LIS-Berichte

Nr. 107

Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen

Herausgeber

Landesanstalt für Immissionsschutz
LIS Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Straße 6 D 4300 Essen 1 Tel. (0201)7995-0

ISSN 0720-8499

1992

100 % Altpapier, chlorfrei gebleicht

Landesanstalt für Immissionsschutz
Nordrhein-Westfalen
Bibliothek

Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen

Dr. Joachim Melke
Technischer Überwachungs-Verein Rheinland e.V.,
Fachbereich Schwingungstechnik und Erschütterungsschutz

Dieses Untersuchungsprojekt wurde im Auftrag der Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen (LIS) durchgeführt.

Projektbetreuung:
Detlef Piorr, LIS

Herausgeber:
Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen

Inhalt

Vorwort		0 - 9
Zusammenfassung/Summary		0 - 11
Empfehlungen der LIS zur Prognose von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen		0 - 13
TÜV-Studie		0 - 17
Berichtskennblatt		0 - 18
Verzeichnis der Tabellen		0 - 19
Verzeichnis der Bilder		0 - 20
Verzeichnis der Abkürzungen		0 - 24
1.	Einführung	1 - 1
1.1	Gesamtziel	1 - 1
1.2	Förderpolitisches Ziel	1 - 1
1.3	Technisch-wissenschaftliches Ziel	1 - 2
2.	Randbedingungen einer Prognose	2 - 1
2.1	Physik des Prognosesystems	2 - 1
2.2	Planungssituationen	2 - 3
2.3	Prognose-Kenngrößen	2 - 3
3.	Literaturbeschaffung und Dokumentation	3 - 1
3.1	Mögliche Quellen	3 - 1
3.2	Datenbankrecherche	3 - 2
3.3	Quantitatives Ergebnis	3 - 4
4.	Emission oder Erschütterungsquellen	4 - 1
4.1	Branchenübersicht und typische Emittenten	4 - 1
4.2	Merkmale der Emission	4 - 3
4.2.1	Typ der Erregung	4 - 3
4.2.2	Dauer der Erregung	4 - 4
4.2.3	Stärke der Erregung	4 - 4
4.2.4	Frequenz der Erregung	4 - 5
4.2.5	Struktur der Erregung	4 - 5
4.3	Ermittlung der Emission	4 - 6
4.3.1	Theoretische Abschätzungen	4 - 6
4.3.2	Schwingungsmessungen	4 - 9
4.3.3	Abgrenzung des Emissionsbereiches - Bezugsabstand	4 - 10

4.4	Emissionen durch Industrie und Gewerbe	4 - 12
4.4.1	Großflächige Industrieanlagen	4 - 12
4.4.1.1	Kraftwerksanlagen	4 - 12
4.4.1.2	Petrochemische Anlagen	4 - 13
4.4.1.3	Aluminium Walzwerk	4 - 14
4.4.1.4	Preßwerk zur Dosenfertigung	4 - 15
4.4.1.5	Webereien	4 - 15
4.4.2	Mittelständisches Gewerbe - Arbeitsprozesse und Einzelmaschinen	4 - 17
4.4.2.1	Stanzen, Ziehen, Schneiden, Zerkleinern	4 - 17
4.4.2.2	Umformen - Schmiedemaschinen	4 - 19
4.5	Emissionen durch Baustellentätigkeiten	4 - 21
4.5.1	Schlagendes Rammen	4 - 21
4.5.2	Vibrierendes Rammen	4 - 23
4.5.3	Bodenverdichtung	4 - 24
4.5.4	Abbruchsprengungen	4 - 25
4.5.5	Unterirdischer Tunnelvortrieb	4 - 26
4.5.6	Baugrubensprengungen	4 - 27
5.	Gewinnungssprengungen in Steinbrüchen	5 - 1
5.1	Merkmale der Emission	5 - 1
5.2	Möglichkeiten der Prognose	5 - 2
5.2.1	Abstands - Lademengen - Gesetze	5 - 2
5.2.2	Statistische Analyse	5 - 5
5.2.3	Analyse und Synthese von Seismogrammen	5 - 7
6.	Transmission der Erschütterungsausbreitung	6 - 1
6.1	Ideale Erschütterungsausbreitung	6 - 1
6.1.1	Maßgebliche Wellen	6 - 1
6.1.2	Geometrische Amplitudenabnahme	6 - 2
6.2	Reale Erschütterungsausbreitung	6 - 3
6.2.1	Annäherung an den meßtechnischen Befund	6 - 3
6.2.2	Absorption	6 - 4
6.2.3	Wasser im Boden	6 - 6
6.2.4	Inhomogenität	6 - 8
6.2.5	Künstliche Störungen im Boden	6 - 9

6.3	Ausbreitungsmodelle	6 - 11
6.3.1	Eingeführte Amplituden-Abnahme-Formeln	6 - 11
6.3.2	Analytische Erweiterungen	6 - 14
6.3.2.1	Inkohärente Linienquellen und Dämpfungen	6 - 14
6.3.2.2	Normalverteiltes Emissionsspektrum	6 - 14
6.3.2.3	Berücksichtigung der Wellenarten	6 - 15
6.3.3	Pauschale Ergänzungen	6 - 16
6.3.4	Darstellungsformen	6 - 17
6.3.4.1	Physikalische Größe und Schwingungsrichtung	6 - 17
6.3.4.2	Mittelwerte und Fraktile	6 - 18
6.3.5	Diskrete Rechenmodelle	6 - 20
6.4	Ermittlung von Bodenkennwerten	6 - 22
6.4.1	Wellengeschwindigkeiten	6 - 22
6.4.2	Materialdämpfung	6 - 25
7.	Wechselwirkungseffekte	7 - 1
7.1	Methoden	7 - 1
7.2	Quelle (Maschinenfundament) - Baugrund	7 - 2
7.3	Baugrund - Empfänger (Gebäude)	7 - 3
8.	Immission oder Erschütterungseinwirkungen	8 - 1
8.1	Überblick und Methoden	8 - 1
8.2	Gebäudedynamik	8 - 3
8.2.1	Modellansätze und Vorgehensweise	8 - 3
8.2.2	Einfluß der Baugrunddämpfung	8 - 4
8.2.3	Einfluß der Strukturdämpfung	8 - 5
8.2.4	Schwingungen der Geschoßdecken	8 - 7
8.2.5	Meßtechnische Details zur Deckenschwingung	8 - 9
8.2.6	Antwort - Spektrum - Methode	8 - 11
8.3	Körperschall	8 - 13
8.3.1	Problemstellung	8 - 13
8.3.2	Wellenfortpflanzung im Festkörper	8 - 14
8.3.3	Körperschallausbreitung	8 - 15
8.3.3.1	Impedanzen	8 - 15
8.3.3.2	Querschnittssprung	8 - 16
8.3.3.3	Biegesteife Ecken	8 - 17
8.3.3.4	Gelenkige Ecke	8 - 18

8.3.3.5	Rechtwinklige Verzweigungen	8 - 18
8.3.3.6	Elastische Zwischenschichten	8 - 20
8.3.3.7	Sperrmassen	8 - 20
8.3.3.8	Parallele Platten	8 - 20
8.3.4	Meßtechnischer Befund zur Körperschallausbreitung	8 - 21
8.4	Sekundärer Luftschall	8 - 24
8.4.1	Körperschallabstrahlung	8 - 24
8.4.2	Berechnung des Luftschallpegels	8 - 25
8.4.3	Meßtechnischer Befund zur Körperschallabstrahlung	8 - 26
9.	Zusammenfassung und Bewertung	9 - 1
9.1	Aktuelle Ausgangssituation	9 - 1
9.1.1	Einsatzbereiche der Prognose	9 - 1
9.1.2	Komplexität und Unsicherheit der Prognose	9 - 3
9.2	Verfügbare Prognosemöglichkeiten	9 - 7
9.2.1	Mathematisch-numerische Verfahren	9 - 8
9.2.2	Nutzung von Dateien	9 - 10
9.2.3	Analytisch-meßtechnische Verfahren	9 - 11
9.3	Anwendungskriterien	9 - 13
9.3.1	Mathematisch-numerische Verfahren	9 - 13
9.3.2	Nutzung von Dateien	9 - 14
9.3.3	Analytisch-meßtechnische Verfahren	9 - 15
9.4	Defizite	9 - 15
9.4.1	Lücken der Studie	9 - 15
9.4.2	Lücken im Wissensstand	9 - 16
9.4.3	Regelbedarf in der Handhabung	9 - 17
10.	Weiteres Vorgehen	10 - 1
10.1	Technisch-wissenschaftliche Problemstellungen	10 - 1
10.1.1	Fortsetzung der Studie	10 - 1
10.1.2	Technisch-anwendungsorientierte Vorschläge	10 - 2
10.1.3	Wissenschaftlich-grundlagenorientierte Vorschläge	10 - 3
10.2	Durchführung der Immissionsprognosen	10 - 4
10.3	Schlußfolgerung	10 - 6
11.	Literaturverzeichnis	
12.	Tabellen	
13.	Bilder	

Vorwort

Erschütterungs- und Körperschalleinwirkungen gehören zu denjenigen Phänomenen in der Umwelt, die Belästigungen, Störungen und gesundheitliche Schäden beim Menschen sowie Schäden an Sachgütern hervorrufen und Funktionsstörungen empfindlicher Geräte verursachen können. Der Einwirkungsbereich umfaßt im allgemeinen zwar nur einen Umkreis bis zu etwa 200 m Abstand von der Quelle, so daß zumeist nur wenige Menschen und Gebäude betroffen sind. Da jedoch einmal vorhandene und als nicht vertretbar anzusehende Erschütterungs- und Körperschalleinwirkungen erfahrungsgemäß nachträglich nur mit hohem Aufwand ausreichend gemindert werden können, müssen diese Einwirkungen möglichst schon im frühen Planungsstadium abgeschätzt werden.

Derzeit gibt es kein standardisiertes Prognosemodell für Erschütterungs- und Körperschallimmissionen; die Prognosemethodik variiert von Gutachter zu Gutachter. Auch in der Literatur werden überlicherweise nur Teilaspekte der Schwingungsprognose behandelt. Die LIS beauftragte daher den TÜV Rheinland, diese verstreut vorhandenen Erkenntnisse zur Schwingungsprognose zu sichten und gesammelt darzustellen. Das Ergebnis dieser Recherche wird hiermit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Basierend auf diesen Ergebnissen werden in dem Bericht außerdem erste Empfehlungen aus Sicht der LIS zur Prognose von Schwingungseinwirkungen gegeben.

Die vorliegende Arbeit behandelt nicht die Schwingungseinwirkungen, die vom Straßen- und Schienenverkehr verursacht werden. Auf diese in der Praxis wichtige Emittentengruppe wird in einer weiteren Studie gesondert eingegangen werden.

Durchführung von Immissionsprognosen für Körperschall- und Erschütterungseinwirkungen

Dr. Joachim Melke

Zusammenfassung

Anhang einer Literaturrecherche wird der gegenwärtige Kenntnisstand zur Erzeugung, Ausbreitung und Einwirkung von Erschütterungen und Körperschall zusammengestellt. In einer praxisbezogenen Darstellung werden die Möglichkeiten zur Durchführung von Immissionsprognosen untersucht.

Im Ergebnis stellt sich heraus, daß mehrere unterschiedliche Prognoseverfahren und eine Fülle von Einzelfakten zur Verfügung stehen. Die Qualität der Verfahren ist sehr unterschiedlich und über die Prognosegenauigkeit liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor.

Es werden die Defizite aufgezeigt und die Aufgabenstellungen zur Lösung technisch-anwendungsorientierter sowie wissenschaftlich-grundlagenorientierter Probleme formuliert. Zur Umsetzung in eine abgesichert und praktikable Verfahrensanweisung werden Vorschläge unterbreitet.

Summary

Predicition of Vibration and Groundborne-Noise

The report provides the state-of-the-art of vibration and groundborne noise generation, propagation, and transmission. Various types of vibration sources as industrial plants and machineries, blasting and civil engineering works are reviewed. The vibration prediction methods are evaluated with regard to practical application.

It was found that several prediction methods are used and a lot of different data are available. But the methods differ widely as far as quality is concerned and no validated information on the precision of the prediction has been obtained.

Deficits are pointed out. Questions for solving problems of technical application and fundamental research work are raised. Proposals are given to convert the reviewed knowledge into a controlled prediction procedure.

Empfehlungen der LIS zur Prognose von Erschütterungs- und Körperschall-immissionen

Detlef Piorr

Der TÜV Rheinland hat im Auftrag der LIS eine Studie erstellt, die den derzeitigen Stand der Immissionsprognosen von Erschütterungs- und Körperschalleinwirkungen aufzeigt. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden mit dem vorliegenden LIS-Bericht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Eine Aussage der Studie ist, daß es auf absehbare Zeit kein einheitliches Prognoseverfahren geben wird, das auf alle Erschütterungs- und Körperschallquellen und alle Quellen-Empfänger-Konfigurationen universell anwendbar ist. Die derzeitig mögliche Vorgehensweise besteht stattdessen darin, das Gesamtsystem in mehrere entkoppelte Teilsysteme zu unterteilen. Beispielsweise können folgende Teilbereiche unterschieden werden:

- Die Quelle inklusive ihrer Ankopplung an den Baugrund,
- die Ausbreitung der Schwingungen im Erdboden,
- der Übergang der Schwingungen vom Erdboden auf die Gebäudefundamente,
- der Übergang der Schwingungen von den Fundamenten auf die Gebäudestrukturen.

Die schwingungstechnisch relevanten Kenngrößen solcher Teilbereiche sind - wenn auch unvollständig - in Datensammlungen vorhanden. Derartige in der Literatur veröffentlichte Kenngrößen wurden im Rahmen des Untersuchungsvorhabens für die verschiedenen gewerblichen Quellen mit Ausnahme der Quellendaten zu Verkehrserschütterungen zusammengetragen. Basierend auf solchen Daten ist - wie in der Studie gezeigt wird - eine "überschlägige Prognose" möglich. Nach den Erfahrungen des TÜV Rheinland können überschlägige Prognosen in ungünstigen Fällen mit unsystematischen Fehlern von bis zu 300 % behaftet sein.

Eine genauere Vorausabschätzung ist mit Hilfe der "analytisch-meßtechnischen Prognose" möglich. Hierbei werden die schwingungstechnischen Kenngrößen der einzelnen Teilsysteme soweit wie möglich frequenzselektiv meßtechnisch ermittelt. In der Regel können die Ausbreitungsbedingungen, die zwischen den vorgesehenen Aufstellungsorten der Quellen und den Immissionsorten vorhanden sind, für jeden konkreten Planungsfall vor Ort ermittelt werden. Sofern die immissionsseitigen Gebäude schon bestehen, ist es auch möglich, die Schwingungsübertragung vom Baugrund auf die Fundamente und von den Fundamenten auf die einzelnen Gebäudestrukturen sowie den zugehörigen sekundären Luftschall meßtechnisch zu ermitteln.

Die Erfassung der Schwingungsemission von Aggregaten ist im Gegensatz zur Erfassung der Luftschallemission (als Schalleistungspegel) bislang nicht in Regelwerken festgelegt. Als Ersatz-Kenngröße für die Schwingungsemission werden häufig die in bestimmten Abständen von einer Quelle ermittelten Schwinggeschwindigkeiten herangezogen. Diese Kenngrößen sind jedoch nur bedingt auf andere Aufstellungsorte und -arten übertragbar.

Nach dem vom TÜV Rheinland ermittelten Erfahrungsstand können durch die analytisch-meßtechnische Prognose die unsystematischen Fehler zwischen den prognostizierten Schwingungsimmissionen und den tatsächlich auftretenden Einwirkungen auf Werte kleiner 50 % reduziert werden. Die unvermeidbaren unsystematischen Fehler werden im Prognoseverfahren in der Regel durch entsprechende Sicherheitszuschläge berücksichtigt.

Eine besondere Schwierigkeit besteht in der Prognose von Schwingungseinwirkungen dann, wenn die zu schützende Wohnbebauung in der Nachbarschaft der geplanten Erschütterungs- und Körperschallquellen noch nicht besteht. In derartigen Fällen können die Übertragungsbedingungen vom Baugrund in die geplanten Gebäude nur durch Erfahrungswerte angenähert werden. Tabelle 0.1 verdeutlicht die Spannweite der Übertragungsbedingungen, die in verschiedenen Wohnhäusern ermittelt wurden. Angegeben ist jeweils das Verhältnis der Schwinggeschwindigkeitsamplitude, die auf einer Decke des Gebäudes auftrat, zu der Schwinggeschwindigkeitsamplitude, die auf dem ungestörten Baugrund ermittelt wurde (siehe auch Tabelle 8.1b der Studie).

Tabelle 0.1: Übertragungsfaktoren für den Übergang von Freifeldschwingungen auf Gebäudedecken (meßtechnische Erfahrungswerte lt. DIN 4150, Teil 1)

Quelle	Übertragungsfaktor
Sprengung	0,5 bis 6,2
Fallrammen und Schmiedehämmer	1 bis 6,5
Vibrationsrammen und -rüttler	1,5 bis 10
Webmaschinen	3 bis 5
Straßen- und Schienenverkehr	0,7 bis 4,5

In der Prognose wird für den Fall, daß die immissionsseitigen Gebäude noch nicht bestehen, in der Regel ein Übertragungsfaktor für den Übergang der Baugrundschwingungen auf die Gebäudestrukturen angesetzt, der aus Sicht des Immissionsschutzes auf der "sicheren Seite" liegt.

Damit die deckenbezogenen Erschütterungs-Anhaltswerte auch bei einer ungünstigen Lage der anregenden Frequenzen zu den Eigenfrequenzen der Decken am Immissionsort eingehalten werden, müssen die Amplituden der Baugrundschwingungen bei impulsförmiger Anregung beispielsweise etwa um den Faktor 6, bei periodischer Anregung etwa um den Faktor 10 und bei stochastischer Anregung etwa um den Faktor 4 kleiner sein, als die zulässigen Deckenschwingungen. Es wird Aufgabe weiterer Untersuchungsvorhaben sein, diese Übertragungsfaktoren statistisch abzusichern und die bislang nur auf Spitzenwerte abgestimmten Übertragungsfaktoren auch frequenzselektiv für Effektivwerte zu ermitteln.

In seinen Schlußfolgerungen weist der TÜV-Rheinland darauf hin, daß die Prognoseunsicherheiten zur Zeit in der Regel durch verschärfte Auflagen einseitig vom Anlagenbetreiber zu tragen sind. Um die negativen Auswirkungen der Prognoseunsicherheiten in den Fällen, in denen die Wohnbebauung noch nicht besteht, nicht nur vom Betreiber der schwingungserzeugenden Aggregate tragen zu lassen, empfiehlt der Autor der TÜV-Studie, in diesen Fällen im Genehmigungsverfahren in Erweiterung der bestehenden Regelwerke Grenzwerte für die zulässigen Baugrundschwingungen anzugeben. Diese Grenzwerte sollen so festgelegt werden, daß sie im Regelfall die Immissions-Anhaltswerte im Innern von Gebäuden abdecken. Mit diesem Vorschlag greift der TÜV-Rheinland auf eine Empfehlung zurück, welche die "Projektgruppe Lärmbekämpfung beim Bundesminister des Innern" [9-1] schon 1978 vorgeschlagen hatte. Allerdings haben derartige baugrundbezogene Grenzwerte bislang keinen Eingang in technische Regelwerke oder Verordnungen gefunden.

Parallel zu den baugrundbezogenen Richtwerten empfiehlt der TÜV-Rheinland für den Fall, daß die immissionsseitigen Gebäude noch nicht bestehen, bautechnische Auflagen für die zu errichtenden Wohngebäude. Diese Auflagen sollen verhindern, daß die über den Baugrund in die Wohngebäude eingeleiteten Schwingungen die dort weiterhin unverändert gültigen, bauwerksbezogenen Immissionsrichtwerte überschreiten. Durch diese abgestufte Vorgehensweise trägt der Bauherr der Wohnbebauung einen Teil der Prognoseunsicherheit mit. Der Schutzanspruch der Bewohner des geplanten, immissionsseitigen Hauses vor Schwingungseinwirkungen bleibt hierbei unverändert bestehen.

Diese vom TÜV-Rheinland für den Fall, daß die Wohnbebauung noch nicht existiert, empfohlene Vorgehensweise wird zur Zeit schon in Sonderfällen angewandt. Die dynamische Berechnung der Wohngebäude ist hierbei mit erheblichem Aufwand verbunden. Da es zur Zeit kein Regelwerk gibt, in welchem aufgezeigt wird, wie ein Gebäude aus Sicht des Immissionsschutzes auszubilden ist, wenn es auf einem mit "Schwingungen" belasteten Baugrund errichtet werden soll, ist es unbedingt erforderlich, daß zur Planung in solchen Fällen ein auf dem Gebiet der Gebäudedynamik erfahrenes Ingenieurbüro hinzugezogen wird.

Eine weitere Möglichkeit, die negativen Auswirkungen der unvermeidlichen Prognoseunsicherheiten aufzufangen, liegt in der Realisierung möglichst niedriger Baugrundschwingungen, wozu sich quellenbezogene, technische Minderungsmaßnahmen anbieten. So ist es bei den meisten ortsfesten Aggregaten möglich, die auf den Baugrund übertragenen schwingungserzeugenden Kräfte durch technische Maßnahmen um wenigstens 80 % gegenüber der "festen Aufstellung " zu mindern. In Resonanzfällen können häufig erhebliche Minderungen durch geringe Drehzahländerungen erzielt werden. Auf die ganze Palette der technischen Minderungsmaßnahmen konnte der TÜV-Rheinland im Rahmen des Untersuchungsvorhabens, das nur den derzeitigen Stand der Prognosemöglichkeiten darstellen sollte, nicht eingehen.

