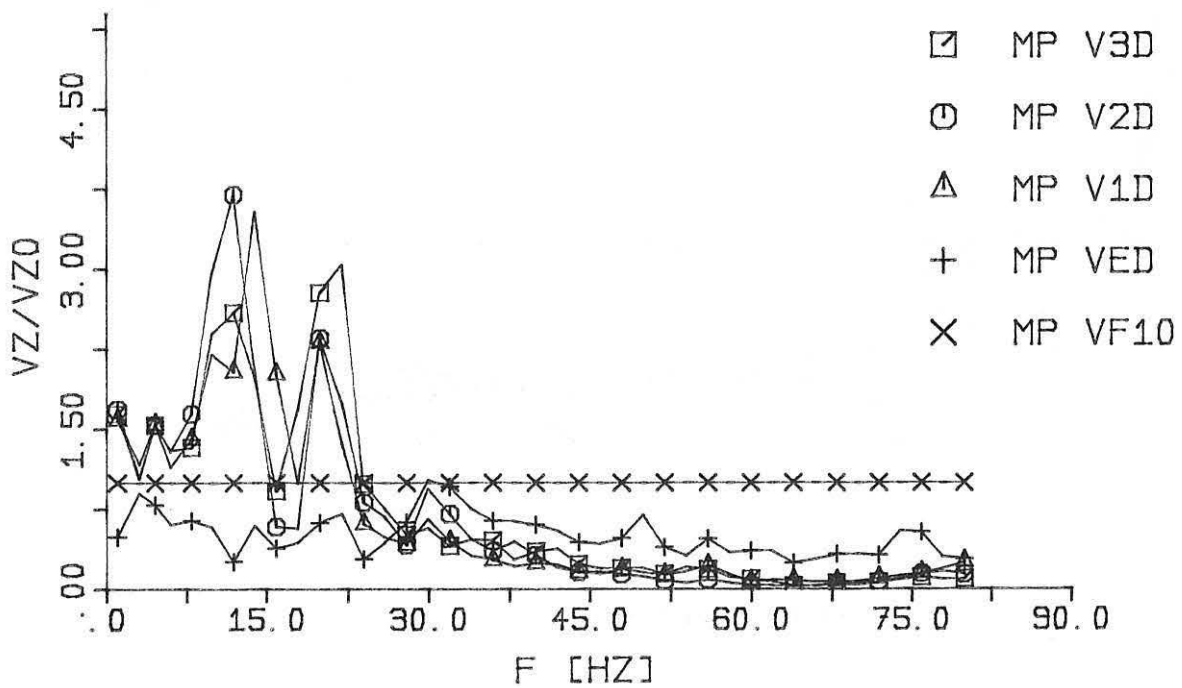
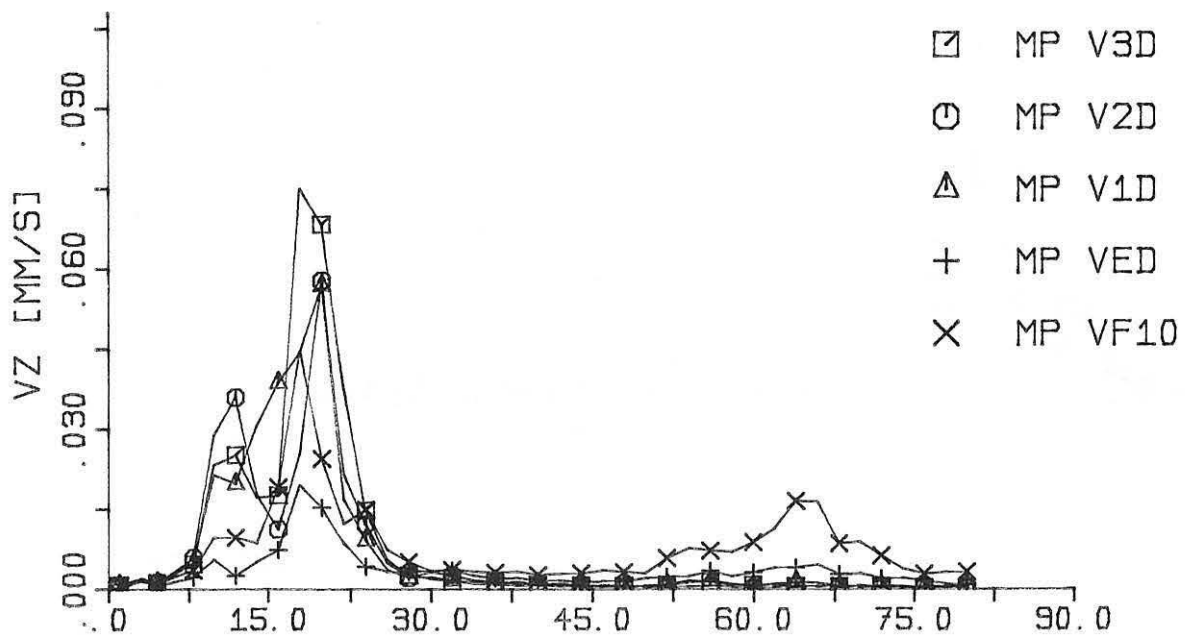


Bild 5.21  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: U-Bahn-Erschütterungen  
 Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Decken  
 Bild unten: Auf VF10 bezogene Frequenzspektren

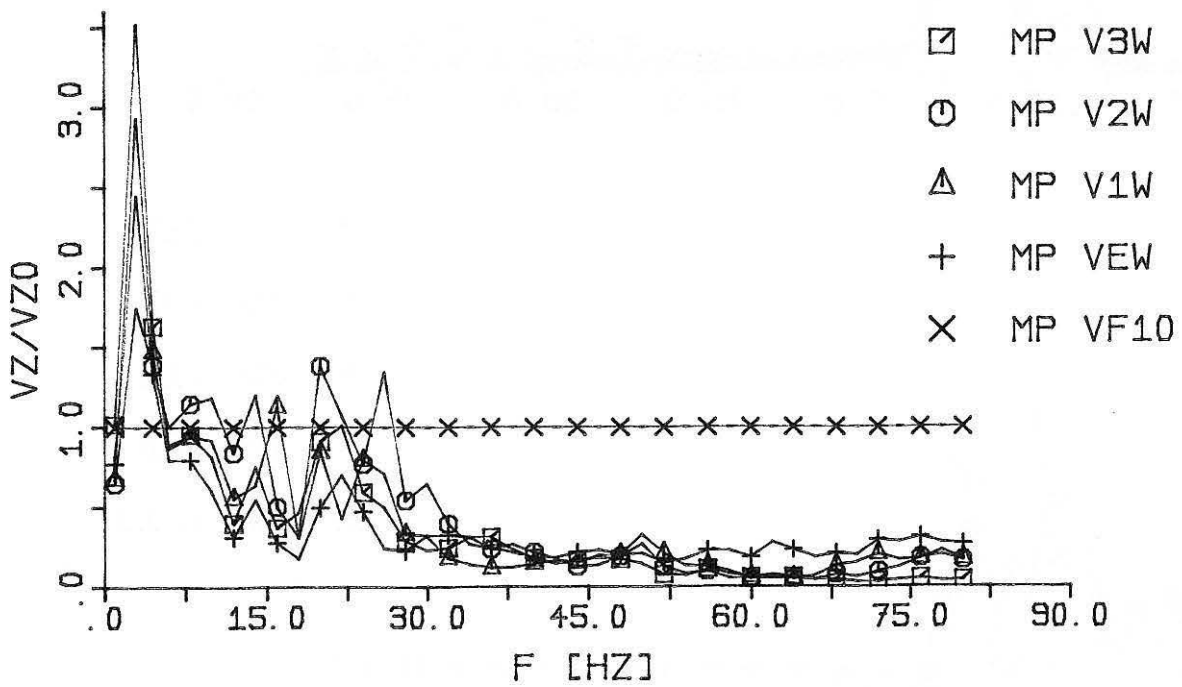
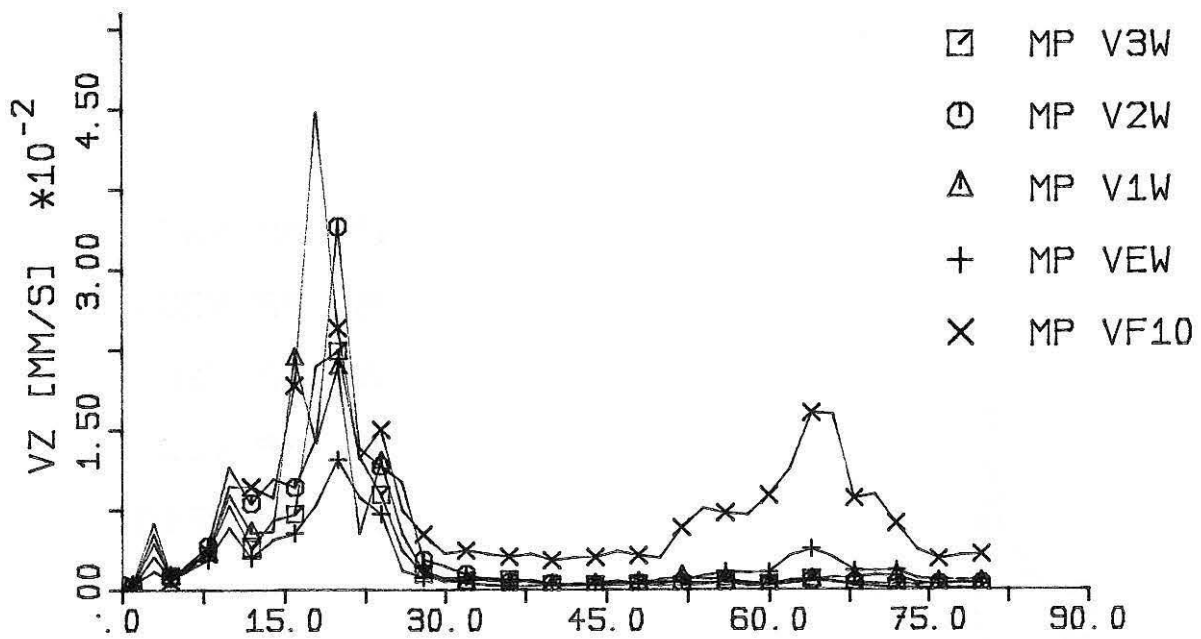


Bild 5.22  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: U-Bahn-Erschütterungen  
 Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Wandfußpunkte (vertikal)  
 Bild unten: Auf VF10 bezogene Frequenzspektren

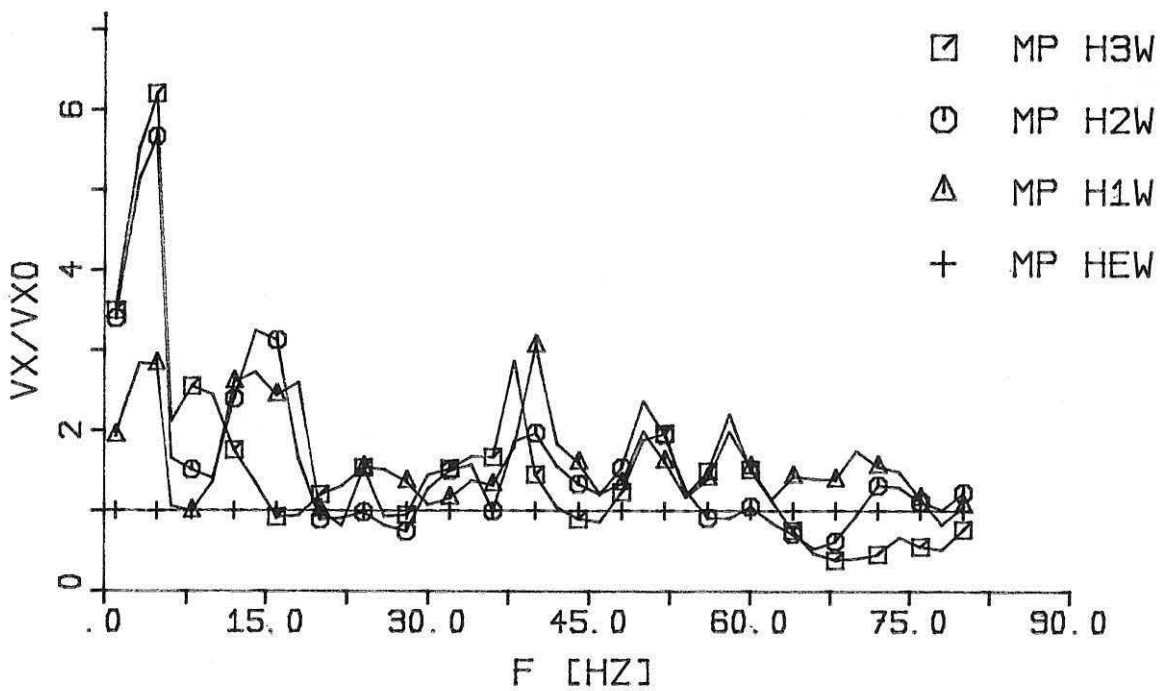
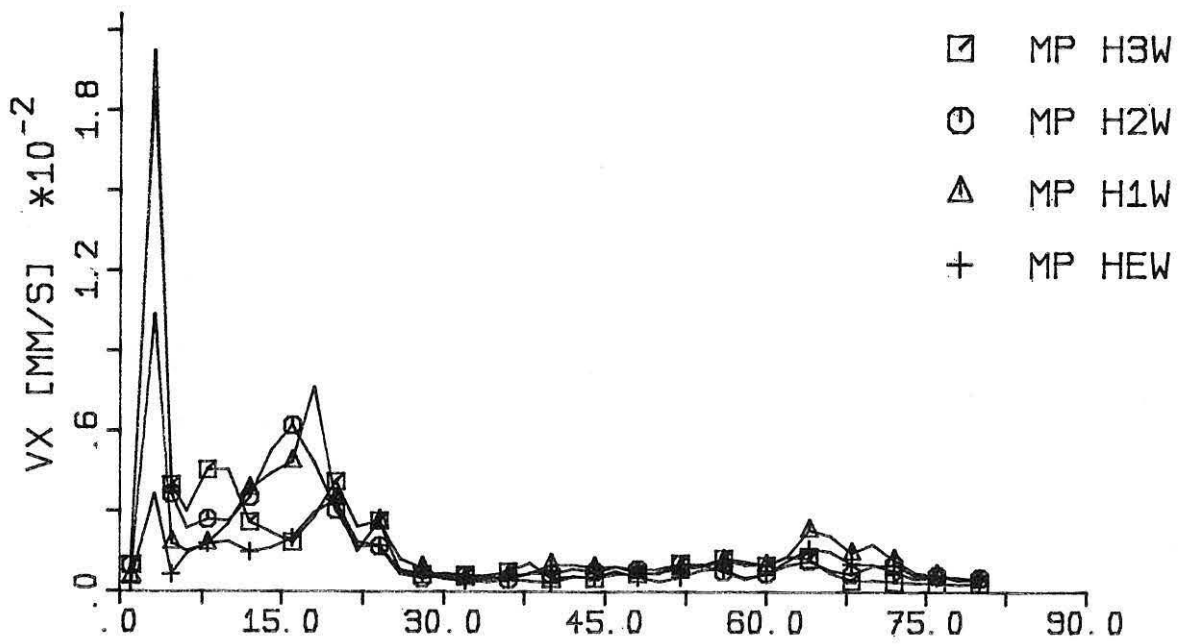


Bild 5.23  
 Projekt: Paul Löbe Oberschule  
 Anregung: U-Bahn-Erschütterungen  
 Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Wandfußpunkte (horizontal)  
 Bild unten: Auf HEW bezogene Frequenzspektren



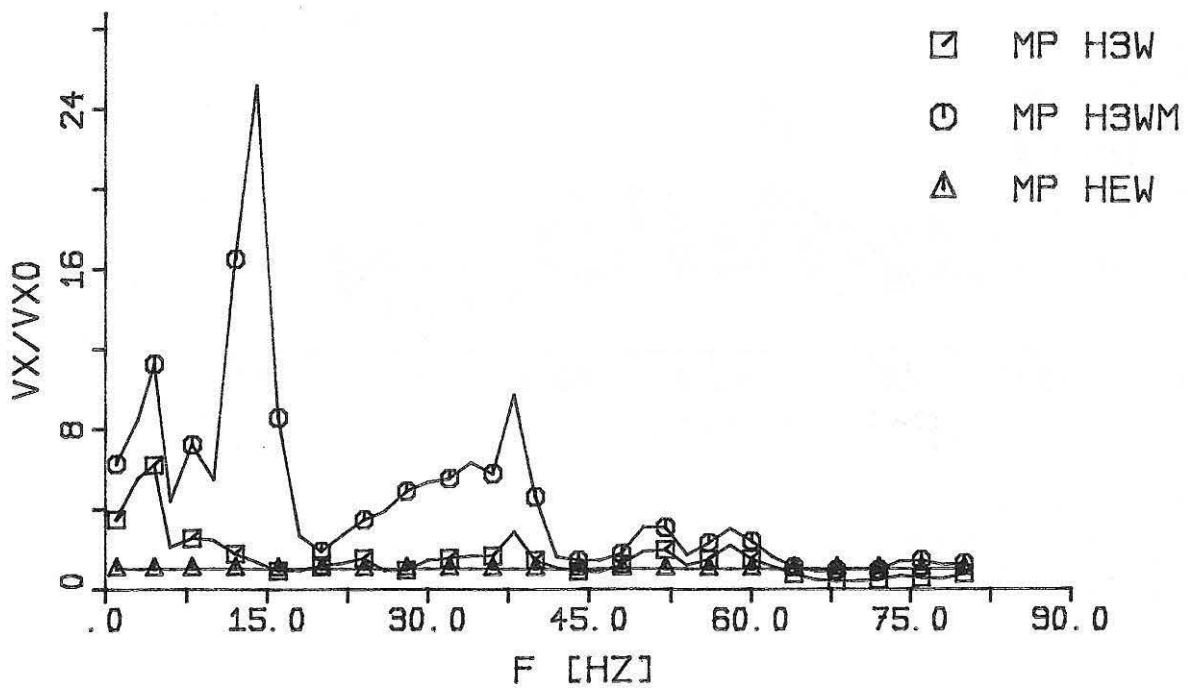
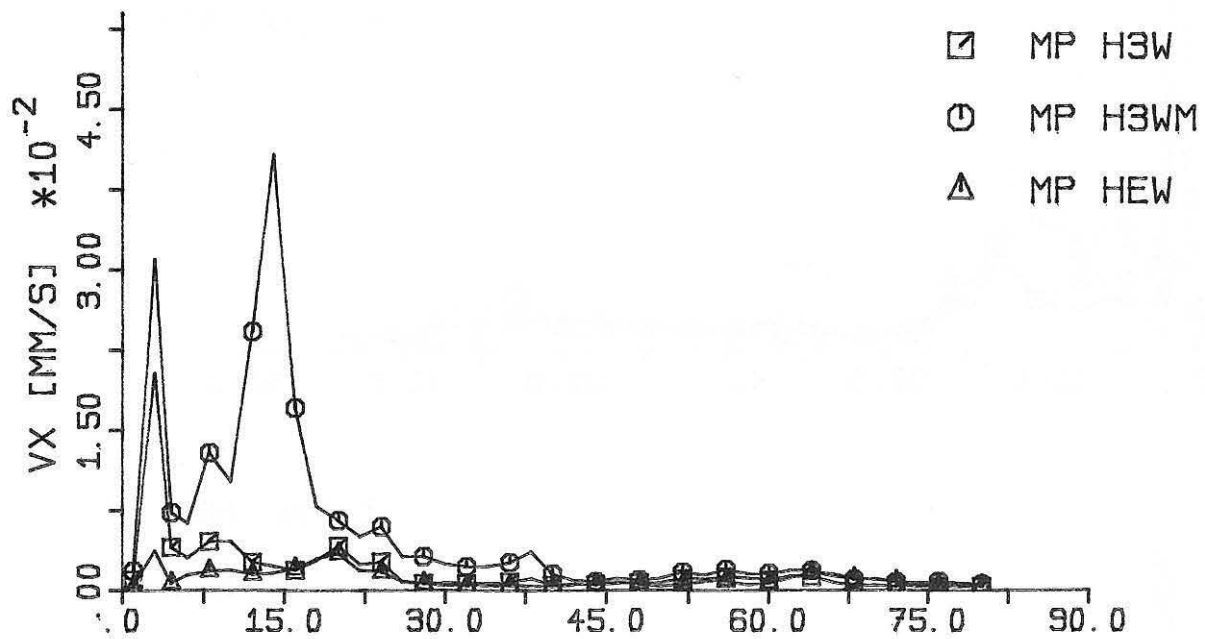