Im Rahmen einer Schwingungsprognose hält die LIS es für erforderlich, auch den Stand der Technik und die möglichen Minderungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Aus diesen Gesichtspunkten heraus kann die vom TÜV Rheinland empfohlene problemangepaßte, abgestufte Unterteilung der Vorausabschätzung in "überschlägige Prognose" und "analytisch-meßtechnische Prognose" folgendermaßen erweitert werden:

Zunächst wird eine "überschlägige Prognose" aufgrund der in Dateien verfügbaren Daten durchgeführt. Wenn diese Abschätzung auf der "sicheren Seite" zeigt, daß mit keinen schädlichen Schwingungseinwirkungen gerechnet werden muß, kann auf die detaillierte, "analytisch-meßtechnische Prognose" verzichtet werden.

Wenn nach der "überschlägigen Prognose" im Rahmen der üblichen Prognoseunsicherheiten zu erwarten ist, daß die vorgegebenen Richtwerte nicht sicher eingehalten bzw. möglicherweise überschritten werden, ist zu prüfen, ob unter Be-

rücksichtigung der technisch möglichen und wirtschaftlich vertretbaren Minderungsmaßnahmen die Einhaltung der Richtwerte gewährleistet werden kann. Ist eine hinreichende Minderung nicht möglich, so muß die Prognosesicherheit - wenn auf die Durchführung des Projektes nicht ganz verzichtet wird - durch die Erstellung einer detaillierten, "analytisch-meßtechnischen Prognose" vergrößert werden.

In einer Vielzahl von Prognosefällen wird die überschlägige Prognose ergeben, daß die Einhaltung der Richtwerte ohne zusätzliche Minderungsmaßnahmen nicht sicher gewährleistet werden kann, daß aber die Richtwerte unter Berücksichtigung der möglichen Minderungsmaßnahmen mit Sicherheit eingehalten werden. In diesen Fällen ist abzuwägen, ob die Prognosesicherheit durch die detaillierte, analytisch-meßtechnische Prognosemethode vergrößert werden soll oder ob die technischen Minderungsmaßnahmen der Planung zugrunde gelegt werden sollen und somit auf die detaillierte, analytisch-meßtechnische Prognose verzichtet wird. Bei dieser Abwägung gibt die LIS der vorbeugenden Realisierung von Minderungsmaßnahmen den Vorzug vor der Erstellung weiterer, aufwendiger Prognosen.

In den Fällen, in denen die Minderungsmaßnahmen auch nach der Aufstellung der geplanten Aggregate ohne erhebliche Zusatzkosten vorgenommen werden können, ist eine zeitliche Aussetzung der im Genehmigungsbescheid vorgegebenen technischen Minderungsmaßnahmen möglich, bis nach der Inbetriebnahme die tatsächlichen Einwirkungen erfaßt werden können und endgültig entschieden werden kann, ob die Minderungsmaßnahmen notwendig sind. In derartigen Fällen sind bei der Errichtung der Anlagen nur die räumlichen und technischen Voraussetzungen zu späteren Durchführung der Minderungsmaßnahmen zu schaffen. Die LIS empfiehlt, diese Möglichkeit des Immissionsschutzrechtes verstärkt zu nutzen, um die unerwünschten Auswirkungen von Prognoseunsicherheiten aufzufangen.

Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen

- Studie zum Stand der Technik -

Zuwendungsgeber:	Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen (LIS) Wallneyer Str. 6 4300 Essen 1
Forschungsvorhaben:	513-8824.11-89-2
Zuwendungsempfänger:	Technischer Überwachungs-Verein Rheinland e.V. Postfach 10 17 50 5000 Köln 1
ausführende Stelle:	Fachbereich Schwingungstechnik und Erschütterungsschutz
Verfasser:	Dr. rer. nat. Joachim Melke z.Zt. Thurner Str. 123 5000 Köln 80
TÜV - Auftrag - Nr.:	848/409002

BERICHTSBLATT

1. Berichtsnummer	2. Berichtsart	3.

4. Titel des Berichts

Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschall-einwirkungen. Studie zum Stand der Technik

5. Autor(en) (Name, Vorname(n))

Dr.rer.nat. MELKE, Joachim

6. Abschlußdatum
31.Oktober 1990

7. Veröffentlichungsdatum

8. Durchführende Institution (Name, Adresse)

Technischer Überwachungs-Verein Rheinland e.V.
Postfach 10 17 50
5000 KÖLN 1

9. Ber.Nr.Auftragnehmer
948/409002

10. Förderungskennzeichen
513-8824.11-89-2

11. Seitenzahl
145 (Text)

13. Literaturangaben
197 (17 Seiten)

12. Fördernde Institution (Name, Adresse)

Landesanstalt für Immissionsschutz NRW
LIS
Wallneyer Straße 6
4300 ESSEN 1

14. Tabellen
18 (17 Seiten)

15. Abbildungen
72 (72 Seiten)

16. Zusätzliche Angaben

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

18. Kurzfassung (Gliederung s. Hinweise)

Anhand einer Literaturrecherche wird der gegenwärtige Kenntnisstand zur Erzeugung, Ausbreitung und Einwirkung von Erschütterungen und Körperschall zusammengestellt. In einer Praxisbezogenen Darstellung werden die Möglichkeiten zur Durchführung von Immissionsprognosen untersucht.

Im Ergebnis stellt sich heraus, daß mehrere unterschiedliche Prognoseverfahren und eine Fülle von Einzelfakten zur Verfügung stehen. Die Qualität der Verfahren ist sehr unterschiedlich und über die Prognosegenauigkeit liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor.

Es werden die Defizite aufgezeigt und die Aufgabenstellungen zur Lösung technisch-anwendungsorientierter sowie wissenschaftlich-grundlagenorientierter Probleme formuliert. Zur Umsetzung in eine abgesicherte und praktikable Verfahrensanweisung werden Vorschläge unterbreitet.

19. Schlagwörter

Erschütterungen, Schwingungen, Körperschall, Immissionsprognose, Industrie-, Spreng-, Baustellenerschütterungen, Emission, Transmission, Immission, Wellenausbreitung, Bodendynamik, Gebäudedynamik, Bauwerksschwingungen, Körperschallausbreitung, Sekundärer Luftschall

20.	21.	22.

Verzeichnis der Tabellen

2.1 Typische Problemstellungen bei der Vorermittlung und Vorgehensweise

4.1 Typische Erschütterungsquellen im Immissionsschutz

4.2 Geometrie der Erschütterungsquelle und Bezugsabstand R_1, R_2

4.3 Emission von Webmaschinen, numerische Übersicht zu Einflußgrößen

5.1 Empirische Kennwerte b, m und k für die Abstands-Lademengen-Beziehung

5.2 Absorptionseigenschaften verschiedener Gebirgsarten - Anisotropiefaktor

6.1 Geometrische Amplitudenabnahme im Idealfall

6.2 Kennwerte für Materialdämpfung und Wellengeschwindigkeiten im Boden

6.3 Kennwerte für Materialdämpfung und Wellengeschwindigkeiten im Boden
a : Literatur Ausland
b : Literatur Bundesrepublik

8.1 Übertragungsverhältnisse für den Übergang von Freifeldschwingungen auf ein Gebäude
a : Modellrechnung
b : meßtechnische Erfahrungen

8.2 Wellentypen in Festkörpern

8.3 Zusammenstellung von Impedanzformeln.

8.4 Zusammenstellung von Impedanzformeln für unendliche und endliche Systeme

8.5 Zusammenstellung der Transmissionsgrade für Longitudinal- und Biegewellen

8.6 Dämpfung der Körperschallausbreitung pro Stockwerk in einem Stahlbetonskelettbau (Beschleunigungspegeldifferenz in dB)

9.1 Durchführung von Immissionsprognosen, Vergleich Erschütterungen und Lärm (im Text Seite 9-4 bis 9-6)

Bemerkung : Aus redaktionellen Gründen wird Seite 12-9 und 12-11 doppelt gezählt (a und b) und Seite 12-10 entfällt

Verzeichnis der Bilder

2.1 Unterteilung des Prognose - Gesamtsystems

2.2 Erschütterungsausbreitung technischer Erreger

2.3 Maßgebender Bereich für Erschütterungen und Körperschall

4.1 Definition der Bezugsabstände

4.2 Beispiele großflächiger Industrieanlagen

4.3 Emission von Kraftwerken: a) Nr.1 in 350 m, b) Nr.2 in 700 m

4.4 Emission einer petrochemischen Anlage an den Betriebsgrenzen

4.5 Petrochemische Anlage - Amplitudenabnahme einer Kompressorenanlage

4.6 Emission eines Aluminiumwalzwerkes an der Betriebsgrenze

4.7 Emission verschiedener Pressen im Nahfeld

4.7a Emission einer großen Spindelpresse als Funktion der Preßkraft

4.8 Emission verschiedener Webmaschinen im Nahfeld

4.9 Amplitudenabnahme von Websaalerschütterungen als Funktion von Hallenbodenstärke und E - Modul des Bodens

4.10 Vergleich gerechneter und gemessener Webmaschinenemissionen

4.11 Amplitudenabnahme für Websaal mit abgefederten Projektil - Webmaschinen

4.12 Amplitudenabnahme verschiedener Webmaschinengruppen

4.13 Emission einer Differenzwegpresse im Nahbereich

4.14 Beispiel einer zusammengesetzten und richtungsabhängigen Emission (Schrottschere)

4.15 Emission von Hammeranlagen als Funktion der Schlagenergie

4.16 Berechnete Emission für Hämmer auf Schwingfundamenten

4.17 Emission von Schmieden als Funktion des Gesamtarbeitsvermögens und des Abstandes

4.18 Energieabstrahlung beim schlagenden Rammen

4.19 Amplitudenabnahme für verschiedene Ramm - und Rüttelvorgänge

4.20 Emission nicht-explosiver Baustellenerschütterungen

4.21 Emission und Amplitudenabnahme bei Abbruchsprengungen

4.22 Emission und Amplitudenabnahme bei Unterwassersprengungen

4.23 Emission und Amplitudenabnahme bei sprengtechnischem Stollenvortrieb

4.24 Emission und Amplitudenabnahme für Tunnelfräsmaschinen

4.25 Emission und Amplitudenabnahme für Baugrubensprengungen

5.1 Frequenzabnahme im Nahbereich von Sprengungen

5.2 Abstands-Lademengen-Beziehungen für Sprengerschütterungen des Katasters Norddeutschland

5.3 Häufigkeitsverteilung der Erschütterungszahl und Abstands - Lademengen - Diagramm einer bestimmten Unterschreitenswahrscheinlichkeit

5.4 Regressionsgerade und Vertrauensbereiche für Gebirge in NRW (a) und Einfluß der Gebirgsart(b)

5.5 Frequenzabhängigkeit von Sprengerschütterungen bei unterschiedlicher Lademenge

5.6 Beispiel für frequenzanalytisch aufbereitetes Seismogramm

6.1 Seismische Wellen - Formen, Ausbreitungsgeschwindigkeiten, Eindringtiefe

6.2 Amplitudenabnahme aufgrund der geometrischen Ausbreitung

6.3 Geometrische Abnahme einiger physikalischer Beispiele

6.4 Amplituden - Abnahme, Meßwerte bei oberflächennaher Anregung

6.5 Regressionskurven geometrischer Ausbreitung und gemessene Beispiele

6.6 Vergleich von geometrischer Amplitudenabnahme und Absorption

6.7 Kritisch refraktierte Welle (Kopfwelle)

6.8 Relative Abnahme der Verschiebungsamplitude $u_{h,v}$ mit der Entfernung R in der elastischen Schicht

6.9 Amplitudenreduktionsfaktor von massiven Einbauten im R - Wellenfeld

6.10 Nebenbedingungen für Amplituden - Abnahmegesetze einfacher Emissionsspektren

6.11 Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten und Dämpfungskonstanten

6.12 Amplitudenabnahme einzelner Frequenzanteile und des quadratischen Mittelwertes be breitbandiger Erregung

6.13 Amplitudenabnahme für Spitzen- und Effektivwerte - (Beispiel Autobahnverkehr)

6.14 Überschreitungshäufigkeit der Schwinggeschwindigkeit in verschiedenen Abständen zur Quelle

6.15 Amplituden - Abnahme für Überschreitungsfraktile verschiedener Erschütterungsquellen.

7.1 Zeitverlauf der Fundamentantworten auf dem Halbraum und auf der Schicht infolge einer Impulserregung

7.2 Lehrsche Dämpfungsmaße des Systems Fundament-Baugrund (a) und Amplitudengäng verschiedener Gründungsarten (b)

7.3 Fundamenteinbettung und Dämpfung

7.4 Gebäudeantwort bei breitbandiger, externer Erregung -a)Tiefpaßfilterung durch das Fundament, b) Verstärkung durch Geschoßdecken

7.5 Erschütterungsreduktion durch Wechselwirkung Baugrund - Gebäudefundament

8.1 Eigenfrequenzen von Decken in Abhängikeit von Form und Auflagerung

8.2 Abhängikeit der Decken-Resonanzüberhöhung vom Verhältnis f_B / f_D

8.3 Deckenschwingungen infolge Impulserregung a)Bestimmung der Resonanzfrequenzen b) Position und max. Schnelle für Moden unter 40 Hz des empfindlichsten Plattenpunktes

8.4 Übertragungsfunktion Rohdecke zu Computer - Zwischenboden

8.5 Antwort-Spektrum-Methode
Überhöhungsfaktor Gebäudeantwort auf Freifelderregung durch Sprengungen (a) und Änderung mit dem Abstand (b)

8.6 Antwort-Spektrum-Methode
Einhüllendes Beschleunigungs-Antwortspektrum für Sprengerschütterungseinwirkungen

8.7 Dämmung von Körperschall in Stäben Abbildung fehlt !

8.8 Biegewelleneingangswiederstände von Platten der Dicke h

8.9 Schalldämm-Maß in Abhängikeit des Dickenverhältnisses
a) Querschnittssprung, b) biegesteife Ecken

8.10 Energieaufteilung beim Auftreffen einer Welle auf eine biegesteife Ecke
a) Biegewelle, b) Longitudinalwelle

8.11 Schalldämm-Maß in Abhängigkeit des Dickenverhältnisses
a) Wandkreuz, b)Wandabzweigung

8.12 Schalldämm-Maß einer elastischen Zwischenschicht in Abhängikeit der Frequenz (Beispiel Kork)

8.13 Verlustfaktoren und Längendämpfungen in Abhängigkeit von der Frequenz

8.14 Frequenzgang von Deckenresonanzüberhöhungen und Körperschalldämpfung pro Stockwerk

8.15 Körperschallpegelabnahme pro Stockwerk für verschiedene Bauwerksausführungen

8.16 Grenzfrequenz für Körperschallabstrahlung in Luft

8.17 Schallabstrahlung von Platten a)Abstrahlgrad verschiedener Plattensysteme b)Abstrahlgrad in Abhängikeit von λ_D / λ von kleinen und großen Platten

8.18 Verhältnis von Schallpegel und Beschleunigungspegel des Fußbodens(a), Pegeldifferenz Schalldruck und Schnelle des Fußbodens(b)

Bemerkung : Aus redaktionellen Gründen entfällt Seite 13-62

Verzeichnis der Abkürzungen

BAM	=	Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin
BAST	=	Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
BGR	=	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
BMBau	=	Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
BMFT	=	Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn
BMV	=	Bundesminister für Verkehr, Bonn
CRI	=	Curt-Risch-Institut für Schwingungs- und Meßtechnik, Universität Hannover
DGEB	=	Deutsche Gesellschaft für Erdbeben-Ingenieurwesen und Baudynamik
DGEG	=	Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
DIN	=	Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
IBBC	=	Institut TNO für Bouwmaterialen en Bouwconstructies, Delft, NL
IRL	=	Institut für Raum- und Luftfahrt, Technische Universität Berlin
ISO	=	International Standardisation Organisation
LIS	=	Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen
ORE	=	Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes, Utrecht, NL
TRRL	=	Transport and Road Research Laboratory , Crowthorne, UK
TÜV	=	Technischer Überwachungs-Verein Rheinland e.V., Köln
UBA	=	Umweltbundesamt, Berlin
UMTA	=	Urban Mass Transportation Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC, USA
VDI	=	Verein Technischer Ingenieure, Düsseldorf

1. EINFÜHRUNG

1.1 GESAMTZIEL

Der Schutz gegen Erschütterungen und Körperschall wird parallel zum Luftschall bei zunehmender Bebauungsdichte immer wichtiger. Im Rahmen möglicher Planfeststellungs- bzw. Genehmigungsverfahren sind technische Anlagen und Verkehrswege auch auf ihre Umweltverträglichkeit hin zu überprüfen, wobei der Aspekt der Erschütterungsimmission nicht vernachlässigt werden kann.

Es geht dabei in erster Linie um den Schutz der Wohnbevölkerung in der Nähe der technischen Anlagen. Als Einwirkungen auf den Menschen sind vor allem die unmittelbar wahrzunehmenden tieffrequenten Schwingungen (Erschütterungen) zu betrachten und der aufgrund von höherfrequenten Bauteilschwingungen (Körperschall) abgestrahlte sekundäre Luftschall. Ferner geht es aber auch um die Schwingungseinwirkungen auf Gebäude und empfindliche Anlagen im Hinblick auf Sachschäden und Funktionsstörungen.

Vor diesem Hintergrund ist es von erheblichem Interesse, ausgehend von den Erschütterungsquellen die künftigen Immissionen zu prognostizieren. Denn für anstehende Planungen ist ein hinreichender Erschütterungsschutz bereits im voraus sicherzustellen. In der Regel stehen keine nachträglichen Minderungsmaßnahmen zu Verfügung, oder sind nur mit einem unverhältnismäßig hohem Aufwand zu realisieren.

1.2 FÖRDERPOLITISCHES ZIEL

Das BImSchG [1-4] enthält u.a. auch den Schutz vor Erschütterungen und zwar sowohl aus Gewerbe und Industrie (§3) als auch bei raumbedeutsamen Planungen von Verkehrswegen (§50). Um dieses Rahmengesetz ähnlich wie bei der Luftverunreinigung bzw. beim Lärm mit Handlungsanweisungen in Form einer Allgemeinen Verwaltungsvorschrift auch für die Erschütterungen auszufüllen, ist daran gedacht, eine TA Erschütterung einzuführen.

Mit der vorliegenden Studie zum Stand der Technik soll der gegenwärtige Kenntnisstand zur Erzeugung von Erschütterungen, ihrer Ausbreitung und ihrer Wirkung in Gebäuden

zusammengetragen werden. Es ist eine praxisbezogene Darstellung erforderlich, um auf dieser Basis eine Anleitung zur Durchführung von Erschütterungs-Immissionsprognosen und zur Plausibilitätsprüfung von entsprechenden gutachterlichen Stellungnahmen erarbeiten zu können.

Da der Rahmen der Studie begrenzt ist, wurde vereinbart, den Untersuchungsschwerpunkt auf die Erschütterungen aus Industrie und Gewerbe zu legen und die Baustellen und Steinbrüche mit einzubeziehen.

Im Hinblick auf das Gesamtziel müßten die Verkehrserschütterungen aufgrund der umfangreichen Literatur nachfolgend in einem zweiten Teil genauer ausgewertet werden.

1.3 TECHNISCH - WISSENSCHAFTLICHES ZIEL

Die Aufgabenstellung erfordert eine strikte Eingrenzung der Untersuchung auf die im Umweltschutz relevanten Situationen. Als Erschütterungsquellen kommen praktisch alle Arten technischer Erreger in Frage, die mit größeren dynamischen Wechselkräften auf ihre Umgebung einwirken und in der Nachbarschaft zu spürbaren Effekten führen.

Gegenstand einer Erschütterungsprognose ist demnach der dynamische Vorgang der Erregung einer mechanischen Struktur zu Schwingungen, die daran anschließende Wellenausbreitung im Boden und die resultierende Schwingungsanregung von Empfängerstrukturen. Die vorgegebene Problemstellung geht davon aus, daß Quelle und Empfänger nicht baulich direkt miteinander verbunden sind, d.h. es handelt sich um externe Quellen. Die Durchführung einer Prognose setzt im Grunde das Verständnis dieses komplexen mechanischen Gesamtsystems und seines dynamischen Verhaltens voraus. Es müssen also Kenntnisse bzw. Modellvorstellungen vorhanden sein, mit denen dieses reale System mathematisch abgebildet werden kann, um den darin ablaufenden dynamischen Prozeß zu beschreiben. Dieses umfassende Modell besteht aber z.Zt. noch nicht, so daß das methodische Vorgehen darauf hinausläuft, das Gesamtsystem in entkoppelte Teilstrukturen aufzuteilen, diese zu idealisieren und getrennt zu untersuchen. Voraussetzung dazu ist ein angenähertes lineares Schwingungsverhalten, was in der Regel bei der Größenordnung umweltschutzrelevanter Erschütterungen gegeben ist.