Bild 5.24

Projekt: Paul Löbe Oberschule

Anregung: U-Bahn-Erschütterungen

Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Wände (horizontal) in EG und 3.OG

Bild unten: Auf HEW bezogene Frequenzspektren

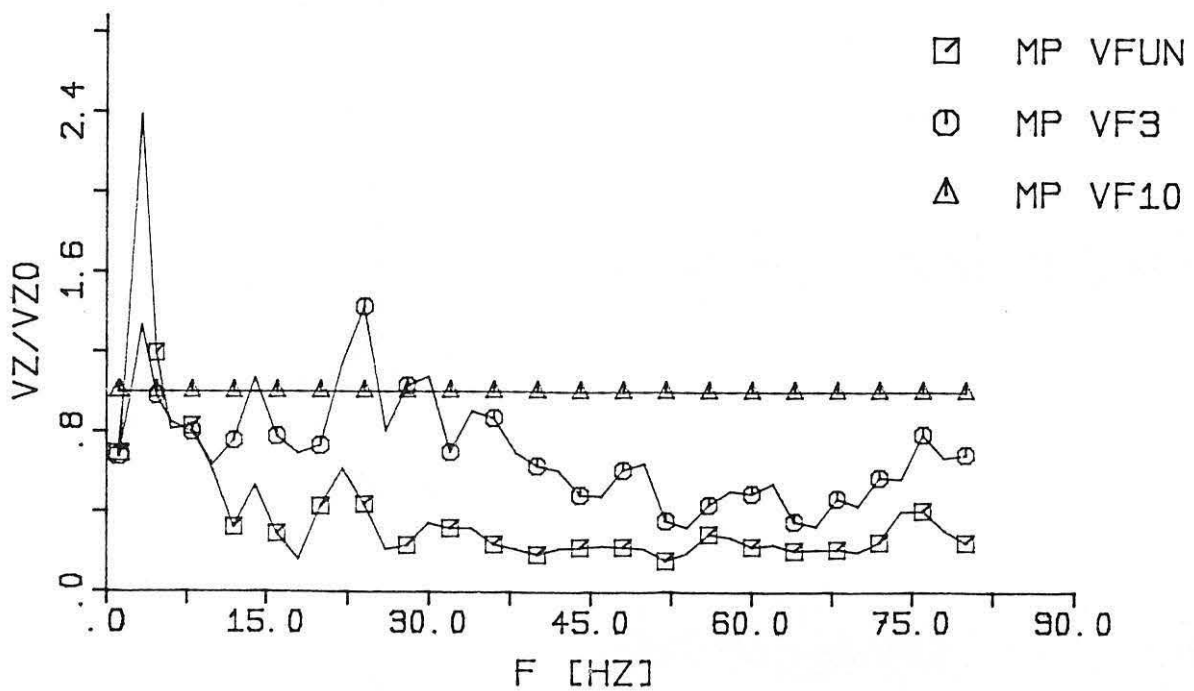
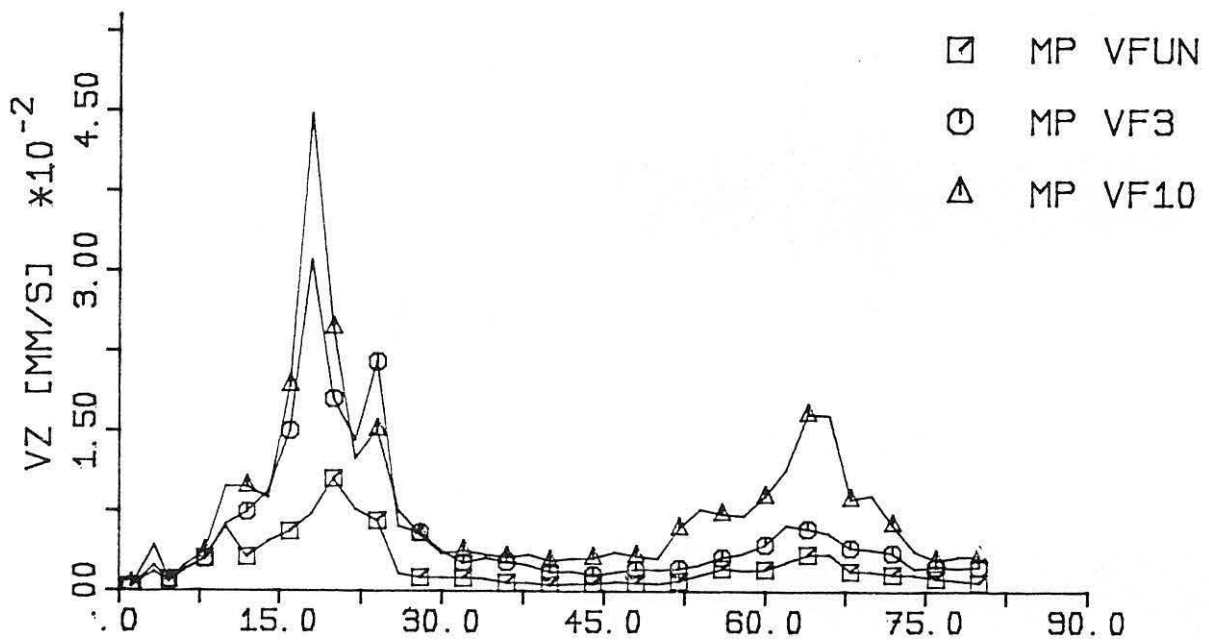


Bild 5.25

Projekt: Paul Löbe Oberschule

Anregung: U-Bahn-Erschütterungen

Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Meßpunkte im Freifeld und am Fundament

Bild unten: Auf VF10 bezogene Frequenzspektren

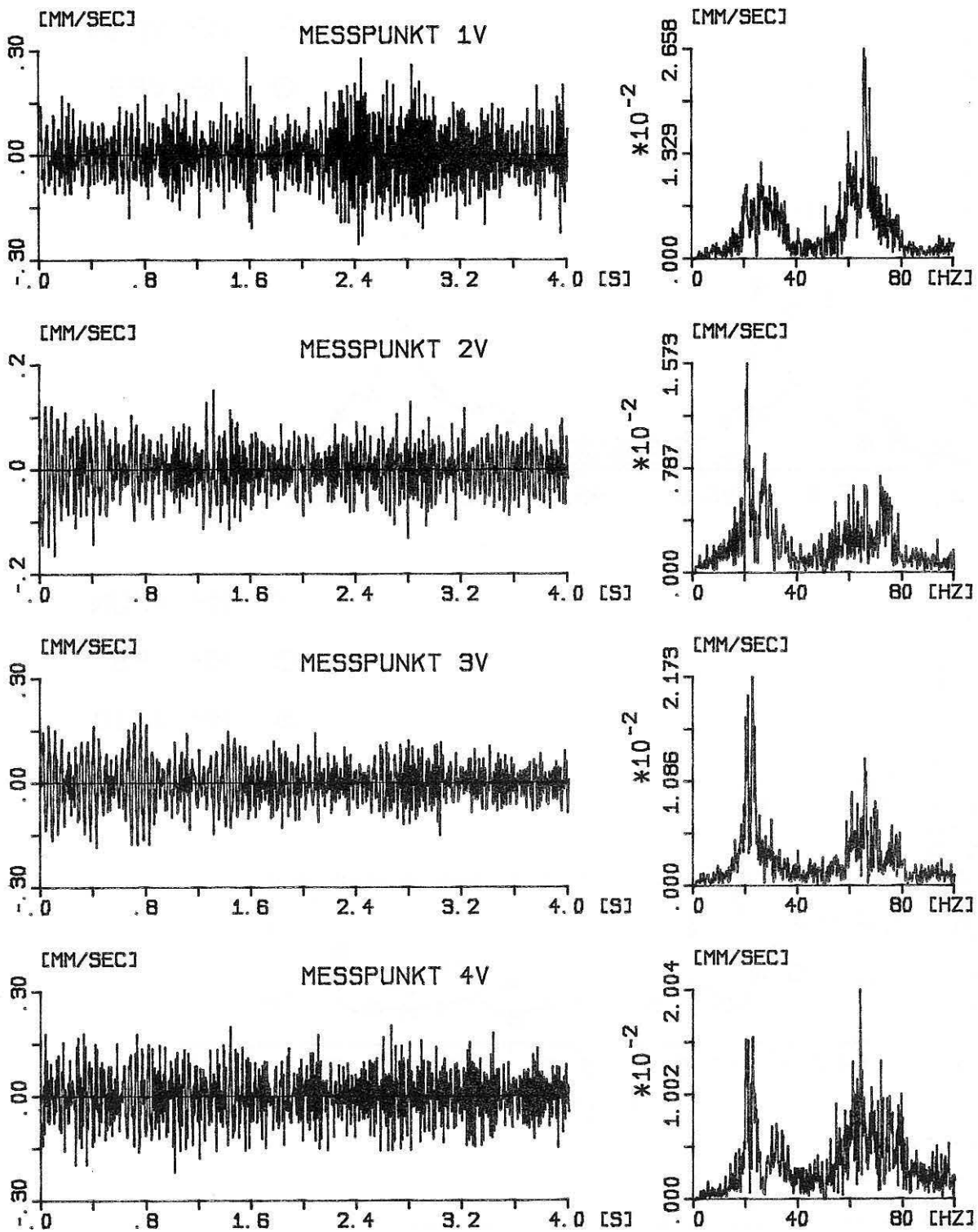


Bild 5.26  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 I. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

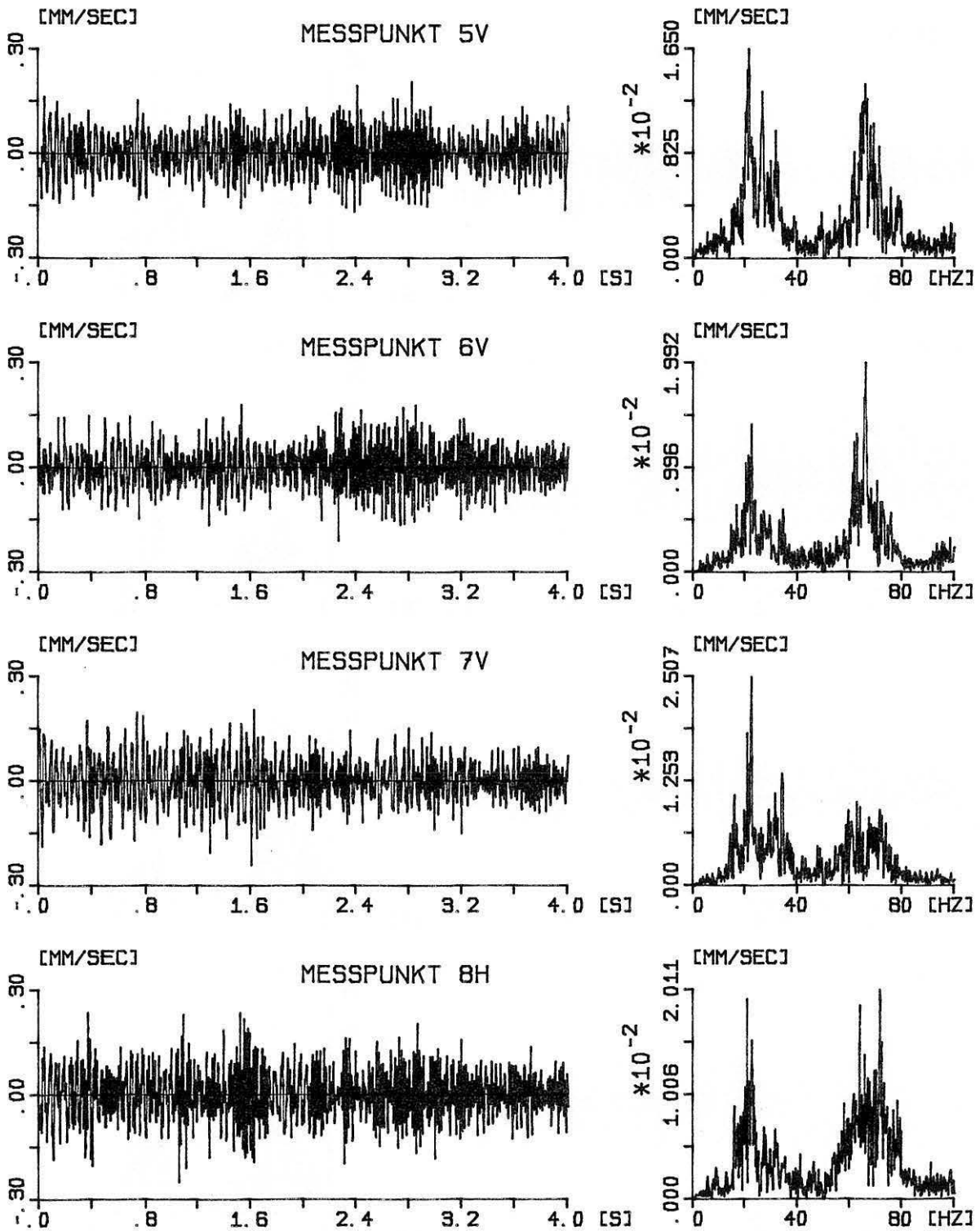


Bild 5.27  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 1. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

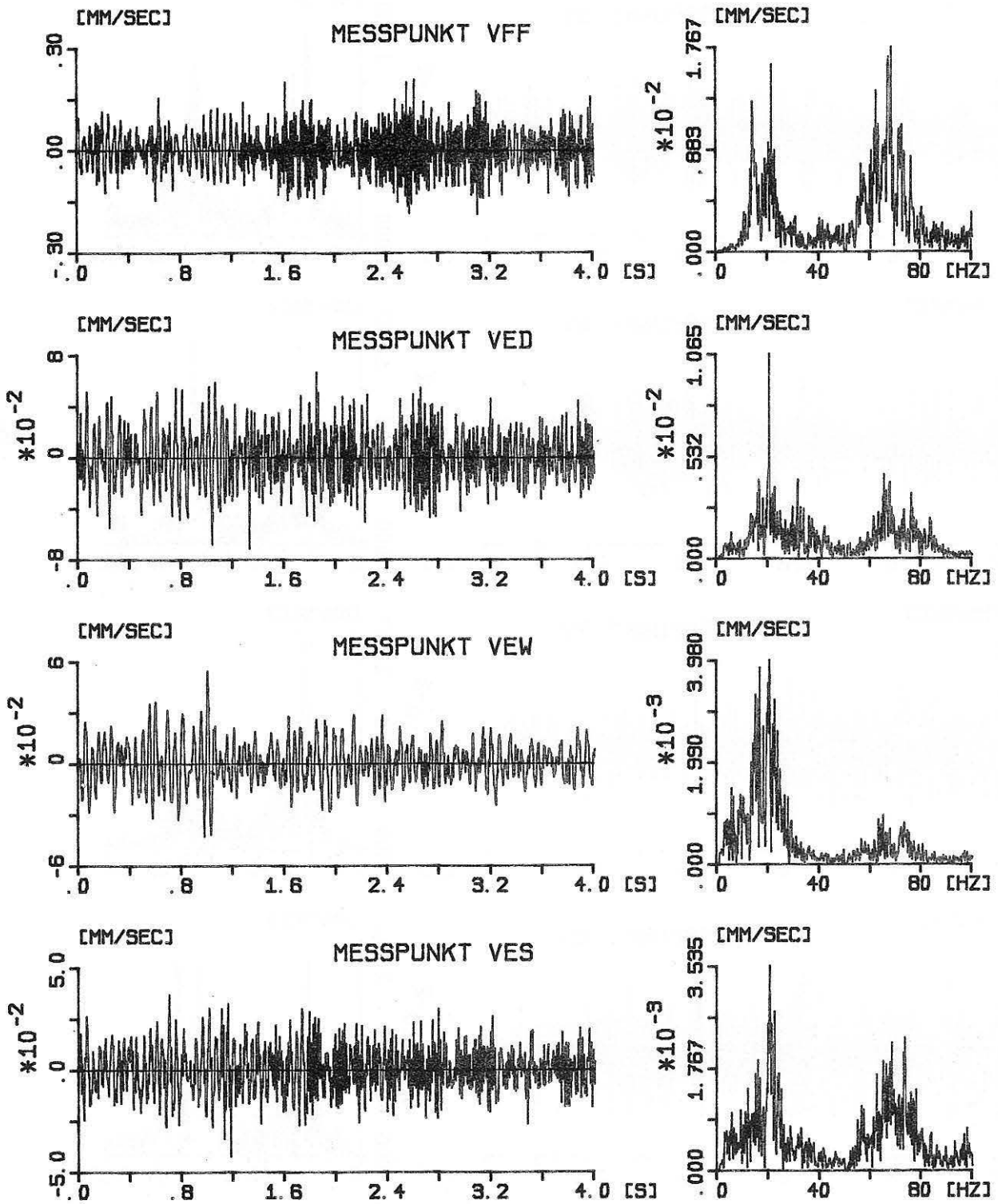


Bild 5.28  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 2. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

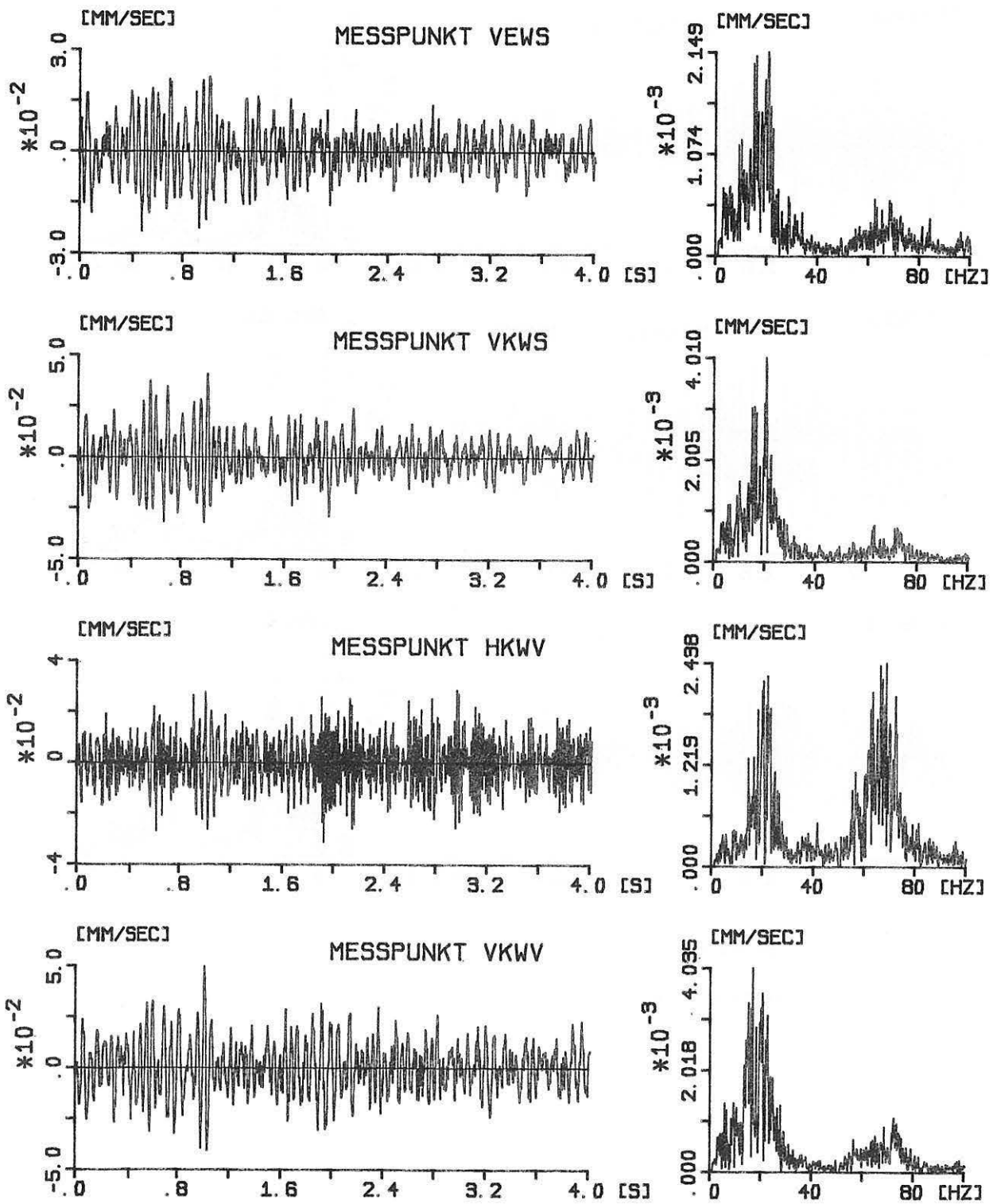
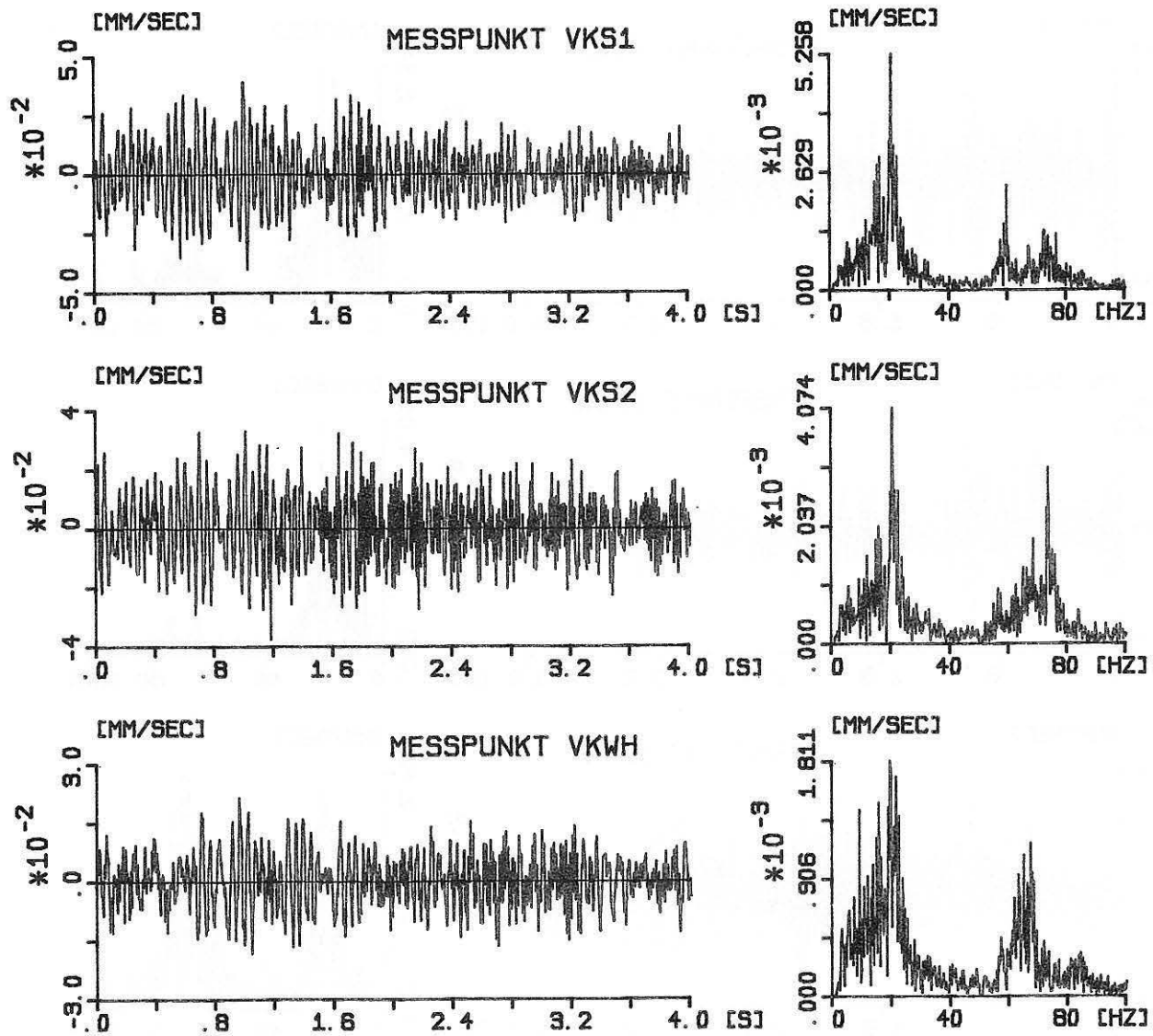


Bild 5.29  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 2. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte





Bld 5.30  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 2. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