Ein weiteres technisches Ziel besteht darin, die Prognose und den damit verbundenen Aufwand entsprechend der Bedeutung des Planungsfalls anzupassen, d.h. ggfs. in Umfang und Genauigkeit unterschiedliche Methodiken bereitzustellen.

Von der Untersuchung ausgenommen sind:

- natürliche Erschütterungsquellen wie z.B. Wind, Erdbeben, Seegang,
- Ausbreitungswege, die Quelle und Empfänger ausschließlich über bauliche Konstruktionen miteinander verbinden, d.h. interne Quellen, sowie
- Auswerte - und Beurteilungsverfahren .

2. RANDBEDINGUNGEN EINER PROGNOSE

2.1 PHYSIK DES PROGNOSESYSTEMS

o Struktureller Aufbau

Um den derzeitigen Stand der Prognosemöglichkeiten aufzuzeigen, soll das Gesamtsystem weitestgehend in die Substrukturen Emission - Transmission - Immission unterteilt werden. Die Unterteilung ist dabei nicht immer einheitlich. Für theoretische Rechnungen und z.B. Finite - Elemente - Modelle werden die Teilsysteme anders begrenzt als aus praktischer Sicht, wo Aspekte der Zuständigkeit von Verursacher und Schutzbereich mit entsprechenden Eingriffsmöglichkeiten eine wesentliche Rolle spielen. Bild 2.1 zeigt dazu verschiedene Schemata.

Das in der Prognose zu betrachtende physikalisch-technische Gesamtsystem gliedert sich prinzipiell in folgende Teilbereiche:

a) Quelle oder Emissionsstruktur

Von Interesse sind - wie in Bild 2.2 veranschaulicht - industrielle und maschinenerregte Erschütterungen (E_2), Verkehrserschütterungen ober- und unterirdisch (E_1, E_3) sowie Sprengerschütterungen (E_4). Systemparameter sind: Betriebsweise und Anregungsart der Quelle (harmonisch, stoßartig, stochastisch), Form und Lage der Quelle (Punkt oder Linie, auf der Oberfläche oder im Untergrund), Zahl der überlagerten Einzelquellen bzw. Zusammensetzung größerer Emissionsstrukturen.

b) Übertragungsweg oder Transmission

Von Interesse sind hier relativ dünne Bodenschichten, die bei Steinbruchsprengungen eine Mächtigkeit von etwa 100 m erreichen können.

Systemparameter sind: geologisch-petrographischer Aufbau, bodenmechanische Kennwerte wie elastische Konstanten, Strukturmerkmale wie Druck, Porosität, Wassergehalt usw.

c) Empfänger oder Immissionsstruktur

Von Interesse sind hier Bauwerke zum Aufenthalt von Menschen oder andere Ingenieurbauten.

Systemparameter sind: Form und Konstruktion, d.h. Steifigkeit und Massenverteilung des Gebäudes, Bauausführung und -zustand.

d) Koppelung zwischen Teilsystemen

Gemeint sind die Wechselwirkungsbereiche zwischen den Fundamenten der Emissions- und Immissionsstruktur einerseits und dem ungestörten Untergrund andererseits. Systemparameter sind: Gründungsart, elastische Vorspannungen und Pressung, bodenmechanische Kennwerte und Schichtdicke des Baugrundes.

o Ausbreitungsvorgang

Wird nun dem System eine Erregung $E_k(f,t)$ frequenz- und zeitabhängig aufgeprägt, so kann die Zustandsänderung in Energie und Phase prinzipiell durch verschiedene Arten elastischer Wellen bis zum Empfänger übertragen werden. Als Raumwellen können Kompressionswellen sowie Scherungswellen vertikaler und horizontaler Schwingungsrichtung auftreten. Als Oberflächenwellen, die mit zunehmender Tiefe rasch abklingen, sind Rayleigh - und Love - Wellen als komplizierte Scherwellen denkbar. Je nach Systemanordnung kann sich die Emission $E_k(f,t)$ auf unterschiedlichen Wegen ausbreiten bis der Empfänger mit der Antwort $I(f,t)$ reagiert. Die dabei auftretende zeitliche und frequenzmäßige Änderung des Schwingungssignals beinhaltet den Einfluß der vielfältigen realen Parameter und wird anhand von Übertragungsfunktionen Y_k beschrieben.

Entkoppelt und idealisiert man die Teilbereiche des Gesamtsystems, so ergibt sich die Immission durch die multiplikative Anwendung der in Frage kommenden Übertragungsfunktionen auf die Emission, es gilt :

$$I(f,t) = \prod_k \left(Y(f) \right)_k \cdot E_k(f,t) \qquad (2\text{-}1)$$

2.2 PLANUNGSSITUATIONEN

Die Vorgehensweise bei der Prognose von Erschütterung und Körperschall hängt vom strukturellen Aufbau des Systems ab, d.h. welche Teilsysteme vorhanden sind und auf welche Teile sich die Planung bezieht. Je nach Planungssituation sind unterschiedliche Prognoseschritte gefordert. Eine Übersicht typischer Problemstellungen aus [6-5] gibt die Norm-Vorlage DIN 4150, Teil 1[1-1], wobei davon ausgegangen wird, das reale Übertragungsverhalten zwischen Quelle und Empfänger möglichst weitgehend durch Feldmessungen zu erfassen. Inwieweit theoretische Berechnungen einzubeziehen sind bzw. zur Verfügung stehen wird in den nachfolgenden Kapiteln erörtert.

Eine Übersicht zu den Problemstellungen und zu möglichen Vorgehensweisen bei der Prognose gibt Tabelle 2.1 im Anhang.

2.3 PROGNOSE - KENNGRÖSSEN

Versteht man im Sinne dieser Studie unter "Umwelt" eine Bebauung in der Nachbarschaft von Erschütterungsquellen, so sind drei Fälle der Einwirkung zu unterscheiden:

- o auf Menschen in Gebäuden
- o auf die Gebäude selbst
- o auf Einrichtungen in Gebäuden.

Dafür stehen entsprechende Meßgrößen bzw. Beschreibungsgrößen zur Verfügung, die zu prognostizieren sind:

o Einwirkung auf den Menschen

Maßgeblich ist die physikalische Größe "Schwinggeschwindigkeit" (o.ä.) einer betrachteten mechanischen Struktur am Immissionsort, aus der die KB - bewertete Schwingstärke als Beurteilungsgröße abgeleitet wird. Je nach Meßort werden Gesamtschwingungen eines Gebäudes und/oder spezielle Bauteilschwingungen (insbesondere Geschoßdecken) erfaßt. Die Schwingungsübertragung durch Möbelstücke auf den Menschen ist nicht zu betrachten.

Liegen die mechanischen Schwingungen der Bauteile im hörbaren Frequenzbereich,

dann spricht man von Körperschall, den die Bauteile abstrahlen. Der so erzeugte sekundäre Luftschall wird nach den in der Akustik üblichen Methoden als Schalldruckpegel erfaßt. Für die Prognose ist wieder die Schwinggeschwindigkeit und zusätzlich der Abstrahlungsgrad der Bauteile von Bedeutung.

- Einwirkung auf Gebäude

  Zur Beurteilung von Schäden sind zunächst die dynamischen Bauteil - Beanspruchungen infolge von Dehnungen bzw. Spannungen wichtig.

  Diese Größen können nun relativ aufwendig direkt gemessen und / oder durch Abbildung der baulichen Anlage in ein mechanisches Ersatzsystem berechnet werden. In der Regel bevorzugt die Praxis eine Vereinfachung, indem die Beanspruchung über die mechanische Bauteilbewegung und die resultierende Trägheitskraft ermittelt wird. Hierzu ist wiederum die Schwinggeschwindigkeit mit dem Maximalwert zu prognostizieren.

- Einwirkung auf empfindliche Einrichtungen in Gebäuden

  Um Geräteschäden und Betriebsstörungen zu vermeiden, sind im Einzelfall Hersteller - und Betreiberspezifikationen einzuhalten. Aber auch in diesen Fällen sind die mechanischen Schwingungen, die auf die zu schützende Anlage übertragen werden, maßgeblich. Neben der vorherzubestimmenden Schwingamplituden kommt auch dem Frequenzverlauf eine größeren Bedeutung zu, da die Herstellergrenzwerte häufig frequenzabhängig angegeben werden und im tieffrequenten Bereich den Schwingweg und im höherfrequenten Bereich die Schwingbeschleunigung als Bezugsgröße verlangen. In der Regel sind Nachweise in der Aufstellungsfläche zu führen, so daß das Übertragungsverhalten spezieller Konstruktionen - analog zum Mobilar bei der Einwirkung auf den Menschen - von der Prognose ausgeschlossen ist.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß trotz unterschiedlicher Immissions-Bewertungsgrößen im Prinzip eine herausragenden Beschreibungsgröße, nämlich der zeitliche Verlauf der Schwinggeschwindigkeit v (t) (o.ä.) zu prognostizieren ist. Dabei ist zu berücksichtigen, daß

- als Bezugsort unterschiedliche mechanische Bauteile der Immissionsstruktur in Frage kommen
- zeitliche Bewertungen des Erschütterungssignals v(t) vorzunehmen sind (u.a. Maximalwert)

- Frequenzanalysen des Erschütterungssignals v(t) erforderlich sind.

Bereits an dieser Stelle sei bemerkt, daß die Ermittlung eines Schwingungszeitverlaufs auf zwei Wegen möglich ist:

- Die direkte Lösung im Zeitbereich (Time-History-Methode) wird bevorzugt bei transienten nichtlinearen Vorgängen eingesetzt (u.a. Erdbeben-Ingenieurwesen) und erfordert einen sehr hohen rechnerischen Aufwand.

- Übertragung des Problems mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich, Lösung im Frequenzbereich und Rücktransformation in den Zeitbereich. Diese Untersuchung im Frequenzbereich wird vor allem für lineare Probleme verwendet und man verzichtet dann auf die Rücktransformation. Belastungsfunktionen sowie Ausbreitungseinflüsse im Sinne von Filtern und resultierende Systemantworten sind spektral darzustellen (Response-Spectra-Methode). Es gehen zwar Zeitinformationen verloren, doch diese Methode ist weniger aufwendig.

Die Literaturauswertung wird zeigen, ob diese Methoden zur Prognose im Umweltschutz eingesetzt werden können oder einfachere Verfahren hinreichend genau eine Immissionsprognose ermöglichen.

3. LITERATUR - BESCHAFFUNG UND DOKUMENTATION

3.1 MÖGLICHE QUELLEN

Informationen können dem Thema aus mehreren, verschiedenen Kanälen zufließen.

- o Lehrbücher und wissenschaftliche Literatur

  (allgemeine Grundlagen, sehr selten für unsere Fragestellungen praktische Schlußfolgerungen, bzw. theoretische Arbeiten mit Bezug zu mathematischen Modellen, im günstigen Fall Parameterstudien von idealisierten, realen Systemen technisch komplexer Konstruktionen)

- o FE-Berichte, Monographien, Institutsberichte

  (angewandte Untersuchungen, z.T. sehr nützlich und in der Regel einen aktuellen Stand der Technik wiedergebend)

- o Meßberichte und Gutachten

  (sehr praxisbezogen und für unsere Aufgabe wichtige Erfahrungen wiedergebend, z.T. brauchbar wenn Fall repräsentativ und Dokumentation einwandfrei; z.T. aber auch zu speziell vom Detail abhängend und / oder in nicht nachvollziehbarer Darstellung)

- o Technische Publikationen

  (obwohl nach Schlagworten dem Thema zuzuordnen, wird überwiegend nur auf den einfachen, bekannten Kenntnisstand verwiesen und in der jeweiligen technischen Anwendung nicht herausgearbeitet; z.T. sind spezielle Daten für einen Fundus nutzbar zu machen).

Es bietet sich also eine Fülle von Informationsquellen zur Sichtung an, die sehr unterschiedlich sind in der Qualität, in der Darstellungsweise und in der Zielrichtung der erarbeiteten Ergebnisse.

Bei diesem heterogenen Erscheinungsbild kann im Rahmen der zur Zeit beauftragten Studie weder eine Harmonisierung der Nomenklatur durchgeführt werden, noch ist eine Prüfung auf Plausibilität und Richtigkeit der Ergebnisse möglich.

3.2 DATENBANKRECHERCHE

Anhand themenbezogener Deskriptoren, die wegen der internationalen Anzapfung von Datenbanken einem "Thesaurus of Engineering and Scientific Terms" entnommen waren, wurde zunächst eine erste Suche in verschiedenen Datenbanken gestartet. Danach fand eine zweite und dritte Suche entweder mit breiter gefaßten Begriffen oder mit verschiedenen Begriffskombinationen statt. Für die umfangreichen Ergebnisse wurden zunächst Titellisten ausgedruckt (ca. 1700 Titel), nach denen für zutreffende Zitate vollständige Dokumente (ca. 200 Abstracts) abgerufen wurden. Die Durcharbeitung dieser Kurzfassungen machte die Doppelnennungen kenntlich und ermöglichte die Beschaffung der interessierenden Artikel (ca. 100) im vollständigen Wortlaut.

Die Recherche stützt sich auf die nachfolgenden Quellen.

a) Suche durch TÜV Rheinland e.V. in folgenden Datenbanken

- o RSWB

  (Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen, Bauwesen)

  Die Datenbank RSWB wird vom Informationszentrum Raum und Bau (IRB, Stuttgart) der Fraunhofer Gesellschaft erstellt. Sie enthält Literaturhinweise aus Zeitschriften, Monographien, unkonventioneller Literatur und Normen.

- o ICONDA

  (International Construction Database)

  Die Datenbank ICONDA wird vom Informationszentrum Raum und Bau der Fraunhofer Gesellschaft (IRB, Stuttgart) in englischer Sprache erstellt. Sie enthält Literaturhinweise aus internationalen Zeitschriften, Serien, Büchern, Konferenz- und Forschungsberichten und Grauer Literatur.

- o COMPENDEX

  (Computerized Engineering Index)

  Die Datenbank COMPENDEX wird von Engineering Information, Inc. (New York, N.Y./USA) in englischer Sprache erstellt. Sie enthält Literaturhinweise aus internationalen Fachzeitschriften, Konferenzberichten, Quellen aus der Ingenieurliteratur, Büchern und Berichten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens.

- o NTIS

  (National Technical Information Service)

  Die multidisziplinäre Datenbank NTIS wird vom National Technical Information Service (NTIS; Springfield, VA/USA) in englischer Sprache erstellt. Sie enthält Literaturhinweise aus Forschungs- und Entwicklungsberichten der US-Regierung, aus zur Lizenz zur Verfügung stehenden Patenten sowie aus Datenbasen.

- o PHYS

  (Physikalische Berichte)

  Die Datenbank PHYS wird vom Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik (FIZ Energie, Karlsruhe) in englischer Sprache erstellt. Sie enthält Literaturhinweise aus internationalen Fachzeitschriften, Serien, Büchern, Konferenzbeiträgen, Berichten und anderer nichtkonventioneller Literatur auf dem Gebiet der Physik.

b) Suche in vorhandenen Titellisten von Recherchen anderer Stellen

- o LIS

  Recherche der Landesanstalt für Immissionsschutz NW (LIS) - mit Informationen zum Umweltschutz :

i)	ab 1980:	Erschütterungen, Schwingungen - Quellen, Minderung, Ausbreitung
ii)	Gesamtzeitraum:	Prognose von Erschütterungs - und Körperschallimmissionen

- o COMPENDEX PLUS

  (siehe COMPENDEX)

  Recherche unabhängig von TÜV Rheinland e.V. in den Niederlanden durchgeführt von Ing.- Büro Cauberg - Huygen für "Foundation for Building Research (SBR)" in Rotterdam

3.3 QUANTITATIVES ERGEBNIS

Häufig besteht trotz vielverspechender Schlagwörter kein Bezug zum Thema "Erschütterungsprognose und die praktische Umsetzung". Nur etwa 12% der in den Datenbanken ermittelten Titel (z.T. Doppelbenennungen) gaben Veranlassung die jeweilige Kurzfassung zu prüfen und nur von 5% erschien die Anschaffung des Artikels im Wortlaut sinnvoll. Nach dem Studium dieser Artikel konnten aus etwa einem Drittel der Arbeiten nicht redundante Informationen, die allerdings überwiegend auf spezielle Anwendungen bezogen sind, zum Thema entnommen werden (ca. 40). Aus dem Fundus des Auftragnehmers lassen sich etwa 20 Arbeiten beisteuern, fremde und eigene, wobei aus der Vielzahl der vorhandenen TÜV-Gutachten - es wurden ca. 40 Berichte aufbereitet - im vorgegebenen Rahmen neutralisierte Ergebnisse und das methodische Vorgehen verwendet werden. Regelwerke sind noch gesondert hinzuzufügen.

Insgesamt können also aus etwa 40 TÜV - Gutachten Meßdaten und aus ca. 60 Literaturstellen Informationen zum Thema gewonnen werden. Darunter sind nur sehr wenige Arbeiten, die einen methodischen Überblick in einem bestimmten Anwendungsbereich geben (z.B. Webereien: CRI, Gewinnungssprengungen: BGR).

Es wurde keine Untersuchung gefunden, die das Thema der Erschütterungsprognose mit Handlungsanweisungen für eine Verwaltungsvorschrift in Verbindung bringt. Und es fällt auf, daß vor allem der Bereich "Industrie und Gewerbe" nicht in einer geschlossenen Untersuchung behandelt wird.

Es ist noch festzuhalten, daß die Literaturrecherche Lücken aufweist, die durch vertiefte Nachforschungen weitgehend geschlossen werden müßten, und zwar in den Bereichen

- o Internationale Konferenzberichte und FE - Vorhaben
- o Verbandsforschung Gewerbe und Industrie
- o Monographien von Fachverbänden und Gesellschaften
- o Berichte von Fachinstituten und Ingenieurbüros
- o Weitere Gutachten und noch nicht analysierte Meßdaten des TÜV.

4. EMISSION ODER ERSCHÜTTERUNGSQUELLEN

4.1 BRANCHENÜBERSICHT UND TYPISCHE EMITTENTEN

Zunächst sind aus der gesamten Wirtschaft die Branchen zu benennen, die als Erschütterungserzeuger prinzipiell in Frage kommen:

Primärsektor

Energie und Wasserversorgung

- Elektrizitätserzeugung
- Gaserzeugung

Bergbau

- Steinkohle/Braunkohle
- Erzbergbau
- Kali und Steinsalzbergbau

Sekundärsektor

Verarbeitendes Gewerbe - Grundstoff- und Produktionsgüter

- Chemische Industrie
- Mineralölverarbeitung
- Gewinnung von Steinen und Erden (Steinbrüche)
- Eisenschaffende Industrie (Schmieden)
- Ziehereien, Kaltwalzwerke, Stahlverformung
- Holzbearbeitung (Sägewerke)

Verarbeitendes Gewerbe - Investitionsgüter

- Stahl und Leichtmetallbau
- Maschinen und Anlagenbau
- Eisen-, Blech- und Metallverarbeitung

Verarbeitendes Gewerbe - Verbrauchsgüter

- Druckereien
- Textilindustrie

Baugewerbe

- Tiefbau
- Spezialbau (Abbruch, Sprengungen)

Tertiärsektor

Verkehr

- Eisenbahnen
- Straßenverkehr (Kfz, Straßenbahn, U-Bahn usw.)

Die für den Immissionsschutz wichtigsten Erschütterungsquellen sind in Tabelle 4.1 im Anhang schematisch zusammengestellt.

Im Bereich 'Industrie und Gewerbe' sind es überwiegend Maschinen, einzeln oder kombiniert zu größeren Produktionseinheiten, sowie flächige technische Anlagen, die dynamische Kräfte in die Umgebung emittieren und zwar in der Regel über Fundamente, auf denen die Maschinen gegründet sind. Ein Fundament kann z.B. ein Stahlrahmen, ein starrer Betonblock, ein biegeweicher Hallenboden sein, auf die Erdoberfläche aufgelegt, in den Baugrund eingebettet oder auch besonders elastisch gelagert.

Eine Sonderstellung nimmt die Branche "Steine und Erden, Bergbau" ein. Hier sind es Sprengungen, die zur Rohstoffgewinnung entweder in unterirdischen Stollen oder in offenen Steinbrüchen abgetan werden. Die gewollt freigesetzten dynamischen Kräfte werden unmittelbar im umgebenden Gestein wirksam, wobei sich die gesamte Sprengenergie in mehrere Prozesse aufteilt.

In der Bauindustrie, vor allem im Tiefbau, sind als überwiegende Erschütterungsquellen die schlagenden und vibrierenden Erdbauverfahren zu nennen. Die Arbeitsprozesse Bohren, Rammen und Verdichten sind darauf ausgelegt, die dynamischen Kräfte möglichst effektiv und direkt zur Überwindung des Bodenwiderstandes einzusetzen. Abbruchsprengungen und Materialtransport per LKW können eine gewisse Rolle spielen.

Eine völlig andere, für den Immissionsschutz relevante Erschütterungsquelle stellen Verkehrswege dar. Der öffentliche Nahverkehr und der Fernverkehr, sei es auf der Straße oder spurgebunden in einem Schienennetz, erzeugt Schwingungen, die über die Fahrbahn bzw. den Gleisoberbau in den Boden eingeleitet werden. Bei unterirdischer oder aufgeständerter Trassenführung werden zuvor noch Tunnel - oder Brückenkonstruktionen dynamisch angeregt.