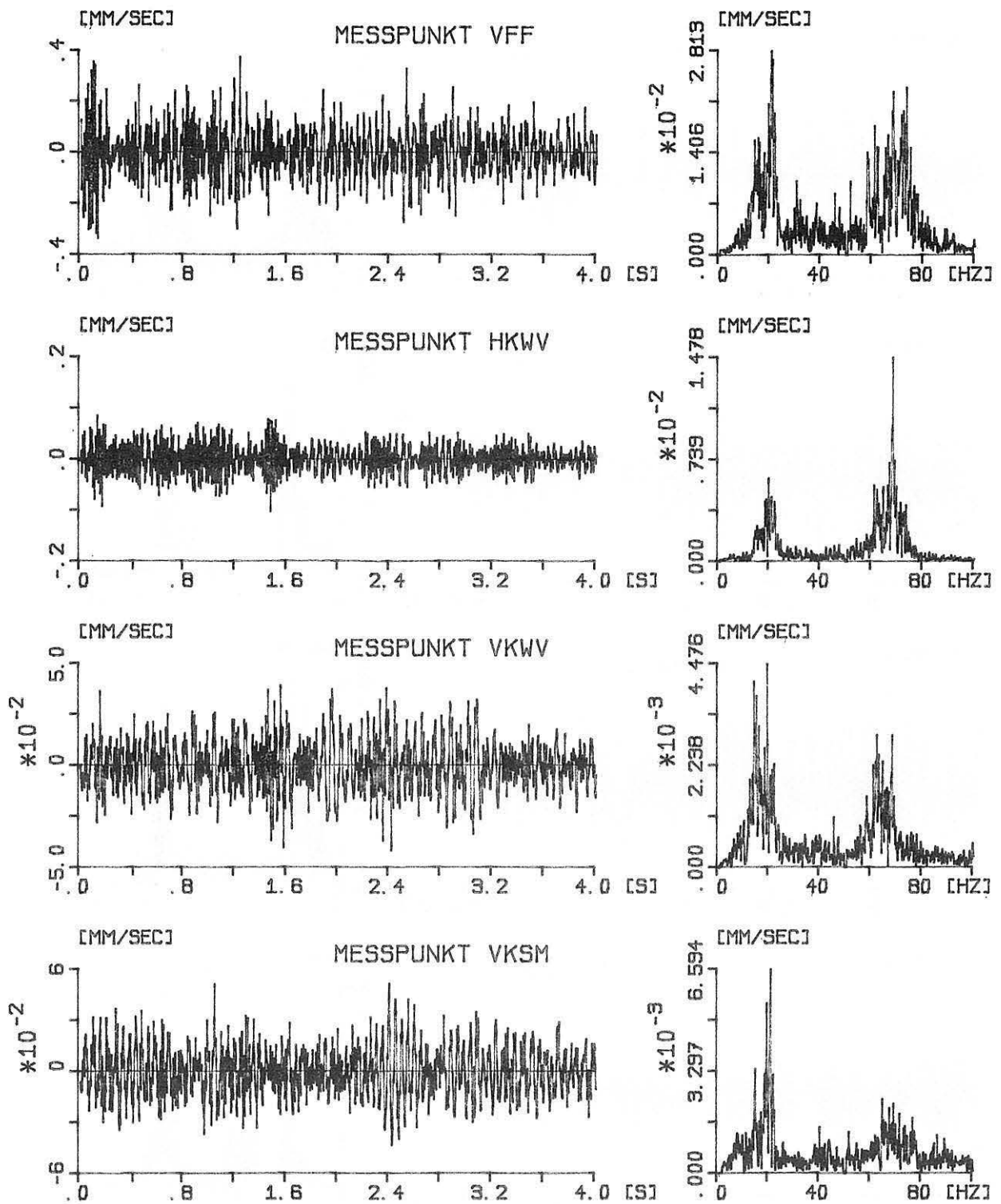


Bild 5.31  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

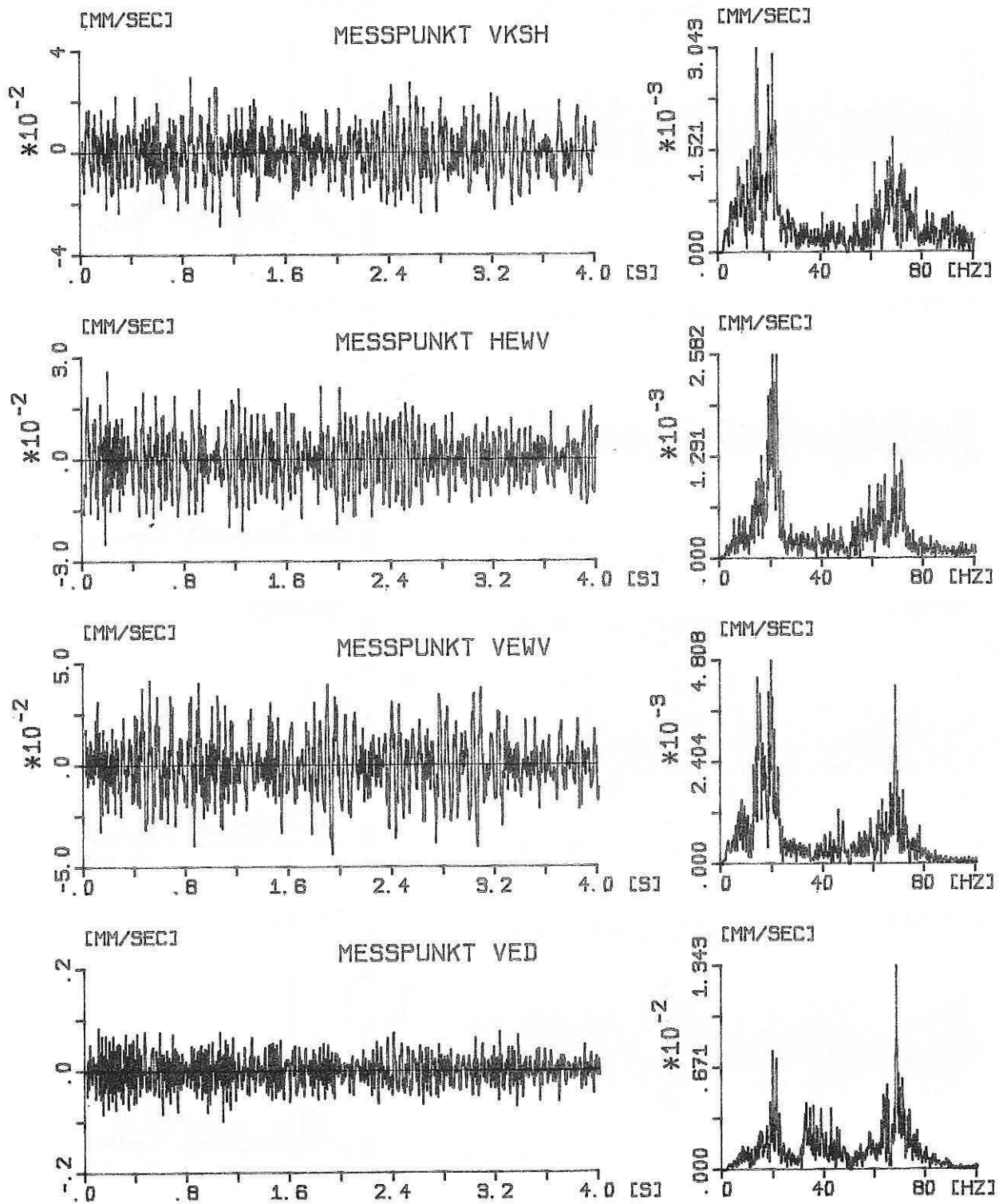


Bild 5.32  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

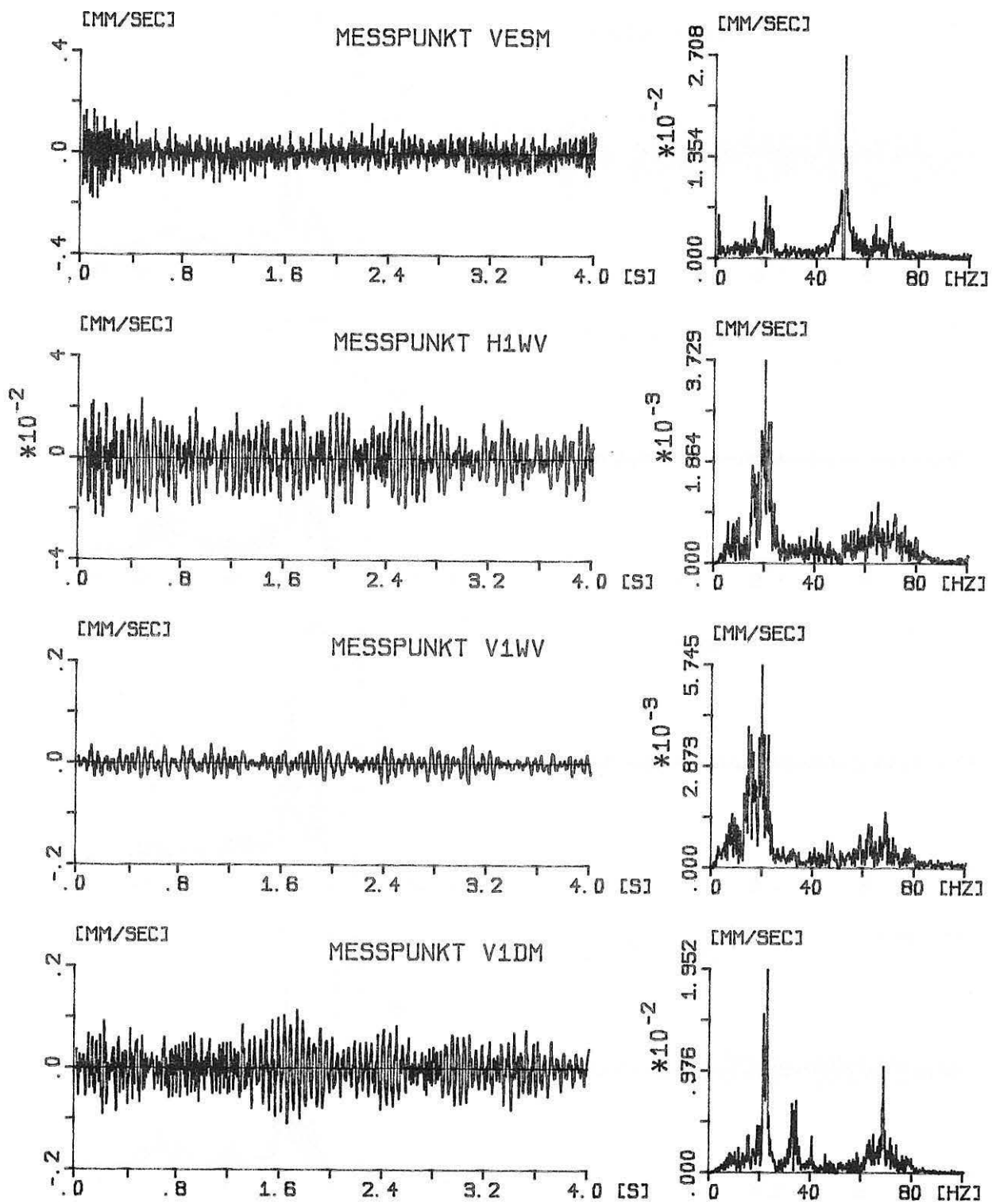


Bild 5.33  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

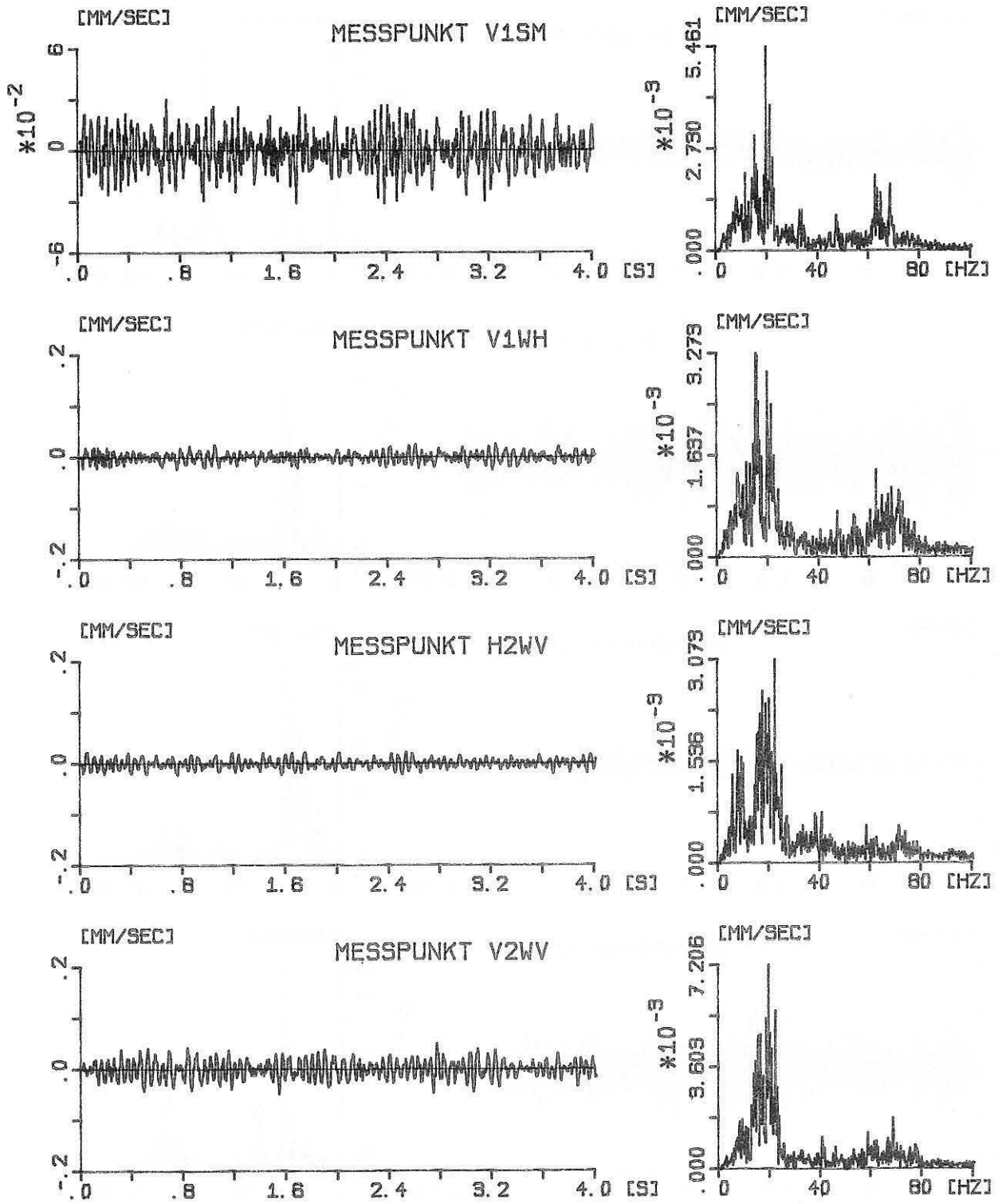


Bild 5.34  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

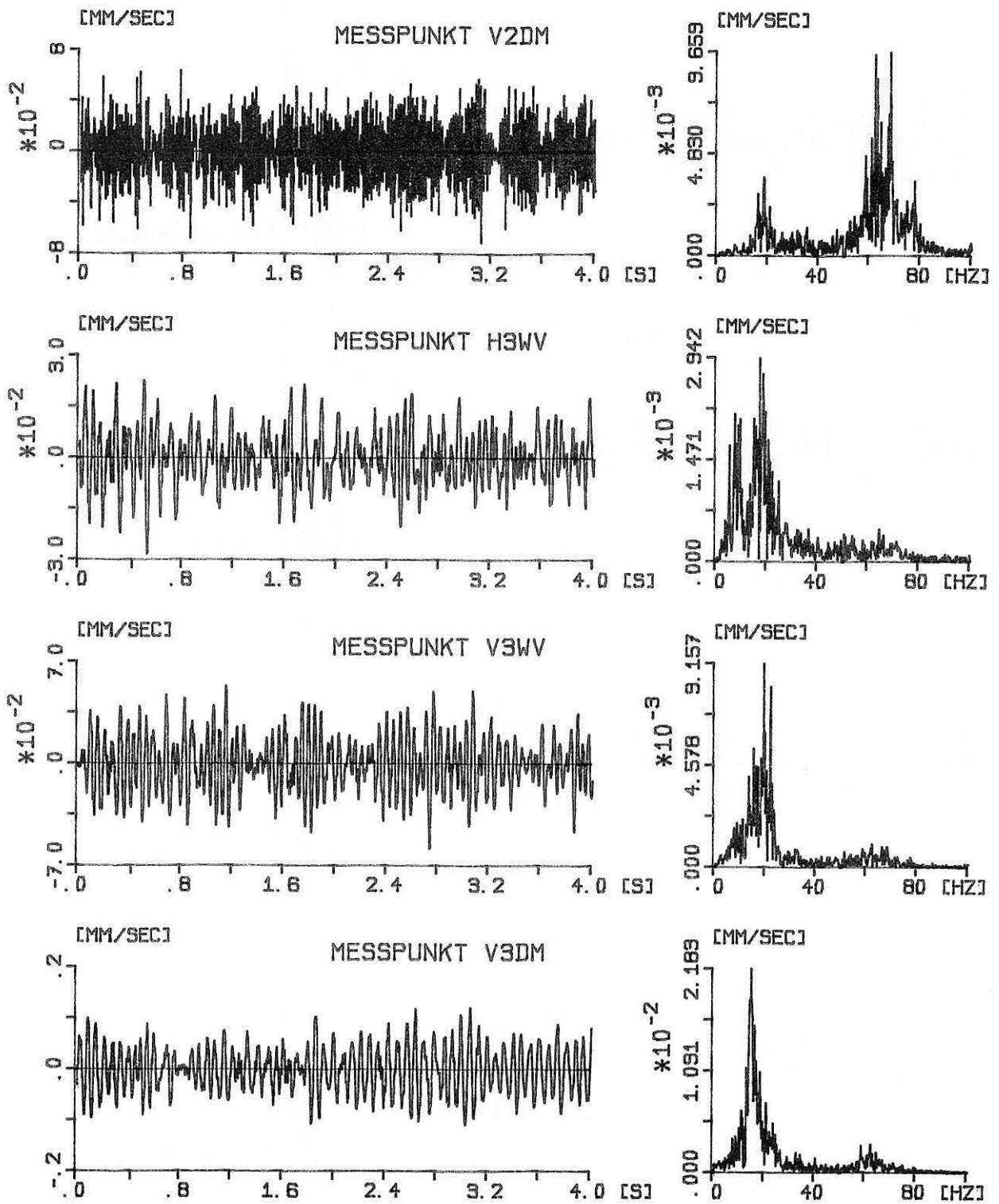


Bild 5.35  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte



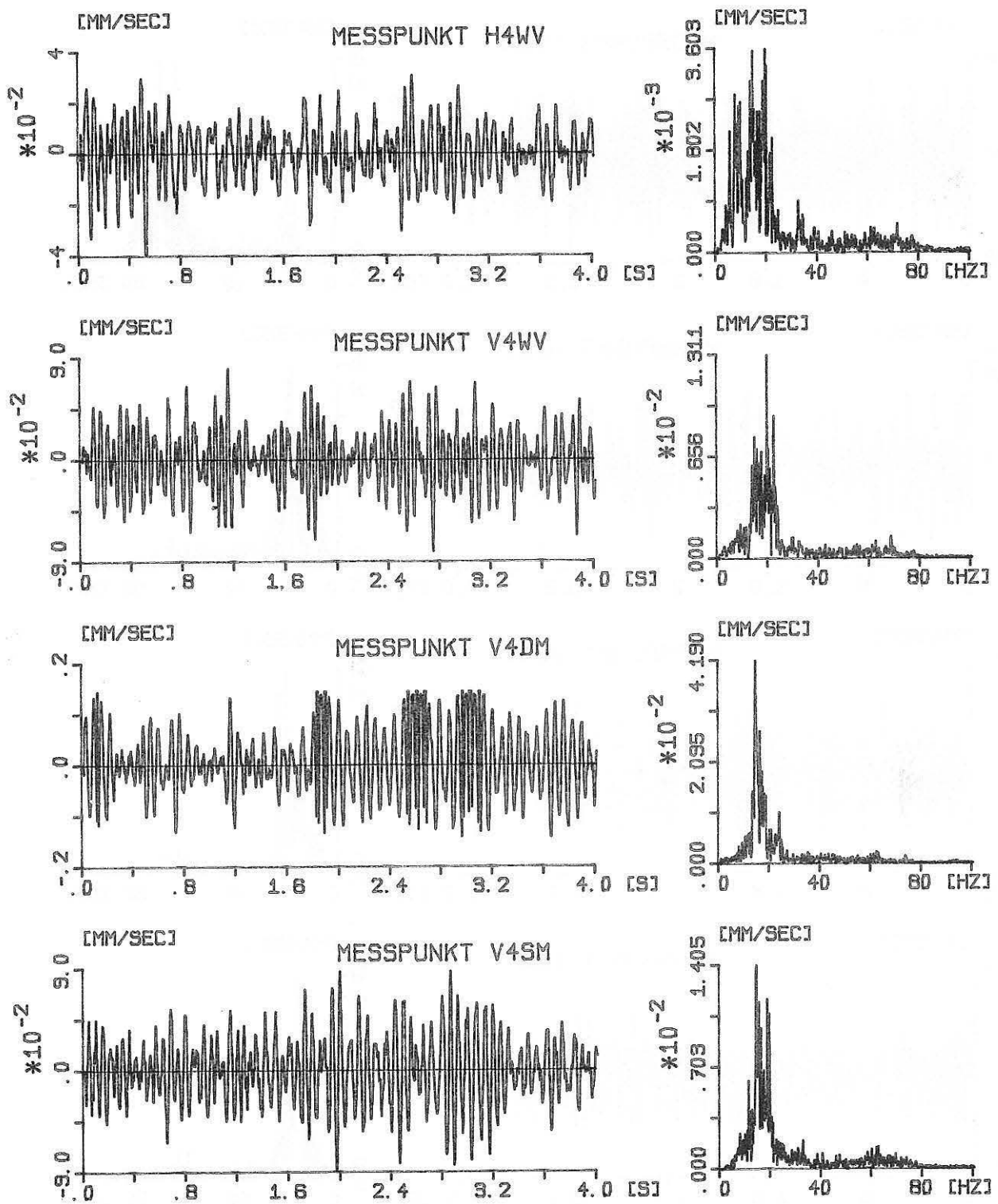


Bild 5.36  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Zeitverläufe und Frequenzspektren der Meßpunkte

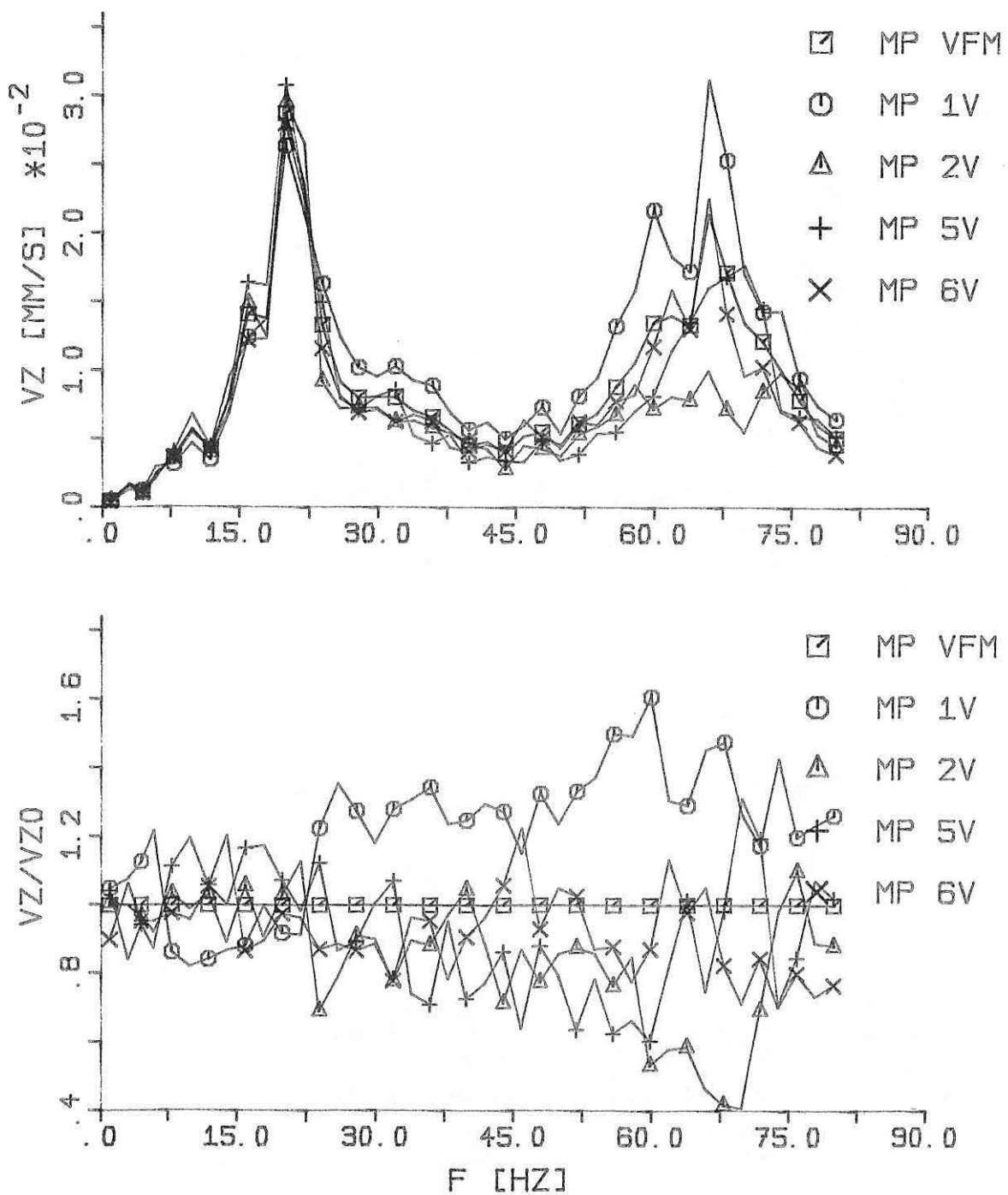


Bild 5.37

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

1. Bauphase

Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren für einige Meßpunkte

Bild unten: Bezogene Frequenzspektren (Bezugsgröße: mittlere Freifeldspektren)

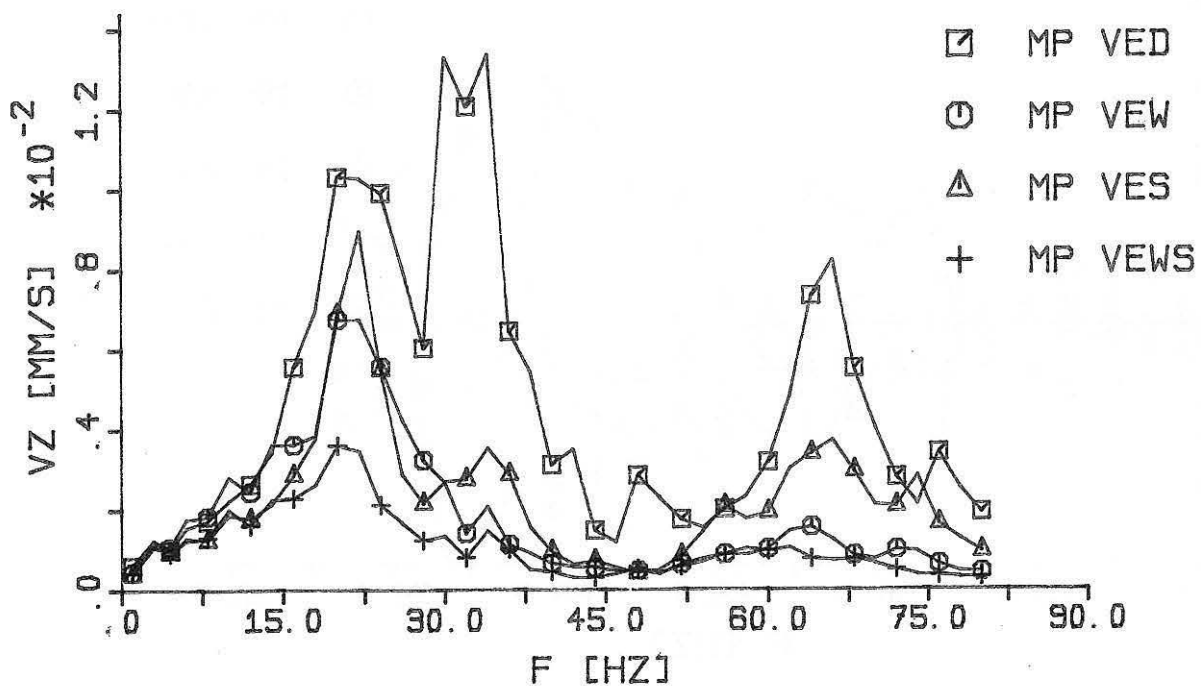
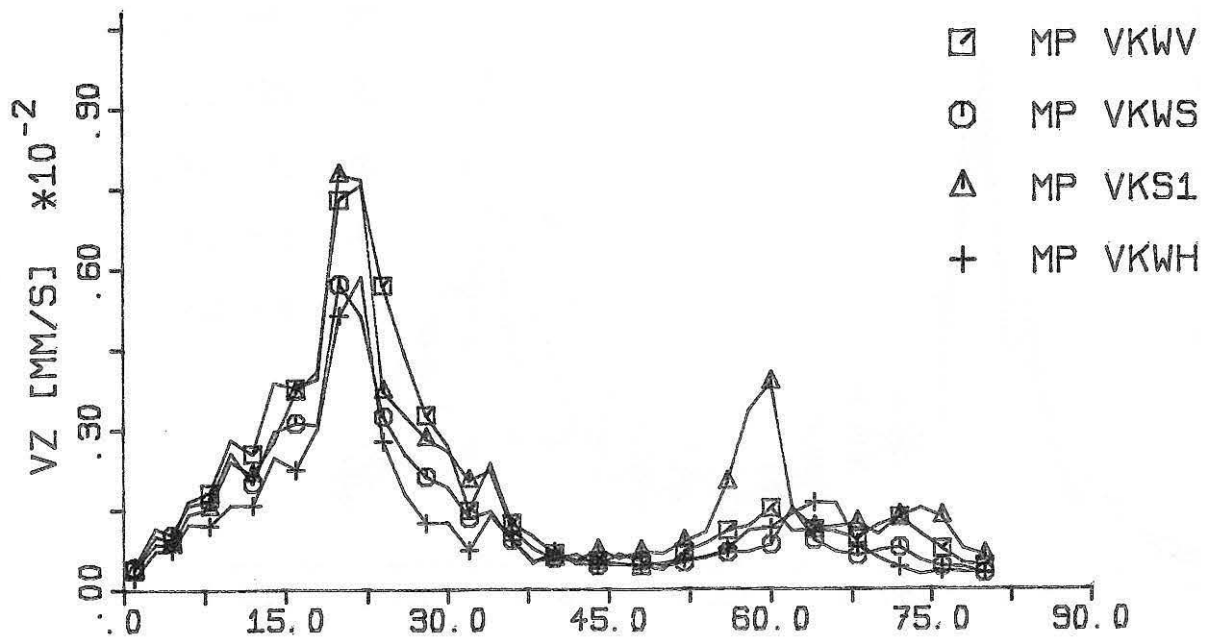


Bild 5.38  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 2. Bauphase  
 Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Meßpunkte im Kellergeschoß  
 Bild unten: Gemittelte Frequenzspektren der Meßpunkte im Erdgeschoß

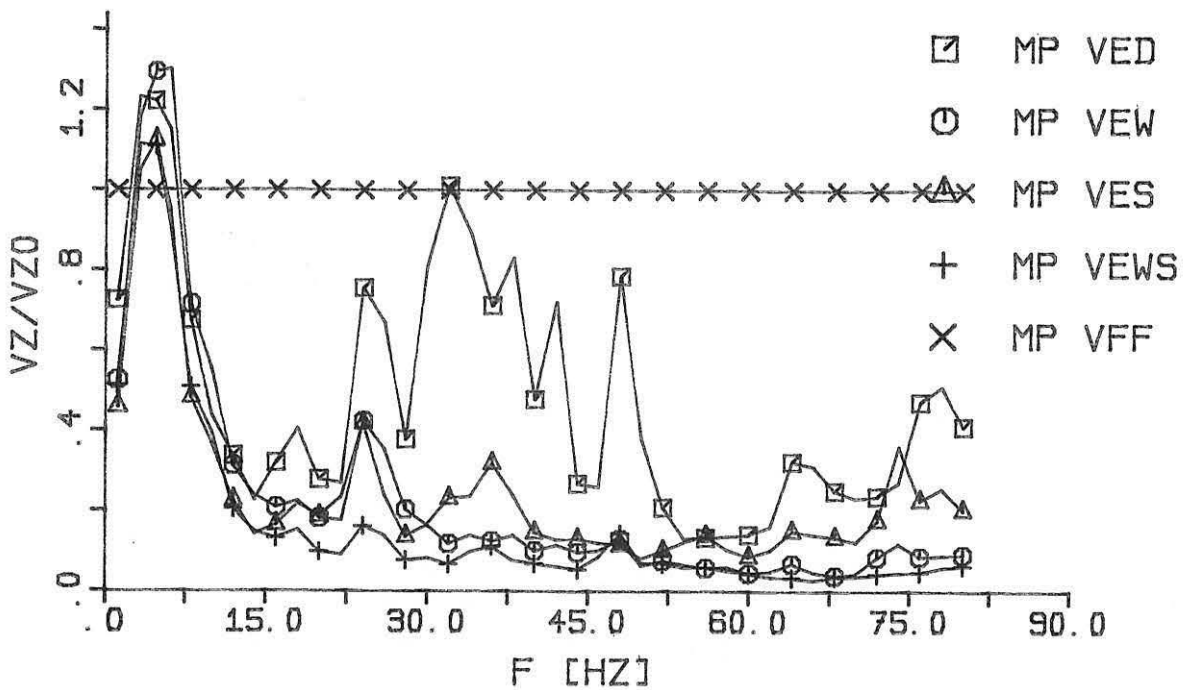
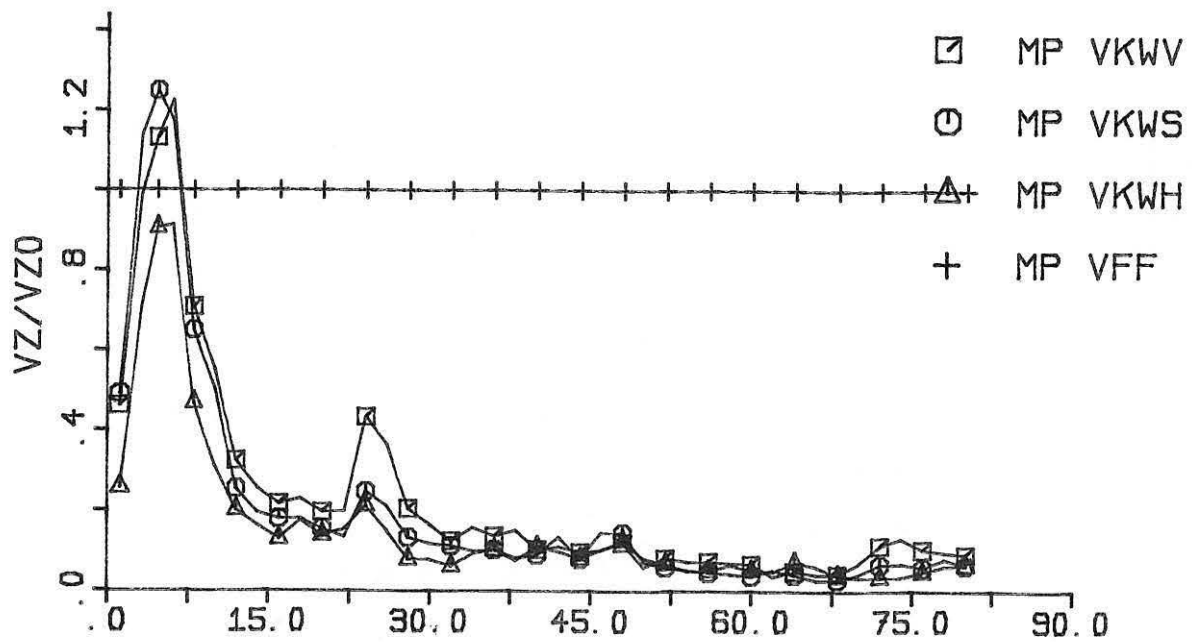


Bild 5.39

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

2. Bauphase

Bild oben: Auf VFF bezogene Frequenzspektren der Meßpunkte im KG

Bild unten: Auf VFF bezogene Frequenzspektren der Meßpunkte im Erdgeschoß

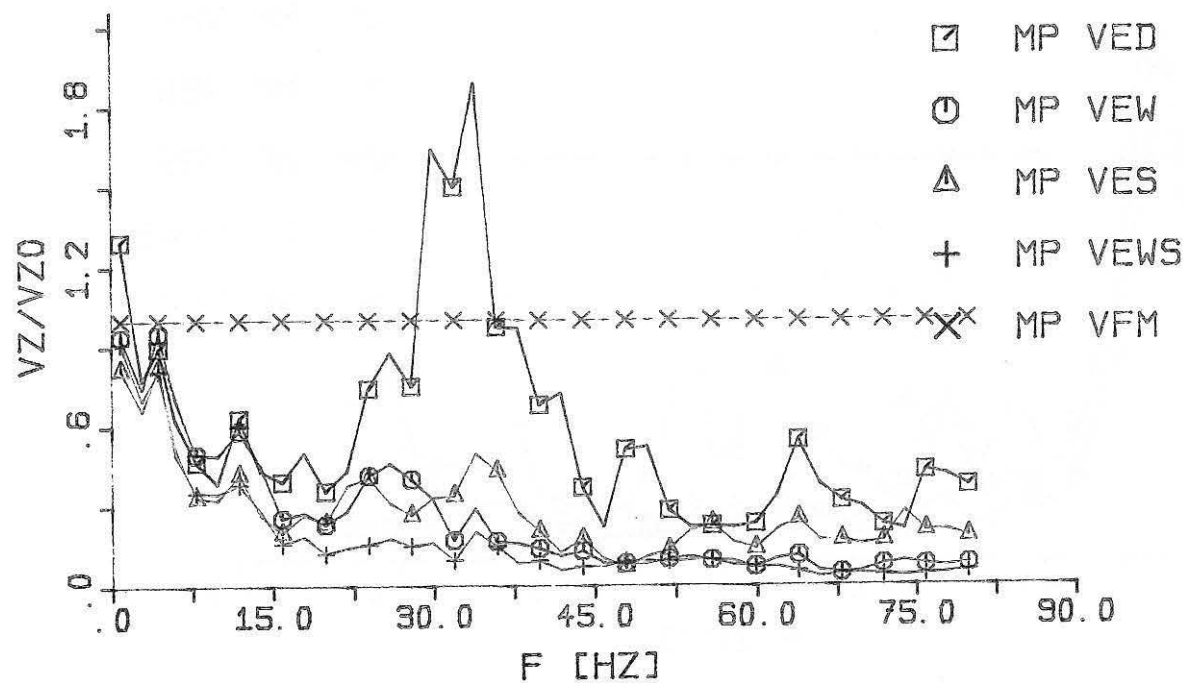
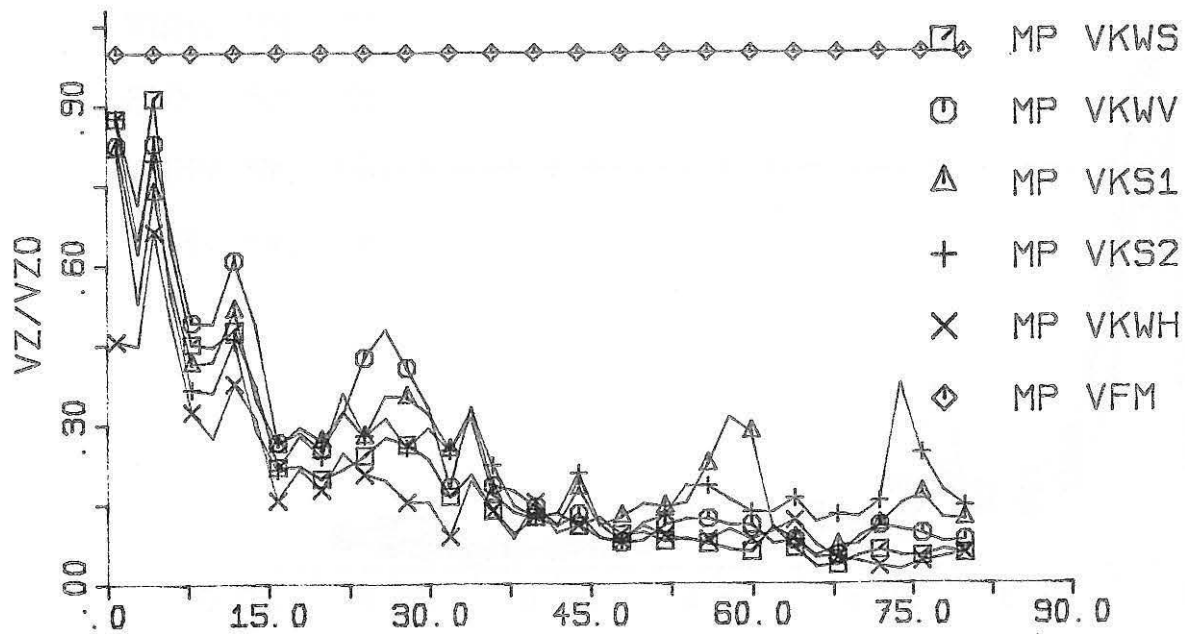


Bild 5.40

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

2. Bauphase

Bild oben: Auf VFF bezogene Frequenzspektren der Meßpunkte im KG

Bild unten: Auf VFF bezogene Frequenzspektren der Meßpunkte im Erdgeschoß

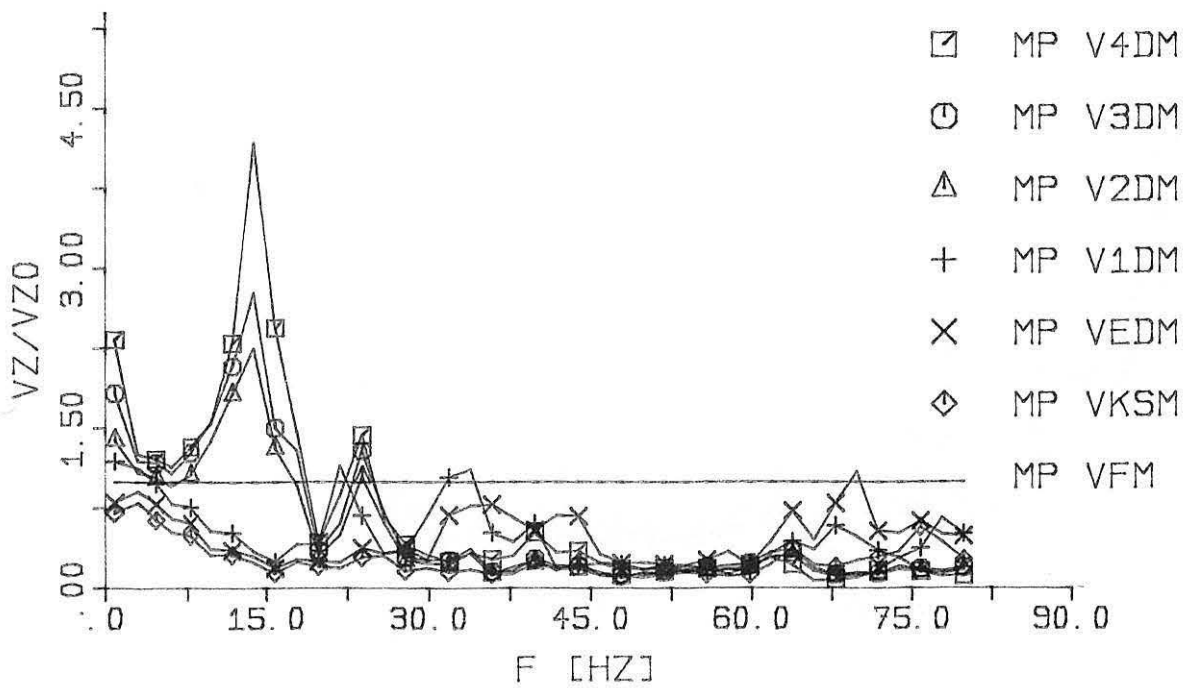
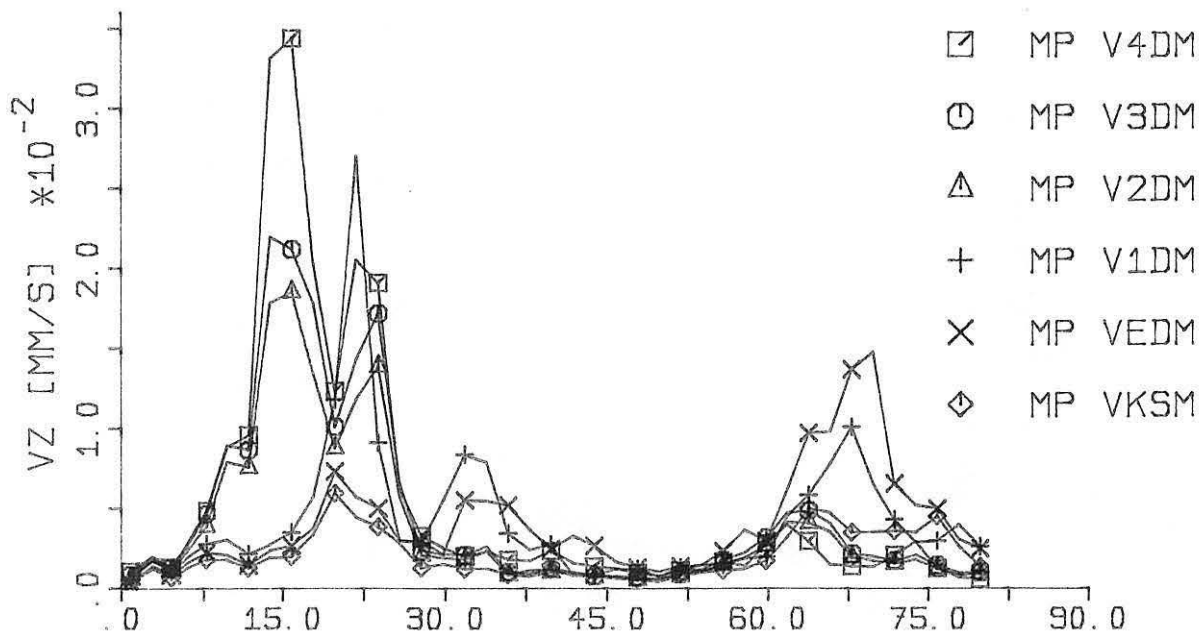


Bild 5.41  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Decken und Stützen  
 Bild unten: AufVFM bezogene Frequenzspektren



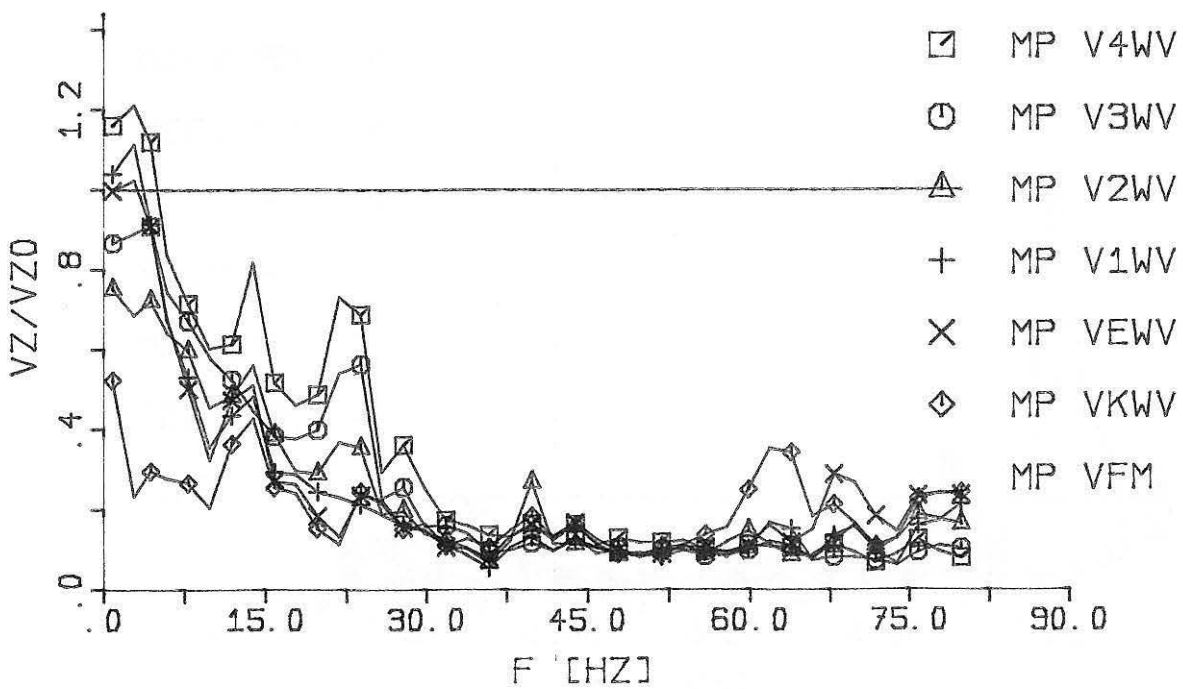
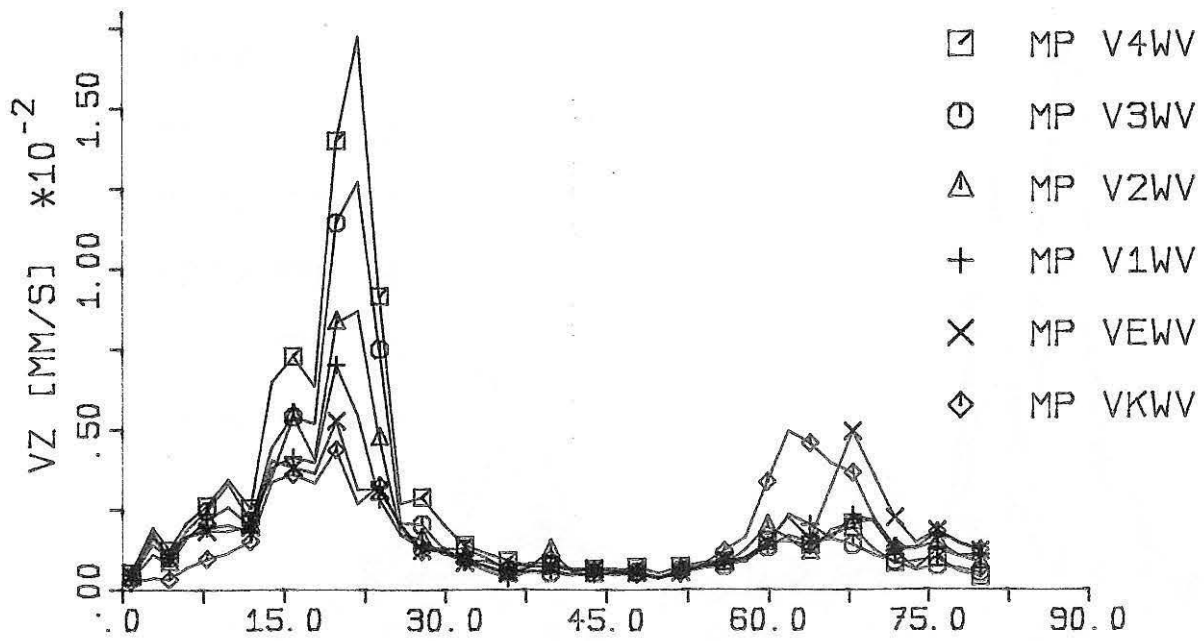