4.2 MERKMALE DER EMISSION

Der im BImSchG[1-4] aufgeführte Begriff "Erschütterungsemission" soll die Schwingungsenergie beschreiben, die von einer Erschütterungsquelle an die Umgebung abgegeben wird. Um Erschütterungsquellen zu charakterisieren und evtl. einer Berechnung zugänglich zu machen, sind physikalische und technische Merkmale aufzuzeigen.

4.2.1 Typ der Erregung

Bei den hier zu betrachtenden technisch erregten Erschütterungen spielen die erzwungenen Schwingungen eine wesentliche Rolle. Sie werden in determinierte und stochastische Schwingungen unterteilt. Von Bedeutung ist, daß die determinierten Schwingungen explizit mathematisch beschreibbar und damit auch reproduzierbar sind. Stochastische zufällige Schwingungen sind für keinen Zeitpunkt mathematisch vorhersagbar, sondern nur mittels statistischer Größen wie z.B. zeitlicher Mittelwerte zu charakterisieren.

Versetzen äußere Kräfte ein System in Schwingungen, ohne daß das System die Kräfte beeinflußt, so spricht man von erzwungenen Schwingungen (Beispiel: Kraftanregung eines Fundaments infolge einer rotierenden Unwucht).

Wirken Parameter des erregten Systems auf die äußeren Kräfte zurück, dann spricht man von parametererregten Schwingungen (Beispiel: Wirkung des Gleisoberbaus auf die dynamische Erregung eines Zuges während der Überfahrt).

In Betrachtung kommen neben den erzwungenen Schwingungen auch die freien Schwingungen, wenn ein System nach transienten oder stoßartigen Krafteinwirkungen ausschwingt und dieser Vorgang nur noch vom Anfangszustand und den Eigenschaften des Systems abhängt (Beispiel: Sprengung, Ramme).

Die mathematische Darstellung dieser verschiedenen Schwingungsarten ist in den Lehrbüchern zu finden.

4.2.2 Dauer der Erregung

Man unterscheidet zwischen länger einwirkenden, stationären Erschütterungen und kurzzeitigen, transienten Vorgängen. Falls zwischen den jeweiligen Einwirkungszeiten Pausen auftreten, spricht man von unterbrochenen oder wiederholt auftretenden Erschütterungen.

In der Richtlinie ISO/DIS 4866 [1-5] wird folgende Unterteilung gewählt:

- kontinuierliche Schwingung $T>5\,\tau_r$
- transiente Schwingung $T<5\,\tau_r$
- unterbrochene Schwingung $T\sim5\,\tau_r$

Die Zeitdauer T einer dynamischen Erregung wird also mit einem Zeitfaktor τ_r der Eigenschwingung des Systems ins Verhältnis gebracht, mit $\tau_r=1/[2\pi f_r \xi_r]$, f_r als die r-te Eigenfrequenz des angeregten Systems (z.B. ein Gebäude) und ξ_r als die dazugehörige Dämpfungszahl.

Eine genaue und allgemein gültige Unterscheidung gibt es nicht. Letztlich ist jede stationäre Schwingungseinwirkung begrenzt, und andererseits kann man bei einer transienten Erregung (Beispiel: Zugvorbeifahrt) Zeitausschnitte als annähernd stationär betrachten.

4.2.3 Stärke der Erregung

Die Stärke von Erschütterungsquellen richtet sich nach den unterschiedlichsten Größen wie Art der Quelle, Arbeitsprozess, Material, Lademenge, Fahrzeuggeschwindigkeit usw. und ist unmöglich einheitlich zu charakterisieren. Primär sind die in die Umgebung eingetragenen dynamischen Kräfte maßgeblich und damit verknüpft die der praktischen Erfassung besser zugänglichen Bewegungen oder Schwinggeschwindigkeiten im umgebenden Boden.

Generell kann man sagen, daß die Stärke der Emission wesentlich abhängt von

- den Schwingungseigenschaften des Erregers (Maschine, Fahrzeug) bzw. von der eingesetzten Sprengstoffmenge (Sprengung)
- der Größe der in den Baugrund eingeleiteten Schwingungsenergie, d.h. dem zur elastischen Verformung beitragenden Anteil,
- den Eigenschaften des Baugrundes.

Überlagern sich n gleichartige unkorrelierte Erschütterungsquellen so darf man näherungsweise

davon ausgehen, daß die Gesamtamplitude mit $\sqrt{n}$ zunimmt. Dies wurde sowohl meßtechnisch z.B. in [6-3] für Schmiedehämmer und Pressen, als auch theoretisch für Züge als stochastische Streckenlasten in [6-13] ermittelt.

4.2.4 Frequenz der Erregung

Hierzu kann ebenfalls keine einheitliche Charakterisierung der Erschütterungsquellen vorgenommen werden. Die erzeugten Frequenzen hängen vom Zeitverlauf der dynamischen Kräfte ab. Rotierende Unwuchten erzeugen z.B. harmonisch veränderliche Fliehkräfte und damit vor allem eine der Drehzahl entsprechende Frequenz. Maschinen mit zyklisch bewegten inneren Massen erzeugen Trägheitskräfte mit einem komplizierten Linienspektrum. Stoßartige und transiente Kräfte erzeugen breitbandige Frequenzspektren, die oft einen dominierenden Bereich enthalten usw.

4.2.5 Struktur der Erregung

Hierzu sollen zwei Merkmale eingeordnet werden

- die äußere Struktur mit Geometrie und Lage der Quelle sowie
- die innere Struktur mit einer Überlagerung mehrerer Erreger.

Die geometrische Ausdehnung von Erschütterungsquellen kann als punktförmig (Maschinen mit starrem Einzelfundament, Ramme u.ä.), als linienförmig (Verkehrsweg) und als flächenhaft (großes Fundament, Hallenboden mit vielen Maschinen) beschrieben werden. Diese Quellengeometrie beeinflußt die weitere Ausbreitung der Erschütterungen.

Die Lage von Erschütterungsquellen - ebenerdig oder unterirdisch, direkt oder über ein Ingenieurbauwerk (Fundament, Tunnel, Brücke u.ä.) auf den Boden wirkend, ist mitbestimmend für die in die Umgebung eingeleitete Schwingungsenergie.

Die Überlagerung mehrerer Erreger ist bereits in einer einzelnen, verschiedene Arbeitsprozesse umfassenden Quelle möglich, wobei die Teilerregungen mit unterschiedlichen Zeitverläufen, Frequenzen und Richtungswirkungen eine komplexe resultierende Emission ergeben können.

In größeren Industrieanlagen mit mehreren gleichen oder unterschiedlichen Quellen summieren sich nicht nur die Erregungen, sondern es sind auch Interferenz - und Abschirmeffekte innerhalb der Gesamtfläche möglich [6-3].

4.3 ERMITTLUNG DER EMISSION

Es gibt keine spezielle Methodik, die die Erschütterungsquellen im Hinblick auf ihr Emissionsverhalten beschreibt, bzw. die Abstrahlung der Energie in die Umgebung zum alleinigen Ziel hätte.

Je nachdem welche technische Daten von der Quelle zur Verfügung stehen, wie weit die Planung bzw. die Inbetriebnahme gediehen ist, wird man entweder theoretische Abschätzungen (Abschnitt 4.3.1) und / oder Schwingungsmessungen (Abschnitt 4.3.2) durchführen müssen, um die Emission zu ermitteln.

Eine weitere einfache Methode besteht im Rückgriff auf einen evtl. vorhandenen Datenfundus zur Beschreibung identischer oder vergleichbarer Quellen. Das Problem hierbei ist nur, bei den vielen Einflußgrößen, die die Emission bestimmen, die Vergleichbarkeit sicherzustellen. Entsprechende Daten aus der Literaturrecherche und aus eigenen Untersuchungen werden in Abschnitt 4.4 aus dem Bereich Industrie und Gewerbe, in Abschnitt 4.5 von Baustellen und in Abschnitt 5 von Gewinnungssprengungen zusammengestellt. Häufig findet man Emission und Ausbreitung gekoppelt dargestellt,

Die Ergebnisse der TÜV-Gutachten werden aus Datenschutzgründen neutralisiert und die Titel im Literaturverzeichnis entsprechend modifiziert wiedergegeben.

4.3.1 Theoretische Abschätzungen

Die konstruktive Auslegung technischer Erreger (Maschinen, Fahrzeuge) wird mit bewährten Mitteln in der Regel getrennt von der Auslegung der Gründungen (Fundament, Fahrweg) durchgeführt. Diese isolierte Behandlung von Erreger und Standort muß aber im Hinblick auf Störungen der Umwelt in eine Betrachtung des Gesamtsystems Erreger - Gründung - Baugrund aufgehen. Insbesondere gilt dies für große Anlagen ohne ausreichende Eigensteifigkeit und für Maschinen und Fahrzeuge, deren Arbeitsweise durch einen hohen Energieeinsatz gekennzeichnet ist, bei denen also das dynamische Verhalten in den Vordergrund rückt.

Zur Bestimmung der Schwingungsvorgänge von komplizierten technischen Strukturen wie Maschinen, Fahrzeuge und Bauwerke ist die Modellbildung der Systeme sowie der Aufbau und die Lösung von Bewegungsgleichungen erforderlich. Hier sind die Methoden aus vielen Ingenieurdisziplinen anzuwenden, die in kompetenten Lehrbüchern und Veröffentlichungen

dargestellt sind. Daß hierauf nicht näher eingegangen werden kann versteht sich von selbst. Lediglich stellvertretend ist auf einige Bücher hinzuweisen, die erst in jüngster Zeit erschienen sind und einen aktuellen Wissensstand präsentieren werden: Maschinendynamik [2-5], Strukturdynamik [2-1], Baudynamik [2-2], Bodendynamik [2-4,8], Computerprogramme zur Schwingungsberechnung [2-3] und Technische Schwingungslehre [2-6].

Die mathematische Modellierung wird normalerweise als diskretes Ein- oder Mehrkörpersystem vorgenommen. Bei komplizierteren Systemen "Erreger - Gründung - Baugrund" (z.B. Turbine auf schwingendem Fundament, Kfz auf welliger Straße) kommen sehr schnell viele Freiheitsgrade ins Spiel, so daß der Einsatz von Rechnern unumgänglich ist. Solange aber nur starre Körper mit Federn und Dämpfern verwendet werden entsteht ein Satz von linearen zeitinvarianten Differentialgleichungen 2. Ordnung. Linear wird das Gleichungssystem deshalb, weil man sich auf die Betrachtung kleiner Schwingungen beschränken kann. Zeitinvariant sind die Bewegungsgleichungen, weil Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitseigenschaften sich im zeitlichen Verlauf nicht ändern. Zeitabhängig sind dagegen die äußere Kräfte und die resultierenden Bewegungen.

Um das zeitliche Verhalten der dynamischen Erregungen oder Emission zu beschreiben, wird man die Bewegungsgleichungen im Zeitraum darstellen. Die Lösungen enthalten dann alle Informationen. Will man Aussagen über die Wirkung der Erregung oder Emission in einem System wissen, dessen Frequenzgang man kennt, wird man eine Darstellung im Frequenzraum (z.B. in Form von Spektralfunktionen) wählen.

Unter mathematischen Gesichtspunkten liegt bei periodischen bzw. stationären Schwingungen die algebraische Behandlung im Frequenzraum nahe, wobei zu jeder Erregerfrequenz Amplituden- und Phasenlage ermittelt wird. Interessiert man sich für Systemantworten bei beliebiger transienter Erregung, so empfiehlt sich eine Behandlung im Zeitraum. Den formalen Zusammenhang zwischen den Darstellungen im Zeit- und Frequenzraum über die Fouriertransformation und Laplacetransformation gibt z.B. ein Übersichtsschema in [2-2] oder [8-1]. Bezüglich genauerer Ausführungen muß wieder auf die einschlägigen Fachbücher verwiesen werden.

Neben geschlossenen analytischen Lösungen der Bewegungsgleichungen steht zur Beschreibung komplexer Strukturbewegungen als sogenannte Gebietsmethoden die Methode der Finiten Elemente und der Finiten Differenzen zur Verfügung. Die Gesamtstruktur wird begrenzt und in Elemente zerlegt, für die einzeln die Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrix aufgestellt wird und die durch Gleichgewichtsbedingungen an den Knoten verknüpft werden. Die Massen sind in den Knoten konzentriert. Eine Ausbreitungsdämpfung infolge der Wellenausbreitung wird durch

Anordnung von Dämpfern an den Modellrändern erzielt. Diese Gebietsmethoden sind universell anwendbar, aber auch sehr rechenaufwendig. Es existieren jedoch zahlreiche Rechenprogramme, von denen viele in [2-3] vorgestellt sind und ihre Eignung für Ausbreitungsrechnungen z.B. in [4-36] untersucht wird. Neuerdings verwendet man für komplexe Ausbreitungsprobleme die Randelement-Methode (boundary-element-method), z.B. in [7-4], die zur Problemformulierung nur die Zustandsgrößen des Bereichsrandes heranzieht. Ihr Vorteil liegt in der Möglichkeit, neben endlichen auch unendliche Gebiete korrekt beschreiben zu können und in dem wesentlich geringeren Diskretisierungsaufwand gegenüber dem FE-Verfahren.

Um auf die Anwendung im Rahmen dieser Studie zurückzukommen, ist deutlich hervorzuheben, daß die vorgenannten dynamischen Berechnungen mit einem erheblichen Aufwand und in vielen Fällen nur mit Computerprogrammen zu leisten sind und nicht immer zu abgesicherten bzw. übertragbaren Ergebnissen führen. Für eine Erschütterungsprognose ist deshalb ernsthaft die Verhältnismäßigkeit der einzusetzenden Mittel zu prüfen, wenn nicht bereits aus anderen Gründen Ergebnisse zu dynamischen Beanspruchungen bzw. Bewegungen des Baugrundes vorliegen und genutzt werden können.

Dies bedeutet, daß zur theoretischen Abschätzung der Emission ein möglichst einfaches Modell gewählt wird. Viele technische Systeme sind näherungsweise Schwinger von ein oder zwei Freiheitsgraden bzw. lassen sich darauf zurückführen. Finite-Elemente-Rechnungen werden meistens in einem zweidimensionalen, linear elastischen, homogenen und isotropen Baugrundmodell durchgeführt. Entscheidend ist die Fragestellung in der jeweiligen Immissionsprognose und was man von den schwingenden Systemen wissen möchte. Durch die Modellbildung sollte nicht mehr abgedeckt werden - aber auch nicht weniger - als es die Erfassung der maßgeblichen Erregungen im zu betrachtenden Frequenzbereich erfordert.

Ein Vorteil jeder dynamischen Vorausberechnung besteht in der Möglichkeit, die Einflüsse verschiedener Parameter der Erschütterungsquelle auf die Emission zu untersuchen und in der Planungsphase bereits geeignete Schutzmaßnahmen vorzusehen. Mit tatsächlichen Gegebenheiten eines Problems stimmen die Rechenergebnisse aber nur dann hinreichend genau überein, wenn zutreffende Annahmen zu den dynamischen Kräften und der Struktur der Erregers (Maschine, Fahrzeug usw.) sowie zur Gründung und zum Baugrund (Aufbau, dynamische Kennwerte usw.) gemacht werden können. Eventuell sind dynamische Kräfte und Bauggrundeigenschaften in speziellen Voruntersuchungen meßtechnisch zu ermitteln.

4.3.2 Schwingungsmessungen

Sind Modellrechnungen zu aufwendig oder stehen die erforderlichen Eingangsdaten nicht zur Verfügung, so gibt es eine zweite Möglichkeit zur Emissionsbestimmung, nämlich die Charakterisierung des Erregers anhand von Meßwerten in einem Referenzabstand von der Quelle.

Auf diese Methode muß man Insbesondere bei den Erschütterungsquellen zurückgreifen, die die dynamischen Kräfte unmittelbar im Boden durch eine Explosion (Sprengungen) bzw. Im Baugrund durch den direkt wirkenden Arbeitsprozeß (Rammen ,Rütteln usw.) freisetzen. Diese Fälle sind außerordentlich stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig und in der Regel nicht anhand von Modellrechnungen allgemein beschreibbar.

Es wäre wünschenswert, analog zu Schalleistungsbestimmungen von akustischen Quellen eine Beschreibung der Erschütterungsquellen durch die abgestrahlte Schwingungsenergie auf einer Hüllfläche zu bekommen. Zu dieser Frage ist nachfolgender Wissensstand festzuhalten. Typische technische Erregersysteme sind:

Maschine - Fundament - Baugrund
Fahrzeug - Fahrbahn - Baugrund
Sprengstoff - Sprenganlage - Fels

Die Quelle der dynamischen Kräfte ist demnach nicht von der direkten Umgebung zu trennen, in der sie eine Verschiebung der Bodenteilchen und damit eine Zustandsänderung des Baugrundsystems bezüglich Energie und Phasenlage bewirkt. Vom Ursprung ausgehend pflanzt sich diese Zustandsänderung als Wellenbewegung in die Umgebung fort. An einem festen Raumpunkt entspricht der Durchlauf der Welle einem meßbaren Schwingungsvorgang, wobei das Quadrat der Schwingungsgröße proportional zur Energiedichte der Welle ist. Hier bietet sich also anhand von Schwingungsmessungen im Boden prinzipiell die Möglichkeit, die abgestrahlte elastische Energie einer Erschütterungsquelle zu bestimmen. In der Ausführung gibt es aber große, wenn nicht gar unüberwindliche Probleme. Zunächst ist der Baugrund ja nicht so ohne weiteres für eine Messung überall zugänglich und in welchem Referenzabstand soll man die Schwingungsenergie erfassen? Die relativ einfache Antwort, dort wo ein repräsentatives Maß zu erwarten ist, ist bis heute noch nicht technisch validiert. Der Grund liegt in den äußerst komplizierten physikalischen Vorgängen in der Nähe der Erregung, die noch nicht besonders gut verstanden werden. In Abhängigkeit von der Art der dynamischen Erregung, von der Geometrie der Quelle und von den Eigenschaften des Baugrundes wird die elastische Energie

anhand verschiedenster Wellenarten transportiert, wobei im Nahbereich zusätzlich komplexe Überlagerungseffekte auftreten. Selbst die universell anwendbaren Finite - Element - Modelle sind nicht in der Lage, diese Phänomene zu simulieren, sondern man muß auch bei dieser aufwendigsten Methode auf einfache Ersatzsysteme und einfache Erregungsarten zurückgreifen.

4.3.3 Abgrenzung des Emissionsbereiches - Bezugsabstand

Aus praktischen Erwägungen sollte der Übergang zwischen Nahbereich der Quelle und der freien Wellenausbreitung im Fernfeld durch einen Bezugsabstand R_1 markiert werden können. Die Referenzgröße an dieser Stelle enthält dann alle komplizierten Entstehungs- und Überlagerungseffekte, so daß sich eine Untersuchung des komplexen Nahbereiches der Quelle erübrigen würde. Zum Beispiel dürften bei oberflächennaher Erregung von der Kombination von P-, S- und R- Wellen des Nahfeldes im Fernfeldbereich nur noch die R-Wellen überwiegen.

Bereits in [6-3] wird zum Wissensstand vor 1980 ausgeführt, daß die einheitliche Festlegung eines Bezugsabstandes nicht möglich sein wird, da das Verhältnis Quellengeometrie zur abgestrahlter Wellenlänge - und damit die Erregerart - entscheidend eingeht. Bei zusammengesetzten Quellen könnte es je nach Arbeitsweise und Art der Einleitung der Erregung in den Boden für die Teilerregungen sogar unterschiedliche Bezugsabstände mit Richtcharakteristik geben. Ein erster Hinweis hierzu findet sich in [6-3] durch Erschütterungsmessungen im Bereich einer großen Scherenanlage. Die in älteren Arbeiten erwähnten Bezugsabstände von 1 m bzw. 6.3 m bei Maschinen oder 100 m bei Sprengungen sind willkürliche Festlegungen und haben sich nicht durchgesetzt. In jüngerer Zeit werden theoretische Ausbreitungsrechnungen für einfache Erregungsarten und einfache Ersatzsysteme z.T. unter Einsatz von Finite-Elemente-Modellen durchgeführt. Dabei geht es schwerpunktmäßig um Schienenverkehrserschütterungen bei der BAM [6-13] und um Websaalerschütterungen bei dem CRI [4-3a,3b,3c]. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse zur Charakterisierung der Emission, die zum Teil auch im Norm-Entwurf DIN 4150, Teil 1 [1-1] aufgeführt sind, werden nachfolgend erläutert.

In [6-13] wird die Erregung stark idealisiert als Punktlast und Linienlast angesetzt und sowohl die deterministische als auch die stochastische Überlagerung von Punktlasten untersucht. Die gleichphasige, deterministische Anregung eines starrren Fundamentes der Abmessung a x b (a < b, a = Seite parallel zur Ausbreitungsrichtung), sowie die unkorrelierte und teilkorrelierte, d.h. stochastische Anregung durch über die Strecke L verteilte Punktlasten ergeben eine ebene und eine räumliche Ausbreitungscharakteristik. Die Grenze wird durch den Abstand R_2 ($R_2 > R_1$) festgelegt, und ist in Bild 4.1(a) dargestellt. Mit Bezugsabstand R_1 und Grenze R_2,

jeweils zur Erregermitte festgelegt, sowie λ als maßgeblicher Wellenlänge erhält man die in Tabelle 4.2 aufgeführten Beziehungen für eine Abgrenzung des Emissionsbereiches.