Bild 5.42

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

3. Bauphase

Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Wände

Bild unten: Auf VFM bezogene Frequenzspektren

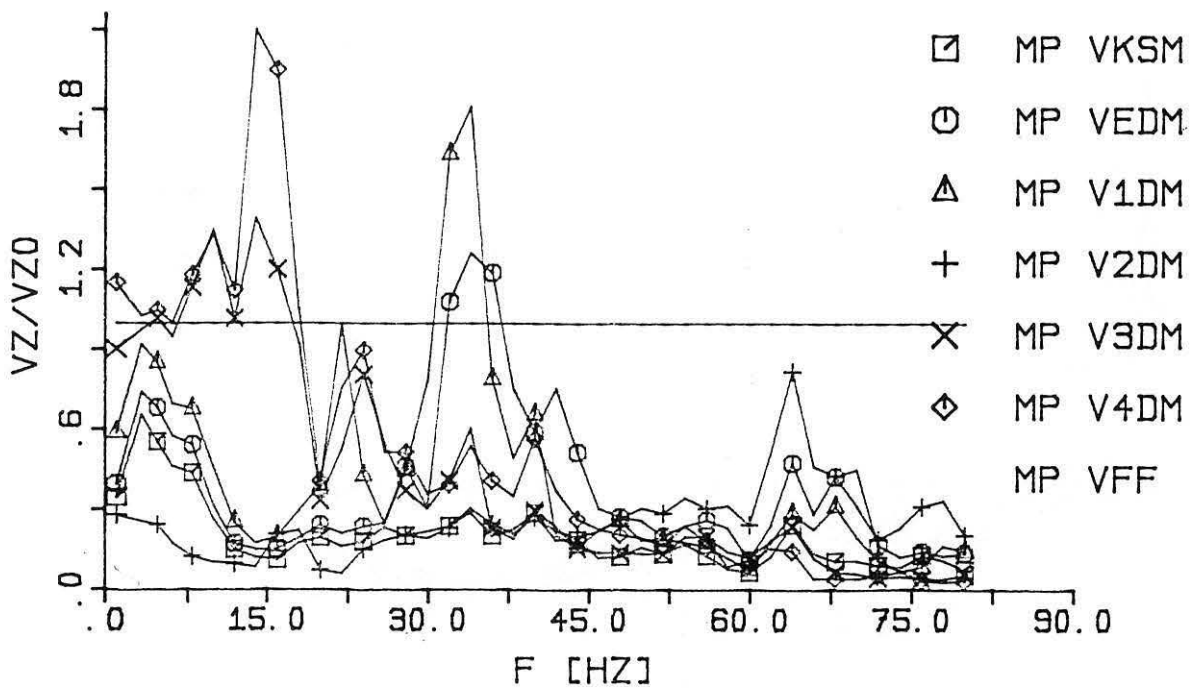
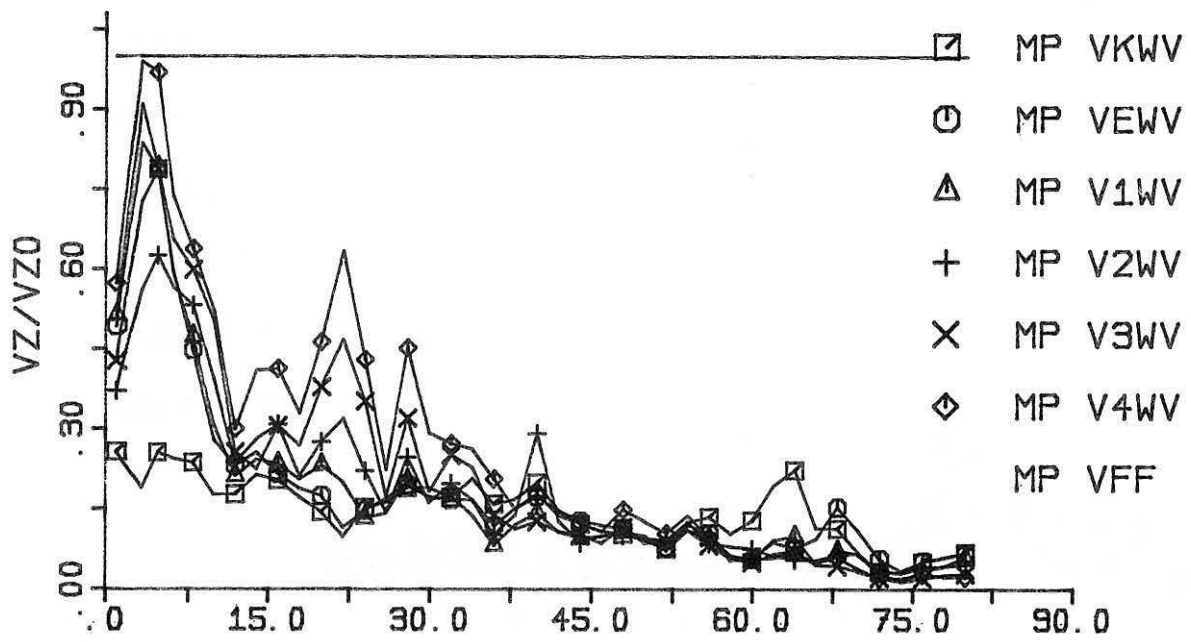


Bild 5.43  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 bild oben: Auf VFF bezogene Wandspektren  
 Bild unten: Auf VFF bezogene Deckenspektren

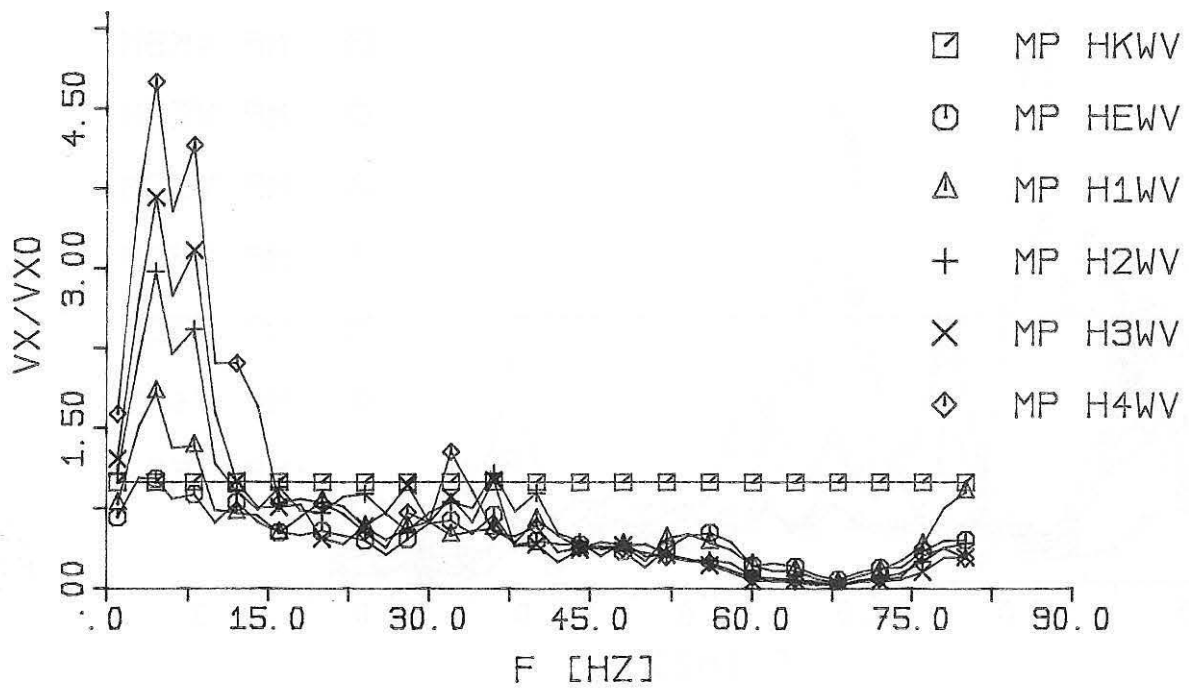
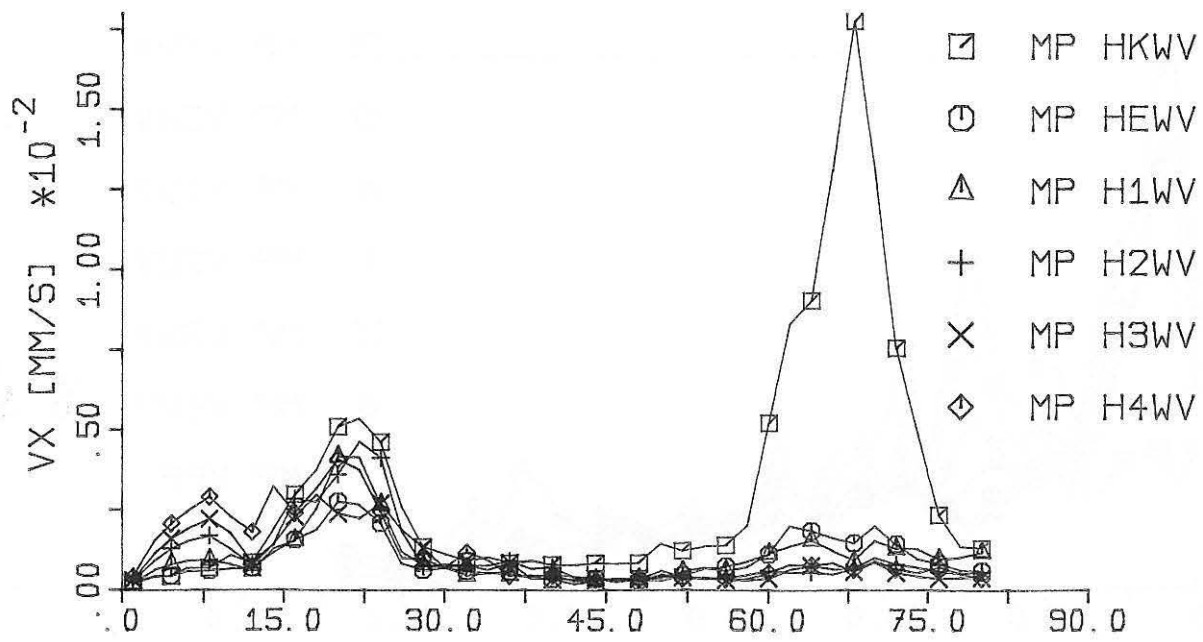


Bild 5.44

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

3. Bauphase

Bild oben: Gemittelte horizontale Frequenzspektren der Wände

Bild unten: Auf HKWV bezogene Frequenzspektren

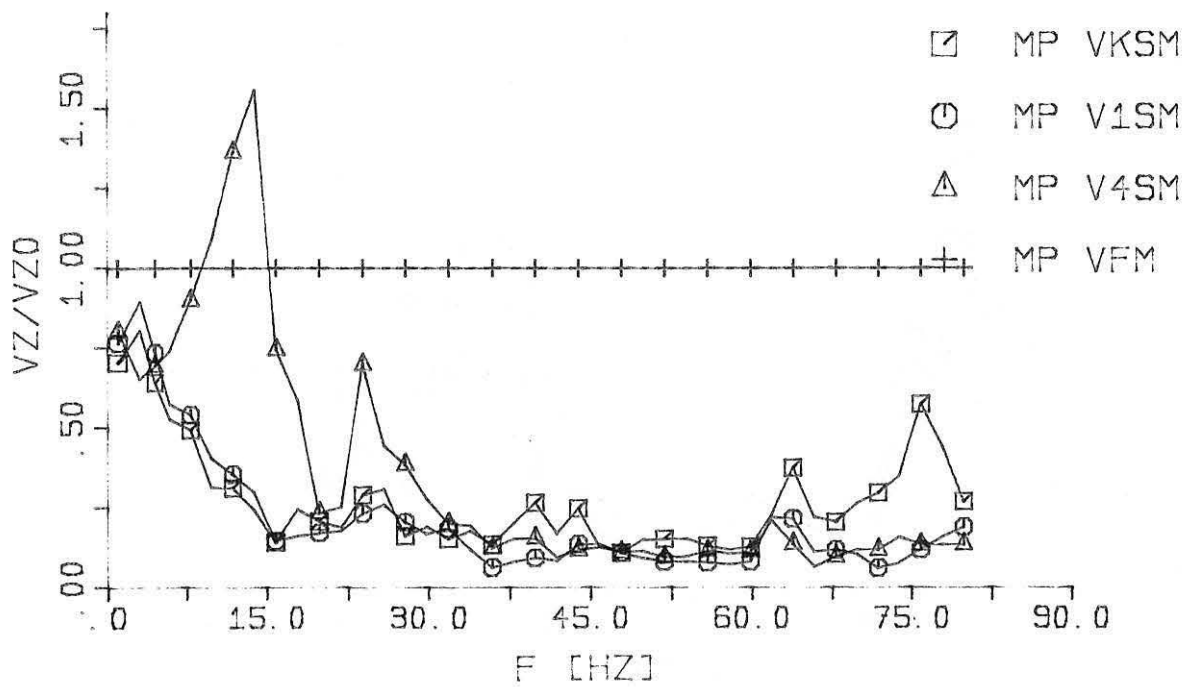
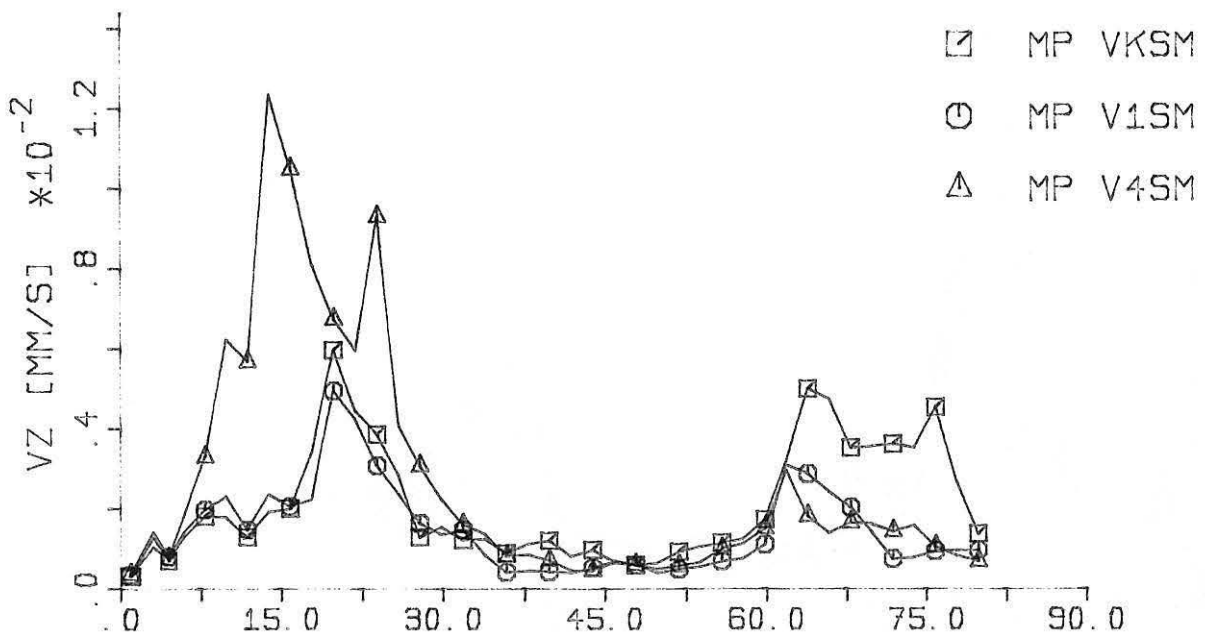


Bild 5.45  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Stützen  
 Bild unten: Auf VFM bezogene Frequenzspektren

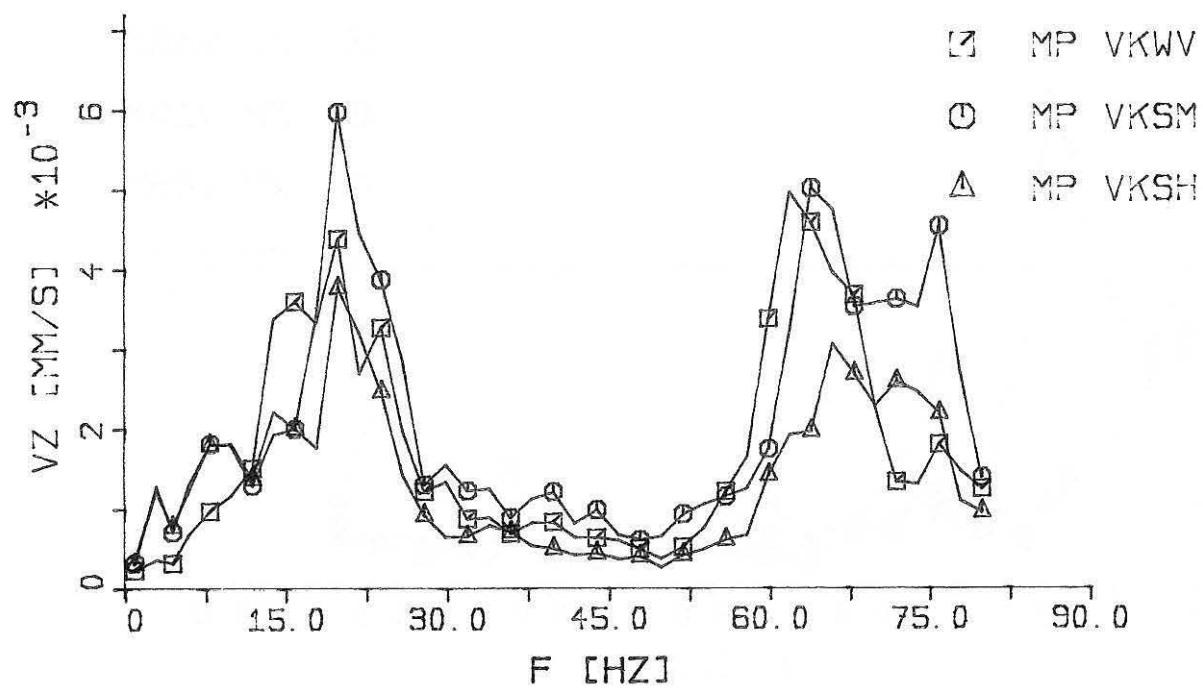
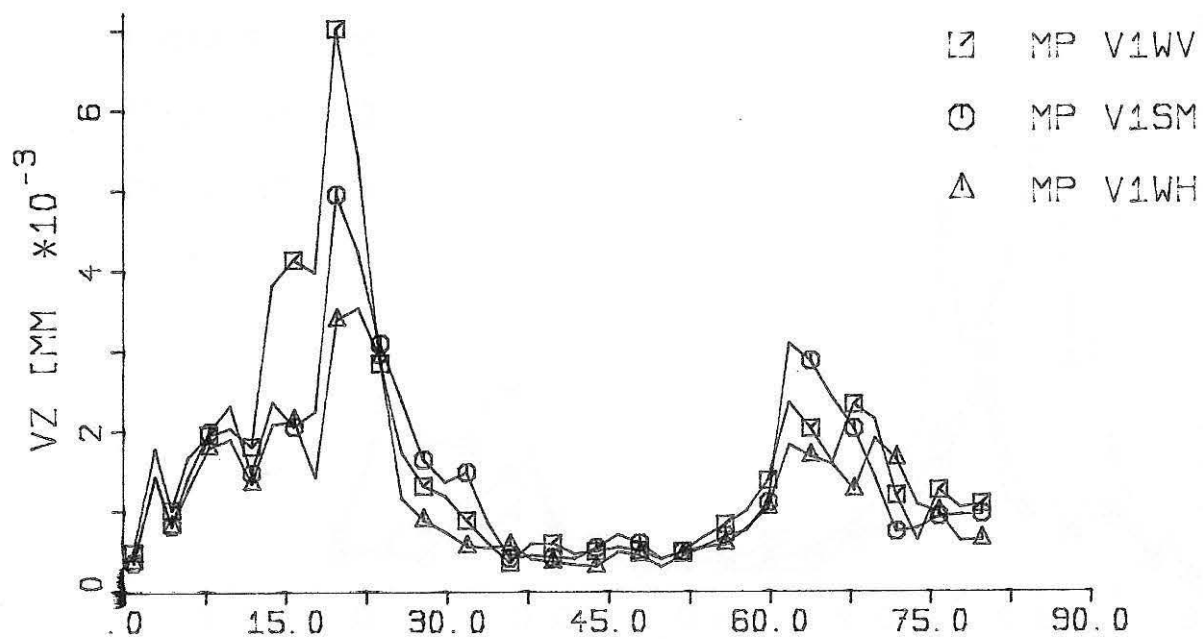


Bild 5.46  
 Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse  
 3. Bauphase  
 Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Meßpunkte im 1. Obergeschoß  
 Bild unten: Gemittelte Frequenzspektren der Meßpunkte im Kellergeschoß

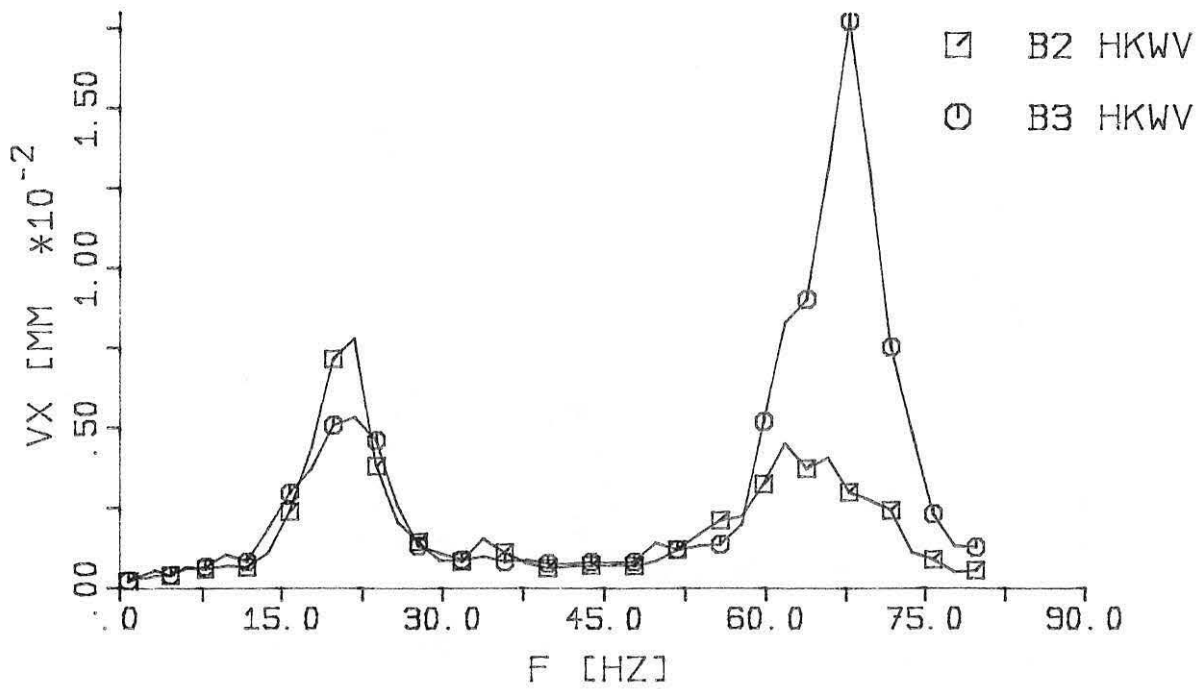
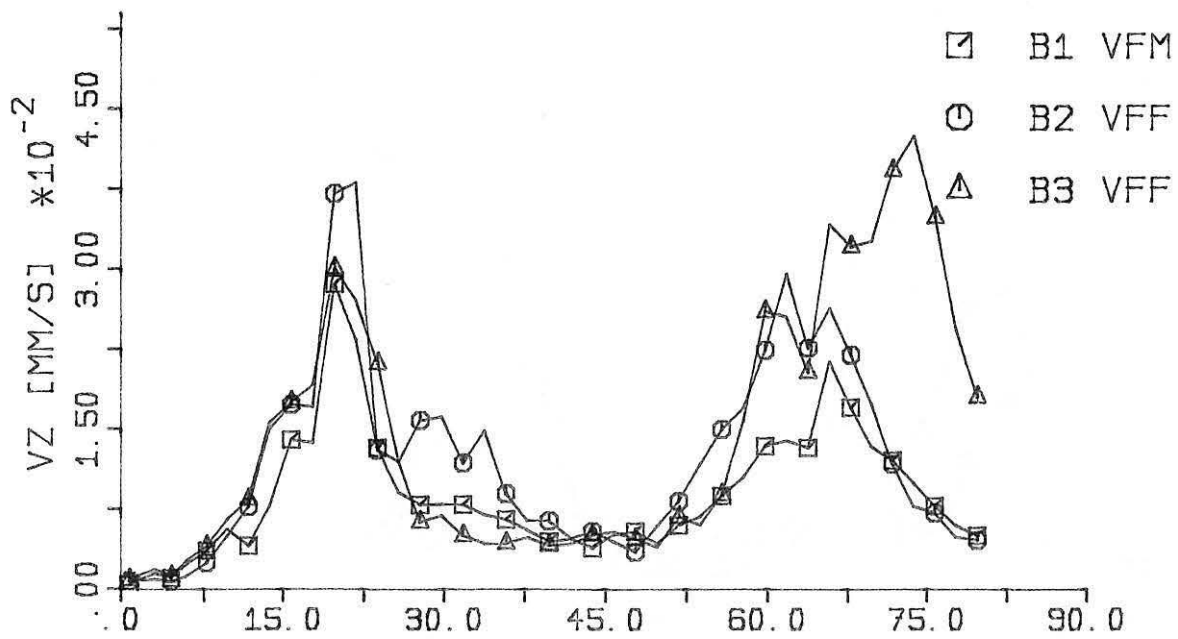


Bild 5.47

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Freifeldmeßpunkte der einzelnen Bauphasen

Bild unten: Gemittelte Frequenzspektren der Kellerwand in der 2. und 3. Bauphase



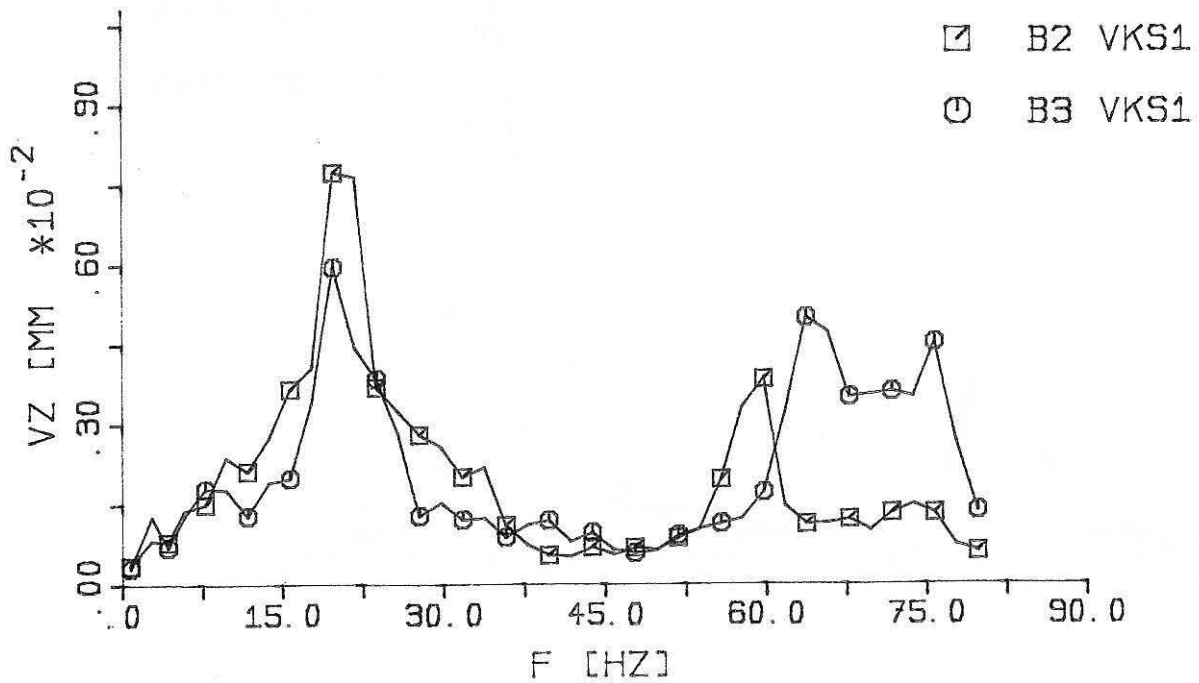
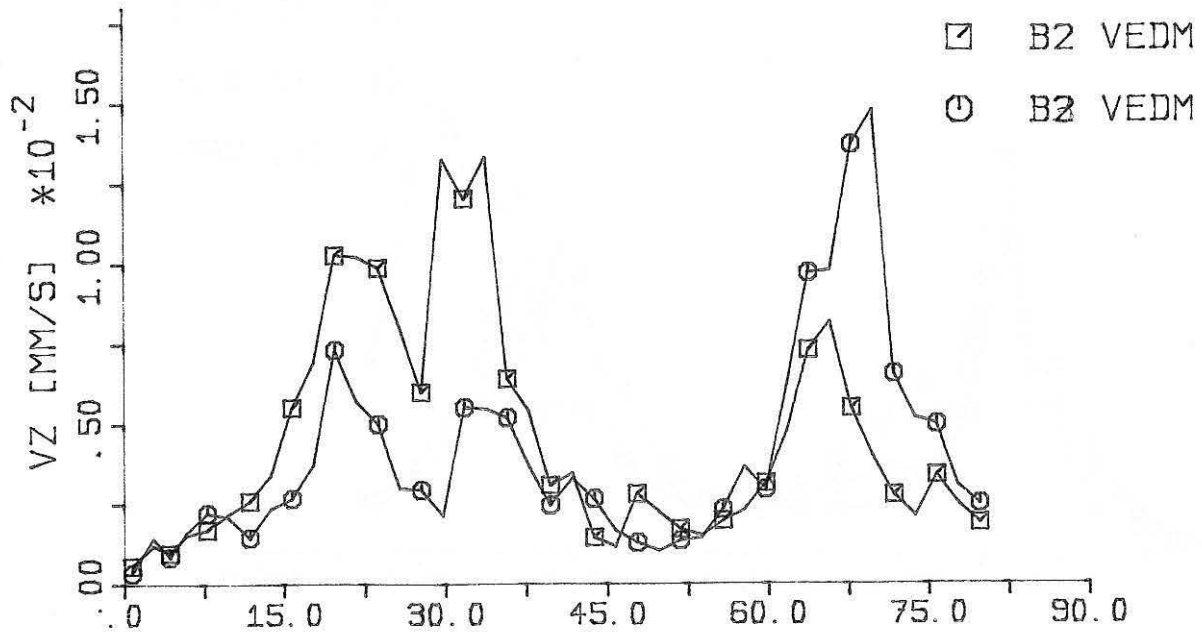


Bild 5.48

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

Bild oben: Gemittelte Frequenzspektren der Erdgeschoßdecke in der 2. und 3. Bauphase

Bild unten: Gemittelte Frequenzspektren der Kellerstütze in der 2. und 3. Bauphase

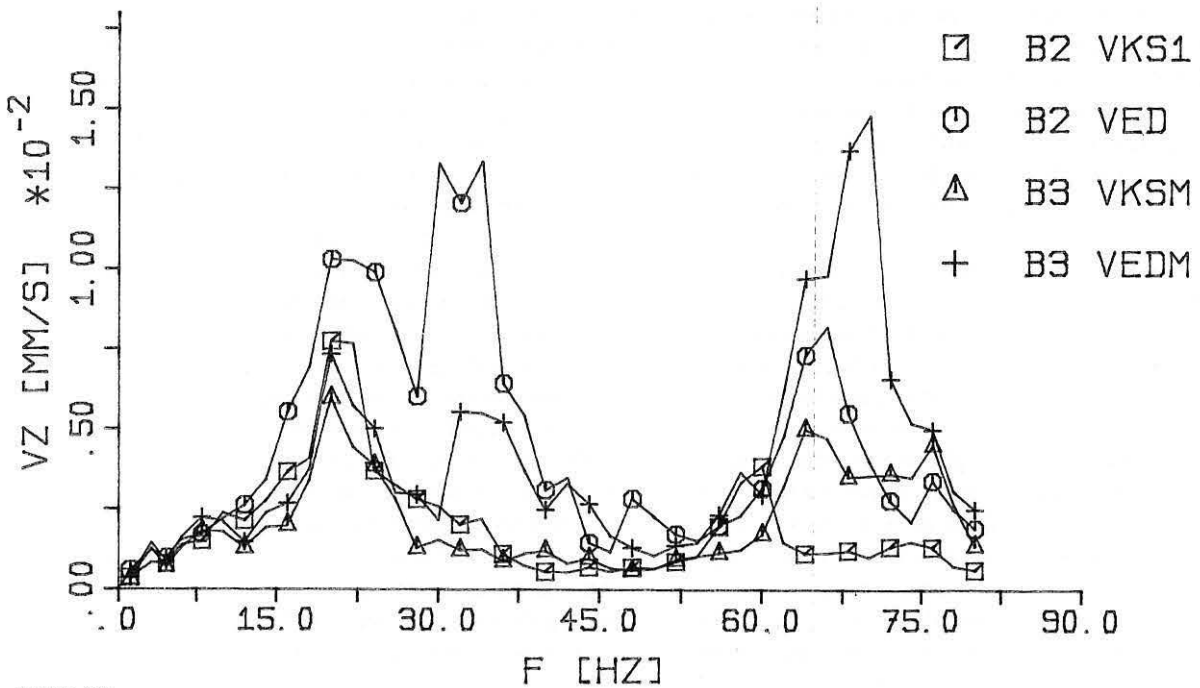
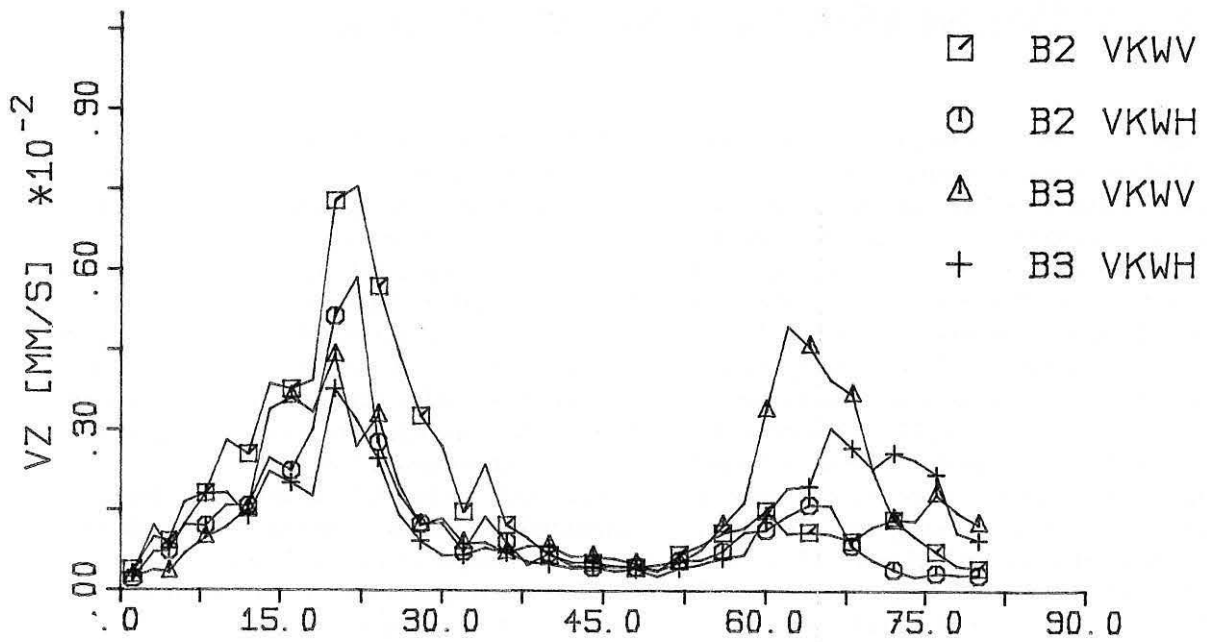


Bild 5.49

Projekt: Technisches Zentrum der Sparkasse

Bild oben: Gemittelte Frequenzspek-tren der Meßpunkte im KG in der 2. und 3. Bauphase

Bild unten: Gemittelte Frequenzspektren der Meßpunkte im KG und EG in der 2. und 3. Bauphase

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Vorhaben TV 8618 „Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahn-Tunneln und dicht benachbarten Gebäuden“ ist Bestandteil des Forschungsprogramms „Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden“ und hier speziell des Teilprogramms „Schienennahverkehr“. Das primäre Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Prognosemodells für die Vorusberechnung der von den Schienenfahrzeugen ausgehenden Erschütterungen, die durch den Untergrund weitergeleitet auf Gebäude und auf Menschen einwirken. Die Ergebnisse des Vorhabens dienen dazu, in der politisch-administrativen Praxis durch Verbesserung der Erschütterungsprognose die Planung und Genehmigung solcher Verkehrsanlagen zu erleichtern, zu beschleunigungen oder überhaupt erst zu ermöglichen. Damit wird zunächst den Erfordernissen des Bundesimmissionschutzgesetzes Rechnung getragen. Von besonderer Bedeutung ist jedoch auch, daß die Ergebnisse des Vorhabens dazu beitragen können, anhand objektiv wissenschaftlich belegbarer Kriterien eine Versachlichung von Umweltdebatten zu erreichen und geplante Maßnahmen im Konsens aller Beteiligten durchzuführen und abzuwickeln. Damit werden notwendige sozialpsychologische Maßnahmen zur Verbesserung der Akzeptanz öffentlicher Nahverkehrsmittel entscheidend unterstützt.