Die vorgenannten theoretischen Ableitungen, die in der Regel von einer harmonischen, vertikalen Erregung des elastischen homogenen Halbraumes an seiner Oberfläche ausgehen, konnten bisher noch nicht meßtechnisch deutlich belegt werden. Selbst für den einfachsten Fall einer idealen Punktquelle schwanken die Angaben des Bezugsabstandes R_1 von λ über λ / 2 [7-1] bis zu λ / 3 nach einem Beitrag von Heckl in [6-16]. Für den Fall der vertikal angreifenden Punktlast im homogenen Vollraum wird in der Seismik z.B. in [2-9] gezeigt, daß die Abstrahlung von Longitudinal - und Scherwellen richtungsabhängig ist und die Ortsabhängigkeit der Verschiebungen ($\sim R^{-n}$) sowohl Fernfeldterme (n = 1) als auch Nahfeldterme (n = 2,3,..) aufweist. Nach Ausführungen in [6-5] ist damit der Fernfeldbereich an der geometrischen Amplitudenabnahme proportional 1/R und an einem Zeitverlauf, der dem der anregenden Kraft gleicht, zu erkennen. Der Nahfeldbereich hat stärkere Abstandsabnahme und einen modifizierten Zeitverlauf gegenüber der Anregungskraft und erstreckt sich über "einige Wellenlängen". Leider sind diese relativ klaren seismischen Verhältnisse einer Punktquelle im Vollraum nicht so ohne weiteres übertragbar auf die begrenzten, heterogenen Systeme, für die in der Regel Erschütterungsprognosen gefordert werden. Allerdings entsprechen die z.B. bei Sprengungen üblichen Sicherheitsabstände immer einigen Wellenlängen, d.h. Messungen finden in diesen Fällen in der Regel im Fernfeld statt.

In [1-1] wird ausgeführt, daß für biegeweiche Fundamente, Platten, Balken und sonstige ausgedehnte Quellen zu den Bezugsabständen R_1 und R_2 noch keine gesicherten Aussagen möglich sind.

In [4-3c] wird bezüglich der Webereierschütterungen deutlich die offene Frage des Bezugsabstandes aufgeworfen und auf noch zu leistende Simulationsrechnungen verwiesen. Eine klare Antwort wird nicht gegeben. Alle FE-Rechnungen zum Websaalboden und seiner Abstrahlung zeigen Abstandskurven, die bei 10 m Entfernung von der "Entfernungs-Nullachse" beginnen. Diese Achse nimmt verschiedene Positionen in einem Websaal mit mehreren Webmaschinenreihen ein [4-3]. Messungen im Außenbereich von Webereien [4-3a] zeigen auch bei großflächiger Anordnung von vielen Webmaschinen eine Amplitudenabnahme, die sich bereits vom Rand des Websaales wie eine Punkt- bzw. Linienquelle ausbildet. Es sei auf Bild 4.11 hingewiesen. Dies bedeutet, daß großflächig angeregte Hallenböden sich nicht wie starre Fundamente verhalten und offensichtlich kein ebener Bereich mit dem Grenzabstand R_2 existiert.

Eine der ganz wenigen Arbeiten, die Fabrikerschütterungen in allgemeiner Systematik betrachten [6-4], geht bei der Formulierung von Amplituden-Abnahmegesetzen ebenfalls davon aus, daß der Grenzübergang von Raumwellen zu Oberflächenwellen unklar ist, und die verschiedenen industriellen Quellen ihre individuelle Emissions-Hüllfläche besitzen. In dieser japanischen Untersuchung werden überwiegend Maschinen, also näherungsweise punktförmige Quellen betrachtet und Bezugsabstände von R_1 = 2m und 5m gewählt.

4.4 EMISSIONEN DURCH INDUSTRIE UND GEWERBE

Zunächst wird die Emission von fünf großflächigen Industrieanlagen (Schema siehe Bild 4.2.) danach Emissionen und Arbeitsvorgänge aus den mittelständischen Betrieben, beschrieben.

4.4.1 Großflächige Industrieanlagen

4.4.1.1 Kraftwerksanlagen

Wesentliche Erschütterungsquellen eines Braunkohlekraftwerks [4-2] sind:

-	Kohlemühlen	7 bis 9 Hz und Harmonische (vertikal)
-	Frischlüfter	12 bis 17 Hz entsprechend Umlauffrequenz
-	Sauglüfter	z.B. 10 Hz und Harmonische
-	Drehkolbenverdichter	13 bis 17 Hz und Harmonische
-	Rauchgassysteme	4.8 bis 6.0 Hz (horizontal)
-	Turbinen und Generatoren	50 und 25 Hz (vertikal)
-	Kohlebahn	5 Hz

In einer Entfernung zu den baulichen Anlagen von einigen hundert Metern führen die vielen Einzelquellen zu einem komplexen Linienspektrum. Für zwei verschiedene Kraftwerke wird die typische spektrale Verteilung der Emission jeweils im Abstand der größten Anlagenausdehnung (d.h. ca. 350m und 700m) in Bild 4.3 dargestellt. Die horizontalen Schwingungskomponenten überwiegen in der Regel, und die Emission kann als stationär eingestuft werden. Die Intensität schwankt jedoch je nach Auslastungsgrad und Zahl der in Betrieb befindlichen Blöcke.

Die Versorgung mit Braunkohle über eine Kohlebahn kann während der Zugvorbeifahrt zu beträchtlichen Emissionserhöhungen führen. Die Amplituden-Abnahme konnte von den

Betriebsgrenzen aus, die ca. 200 - 300m Abstand zu den Gebäuden halten, mit der Formel $v_l = v_1 (R_1 / R_l)^n$, n = 0,7 bis 1,2 je nach Frequenz, angenähert werden. In dem mittleren Exponent n $\approx$ 1 ist dann der Effekt der Absorptionsverluste enthalten. Typische horizontale Schwinggeschwindigkeiten quer zur Längsausdehnung an oberflächennahen Geländemeßpunkten sind:

o Kraftwerk I mit Blockabmessungen ca. 150 m X 340 m

$\hat{v}_x \approx$ 0.001 mm/s in 400 m

$\hat{v}_x \approx$ 0.003 mm/s in 1250 m

Es dominieren die Kohlemühlen mit ca 8 Hz und das Abgassystem mit ca.. 5 Hz.

o Kraftwerk II mit Blockabmessungen ca. 120 m x 680 m

$\hat{v}_x \approx$ 0.01 mm/s in 800 m

Es dominieren 10.5, 12.5 und 16.5 Hz.

o Kohlezüge mit Gesamtladung von ca. 1000 t und 20 bis 40 km/h

$\hat{v}_x \approx$ 0.500 mm/s in 30 m

$\hat{v}_x \approx$ 0.015 mm/s in 480 m

$\hat{v}_x \approx$ 0.005 mm/s in 1800 m

Es dominierte 5 Hz. Die Amplituden - Abnahme folgt der Punktquelle mit n $\approx$ 1, in n ist der bei 5 Hz schwache Absorptionsverlust enthalten.

4.4.1.2 Petrochemische Anlagen

Wesentliche Erschütterungsquellen sind:

- Kolbenverdichter bzw. Kompressorenanlagen
- Pumpen und Lüfter

In einer Entfernung von ca. 300m zu den relevanten Produktionseinheiten [4-1] führt die Summe vieler Einzelquellen ebenfalls zu einem komplexen Linienspektrum, das beispielhaft in Bild 4.4 für die horizontale und vertikale Schwingungsrichtung dargestellt ist. Je nach Standort treten einzelne Frequenzen im Bereich zwischen etwa 3.5 Hz und 18 Hz unterschiedlich stark hervor. Es handelt sich fast immer um Antriebsfrequenzen von Maschinen und deren Harmonische. Als Beispiel einer Amplituden-Abnahme sind in Bild 4.5 die Antriebsschwingungen einer großen Kompressorenstation über eine Entfernung von 500m wiedergegeben. Die Wellenlängen

der Oberflächenwelle mit v_s = 260 m/s liegen zwischen 36 m und 47m. Die Emission ist als stationär harmonisch mit extrem langsamen Schwebungen zu charakterisieren.

Infolge der komplizierten gegenseitigen Beeinflussung parallel betriebener Anlagen und der unterschiedlichen Blickwinkel in einer weiträumigen Verteilung der Quellen, liegt hier der häufig anzutreffende Fall vor, daß keine monotone Abnahmekurve gemessen werden kann. Deshalb ist im Bild die resultierende Schwinggeschwingigkeit dargestellt, die für die 7.15 Hz-Schwingung bei 45 m den Wert v_{res} = 0.14 mm/s hat und die 5.5 Hz-Schwingung davon 30% aufweist. Diese singulären Werte sollen nur eine Vorstellung von der Größenordnung der Emission vermitteln.

4.4.1.3 Aluminium Walzwerk

Wesentliche Erschütterungsquellen sind:

- Walzstraßen
- Schwingförderbänder
- Bearbeitungsmaschinen
- Elektroglüh - und Schmelzöfen

An den Betriebsgrenzen, die zwischen 150m und 200m von den Maschinenhallen [4-4] entfernt sind, stellt man das in Bild 4.6 wiedergegebene breitbandige Frequenzspektrum unterhalb von 30 Hz mit einigen hervortretenden Einzellinien fest. In der Nähe der Elektroöfen überwiegt eindeutig 25Hz. Es handelt sich um eine quasistationäre Kombination von harmonischer und stochastischer Emission. Eine Amplituden - Abnahme mit der Entfernung kann nur andeutungsweise vermittelt werden. In jedem Fall hängt sie richtungsabhängig von der inneren Werksstruktur ab. So unterscheidet sich die resultierende horizontale Schwinggeschwingigkeit an der Werksgrenze etwa um den Faktor 3 d.h. $\hat{v}$ = 0.05 bis 0.16 mm/s. Der letztgenannte Wert nimmt über die nächsten 100 m nur auf $\hat{v}$ = 0.14mm/s ab (n = 0.5), um dann in einem Abstand von 400 m zur Werksgrenze auf $\hat{v}$ = 0.05mm/s zu sinken (n > 1).

In einer größeren Entfernung ist demnach von dem Walzwerk im wesentlichen nur noch eine relativ schwache, horizontale Schwingung mit einer dominierenden Frequenz von 3.5 Hz und abgeschwächt von 5.5 Hz und 7 Hz meßbar. Während aus der Gesamtbewegung benachbarter Gebäude Wahrnehmungsstärken unterhalb der Fühlschwelle von KB = 0,1 resultieren, kann sich die Situation völlig anders darstellen, wenn z.B. am Werksrand eine einzelne, stark emittierende Erschütterungsquelle die vorgenannten Werte an der Werksgrenze um den Faktor 3 bis 4 erhöht und zudem noch stationär mit einer höheren Frequenz (z.B. 16Hz) in der Nachbarschaft

vertikale Geschoßdeckenschwingungen verursacht. Im Resonanzfall wurden Werte von KB > 0,6 nachgewiesen.

4.4.1.4 Pressenwerk zur Dosenfertigung

Die Erschütterungsquellen sind Pressen der unterschiedlichsten Bauart, die jeweils in Produktionsfeldern zusammengestellt sind [4-8]. Maßgeblich für die Stärke der Emission ist die Güte des Massenausgleichs und die Arbeitsfrequenz, die in Grenzen variiert werden kann und etwa bei 5 Hz bis 7 Hz, zum Teil auch darunter liegt. Die Erregung wird durch die Trägheitskräfte der vertikal oder horizontal bewegten Stößelmassen verursacht. Moderne Pressen mit vollständigem Massenausgleich sind als Erschütterungsquellen zu vernachlässigen. Dies gilt aber nur, wenn bei einem Werkzeugwechsel der Massenausgleich auch erhalten bleibt. Das Emissionsspektrum wird von den Arbeitsfrequenzen und der 1. und 2. Harmonischen bestimmt, d.h. es handelt sich um eine Kombination von Einzellinien als stationäre Erregung. Beispiele eines Emissionsspektrums am Fußpunkt einer Stolle - Bruderer - Presse (Fundamentbewegung ≈ 0,5mm, dynamische Kraft = 42 kN) und von 4 Cuppermaschinen gibt Bild 4.7 wieder.

An der Werksgrenze, die etwa 120m Abstand zum Rand der Pressenhalle hat, sind die horizontalen Schwingungen im Frequenzbereich unter 7 Hz dominierend. Die Schwinggeschwindigkeitsamplituden betragen z.B. $\hat{v}_y \approx 0{,}07$ mm/s für 9 gleiche Pressen älterer Bauart. Für ein größeres Pressenwerk, dessen Maschinen nach dem neuesten Stand der Technik mit Schwingungsisolierungen und Massenausgleich versehen sind, lassen sich für einen Abstand von 120 m Schwingungen von ca. $\hat{v} = 0{,}2$ mm/s, d.h. KB-Werten ≈ 0.4 prognostizieren.

4.4.1.5 Webereien

In einer Webmaschine werden infolge der Trägheitsreaktion bewegter Massen periodische Kräfte erzeugt und in den Hallenboden eingebracht. Die Größe der Erregerkräfte wird maßgeblich durch die Maschinenkonstruktion bestimmt, die exzentrisch rotierende und translatorisch bewegte Maschinenteile umfaßt. So spielt z.B. die Nockenscheibengeometrie bei der Steuerung der Weblade eine große Rolle. Die Schwingungsemission der unterschiedlichsten Maschinentypen (z.B. Schützen-, Projektil-, Stangengreifer- und Luftdüsenwebmaschinen) ist demnach sehr verschieden in den dynamischen Kräften und im Frequenzspektrum. Die zu erwartenden Kräfte sind vertikal kleiner als 25 KN und horizontal kleiner als 2 KN. Die größten Kräfte treten meistens bei der 3. bis 7. Harmonischen der Antriebsfrequenz, d.h. unterhalb von 100 Hz auf.

In Webereien kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Webmaschinen in hoher Stückzahl zum Einsatz. Sie werden mit unterschiedlichen Drehzahlen betrieben, so daß die Gesamtemission einer Weberei deutliche Schwebungserscheinungen mit einem fast periodischem Zeitverlauf aufweist. Zur Erfassung der maximalen Erschütterungen sind dementsprechend lange Meßaufzeichnungen durchzuführen.

Die wohl umfassendste Untersuchung der von Webereien ausgehenden Schwingungen wurden vom CRI durchgeführt. Die Erkenntnisse meßtechnischer Untersuchungen an fünf Standorten in Westfalen [4-3a] sowie theoretischer Berechnungen zur Erschütterungsemission und Ausbreitung [4-3b,3c] wurden in einer Anleitung zur Websaal-Bauplanung zusammengefaßt [4-3]. Ausgehend von den dynamischen Erregerkraftspektren werden theoretisch die Einflüsse von Maschinentyp, -zahl und -anordnung, sowie von Hallenbodenaufbau und Eigenschaften des Baugrundes ermittelt und in vielen Graphiken u.a. als Abstandsdiagramme ab 10 m von der Websaalgrenze bis 80 m dargestellt. Als Beispiel sind Zeitverläufe und Spektren verschiedener Webmaschinen in Bild 4.8 vorgestellt. Bild 4.9 zeigt die daraus resultierenden verschiedenen Abnahmekurven und z.B. für einen Maschinentyp den Einfluß der Hallenbodenplatte und des Elastizitätsmoduls des Erdbodens. Eine numerische Übersicht gibt die Tabelle 4.3 im Anhang.

Obwohl es sich um eine mustergültige Parameterstudie mit nicht zu unterschätzendem Wert für die Planung handelt, darf und muß man hier in Übereinstimmung mit dem CRI auf die Eingrenzung hinweisen. Das zweidimensionale Rechenmodell vereinfacht das in Wirklichkeit komplizierte Schwingungsausbreitungsproblem sehr stark, und ein Ergebnisübertrag auf abweichende Situationen ist nicht so ohne weiteres möglich. Es bleiben mehr oder weniger große Unsicherheiten bezüglich der Ergebnisgenauigkeit bestehen [4-3,S.14]. Um dies deutlich zu machen, werden für eine vergleichbare Situation Meßergebnisse des CRI [4-3a] und Rechenergebnisse des CRI in Bild 4.10 einander gegenübergestellt (Stangengreifer - Webmaschine). Die Messungen liefern deutlich größere Emissionen, obwohl bei einer Maschinenreihe der Länge L die Modellrechnung zu große Werte liefern soll, wenn der Abstand zur Quelle R > L/3 ist. Auch ist die in der Realität vorgefundene Ausbreitungsdämpfung geringer als die theoretisch prognostizierte.

Um evtl. einen Hinweis zur Emission von biegeweichen Bodenplatten zu erhalten seien die Ergebnisse von zwei weiteren meßtechnischen Untersuchungen vorgestellt. Das Beispiel aus [4-5] zeigt die Abnahmekurven für Maschinengruppen unterschiedlicher Typen und Positionen im Gesamtbetrieb in Bild 4.12. In beiden Bildern verläuft die Amplitudenabnahme mit der Entfernung mit n zwischen 0,5 und 1,0 (Ansatz $v_i=v_1(R_1/R_i)^n$). Es kann zwar keine Unterscheidung der beteiligten Wellenarten und der Geometrieeffekte vorgenommen werden, doch ein in [6-13]

durch R_2 definierter, ebener Bereich für großflächige Quellen existiert nicht. Biegeweiche Bodenplatten sind also nicht in die Klasse der starren Fundamente einzuordnen.

4.4.2 Mittelständisches Gewerbe - Arbeitsprozesse und Einzelmaschinen

4.4.2.1 Stanzen, Ziehen, Schneiden, Zerkleinern

In diese Maschinengruppe gehören die unterschiedlichsten hydraulichen Pressen und Scherenanlagen, Ziehbänke und elektrisch angetriebene Shredderanlagen. Mit Ausnahme der Shredder ist ihnen allen gemeinsam, daß das Arbeitsvermögen zunächst zu einer elastischen Verformung des geschlossenen Maschinenrahmens eingesetzt wird. Erst der Stanz - und Schneidevorgang oder der Abschluß des Ziehvorgangs führt zu einer schlagartigen Entspannung der Rahmens und damit zu einem Impulsübertrag auf den Baugrund. Die Emission ist also durch einen stoßartigen, transienten Vorgang gekennzeichnen, dessen Frequenz durch das Schwingverhalten des Systems Fundament - Baugrund bestimmt wird. Der Frequenzbereich liegt bei ca. 16 Hz bis 75 Hz. Shredderanlagen emittieren mit der Antriebsfrequenz und deren Harmonische

Da zu diesen Maschinengruppen keine relevanten Veröffentlichungen zu finden sind, sollen einige Einzelbeispiele die Bedeutung für den Immisionsschutz wenigstens grob verdeutlichen [4-9,10,11,12]:

- Ziehbank für nahtlose Rohre (1600 kN), Fundament auf Gummimatte:
  $\hat{v}_z \approx$ 1.6 mm/s in 10m Abstand, ca. 16 Hz

Die Emission einer großen Schmiede-Spindelpresse wird als Funktion der Preßkraft in Bild 4.7a dargestellt und zwar als Freifeldschwingung in 15 m Abstand innerhalb einer Werkshalle [4-57]. Bei der Bearbeitung schwerer Werkstücke wurde gemessen:

- Spindelpresse zum Schmieden (max. 80000kN), Prüffundament beim Hersteller (ohne Isolierung):
  $\hat{v}_z \approx \hat{v}_{xy} \approx$ 1,5 mm/s in 15m Abstand, 10-13Hz.

Daten einiger mittelgroßer Pressen sind:

- Spindelpresse zum Stanzen von NE Material (5000kN), Fundament auf Korkmatte:

$\hat{v}_z \approx 4.3$ mm/s, $\hat{v}_{xy} \approx 2$ mm/s in 4m Abstand, 24-75 Hz
$\hat{v}_z \approx 50$ mm/s, $\hat{v}_{xy} \approx 33$ mm/s auf dem Maschinenfundament

- Differenzwegpresse zur Herstellung von Metalldübeln (2500kN), Fundament auf Gummimatte (Bild 4.13):
  $\hat{v}_z \approx 0.7$ mm/s, $\hat{v}_{xy} \approx 0.2$ mm/s in 25m Abstand, 21-25 Hz

- Groß - Schrottschere (Messer 12.8kN, Preßdeckel 3kN, Vorverdichter 4.5kN), Wannenfundament ohne zusätzliche Isolierung:
  $\hat{v}_y \approx 0.3$ mm/s für Verdichter, 8 - 10 Hz,
  $\hat{v}_y \approx 0.7$ mm/s für Messer, 15 - 20 Hz,

  jeweils im Gelände in ca. 100 m Abstand. In 170 m wurde in einem Wohnhaus KB=0.13 festgestellt.

Obwohl nach [6-3] eine Groß-Schrottschere mit Vorverdichter, Preßdeckel, Niederhalter und Messer eine komplizierte Erschütterungsquelle darstellt (Bild 4.14), kann die Entspannung des Maschinenrahmens konstruktionsbedingt für verschiedene Maschinengrößen mit etwa dem gleichen Federweg von 0,3 bis 0.4 mm angesetzt werden. Eine grobe Schätzung der lotrechten Fundamentschwingungen führt zu 0.07 mm bis 0.09 mm und bei extremer Scherenbelastung zu 0.4 mm. In Übereinstimmung dazu konnte in [4-12] bei Verarbeitung von schwerem Schrott bzw. sehr hartem und evtl. außermittig liegenden Knüppeln gegenüber Normalschrott eine Verstärkung der Emission um den Faktor 3 meßtechnisch nachgewiesen werden.