Das Laboratorium Baudynamik, Erschütterungsschutz der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung befaßt sich seit 1975 intensiv mit der Untersuchung der Entstehung und der Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen sowie deren Einwirkung auf Gebäude und Menschen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, Grundlagen zu schaffen, die es ermöglichen, bei der Projektierung von neuen Nah-, Fern- oder Hochgeschwindigkeitsstrecken oder bei neuen Bebauungen in der Nähe dieser Strecken die Erschütterungsbelastung zuverlässig zu prognostizieren. Für diese Prognose ist zunächst die Kenntnis der Erschütterungsanregung der verschiedenen Züge bei verschiedenen Fahr- und Streckenzuständen notwendig. Danach müssen die Einflüsse des Untergrundes auf die Art der Erschütterungsausbreitung bekannt sein. Schließlich muß der Einfluß der Wechselwirkung zwischen Boden und Bauwerk auf die Erschütterungsübertragung und letztlich das Schwingungsverhalten der verschiedenen Bauwerke selbst untersucht werden.

Die Entwicklung eines Prognosemodells für Schienenverkehrserschütterungen begann mit Untersuchungen zur Entstehung von U-Bahnerschütterungen und deren Weiterleitung über den Tunnel an das umgebende inhomogene Erdreich. Diese ersten Arbeiten führten zu einer Methode zur Ermittlung von Ersatz-Erregerspektren von Zügen sowie zu einem Verfahren zur Berechnung der ebenen und axialsymmetrischen Schwingungsausbreitung im inhomogenen Untergrund. Diese finiten Rechenverfahren wurden ergänzt durch Rechenverfahren zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von zwei-

und dreidimensionalen Bauwerken, die sich auf dem Untergrund befinden. In weiteren Forschungsvorhaben wurden diese Berechnungsmethoden auf konkrete Situationen angewandt. Hierbei wurden u.a. die Erregerspektren einiger Zugtypen als Eingangsdaten in ein einfaches Prognosemodell ermittelt. Bei der Berechnung dieser charakteristischen Emissionsdaten wurden die Züge als Punktquellen oder Linienquellen idealisiert. Für diese Quellenarten wurden durch umfangreiche numerische Simulationsrechnungen die Ausbreitungsgesetzmäßigkeiten im inhomogenen Untergrund analysiert. Im einzelnen wurde der Einfluß von Bodenschichtungen, Bodensteifigkeit, Grundwasserhorizont, Materialdämpfung sowie Geländegeometrie und Einbauten im Boden auf die Erschütterungsausbreitung untersucht und in Form von frequenzabhängigen Einflußfunktionen beschrieben.

Das Anwendungsfeld dieses so konzipierten Prognoseverfahrens liegt zunächst dort, wo sich die Erschütterungen frei neben der Trasse bis zum Einwirkungsort ausbreiten können. In innerstädtischen Bereichen ist jedoch der Abstand zwischen Trasse und Gebäuden häufig sehr gering. In manchen Fällen befindet sich die Trasse sogar direkt unter Gebäuden oder führt durch ein Gebäude hindurch. Da in diesen Fällen die oben mitgeteilten Ergebnisse und Verfahren nur beschränkt gültig sind – infolge anderer Effekte bei der Wellenausbreitung – wurden zur Erfassung solcher Situationen die zu Beginn entwickelten Programme zur Berechnung der Erschütterungsausbreitung und zur Berechnung der Gebäudedynamik innerhalb dieses Vorhabens zusammengeführt. Mit diesem neuen, auch auf einem Personal Computer (PC) ablauffähigen Programmsystem, wurden insgesamt etwa 36 verschiedene Tunnel-Gebäude-Situationen berechnet und der Einfluß verschiedener Parameter auf die Schwingungsabstrahlung durch den Tunnel, die Ausbreitung durch den Boden und die Einleitung in Gebäude systematisch untersucht. Variiert wurden

- die Tiefenlage der Gebäude neben dem Tunnel
- die Lage des Gebäudes relativ zum Tunnel (über dem Tunnel und seitlich neben dem Tunnel)
- die Gebäudehöhe
- die Gebäudefundamentierung
- die Bodensteifigkeit und die Bodendämpfung.
- verschiedene Bauzustände.

Neben diesen Parametern wurden auch verschiedene mögliche Minderungsmaßnahmen wie:

- offene Schlitz mit Tiefen zwischen 3 und 12 m
- Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Bauwerk
- (verlorener) Baugrubenverbau bei der Tunnelerstellung
- massive und schwere Platten auf der Bodenoberfläche.

- Wirkung von Lichtschächten bei seitlichem und zentralem Gebäude
- Einzelfundamente mit und ohne aussteifende Bodenplatte
- Tiefabstimmung des Gleises in verschiedenen Frequenzen
- Tiefabstimmung des Gebäudes in verschiedenen Frequenzen.

im Sinne einer ersten Analyse untersucht.

Die Ergebnisse zeigen,

- daß besonders die Tunneldecke ein ausgeprägtes Eigenschwingungsverhalten aufweist, wobei deren Eigenfrequenzen in einem Bereich liegen können, in dem sowohl die Anregung durch das Fahrzeug wie auch die Gebäudeantwort infolge Eigenfrequenzen besonders stark ist. Mit zunehmender Tiefenlage des Tunnels (Überdeckung größer als 3 m) reduziert sich jedoch diese Resonanzfrequenz sehr stark, sodaß hinsichtlich dieses Effektes nur oberflächennahen Tunneln besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist.
- oberhalb der Tunneldeckenresonanz wird das Schwingungs- und Abstrahlungsverhalten des Tunnels unabhängig von der Tiefenlage überwiegend von der Tunnelsohle bestimmt. Das dynamische Verhalten wird dann ausschließlich von den elastischen Eigenschaften der Tunnelsohle und der Abstrahlungsdämpfung des Bodens bestimmt. Die Steifigkeit des Bodens ist dann ohne Bedeutung.
- Die Bodensteifigkeit beeinflußt jedoch die Lage der einzig relevanten Resonanzfrequenz des Tunnels, nämlich der Tunneldecke, in der Weise, daß die Resonanzfrequenz mit der Bodensteifigkeit zunimmt. Gleichzeitig werden die Tunnelschwingungen und die Schwingungen im umgebenden Erdreich im Frequenzbereich bis zur Tunneldeckenresonanz mit zunehmender Bodensteifigkeit stark reduziert.

Der Übergang der Schwingungen vom Boden in das Gebäude ist durch folgende Effekte geprägt:

- Schwingungen, die Frequenzen besitzen, die größer als die sogenannte Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz sind, werden abgemindert, darunter verstärkt. Die Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz wird durch die Fundament-Bodensteifigkeit und durch die Gesamtmasse des Gebäudes festgelegt. Bei einem bestimmten konstanten Anregungsspektrum werden dann niedrige Gebäude (kleine Gesamtmasse) die auf einem steifen Untergrund stehen (große Bodensteifigkeit) weitaus mehr mit Schwingungen belastet, als größere Gebäude, die auf einem weichen Untergrund stehen.
- Neben der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz sind die nächsten relevanten Frequenzen die vertikalen Wand-eigenfrequenzen. Diese legen die Bereiche fest, bei

denen die einzelnen Stockwerke gegeneinander schwingen. Anschaulich heißt das, das sind die Frequenzen, die sich ergeben, wenn das gesamte Bauwerk als eine Kette von Einmassenschwinger betrachtet wird, bei denen die Federn die Vertikalsteifigkeiten der Wände und die Decken die Einzelmassen darstellen. Für den hier betrachteten Frequenzbereich bis etwa 100 Hz und die Baumaterialien Ziegel oder Beton ist hierbei meistens nur die erste dieser Eigenfrequenzen von Bedeutung, da die weiteren weit oberhalb des betrachteten Frequenzbereiches liegen.

- Im weiteren sind die horizontalen Eigenfrequenzen des Gesamtbauwerks, die horizontalen Wandeigenfrequenzen und die Biegeeigenfrequenzen der Stockwerksdecken von grundlegender Bedeutung für das Schwingungsverhalten des Bauwerks. Die horizontalen Gebäude- und Wandeigenfrequenzen sind deshalb von großer Bedeutung, weil sie die Einspann- und Anregungsbedingungen der Stockwerksdecken bestimmen. Neben der Wandgeometrie und dem Wandmaterial ist hierbei auch die Einbettung der Gebäude von großer Bedeutung, da beide die horizontalen Eigenschwingungsformen bestimmen. Durch diese Wechselwirkung zwischen Wand und Decke ergeben sich veränderte Einspannbedingungen über die Bauwerkshöhe und in Folge von Stockwerksdecke zu Stockwerksdecke veränderliche Eigenfrequenzen. In praktischer Hinsicht bedeutet dies, daß ein Gebäude bei gleichen Spannweiten und Abmessungen ein ganzes Band von Deckeneigenfrequenzen besitzt, so daß bei breitbandiger Anregung, wie sie bei U-Bahn und Straßenbahnerschütterungen immer vorhanden ist, mit großer Wahrscheinlichkeit immer irgendeine Decke zu Resonanzschwingungen angeregt wird.
- Hinsichtlich des Einflusses einer Einbettung gilt, daß das System dadurch versteift und die Systemdämpfung infolge verbesserter Wellenabstrahlung im Boden vergrößert wird. Die Versteifung der aufgehenden Wände durch die Einbettung führt jedoch im allgemeinen dazu, daß die Decken phasengleicher als bei Nichteinbettung angeregt werden. Dies wiederum führt im allgemeinen zu einer Vergrößerung der Deckenschwingungen.
- Die Lage des Gebäudes - seitlich oder unmittelbar über dem Tunnel - ist von großer Bedeutung. Während bei einer seitlichen Lage die horizontalen Wandschwingungen in großem Maße angeregt werden, ist dies bei zentraler Lage von weit geringerer Bedeutung. Gleichzeitig wird das seitliche Gebäude wesentlich mehr durch die Bodenschwingungen im Bereich der Kellerwände angeregt. Das zentrale Gebäude zeigt demgegenüber eine starke Koppelung mit den Tunneldeckenschwingungen. Besonders die Resonanz der Tunneldecke wirkt sich auf die Gebäudeschwingungen stark aus. Durch die mehr phasengleiche Anregung der Gebäudefundamente des zentralen

Gebäudes im Vergleich mit dem seitlich gelegenen Gebäude ergeben sich beim zentralen Gebäude stets größere Deckenschwingungen.

- Ist ein Gebäude ohne weitere Maßnahmen direkt auf der Decke eines Tunnels gegründet, dann wird das Schwingungsverhalten des Gebäudes einschließlich der Stockwerksdecken stark bis ausschließlich von dem Schwingungsverhalten der Tunneldecke bestimmt.

Die Kenntnis der Wirksamkeit von Abschirmmaßnahmen ist im Erschütterungsschutz von großer Bedeutung, da deren Einbau stets mit großen Kosten verbunden ist. Da in der Praxis oftmals große Unklarheit über die Wirksamkeit bestimmter Maßnahmen vorhanden ist, wurde das Abschirmverhalten einiger praxisrelevanter Abschirmmaßnahmen rechnerisch untersucht. Als wirksam können eingeschätzt werden:

- Schlitz zwischen Tunnel und Gebäude
- Bodenverfestigung zwischen Tunnel und Gebäude
- Feder-Masse-Systeme unter der Fahrbahn
- Bauwerksabstimmung mit niedrigen Abstimmfrequenzen ( $< 4$  Hz)
- einseitige oder beidseitige Lichschächte

Als nichtwirksam ergaben sich folgende Maßnahmen:

- (zurückgelassener) Baugrubenverbau
- steife Platte auf der Bodenoberfläche
- steife und schwere Platte auf der Bodenoberfläche
- Art der Fundament (Platte oder Einzelfundament)

Die theoretischen Untersuchungen wurden begleitet und überprüft durch Messungen an verschiedenen Gebäuden unter Anregung durch U-Bahnverkehr und künstliche Anregung (Hydropuls in Zusammenhang mit dem TÜV/Rheinland). Gemessen wurde hierbei insbesondere die

Veränderung des Wechselwirkungsverhalten zwischen Untergrund und Bauwerk im Zuge der Erstellung eines Bauwerkes (Neubau des Technischen Zentrums der Sparkasse der Stadt Berlin). Durch diese Messungen ergaben sich auch neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verteilung der Schwingungsgrößen über die Gebäudehöhe sowie zur Minderungswirkung eines steifen, schweren Kellergeschosses. Das zweite vollständig ausgemessene Bauwerk, die Paul Löbe Oberschule ist ein Beispiel für ein sehr leichtes, sehr schwingungsfähiges Bauwerk. Neben der Ermittlung der Art der Erschütterungsübertragung wurde hier das Eigenschwingungsverhalten, insbesondere hinsichtlich der Koppelung der Wand- und Deckenresonanzen untersucht.

Insgesamt kann gesagt werden, daß sich durch die durchgeführten Messungen und Berechnungen grundsätzliche Aussagen zur Art der Schwingungsanregung durch das Tunnelbauwerk, zur Ausbreitung durch den Untergrund und zur Gebäudeanregung in Abhängigkeit der jeweiligen Tunnel-Bauwerkskonstellation ergaben. Diese Ergebnisse können direkt in der Planung und beim Bau von neuen Trassen und neuen Gebäuden in der Nähe dieser Trassen berücksichtigt werden und führen insofern unmittelbar zu einer Erschütterungsreduzierung.

Weitere Arbeiten erscheinen jedoch notwendig bei der Untersuchung der Fahrzeug-Fahrbahn-Wechselwirkung und bei der Untersuchung und der Entwicklung konkreter schwingungsmindernder Maßnahmen. Das Ziel dieser weiteren Arbeiten ist somit, die einzelnen erschütterungserzeugenden Lastanteile des Fahrzeugs und des Fahrwegs auf der Basis der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund zu charakterisieren und zu quantifizieren. Nach deren Kenntnis können dann wirkungsvolle, praktikable und wirtschaftlich vertretbare erschütterungsmindernde Maßnahmen entwickelt werden.



# LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Rücker, W.: 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
- /2/ Rücker, W.: Auswirkung von U-Bahnerschütterungen auf geplante Gebäude, Die Bautechnik 7/1978, S.218-226
- /3/ Auersch, L., Krüger, F.: Untersuchung zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Stadtverkehrs im Geländeniveau. Bericht Nr. 9 des BMFT-Vorhabens TV 7954 - AP 09 000. Projektleiter: Dr.-Ing. W. Rücker, Dr.-Ing. F. Blennemann
- /4/ Auersch, L., Hebener, H., Rücker, W.: Erschütterungen infolge Schienennahverkehr: Theoretische und meßtechnische Untersuchungen zur Emission, zur Ausbreitung durch den Boden und zur Übertragung in Gebäude. Bericht Nr. 19 des BMFT-Vorhabens TV 8329. Projektleiter: Dr.-Ing. W. Rücker
- /5/ Rücker, W.: Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund, BAM-Forschungsbericht 78, 1981
- /6/ Rücker, W.: Dynamic behaviour of rigid foundations of arbitrary shape on a halfspace. Earthquake Eng. and Struct. Dynamics, Vol. 10, S. 675-690, 1982
- /7/ Mitakidis, A.; Rücker, W.: Erschütterungsausbreitung bei transienten Belastungsvorgängen im elastischem Halbraum.
- /8/ Auersch, L.: Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen - theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental, BAM-Bericht 155, 1989
- /5/ Auersch, L.: Wellenausbreitung durch eine Bodenschicht. Die Bautechnik, S. 221-236, 1981
- /10/ Auersch, L.: Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden. BAM-Forschungsbericht 92, 1983
- /11/ Waas, G.: Analysis Method for Footing Vibrations through layered Media, US-Army-Engineer-Waterway Experiment Station, September 1972



# Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

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

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas  
**Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970

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

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit - Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971

N. Steiner  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971

P. Schneider  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz  
**Chromatographie und chemische Konstitution - Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971

H. Veith  
**Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971

K.-H. Möller  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972

H.-J. Krause  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972

H. Feuerberg  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen  $760$  und  $2.10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972

E. Fischer  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei  $20$  kHz**

Nr. 15/1972

H. Pohl  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972

E. Knublauch  
**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer**

Nr. 17/1972

P. Reimers  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973

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

Nr. 19/1973

K. Kaifanke, H. Czichos  
**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973

R. Rudolphi  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973

D. Klafke, W. Maennig  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrütung**

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973

W. Ruske  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973

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

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM - Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974

H. Heinrich  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974

P. Schneider  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nicht-stationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff**

Nr. 35/1976

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

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976

W. Struck  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen - Vorschlag für ein Prüfverfahren -**

Nr. 38/1976

K.-H. Habig  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung**

Nr. 40/1976

H. Hantsche  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976

B. Böttcher  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976

S. Dietlen  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976

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

Nr. 44/1976

W. Mathees  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"**

- Nr. 45/1976  
W. Paatsch  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**
- Nr. 46/1977 (vergriffen)  
G. Schickert, H. Winkler  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**  
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
- Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**
- Nr. 48/1977  
U. Holzöhner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**
- Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**
- Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiers, G. Andreae, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**
- Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**
- Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**
- Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**
- Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisen-schichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**
- Nr. 56/1979  
W. Brüner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**
- Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**  
Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing
- Nr. 58/1979  
W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**
- Nr. 59/1979  
G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der**
- Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**
- Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**
- Nr. 61/1979  
K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**
- Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**
- Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**
- Nr. 64/1980  
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**
- Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**
- Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**
- Nr. 67/1980  
W. Matthees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**
- Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines vollzentrischen Präzisions-Goniometers**
- Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität den Liners von Reaktorsicherheitschülern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**
- Nr. 71/1980  
W. Matthees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**
- Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**
- Nr. 73/1980  
P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**
- Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**
- Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**
- Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**
- Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Mautzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**
- Nr. 78/1981  
W. Rücker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**
- Nr. 79/1981  
V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**
- Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**
- Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**
- Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J.- Kühn, S. Ledworuski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches**  
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
- Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen - Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -**
- Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231 -X/1982  
H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung - Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research" Materials Research and Testing - Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme "Basic Technological Research" -**
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimmelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**

- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Quan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren  
- Stretch- und Erholungsvermögen -**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiers  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initlierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützwow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development  
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung - Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 1  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Slabs, Part 1**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste**
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 1  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 1**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 11  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 11**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load  
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit  
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**

- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**  
**Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 11**  
**Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 11**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreas, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brett-schichtverleimungen für den Holzbau**
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogurike, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively**
- Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung**  
**Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR- Reaktor-gebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzlöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987  
W. Schon, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzlöhner  
**Bestimmung baugruddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D Zeichenprogramm für vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmarin, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breitkreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160, Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Gobel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission - Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rucker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rucker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung**



- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggerhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs**
- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992  
M. Weber  
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992  
F. Buchhardt  
**Zur Dekonvolution im Zeitbereich**
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992  
M. Maultzech, W. Stichel, E.- M. Vater  
**Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")**
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992  
Renate Müller  
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen**
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992  
B. Löffelbein, M. Woydt, K. -H. Habig  
**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen**
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992  
Th. Schneider, E. Santner  
**Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten. Literaturübersicht**
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992  
K. Mallwitz  
**Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung**
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992  
W. Matthees, G. Magiera  
**Impedanzeigenschaften von Finiten Elemente Modellen bei Integration im Zeitraum**
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992  
G. Zachariev  
**Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch**
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992  
H.- M. Bock, S. Erbay, J. With  
**Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl**
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte; Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit**
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993  
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn  
**Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfea/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)**
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993  
U. Krause  
**Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen**
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993  
U. Schmidchen, G. Würsig  
**Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln**
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993  
D. Lietze  
**Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme**
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993  
A. Skopp  
**Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C**
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994  
St. Meretz  
**Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen**
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994  
W. F. Rucker, S. Said  
**Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden**





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

**Federal Institute for  
Materials Research and Testing**

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

Unter den Eichen 87  
D-12205 Berlin  
☒ D-12200 Berlin

Telefon (0 30) 81 04-0  
Telefax (0 30) 8 11 20 29  
Telex 1 83 261 bamb d

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