Zum Zerkleinern von Autokarosserien und Blechschrott werden Shredderanlagen mit Antriebsleistungen zwischen 400 KW und 3000 KW eingesetzt. Verschiedene Untersuchungen [4-22,23,24,25,26] liefern folgende Bodenerschütterungen dieser Quellen:

- Shredderanlage 2940kW mit Schwingungsisolierung:
  $\hat{v}_x = 0.6$ mm/s, $\hat{v}_z = 0.9$ mm/s in 24 m Abstand, ca. 8 Hz

- Shredderanlage 1470KW ohne Isolierung auf Pfählen gegründet:
  $\hat{v}_z = 1.7$ mm/s in 5 m Abstand, ca. 6 - 8 Hz
  $\hat{v}_z = 0.4$ mm/s in 37 m Abstand, ca. 6 - 8 Hz

Bei Shreddern mittlerer Leistung auf schwingungsisolierten Fundamenten wird die Emission nicht mehr unbedingt von den tiefen Drehfrequenzen des Rotors bestimmt, sondern von

Nebenaggregaten, wie Ventilatorantrieb (25Hz) oder Vibrationsförderbänder (16 2/3 Hz), z.B. wurden gemessen:

$\hat{v}_z$ = 0.3 mm/s; in 25 m; mit 16.7 Hz .

Maximale, jedoch selten auftretende Emissionen werden in Shreddern durch Verpuffungen verursacht. Gezielt untersuchte Verpuffungen in [4.22] ergaben Bodenerschütterungen von

$\hat{v}_{xz} \approx$ 2.5 bis 3.5 mm/s; in 32 - 40 m Abstand; 17 - 27 Hz .

Gleichzeitig wurden Luftdruckstöße von 2 bis 5 hPa in ca. 45 m Abstand oberhalb eines Daches gemessen. Diese Stöße verursachten deutlich größere Gebäudeschwingungen als die Bodenerschütterungen.

4.4.2.2 Umformen - Schmiedemaschinen

In Freiform - und Gesenkschmieden, aber auch im metallverarbeitenden Anlagen - und Fahrzeugbau, wird mit Hammeranlagen und Pressen eine große Umformarbeit erbracht. Bezüglich der Erschütterungsemission ist diese äußerst wichtige Maschinengruppe zu unterteilen in

- Schabottehämmer und Gegenschlaghämmer
- Exzenter- bzw. Kurbelpressen, Spindelpressen und hydraulische Pressen.

Während Hämmer und Spindelpressen arbeitsgebunden sind, sind Exzenter- bzw. Kurbelpressen weggebunden und die hydraulichen Pressen kraftgebunden. Dementsprechend unterscheiden sie sich auch im Verhältnis von Nutzarbeit zu Kraft sowie im zeitlichen Ablauf des Umformprozesses, d.h. die Erschütterungsemission steigt je nach Verfahren sehr unterschiedlich mit der Maschinengröße an. In einer Anzahl alter Untersuchungen sind die Arbeitsvorgänge mit dem Verlauf der dynamischen Kräfte genauer behandelt.

Der sehr frühe und bis jetzt einzige Versuch, eine Emissionsbezugsgröße mit dem Schwingstärkemaß S einzuführen, kommt aus dem CRI [4-21,19]. Das Schwingstärkemaß S mit der Einheit "Vibrar" wurde für eine Bezugsentfernung R_1 = 1m definiert ($S = 10\lg(4 f^2 v^2)$, f = Frequenz, v = Schwinggeschwindigkeit in mm/s). Ausbreitungsmessungen zeigten dann, daß bei einer Bezugsentfernung von R_1=6.3m die Fundamentgeometrie der Hämmer vernachlässigt werden konnte und die Amplituden-Abnahmen einer Punktquelle galt. Auf dieser Basis wird in [4-7] die Wahrnehmungsstärke K bzw. die Schwinggeschwindigkeitsamplitude für die Bezugsentfernung R_1 = 6.3m von Gesenkschmiede-Maschinen graphisch dargestellt (Bild 4.15). Aus den Kurven wird klar, daß offensichtlich die Emissionen stärker mit der Erhöhung des Bärgewichtes (bei kleinen und großen Hämmern) als mit der Erhöhung der Fallhöhe (mittlere Hämmer) anwächst. Gegenschlaghämmer, die kaum noch neu aufgestellt werden, leiten wegen des weitgehenden

Impulsausgleichs beim Aufeinandertreffen von Ober- und Unterbär etwa nur 1/10 der Nennenergie in die Umgebung weiter. Sie werden deshalb auch für große Arbeitsvermögen eingesetzt

Bei Schmiedepressen verursacht weniger der eigentliche Preßvorgang, sondern vielmehr der Anfahr - und Bremsvorgang Erschütterungsemissionen. Vor allem Nickschwingungen im Frequenzbereich bis zu 10 Hz können bei größeren Pressen unangenehm auf die Nachbarschaft einwirken. Im Nahbereich der Pressen liegen die Schwingfrequenzen aber überwiegend zwischen 20 bis 80Hz. Die in [4-7] dargestellte Stärke der Emission ist bei Pressen zwar geringer als bei Hämmern, doch ob die Befreiung von der Genehmigungspflicht dadurch gerechtfertigt ist, sei dahingestellt, zumal in der Nachbarschaft hohe KB-Werte möglich sind.

Ergänzend sei noch auf Berechnungsergebnisse für Hammeranlagen auf Fundamenten mit und ohne Schwingungsisolierung in [4-6] hingewiesen. Die für ein Beispiel berechneten Schwingungen des Baugrundes unter dem Fundament werden nach VDI 2057 frequenzmäßig bewertet und der daraus resultierende KB-Wert wird als Gütemaßstab für die Aufstellung in Bild 4.16 wiedergegeben.

Ein Versuch, die Emission von Fallhämmern mit der Einwirkung in der Nachbarschaft in Abhängigkeit vom Arbeisvermögen E der Schmiede und des Abstandes R zur Bebauung pauschal zu verknüpfen, wird vom Autor dieser Studie in Bild 4.17 gemacht. Die Auswertung eigener Meßdaten [4-13 bis 18] deutet darauf hin, daß ein Zusammenhang der Form KB-Wert = $a + b \sqrt{E} / R$ evtl. zur ersten groben Abschätzung eines Schutzabstandes bzw. der Immission herangezogen werden kann.

4.5 EMISSIONEN DURCH BAUSTELLENTÄTIGKEITEN

Erschütterungsemissionen von Baustellen lassen sich entsprechend ihrer Wirksamkeit unterteilen in

- Schlagende Rammen
- Vibrierende Rammen
- Oberflächenverdichter: Rüttler und Vibrationswalzen
- Baumaschinen
- Baugruben- und Abbruchsprengungen

Bohr- und Preßverfahren zum Einbringen großer Gründungspfähle sind weitgehend erschütterungsfrei, wenn nicht gerade Rüttelbohrpfähle oder Schlagmeißel bei hartem Untergrund zusätzlich eingesetzt werden.

Alle typischen Emissionsarten sind vertreten; von dem Einzelschlag der Freifallramme und dem einzelnen Sprengimpuls, über eine schnelle Folge von Impulsschlägen, bis hin zum stationär schwingenden, regelbaren Arbeitsprozeß. Hinzu kommen regellose Emissionen des Baustellenverkehrs. Sprengerschütterungen werden in Kapitel 5 ausführlich behandelt.

4.5.1 Schlagendes Rammen

Beim schlagenden Rammen hat die Schlagenergie des Rammbären Spitzendruck und Mantelreibung zwischen Pfahl und Boden zu überwinden. Die eingesetzte Schlagenergie wird hauptsächlich über die Pfahlspitze in den Boden eingebracht [4-36,39], von der sich eine Kombination von P - und S - Wellen als Raumwelle ausbreitet. Die Energie ist dabei ungleichförmig auf der kugelförmigen Wellenfront verteilt, unterhalb der Spitze mit maximaler vertikaler Komponente (Bild 4.18). Seitlich des Pfahlschaftes wird ferner eine vertikale Scherwelle infolge Schaftstauchung und in Oberflächennähe infolge Schaftbiegung und exzentrischem Schlag eine horizontale P - Welle emittiert [4-36]. Im allgemeinen als Punktquelle anzusehen, können im Einzelfall je nach Rammgerät, Rammgut und Bodenaufbau die vorgenannten physikalischen Effekte zu unterschiedlichen Emissionen und Amplituden-Abnahmen Anlaß geben.Ein wesentlicher Faktor ist neben der Schlagenergie auch die Eindringtiefe des Pfahls, d.h. die relative Lage der Pfahlspitze zum Bezugspunkt an der Oberfläche.

Bezugsabstände Nahfeld/Fernfeld sind nicht relevant. Als kürzeste Entfernung zur Quelle tritt in der Immissionsschutzpraxis häufiger etwa 3 m auf. Noch geringere Abstände können bei der

Einwirkung der Rammerschütterungen auf erdverlegte Rohrleitungen eine Rolle spielen [4-39]. Die radiale Schwingungskomponente dominiert an der Oberfläche.

Zur rechnerischen Abschätzung der Schwingwege w, u an der Bodenoberfläche wird in [4-35] folgende Formel für schlagendes Rammen angegeben:

$$w,u = k_{w,u} \; ss \; (D^2/E\,R) \; \exp\left[-0.07\,R\sqrt{\rho\,D/M}\right] \approx 1/R \cdot \exp\left[-\alpha\,R\right] \qquad (4\text{-}1)$$

k_w = 0,15 für vertikale Schwingungsrichtung

k_u = 0,10 für horizontale Schwingungsrichtung

ss = "Konusswiderstand" des Bodens[N/m²] (Sondierung nach Norm NEN3680)

D = Pfahldurchmesser [m]

E = Elastizitätsmodul Boden [N/m²]

R = $\sqrt{H^2+r^2}$ mit H=Tiefe der Pfahlspitze, r=horizontaler Abstand zum Pfahl [m]

ρ = Dichte des Bodens [kg/m³]

M = Masse von Pfahl und Rammbär [kg]

Der exponentielle Term der Bodendämpfung muß nach [4-35] vorsichtig als spezifische, empirische Größe angesehen werden. Dies gilt auch für den Faktor $k_{w,u}$, er wird nicht näher erläutert, läßt sich offensichtlich aber aus der Rechnung eines Stoßes in der Tiefe H in einem elastischen Halbraum ableiten.

Zur Amplituden-Abnahme mit der Entfernung R wird in [4-35] im wesentlichen für die resultierende Schwinggeschwindigkeit v_{Res} die Abnahme

$$v_{Res} = k \left[\frac{\sqrt{W_0}}{r} \right]^n \qquad (W_0 = \text{Rammenergie}) \qquad (4\text{-}2)$$

bestätigt. Die örtlich bedingten Faktoren k und n schwanken natürlich, kommen aber den 1973 von Attewell u. Farmer vorgeschlagenen Werten für eine obere Grenze von k = 1.5 und n = 1 nahe [4-44]. Beim schlagenden Rammen stellt man häufiger fest, daß die 1/R - Abnahme der Amplituden nicht monoton verläuft, sondern in einem bestimmten Abstandsbereich ΔR ein Maximum aufweist. [4-36,39,42]. Die von der Pfahlspitze ausgehenden Raumwellen treten in einem Abstand $r_1 > H\,c_R / \sqrt{c_L^2 - c_R^2}$ an die Oberfläche und wandeln sich in Rayleighwellen, um, die durch das Auftreffen von Scherwellen im Abstand $r_2 > H\,c_R / \sqrt{c_S^2 - c_R^2}$ verstärkt werden [4-52]. Es ist H = Rammtiefe, $c_{R,S,L}$ = Wellengeschwindigkeit der Rayleigh-, Scher- und Longitudinalwelle. Beim Rammen in Kiessand dürfte diese Verstärkung etwa im Bereich $0.6\,H < \Delta r < 0.8\,H$ liegen

4.5.2 Vibrierendes Rammen

Eine andere Emission stellt das vibrierende Rammen dar. Rammbär, Pfahl und Boden bilden insgesamt ein schwingendes System. Mit der regelbaren Drehzahl des Vibrators wird der Boden in einen pseudoflüssigen Resonanzzustand versetzt und damit die Mantelreibung stark reduziert. Diese Optimierung des Wirkungsgrades ist mit einer stärkeren harmonischen Schwingungserregung des Bodens verbunden, an der alle drei Richtungskomponenten gleich beteiligt sind.

Auch für das vibrierende Rammen gilt die Amplituden - Abnahme des schlagenden Rammens, aber mit dem Unterschied, daß die 1/r - Abnahme ungestört monoton verläuft. Der Rammenergie W_0 entspricht hier die Nennenergie pro Zyklus des Vibrators.

Beispiele für gemessene Amplituden-Abnahmen mit der Entfernung zum Pfahl sind in Bild 4.19 zusammengefaßt, als Übersicht in [4-34] und im Detail auch in Abhängigkeit vom Rammgut in [4-42], sowie in Abhängigkeit von der Art des Rammbären in [4-43] zu finden.

In den bereits ca. 20 Jahre alten umfangreichen Untersuchungen zu den Rammerschütterungen [4-42,43,44] ist der damalige Stand der Technik dargestellt. Die Rammtechnik hat sich aber in Richtung der Vibrationsverfahren weiterentwickelt, so daß bei konkreten Anwendungen heute die Vergleichbarkeit zu prüfen ist. Spezielle Hinweise zu Erschütterungsemmisionen und Ausbreitungen findet man für

- das Ziehen von Spundbohlen mit Hilfe eines Vibrators in [4-38],
- das Herstellen von Pfahlgründungen in [4-37,49],
- das Rammen von Spundwänden in [4-47] und im Vergleich von schlagenden und vibrierenden Verfahren in[4-46,52].

Pauschal kann man die in [4-34] skizzierte Situation bestätigen: Innerhalb eines großen Streubereiches kann das vibrierende Rammen und Ziehen wegen möglicher stationärer Erregung von Resonanzen größere Schwingungen erzeugen. Bei Baustellen im Straßenraum mit Abständen von 5 - 10 m zu Gebäuden ist mit einer Schwinggeschwindigkeit im Boden von 10 mm/s, bei Heranrücken auf 1 m von ca. 20 mm/s zu rechnen. Maxima können bei 50 mm/s liegen.

Unter dem Aspekt "Erschütterungseinwirkungen auf Sachgüter" sei an dieser Stelle auf die mögliche Beschädigung von erdverlegten Rohrleitungen durch nahe Baustellentätigkeiten hingewiesen. Messungen auf den Leitungen haben z.B. beim Rammen von Gründungspfählen

in 20 m Abstand $\hat{v}$= 10 mm/s und in 70 m Abstand $\hat{v}$ = 1.5 mm/s bei 5-20 Hz ergeben [4-56]. Vibrationswalzen in 5m Abstand zur erdverlegten Rohrleitung verursachen bei 20-88 Hz ein $\hat{v}$ = 3 bis 4 mm/s [4-48]. Über eine Abschätzung der Wechselbiegebeanspruchung der Rohrleitung läßt sich dann die zulässige Lastwechselanzahl abschätzen.

4.5.3 Bodenverdichtung

Bodenverdichtung in Baugruben und an der Oberfläche werden heute überwiegend mit Hilfe von Rüttelplatten und Vibrationswalzen - also stationären Erregern durchgeführt. Seltener kommt die Stoßverdichtung mittels Fallgewichten zum Einsatz. Im Prinzip gelten die Ausführungen zum Rammen aber mit dem Unterschied, daß überwiegend Oberflächenwellen erzeugt und die Erschütterungsquellen bewegt werden. Eine systematische Untersuchung zu dieser Baumaschinengruppe liegt nicht vor, so daß Kenntnisse zur Emission und Ausbreitung aus Einzelereignissen zusammengestellt werden müßten. Lediglich vom TRRL in England werden die Bodenverdichtungsgeräte im Rahmen der Baustellenemissionen mit aufgeführt [4-40,41]. Zusammen mit der Übersicht in [4-29] lassen sich die Ereignisse aus den verschiedenen Untersuchungsgebieten am besten in den ursprünglichen Diagrammen, die normierte Amplituden-Abstandsgesetze in der von [4-29] kreierten Form

$$v = k \left(D / \sqrt{E}\right)^{-n} \qquad (4\text{-}3)$$

darstellen, wiedergeben. D ist der Abstand zur Quelle, E ist die kinetische Energie oder die Lademenge pro Zündzeitstufe und k ist die Schwingungsamplitude für $D/\sqrt{E} = 1$. Die gezeigten Daten wurden an der Erdoberfläche oder an Fundamenten gemessen. Trotz eines Hinweises auf den Näherungscharakter wird durchaus eine Vorstellung von der relativen Größenordnung der Emission unterschiedlicher Geräte und Tätigkeiten auf Baustellen gegeben.

Bild 4.20 aus [4-40] zeigt nicht-explosive Baustellenerschütterungen zwischen 1 und 100 m Entfernung, deren wesentliche Schwingungsenergie im Frequenzbereich zwischen 10 und 100 Hz liegt. Die Erschütterungsintensitäten können beträchtlich von Ort zu Ort schwanken, doch es wird auch deutlich, daß z.B. 1 kg Dynamit größere Erschütterungen erzeugt, als die ständig eingesetzten maschinellen Erreger.

Emissionen des Baustellenverkehrs und anderer Aktivitäten sind in den vorgenannten Bildern bereits enthalten. Einzelergebnisse aus [4-48,50,51] zeigen ferner, daß

- o Bodenverdichtungsgeräte moderner Bauart bei gleicher Leistung durchaus verschiedene Erschütterungen verursachen können. Rüttler mit 30 Hz Erregerfrequenz sind im Hinblick auf die Resonanzanregung von Geschoßdecken ungünstiger einzustufen als Rüttler mit 40 - 50 Hz Erregerfrequenz.

- o Rüttlerplatten und Vibrationswalzen gleicher Leistung unterscheiden sich nicht signifikant. Die Walzen können im Einzelfall etwas ungünstiger sein, da sie in mehreren Betriebsstufen mit verschiedenen Frequenzen vibrieren, z.B. mit 21 Hz in größere Nähe zu Deckenresonanzen als bei 39 Hz.

4.5.4 Abbruchsprengungen

Zu den Baustellenerschütterungen sind auch Abbruchsprengungen zu rechnen. In der Regel bestimmt hierbei nicht die eingesetzte Lademenge die Emission, sondern der Fallimpuls bzw. die kinetische Energie E der abgesprengten Bauteile. Für das Umstürzen eines Bauwerks gilt

$$E = m \cdot \Delta H_S \cdot g \qquad (4\text{-}4)$$

worin g die Erdbeschleunigung, m die Masse des umstürzenden Baukörpers und ΔH_S die Fallhöhe seines Massenschwerpunktes ist. Ein Teil der Fallenergie wird in Formänderungsarbeit des Bodens umgewandelt. Die maximalen Erschütterungen hängen wesentlich vom zeitlichen Verlauf des Aufpralls ab, d.h. vom Auseinanderbrechen des Bauwerks in Teilstücke und von der Art des Fallbettes. In [4-45] wird für 13 Fallbeispiele die Emission und die Amplituden - Abnahme mit der Entfernung angegeben und zwischen Kippkantenlänge des Bauteils > 30 m und < 18 m, sowie Schornsteinfallängen zwischen 40 und 75 m unterschieden. Die resultierenden Schwinggeschwindigkeiten betragen etwa 15 mm/s in 40 - 70 m und 5 mm/s in 60 - 100 m Entfernung (Bild 4.21a). Die Frequenzen liegen überwiegend zwischen 1 und 10 Hz. An gleicher Stelle wird als Bezugsabstand R_1 der Schwerpunkt der Abbruchmassen in Fallrichtung angenommen, der bei gleichmäßiger Massenverteilung längs der Bauwerkhöhe etwa 2/3 der Höhe des umstürzenden Baukörpers entspricht. In [4-33] wurde für Sprengungen von Kohlebunkern eine Abhängigkeit der Emission von der Fallenergie mit $v_{Res} \sim E^{1/3}$ gefunden und Schornsteinsprengungen eine Amplituden-Abnahme mit $v_{Res} \sim R^{-1/4}$ (Bild 4.21b).

Für Abbruchsprengungen im Wasser (z.B. Beseitigung alter Brückenpfeiler) und Unterwassersprengungen (z.B. Herstellen von Dükern) gibt es keine gesicherten Ergebnisse. In Einzelfällen wird berichtet, daß die Erschütterungen bei Pfeilerabbruch zum überwiegenden Teil durch den Baugrund erfolgt und das umgebende Wasser keinen wesentlichen Einfluß hat,

solange die Ladung nicht direkt im Wasser explodiert. In [5-2] wird für diese Situation eine Abstands - Lademengen - Beziehung

$$v = k\ L^{2/3}\ R^{-1} \qquad (4\text{-}5)$$

mit L = wirksame Lademenge [kg], R = Abstand [m] angegeben, worin der Kennwert k= 60 für massive Bauwerke die Meßwerte gut abdeckt (Bild 4.22). Im übrigen wird in [5-2] k = 100 für den Abbruch leichter Bauwerke und k = 150 für die Bodenoberfläche angegeben. Bei direkten Unterwassersprengungen zur Beseitigung von Hindernissen wurden Meßwerte mit k = 240 angenähert beschrieben. Bei Unterwassersprengungen zur Herstellung von Düker bzw. Gräben wird in [5-24] berichtet, daß nach dem eigentlichen Sprengvorgang mit v = 4,5 mm/s in 76 m Entfernung überraschend eine Aufschaukelung auf den dreifachen Wert eintrat. Diese Zahlenwerte sind in Bild 4.25 mit aufgenommen.

4.5.5 Unterirdischer Tunnelvortrieb

Unterirdische Baustellen mit Erschütterungsemissionen sind bergmännisch aufgefahrene Tunnel, die oft in dicht besiedelten Gebieten für Verkehrswege und Versorgungsleitungen angelegt werden. Ein sprengtechnischer Vortrieb erzeugt kurze Einzelimpulse, ein mechanischer Vortrieb mit Fräsmaschinen verursacht Dauererschütterungen, die zu Resonanzanregungen führen können. Lademenge bzw. Maschinentyp, sowie Geometrie und Bodenaufbau beeinflussen die Emission.

Anhand von wenigen Einzeluntersuchungen [4-28,32] kann nicht mehr als ein erster Eindruck vermittelt werden. In [4-32] wird z.B. für acht verschiedene Vortriebssprengungen eine Schwankungsbreite der Fundamentschwinggeschwindigkeiten von $\hat{v}$ = 0,5...22 mm/s und der Frequenzen von f = 30...100 Hz bei Abständen zwischen 6...130 m angegeben. Zum Vortriebssprengen vor allem in Nähe von Tunnelportalen ist das Vorgehen wie bei allen Sprengungen anzuwenden. Wegen der nahen Bebauung sind mit größter Vorsicht Probesprengungen durchzuführen und meßtechnisch zu kontrollieren.

Für einen Straßentunnel mit Überdeckungen von 8 - 30 m und kürzester Unterfahrung von Gebäuden in 4 m Abstand werden in [4-32] sowohl der sprengtechnische als auch der mechanische Vortrieb untersucht. Die Amplituden-Abstands-Kurve in Bild 4.23 zeigt für das Aussprengen des Gesamtquerschnitts (Kalottenform, 56m^2, Kalkstein) und für den Teilausbruch (nach Ausfräsen von zwei Vorstollen) den deutlichen Unterschied, daß beim Teilausbruch die Sprengerschütterungen eine stärkere Ausbreitungsdämpfung erfahren. Die Kombination von

sprengtechnischem und mechanischem Vortrieb scheint demnach für oberflächennahe Tunnel günstig zu sein.

Der Einsatz mechanischer Tunnelfräsmaschinen führt nach [4-28,32] in Abständen bis zu etwa 20 m zu deutlichen Körperschallimmissionen in den Wohnhäusern. Einen Hinweis auf die Schwingungsemission geben drei Einzelbeispiele in Bild 4.24 aus [4-28]. Eine Vollschnittfräse im Fels erzeugt etwa vergleichbare Erschütterungen wie ein großer Bulldozer mit v= 0,5 mm/s in 20 m Entfernung, d.h. Bauschäden sind i.a. nicht zu erwarten. Sie treten bei derartigen Bauvorhaben eher durch quasistatische Baugrundsetzungen auf. Es wird deshalb die gleichzeitige Überwachung der Vibrationen und der Bodensetzungen empfohlen.

4.5.6 Baugrubensprengungen

Das Sprengen als spezielle Baustellentätigkeit zum Abbruch von Bauwerken und zum unterirdischen Vortrieb von Tunneln ist zu ergänzen durch das Sprengen zur Herstellung von Baugruben, Gräben, Kanäle etc. in Gebieten mit oberflächennah anstehendem Fels. Dort werden Lockersprengungen mit relativ kleinen Lademengen pro Zündstufe vorgenommen. Die typischen Emissionen sind von geringer Pulsdauer mit Frequenzen zwischen 40 und 100 Hz. In Bild 4.25 aus [5-4] sind für verschiedene Entfernungen Erschütterungen bei Baugrubensprengungen im Alpengebiet gezeigt, ergänzt um eine Messung im Sauerland [4-58] und die weiter oben erwähnte Grubensprengung unter Wasser [4-53]. Obwohl unterschiedliche Sprengbedingungen vorliegen, wird in [5-4] qualitativ festgestellt, daß bei Baugrubensprengungen, für die ein hoher Verspannungsgrad der Laderäume und ein kleiner Anteil seitlich freier Flächen typisch ist, von einem Werfen der Vorgabe nicht mehr gesprochen werden kann. Die erzeugten Erschütterungen sind deshalb oft stärker, als es nach der Lademenge zu erwarten wäre.

5. GEWINNUNGSSPRENGUNGEN IN STEINBRÜCHEN

5.1 MERKMALE DER EMISSION

Bei keiner anderen technisch erzeugten Erschütterung sind Quelle und Ausbreitungssystem so eng verknüpft wie beim Sprengen. In den zahlreichen Veröffentlichungen zu diesem Themenkreis wird deshalb auch die Erschütterungsemission stets im Zusammenhang mit der Ausbreitung untersucht und beschrieben. Besonders intensiv wurden im deutschsprachigen Raum Sprengerschütterungen von der BGR mit mehreren Forschungsvorhaben und Erstellen von Steinbruchkatastern untersucht [5-1,2,3,4,5,12,16,17]. Einen guten Überblick zur Literatur vor 1970, in der auch die gebräuchlichen, empirisch gefundenen Ausbreitungsgesetze zusammengestellt sind, gibt [5-1]; neuere Arbeiten sind in [5-17] zusammengestellt.

Die Bodenerschütterungen werden beim Sprengen von Gestein durch sich zeitlich überschneidende Vorgänge ausgelöst: kurzer Detonationsstoß, sich vergleichsweise langsam aufbauender Schwadendruck, Losreißen der Vorgabe und Aufprall des Gesteins. Hinzu kommt die Überlagerung der Wirkung von mehreren Zündstufen im Millisekundenabstand. Der Schwadendruck führt im Normalfall zum Losreißen der Vorgabe. Dabei können im Gestein bereits vorher aufgestaute Spannungen freigesetzt werden. Hierin und in der Aufteilung der Sprengenergie in Teilbeträge zum Losreißen, zur Deformationsarbeit und zur elastischen Anregung des Bodens liegt für die Vorhersage der auftretenden Erschütterungen ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor.

Der Anregungsmechanismus der Erschütterungen hängt von mehreren Parametern ab. Größe, Dauer und Verlauf des Schwadendrucks ,d.h. Menge und Art des Sprengstoffs sowie die anstehende Gesteinsart sind zumeist maßgebend für die Energieabgabe an den Untergrund. Neben dem Explosionsverlauf spielt aber auch die zeitliche und räumliche Verteilung der Lademenge eine wichtige Rolle wie Zahl und Anlage der Bohrlöcher, Verdämmung, Vorgabe, Zündfolge und Zündstufen. Die Stärke und Ausbreitung der Sprengerschütterungen hängt weiterhin stark vom geologischen Untergrund ab, d.h. von der Gebirgsart, von Schichtungen und Verwerfungen sowie von der Hydrologie des Geländes. Die stark ortsgeprägten Dämpfungs- und Anisotropieeigenschaften des Gebirges verbieten die vereinfachte Modellierung des Bodens als einen ideal elastischen, isotropen, homogenen Halbraum. Und es muß bezweifelt werden, ob die aus diesem Modell und punktförmiger Oberflächenerregung resultierenden Energieaufteilung wie sie in der Literatur überall zitiert wird, auf die Rayleigh-,

Scher- und Kompressionswelle mit 67% zu 26% zu 7% für Sprengerschütterungen zutrifft. Bei einer Sprengung wird ein Gemisch dieser Wellen erzeugt. In "einiger" Entfernung stellt sich die Emission im zeitlichen Verlauf als hochfrequenter Schwingungsbeginn einer Kompressionswelle dar, dem ein tieferfrequentes Ausklingen einer Rayleighwelle folgt.

Nach den elastischen Eigenschaften des anstehenden Gebirges, der Ladungsmenge und dem Beobachtungsabstand richtet sich die Zeitdauer und die Frequenzzusammensetzung der Erschütterung. Kompaktes Gebirge, geringer Abstand und kleine Ladungen erzeugen relativ hochfrequente Erschütterungen unter einer Sekunde Dauer. Weniger festes Gestein, größere Abstände und größere Lademengen verursachen tieffrequente Erschütterungspulse von mehreren Sekunden Dauer. Es konnte in etwa eine Frequenzerhöhung umgekehrt proportional zu der Kubikwurzel der Lademenge festgestellt werden [5-18]. Einige Beispiele sind den Bildern 5.1 und 5.5 zu entnehmen.

In jedem Fall sind Sprengerschütterungen als impulsartige, stochastische Punktquellen einzustufen. Ein Bezugsabstand für den Übergang vom Nahfeld zur Fernfeld-Ausbreitung läßt sich wegen der komplexen Beeinflussung durch die vorgenannten Parameter nicht angeben. In der Praxis werden die nächstgelegenen Meßpunkte und Immissionsorte aus Sicherheitsgründen immer im größeren Abstand von ca. 300m vom Explosionsort liegen, so daß bereits Fernfeldbedingungen einer Punktquelle anzunehmen sind. Davon gehen in der Regel auch alle Abstands-Lademengen-Gesetze aus.

Zur vollständigen Beschreibung der Erschütterungsemission einer Gewinnungssprengung gehören neben den wesentlichen seismischen Wellen im Gestein auch die in der Luft erzeugten Druckwellen. Im Rahmen dieser Studie kann hier nur auf entsprechende Literatur hingewiesen werden [5-22,23,24].

5.2 MÖGLICHKEITEN DER PROGNOSE

5.2.1 Abstands - Lademengen - Gesetze

Der komplizierte und standortgeprägte Sachverhalt bei Sprengerschütterungen läßt es verständlich erscheinen, daß die Verknüpfung von Emission und Ausbreitung im Unterschied zu den Maschinen- und Verkehrserschütterungen ausschließlich empirisch zu brauchbaren Aussagen

kommt. Ein exakter physikalischer Zusammenhang zwischen den meßbaren Größen Erschütterungsstärke - repräsentiert durch die Schwinggeschwindigkeit v eines Bodenteilchens beim Durchlauf der seismischen Wellen -, Entfernung R vom Sprengort und Ladungsmenge pro Zündstufe L kann nicht angegeben werden. Dieser Zusammenhang wird in der gesamten Literatur ersetzt durch die als Abstands-Lademengen-Gesetz bezeichnete Näherungslösung

$$v = k \cdot L^b \cdot R^{-m} \qquad (5\text{-}1)$$

Dazu wird im Normentwurf [1-1] ausgeführt, diese Gleichung sei nicht dimensionsrein und die Kennzahlen k, b und m seien empirisch zu belegen. Die Schwankungsbreite dieser Kennzahlen ist beträchtlich, für Untersuchungen in der BRD variieren sie z.B. wie folgt:

- o Ladungsexponent $b \approx 0{,}5 \ldots\ldots 0{,}8$
- o Entfernungsexponent $m \approx 0{,}8 \ldots\ldots 1{,}8$
- o Proportionalitätsfaktor $k \approx 20 \ldots 9500$

Bei der Zusammenstellung in Tabelle 5.1 im Anhang ist zu beachten, daß nicht immer eindeutig aus der Literatur zu erkennen ist, welche Schwingungskomponente (radial, vertikal, Resultierende) und welcher Bezugsort (Freifeld, Hausfundament, Geschoßdecken) der jeweiligen Untersuchung zugrundeliegen.

Zur praktischen Anwendung in einer Prognose sei in Tabelle 5.1 auf Näherungsformeln mit etwas allgemeineren Bezug für Sprengungen im

- o Schichtgestein und kristallinem Hartgestein (Nr.14)

sowie für Sprengungen im

- o Nahbereich und im Normalbereich (Nr. 9)

hingewiesen.

Interessant ist, daß gerade zum stark variierenden Abstands-Lademengen-Gesetz in einem neuen internationalen Normenentwurf der ISO [1-6] konkrete Kennwerte angeführt werden (Tab. 5.1, Nr. 16).

Der Aufbau der empirisch gefundenen Ausbreitungsgesetze erfolgt in der Regel durch Auswertung von Feldmessungen, indem die Erschütterungsgröße einer Regressionsanalyse unterzogen wird. Variiert wird bei konstanter Entfernung die Ladungsmenge oder bei konstanter Ladungsmenge wird simultan in verschiedenen Entfernungen gemessen. Im doppellogarithmischen Maßstab erhält man so Geraden unterschiedlicher Neigung und Lage. Um trotz der großen Streuung zu einer brauchbaren Prognoseformel zu gelangen, hat die BGR für

abgegrenzte Gebiete Erschütterungskataster erstellt und entsprechende Näherungslösungen auf der Basis der Gleichung (5-1) vorgeschlagen. Sie sind für den Raum Niedersachsen, Bayern, Bayerischer Wald und Fränkischer Jura in Tabelle 5.1 mit Angabe der Literaturquellen enthalten. Für eine einfache Handhabung wird in Diagrammen die Abhängigkeit der Schwinggeschwindigkeit von den unabhängigen Parametern Entfernung und Lademenge dargestellt. Ein Beispiel aus [5-12] ist für Norddeutschland für die Freifeldwerte und 50% Eintrittswahrscheinlichkeit in Bild 5.2 dargestellt.

Die Verwendung einer auf die Lademenge normierte Entfernung ist vor allem in England und in den USA üblich. So formuliert das US Bureau of Mines das Abstands-Lademengen-Gesetz (5-1) als

$$ppv = k \cdot (R / \sqrt{L})^{-n} \qquad (5\text{-}2)$$

mit ppv = peak particle velocity = $\hat{v}$, R = Entfernung und L = wirksame Lademenge. Die normierte Entfernung (scaled distance) $R / \sqrt{L}$ kann zur besseren Anpassung an Meßdaten auch als $R / \sqrt[3]{L}$ angenommen werden [5-15].

Allen vorgenannten Formeln ist gemeinsam, daß sie nicht zwischen geometrischer Ausbreitungsdämpfung und Absorptionsverlusten unterscheiden, wie dies bei den Maschinen- und Verkehrserschütterungen üblich ist. Eine Trennung dieser Effekte wird in der statistischen Analyse von Minensprengungen in Arizona angesetzt und mit der herkömmlichen Näherung verglichen [5-13]. Es stellte sich heraus, daß Prognoseformeln von der Art

$$ppv = k' (R / \sqrt{L})^{-n'} e^{-\alpha R} \qquad (5\text{-}3)$$

nur geringfügig bessere Korrelationen zu Meßwerten aufweisen, als Formeln nach (5-1) bzw. (5-2). Keine von sechs verschiedenen Prognoseformeln brachte in allen Fällen das eindeutig bessere Ergebnis.

Die vielen Einflußgrößen kann man in zwei Kategorien einteilen und jeder Kategorie eine empirische Kenngröße zuordnen. Die Konstante n wird summarisch mit dem Einfluß aller geologischen Parameter verknüpft, die Konstante k mit den Design-Parametern wie Sprenganlage und -technik, Lademenge und Entfernung. Es ist jedoch bei den Formeln des Typs (5-1) und (5-2) grundsätzlich zu bemängeln, daß keine Differenzierung innerhalb der jeweiligen Kategorie möglich ist und daß z.B. für den Boden isotropes, lineares Verhalten vorausgesetzt wird. Die BGR hat jedoch z.B. für geschichteten Fels festgestellt, daß die Anisotropie die Ausbreitungsdämpfung beeinflußt. Die Ausbreitung senkrecht zur Schichtung wird deutlich

stärker gedämpft als parallel zur Schichtung wie die Beispiele in Tabelle 5.2 aus [5-3] zeigen. Ein weiterer Nachteil besteht in der Annahme einer punktförmigen Erschütterungsquelle. Die in der Praxis auftretende räumliche Ausdehnung einer Sprenganlage und das Verzögerungsschießen kann in seiner Variationsbreite mit einer einzigen Konstanten nur ungenügend erfaßt werden. Hier hilft im Prinzip auch nicht weiter, wenn die Kennzahl k in (5-1) zur einfacheren Unterscheidung der Erschütterungsstärken verschiedener Gesteinsgruppen als Erschütterungszahl I = log k geschrieben wird [5-12].

5.2.2 Statistische Analyse

Die Anwendung von Regressionsgeraden der Form (5-1) bleibt wegen der großen Streubreiten unbefriedigend. Vor allem hängt die Größe des Kennwertes k als Ergebnis der statistischen Ausgleichsrechnung im hohen Maße von der Wahl der Exponenten b und m ab. Um in Planungsfällen überhaupt eine Prognose mit einer bestimmten Sicherheit abgeben zu können, muß man Aussagen zur Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Wertes und zum Vertrauensbereich machen. Dies geht aber nur, wenn eine Daten-Grundgesamtheit, d.h. Meßwerte eines Erschütterungskatasters, vorhanden sind.

Von der BGR [5-12] wird die Vorgehensweise vorgeschlagen, die Erschütterungszahlen I=log k einer Kataster-Datenmenge als Summenhäufigkeitskurve darzustellen und für eine vorgegebene Unterschreitenswahrscheinlichkeit von X [%] die Erschütterungszahl zu entnehmen. Ein Beispiel aus [5-13] für Freifeldwerte der Kalksteingewinnung in Bayern und Niedersachsen wird in Bild 5.3 vorgeführt. Das Beispiel entspricht Nr. 12 in der Tabelle 5.1. Unter Rückgriff auf die der Gesamtheit optimal angepaßten Regressionsgerade kann dann mit der Abstands - Lademengen - Beziehung der Erwartungswert (Mittelwert der Schwinggeschwindigkeitsamplitude) berechnet werden. Von den später gemessenen Erschütterungen werden X [%] diesen Erwartungswert unterschreiten. Die Größe des Kennwertes k hängt demnach nicht nur von den Exponenten b und m, sondern auch noch von der vorgegebenen statistischen Sicherheit ab.

Einen Schritt weiter in der statistischen Analyse von Sprengerschütterungsdaten geht man in der LIS [5-10]. Neben dem Erwartungswert der optimierten Regressionsgeraden werden auch ihre Vertrauensbereiche mit einer statistischen Sicherheit von X [%] geschätzt. Die Ergebnisse für die unsystematische Datenbasis der in Nordrhein - Westfalen an Gebäudefundamenten gemessenen Sprengerschütterungen sind in Diagrammen dargestellt. Ein Beispiel aus [5-10] in Bild 5.4 zeigt neben einem Vergleich der Regressionsgeraden für verschiedene Gebirgsarten

Landesanstalt für Immissionsschutz
Nordrhein-Westfalen
Bibliothek

auch die Regressionsgerade der Gesamtmenge mit dem Vertrauensbereich für Erwartungs- und Einzelwert. Das Beispiel entspricht Nr. 10 in der Tabelle 5.1.

Ohne Zweifel stellt die statistisch abgesicherte Prognoseaussage eine Verbesserung gegenüber den älteren, heute noch häufig angewendeten Faustformeln dar. Aber es bleibt eine Schätzung, die z.B. im dargestellten Fall dem Planer sagt, in 95% aller Fälle werden zukünftige Einzelmeßwerte in 100m Abstand vom Sprengort unter v_{Res}= 50mm/s und wird der Mittelwert unter v_{Res}=18mm/s liegen. Letztendlich wird also mit einer definierten hohen Wahrscheinlichkeit eine große Spannbreite der Meßwerte vorausgesagt, d.h. die statistisch mögliche, hohe Aussagesicherheit führt nicht automatisch zu genaueren Prognosen. Dies wird wohl erst möglich werden, wenn neue Erkenntnisse eine differenzierte Schichtung der Grundgesamtheit in Zukunft zulassen. Das Beispiel verdeutlicht aber auch, daß es u.U. notwendig werden kann, für bestimmte Problemstellungen der Prognose mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten zu rechnen.

Ein Versuch, die genannten Schwierigkeiten pragmatisch zu behandeln liegt mit einer Berechnungsanleitung für Sprengerschütterungen in [5-7] vor. Ausgangsbasis ist die statistische Analyse eines größeren Erschütterungskatasters für Meßwerte an Gebäudefundamenten. Einheitlich für das gesamte Gebiet werden zunächst Berechnungsformeln vom Typ (5-1) abgeleitet, deren Kennwerte in Tabelle 5.1 unter Nr.9 aufgeführt sind und die für den Regelfall gelten. Davon abweichende geologische und sprengtechnische Bedingungen werden zusätzlich durch pauschale, tabellierte Faktoren berücksichtigt. Neu ist der Ansatz unterschiedlicher Regressionsgeraden für Sprengungen im Nahbereich (5 bis 50m, 0.1 bis 30 kg) und im Normalbereich (50 bis 2000m, 5 bis 2000 kg). Hier dürfte die Frequenzabhängigkeit der Energieumsetzung unterschiedlicher Lademengen und die Frequenzabhängigkeit der Wellenausbreitung mit zunehmender Entfernung einfließen, die z.B. in [5-14] in zwei Diagrammen dargestellt und in Bild 5.5 wiedergegeben wird. Ferner werden in [5-7] Streubreiten des Erwartungswertes für Wahrscheinlichkeiten zwischen 50% und 95% angegeben und die Anwendung unterschiedlicher Wahrscheinlichkeiten bei der Schadensbeurteilung von Gebäuden, Massenbeton, Rohrleitungen und EDV-Anlagen empfohlen. An dieser Stelle ist eine Abschätzung der Prognosegenauigkeit der Berechnungsanleitung nicht möglich, obwohl in [5-7] anhand eines Beispiels Feldmessungen und Rechnungen miteinander verglichen werden und konstatiert wird, die Messung habe die theoretisch ermittelten Werte "etwa" bestätigt.

Zusammenfassend muß man feststellen, daß die Prognose von Sprengerschütterungen auf der

Grundlage statistisch abgesicherter Abstands-Mengen-Beziehungen zwar möglich, aber wegen der verbleibenden großen Streubreite noch unbefriedigend ist. Aufgrund der großen Varianz können die Abstands - Lademengen - Beziehungen nicht so ohne weiteres zur Grundlage von Sprenggenehmigungen gemacht werden, wie schon in [5-3] bemerkt wurde. Denn ob man eine statistische Sicherheit von 50% oder 95% vorgibt kann beispielsweise bedeuten, daß die Lademenge auf etwa 1/4 reduziert oder das Einzugsgebiet etwa auf das Dreifache vergrößert wird.

Um mit flächendeckenden Erschütterungskatastern die Immissionen eines einzelnen Sprengbetriebes genauer abschätzen zu können, müßten umfangreiche Datenbanken eine differenzierende Schichtung nach Einflußparametern ermöglichen. Dies ist allein aus Kostengründen wegen der Vielzahl der Einflüsse nicht zu leisten, und es erscheint zweifelhaft, ob mit dem pauschalen Ansatz der Formel (5-1) noch entscheidende Verbesserungen zu erzielen sind.

5.2.3 Analyse und Synthese von Seismogrammen

Um Fortschritte zu erzielen müßte man neben den Spitzenwerten des Erschütterungssignals auch die Frequenzinhalte und die Einwirkungsdauern, d.h. die komplette Information eines Seismogramms für eine Prognose nutzen. Z.B. zeigt Bild 5.6 aus [5-4] die höherfrequenten Druckwellenanteile in der Anfangsphase und die tieffrequenten Oberflächenwellen in der Hauptphase des Seismogramms. Die Aufeinanderfolge unterschiedlicher Frequenz-Amplituden-Spektren ist für die Reaktion eines Gebäudes von Bedeutung und damit auch für die Schadensbetrachtung.Ein Vergleich der maximalen Schwinggeschwindigkeit von Raumwellen (30-50 Hz) und Oberflächenwellen (4-6 Hz) in 800 m Abstand zu Sprengungen zeigt in [5-5], daß Raumwellen im Freifeld etwa 5 fach stärker waren als die langwelligen Oberflächenwellen, daß letztere aber beim Übergang auf Fundamente nicht abgeschwächt wurden und infolge der Nähe zu Gebäudeeigenschwingungen eher eine Gefährdung darstellten als die stark abgeminderten Raumwellen.

Eine weitere Möglichkeit die Prognose zu verbessern wird von der BGR mit der Berechnung von synthetischen Seismogrammen eröffnet [5-17]. Das dabei verwendete hybride Modellieren ist eine Kombination von Geländemessung (Einzelschuß am Prognoseort) und Computersimulation (numerische Überlagerung für Bedingungen einer geplanten Großbohrlochreihensprenganlage). Mit dem gemessenen Quellseismogramm wird das Problem umgangen, die komplexe Entstehung und Ausbreitung im Gebirge zu modellieren. Freie Parameter in der

Simulationsrechnung sind die Zündverzögerungszeit und die Erschütterungswirksamkeit der einzelnen Bohrlöcher. Durch Optimierung der kontrollierbaren Zündzeitintervalle sollen die Sprengerschütterungen minimiert werden. Dieses Ziel kann aber nur durch eine sehr genaue Einhaltung des optimalen Verzögerungsintervalls von < 1 Millisekunde erreicht werden. Das Verfahren setzt eine neue Generation von Zündmitteln voraus und ist z.Zt. noch nicht praktisch anzuwenden.

Abschließend ist also für das Erstellen genauer Prognosen von gewerblichen Sprengerschütterungen der Trend zu einer verbesserten frequenzabhängigen Signalanalyse zu erkennen. Dies ist entscheidend im Hinblick auf das frequenzabhängige Strukturverhalten am Immissionsort.

Der Themenkomplex Schwingungsübergang vom Freifeld auf Fundamente und Reaktion von Gebäuden wird an dieser Stelle nicht gesondert für Sprengerschütterungen behandelt, sondern ist allgemein als transiente Immission in Kapitel 7 und 8 aufgenommen. Der Themenkomplex Schadensbetrachtung und Risikoabschätzung gehört nicht in den Rahmen der vorliegenden Studie. Allerdings ließen sich auch Risikoabschätzungen verbessern, wenn Ursache und Wirkung frequenzmäßig, d.h. das Resonanzverhalten von Strukturen und von Schadensbeziehungen genauer untersucht würde, wie dies in einigen Arbeiten in der USA getan wird [5-9,19,20,21].

6. TRANSMISSION ODER ERSCHÜTTERUNGSAUSBREITUNG

In der vorliegenden Studie sollen Prognosemöglichkeiten für die Situation "externer Quellen", d.h. Quellen und Immissionsbereich sind nicht direkt baulich miteinander verbunden, betrachtet werden. Als Übertragungsweg kommt demnach nur der Boden infrage, in dem der in Abschnitt 2.1 skizzierte Wellenausbreitungsvorgang stattfindet. Auf die Übergangs - oder Wechselwirkungsbereiche zwischen Baugrund und Fundamenten wird in Kapitel 7 näher eingegangen . Nachfolgend wird also der Wissensstand zur freien Wellenausbreitung im Boden sowohl für den Idealfall der Fernfeldausbreitung im homogenen Medium (Abschnitt 6.1), als auch unter Einbeziehung der in der Realität vorhandenen Einflußgrößen (Abschnitt 6.2) vorgetragen. Die resultierenden Amplituden - Abnahme - Gesetze, ihre Varianten bzgl. der dargestellten Größe und Anwendung werden diskutiert (Abschnitt6.3) und Hinweise zur Ermittlung von Bodenkennwerten aufgenommen (Abschnitt 6.4).

6.1 IDEALE ERSCHÜTTERUNGSAUSBREITUNG

6.1.1 Maßgebliche Wellen

Im Idealfall handelt es sich um ein homogenes, isotropes, ideal elastisches Ausbreitungsmedium, das als Vollraum oder häufiger als Halbraum vorliegt. Der aus der Seismik bekannte Sachverhalt der Wellenausbreitung, der in der hier untersuchten Literatur immer wieder aufgegriffen wird, z.B. [6-5a,17] und [4-3c], ist nur insofern kurz anzusprechen wie es zum Verständnis bestimmter realer Effekte dient.

Wesentlich komplexer als beim Luftschall wird die Schwingungsenergie im Boden durch:

- Raumwellen
  - Kompressionswellen (Druck-, Longitudinal-, P-Wellen)
  - Scherwellen (Transversal-, S-Wellen)

und

- Oberflächenwellen
  - Rayleigh-Wellen (R-Wellen)
  - Love-Wellen (L-Wellen)

transportiert, wobei die Verteilung der Energie im Raum und in der Fläche zu unterschiedlich schneller Abnahme der Schwingungsamplituden mit der Entfernung von der Quelle führt. In

Bild 6.1 werden einige Wellenformen veranschaulicht (a), die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten als Funktion der Poissonzahl (b) und die Abhängigkeit der Rayleigh - Wellenamplitude von der Eindringtiefe (c) graphisch dargestellt. Als Näherung darf man z.B. für nichtbindige, rollige Böden (ν = 0.25 bis 0.30) ein Verhältnis der Wellengeschwindigkeit von P- zu S- zu R-Welle wie 1,7 zu 1 zu 0,9 annehmen. Da die an eine Grenzschicht gebundenen Oberflächenwellen sehr schnell mit der Tiefe abnehmen, kann man in vielen Fällen der technischen Erschütterungsausbreitung im Fernfeld hauptsächlich die Rayleigh - Wellen als Energieträger im oberflächennahen Bereich registrieren. Dies konnte z.B. für Maschinen- und Verkehrserschütterungen mittels Fourier- und Korrelationsanalysen von Meßsignalen experimentell nachgewiesen werden [6-5a,6]. Seit langem ist auch in der Seismik das Beispiel der schwingenden Flächenlast auf der Halbraumoberfläche (Lamb'sches Problem) bekannt, die die eingeleitete Energie zu 2/3 als Rayleigh-Welle abstrahlt, nämlich P- zu S- zu R-Welle wie 7% zu 26% zu 67%.

6.1.2 Geometrische Amplitudenabnahme

Um die Ausbreitungscharakteristik der Erschütterungen, d.h. die Amplitudenabnahme mit der Entfernung zu bestimmen, gibt es die Möglichkeit der Energiebetrachtung, der Lösung der Wellengleichungen bei Punktquellen, das Superpositions- und das Wechselwirkungsverfahren für Linienquellen und starre Fundamente, auf die in [6-13] näher eingegangen wird. Es zeigt sich, daß die Ausbreitungscharakteristik im Idealfall abhängt von:

- o der Wellen- bzw. Ausbreitungsart
- o der Geometrie der Quelle
- o dem Zeitverlauf der Erregung.

Schreibt man die geometrisch bedingte Amplitudenabnahme der Schwinggeschwindigkeit v mit der Entfernung R von der Quelle in der üblichen Form

$$v = v_1 \cdot (R / R_1)^{-n} = G^* \cdot v_1 \qquad (6\text{-}1)$$

mit v_1 als Amplitude im Bezugsabstand R_1, dann sind für den Exponenten n die Werte der Tabelle 6.1 anzusetzen.

Die Exponenten n sind graphisch verarbeitet in den Abnahmekurven des normierten Scheitelwertes der Schwinggeschwindigkeit v / v_1 mit der Entfernung R / R_1 in Bild 6.2. Die

dargestellten geometrischen Abnahmekurven sind dem Norm-Entwurf [1-1] entnommen. Sie gelten im Fernfeld für $R>R_1$ bzw. $R>R_2$.

Zur Erhöhung der Exponenten n um $\Delta n = 0.5$ bei impulsartiger Erregung (z.B.Sprengung, Rammen) wird in [1-1] gesagt, daß dies in vielen praktischen Fällen zutreffe und in [6-13], daß diese zusätzliche Abnahme zunächst nur für die Maximalamplitude des zeitlichen Signalverlaufs gelte. Der quadratische Mittelwert werde die Abnahme mit $R^{-0.5}$ zusätzlich zur geometrischen Abnahme nur bei breitbandiger Erregung erfahren. Über Spekralanteile von Impulssignalen wird keine Aussage gemacht.

Eine analoge Darstellung mit physikalischen Ausführungsbeispielen in Bild 6.3 wird nach [6-2] modifiziert in [6-3] dargestellt. Sie ergänzt Tabelle 6.1 um den Sachverhalt, daß Raumwellen mit der Entfernung von der Quelle an der Oberfläche mit R^{-2} schneller abnehmen als im Rauminneren mit R^{-1}. Diese Angabe findet man auch in einem neuen ISO-Standard [1-6], wo hinzugefügt ist, daß Raumwellen von Linienquellen an der Oberfläche, die als Kompressionswellen und Scherwellen entlang der Oberfläche laufen dort mit R^{-1} abnehmen. Abnahmeexponenten n für die Ausbreitung in einer Schicht sind in Bild 6.8 zu finden.

Für die praktische Anwendung sollte der Näherungscharakter aller zuvor gemachten Angaben angemerkt werden. Es handelt sich um theoretische Herleitungen für den Idealfall des homogenen Bodens und der Existenz von nur einer Wellenart. Dieses Modell muß durch die nachfolgend beschriebenen realen Einflüsse ergänzt werden .

6.2 REALE ERSCHÜTTERUNGSAUSBREITUNG

6.2.1 Annäherung an den meßtechnischen Befund

Gemessene Amplituden - Abnahmen mit wachsendem Abstand zur Quelle zeigen in der Regel nicht allein den theoretischen Verlauf der geometrischen Abnahme. Die mögliche Schwankungsbreite der Erschütterungsabnahme von vielen Messungen des TÜV bei oberflächennaher Anregung zeigt Bild 6.4, das [6-5] entnommen ist. Zusätzlich eingetragen ist ein Diagramm einer japanischen Studie über Industrieerschütterungen [6-4], das die gleiche Tendenz der Streubreite aufweist, nämlich mit stärkeren Abnahmen als die Raumwellen (n = 1, d.h. -6dB / DD; DD = Abstandsverdopplung) und schwächeren Abnahmen als die RayleighWelle (n = 0.5, d.h. -3dB / DD).

Diese realen Amplituden-Abnahmen kann man nun auf zwei Wegen theoretisch bzw. analytisch annähern.

- o Schematisch werden Meßergebnisse mit optimalem Exponenten n, der häufig dann für verschiedene Abstandsbereiche zu modifizieren ist, angefittet, so daß die in Bild 6.5 gezeigten Muster aus [6-4] entstehen. Reale Abstandskurven aus [6-4] und [6-5] sind dem gegenübergestellt. Diese "Regressions" - Methode orientiert sich vor allem an der Art der beteiligten Wellen und an der Geometrie der Quelle. Ob eine gute Näherung der Meßwerte auf diese Weise auch eine sinnvolle physikalische Interpretation liefert muß offen bleiben.
- o Physikalisch werden zusätzlich zur geometrischen Ausbreitung nach Tabelle 6.1 bzw. [1-1] die Material - und Struktureigenschaften berücksichtigt und entweder analytisch formuliert oder durch empirische Faktoren eingebracht.

In den nächsten Abschnitten wird auf diese realen Abweichungen von der idealen Ausbreitung näher eingegangen.

6.2.2 Absorption

Zusätzlich zur geometrischen Amplitudenabnahme tritt in einem realen System eine Minderung der Erschütterungsamplituden durch Absorption der Schwingungsenergie im Boden auf. Als Materialdämpfung hängt die Absorption von den bodenmechanischen Eigenschaften ab. Diese Energieverluste sind Reibungsverluste infolge der Phasenverschiebung zwischen benachbarten Bodenteilchen. Es findet also eine Umwandlung in Wärme statt, auch Dissipation genannt. Üblicherweise geht man von diesem linear elastischen, hysteretischen Stoffverhalten des Bodens aus und beschreibt die Amplitudenabnahme infolge Dissipation durch

$$v = v_1 \cdot \exp\{-\alpha (R - R_1)\} = A^* \cdot v_1 \qquad (6\text{-}2)$$

mit dem Abklingkoeffizienten α [m^{-1}]. Die Formulierung von α als dimensionslose Größe α'

$$\alpha' = \lambda \alpha = 2 \pi D = \pi d_n = c \cdot \alpha / f \qquad (6\text{-}3)$$

mit λ als Wellenlänge, f als Frequenz, dem Dämpfungsgrad D bzw. dem Verlustfaktor d_n nach VDI 2062 [1-8] und der Wellengeschwindigkeit c ergibt die Amplitudenabnahme für eine auf die Wellenlänge normierte Entfernung zu

$$v = v_1 \cdot \exp\{-\alpha' (R-R_1) / \lambda\} = v_1 \cdot \exp\{-2\pi D (R-R_1) / \lambda\}. \qquad (6\text{-}4)$$

Für die relativ geringen Dehnungsamplituden technisch erregter Erschütterungen kann man nach [6-18b] den Dämpfungsgrad D als konstant ansehen. Er liegt für die verschiedenen Böden etwa zwischen 1% und 5% . In massivem Fels ist die Dämpfung noch schwächer (D = 0.2...1%). D bzw. d_n werden im allgemeinen für Scher- und Kompressionswellen gleich angenommen, was eine schwächere Amplitudenabnahme mit der Entfernung von Kompressionswellen gegenüber den Scherwellen zur Folge hat. Die Annahme gleicher Dämpfung für verschiedene Wellenarten könnte aufgrund bodenphysikalischer Vorgänge bei wassergesättigten Böden nicht richtig sein (siehe Abschnitt 6.2.3), genaue Kenntnisse liegen nicht vor.

In Tabelle 6.2 sind einige Zahlenwerte für α und α' sowie für die Wellengeschwindigkeiten als Anhaltswerte aus [6-3] und einige weitere Kennwerte aus der Literatur in Tabelle 6.3 aufgeführt. Auf eine Vervollständigung der Kennwerte aus der Literatur wird verzichtet, da eine große Streubreite zu verzeichnen ist und eine eindeutige Zuordnung zur Bodenart, den geologischen in-situ- Verhältnissen und der Ermittlungsart meistens nicht möglich ist. In Tabelle 6.2 wird deshalb ergänzend nur die für den Immissionsschutz typische Spannbreite dieser Kenngrößen ohne Anspruch auf Vollständigkeit und der Zusammenhang zwischen den in der Literatur verwendeten Dämpfungsgrößen genannt. Ein typisches Beispiel zum Vergleich der Amplitudenabnahme durch geometrische Faktoren und durch Absorption zeigt Bild 6.6 .

Als wichtig sollte nochmals hervorgehoben werden, daß der Dämpfungsgrad bzw. die Amplitudenabnahme infolge Absorption eine lineare Funktion der Frequenz ist, so daß dynamische Berechnungen dadurch wesentlich vereinfacht werden. Obwohl dies auch in [6-2] festgestellt wird, geben die gleichen Autoren an, daß diese dissipative Abschwächung, wenn man sie proportional zum Logarithmus der auf die Wellenlänge normierten Entfernung ansetzt, eine bessere Korrelation zu Meßwerten seitlich von Verkehrswegen aufweist und mit dem Faktor A^* aus [6-2] soll gelten

$$A^* = k \log \left[\frac{R-R_1}{\lambda} \right] . \qquad (6\text{-}5)$$

Der Faktor k liegt etwa zwischen 10 und 20 bei den üblichen Böden, d.h. zwischen Lehm und Sand. Es werden Interpretationen dieses Trends für nichtlineares und auch lineares Dämpfungsverhalten mitgeliefert. Letzteres könnte als Materialeigenschaft nach wie vor gelten, wenn für die gemessenen Effekte Struktureinflüsse (Schichten, Streuung etc.) maßgeblich sind.

Bessere Anpassungen an Meßwerte werden zuweilen auch dann erzielt, wenn die Dämpfungseigenschaften des Bodens nicht mit dem hysteretischen Stoffgestz beschrieben werden, sondern der Boden als Voigt - Kelvin - Körper mit einem linear visko - elastischen Stoffgesetz gekennzeichnet wird [6-18b]. Während das hysteretische Verhalten die Reibungsdämpfung in rolligen, nicht kohäsiven Böden beschreibt, können bei geringeren Verformungen in bindigen, kohäsiven Böden infolge der molekularen Bindungskräfte des Wassers viskose Vorgänge überwiegen. Damit würde der Dämpfungsgrad D frequenzabhängig und die Amplitudenabnahme infolge Absorption wäre eine quadratische Funktion der Frequenz. Das Voigt - Kelvin - Modell führte z.B. bei einer Untersuchung von Rammerschütterungen [4-52] zu einer besseren Übereinstimmung mit gemessenen Amplituden - Abstandskurven als das hysteretische Modell.

Für Prognoserechnungen von untergeordneter Bedeutung und deshalb nur in der Tendenz zu erwähnen ist die Abnahme des Dämpfungsgrades D mit wachsender Zahl der Belastungszyklen, mit wachsendem Druck und mit größerer Dichte des Bodens.

6.2.3 Wasser im Boden

Wasser in oberflächennahen Bodenschichten gehört zum realen Modell und fügt weitere Komplikationen zur idealen Ausbreitung hinzu. Zwei Effekte sind im Hinblick auf die Erschütterungsausbreitung zu betrachten:

- o der Wasser-Sättigungsgrad
- o der Grundwasserspiegel.

Sättigungsgrad:

In einem ungesättigten Boden (Dreiphasensystem) erfolgt die Schwingungsübertragung über das Korngerüst. Das Wasser im Porenvolumen erhöht lediglich die Dichte. In wassergesättigten Böden (Zweiphasensystem) steigt die P - Wellengeschwindigkeit stark an. Es gibt P - Wellen mit $c_p \approx 1500$ m/s, die über das Porenwasser, sowie P-Wellen, die mit einer anderen Geschwindigkeit über das Korngerüst laufen. Scherwellen sind dagegen nur schwach vom Sättigungsgrad beeinflußt.

Auf die Amplitudenabnahme hat der Sättigungsgrad folgenden Effekt: In trockenen Böden sind die Energieverluste am geringsten. Sie steigen jedoch mit dem Sättigungsgrad für P - und S -

Wellen an, wobei die P-Wellen-Verluste doppelt so hoch sind wie die S-Wellen-Verluste. Ab etwa 95% Wassersättigung nehmen die P-Wellen-Verluste infolge der drastisch ansteigenden Wellengeschwindigkeit auf weniger als ein Drittel der konstant bleibenden S-Wellen -Verluste ab [6-21]. Je nach Beteiligung von P-, S- und R-Wellen an dem Erschütterungsvorgang kann also vor allem ein hoher Sättigungsgrad über 95% eine merkliche Veränderung in der Ausbreitungsdämpfung bewirken.

Pauschal kann man voraussetzen, daß oberflächennahe Maschinen- und Verkehrserschütterungen mit eindeutiger R - Wellenausbreitung von einer Wassersättigung im Boden wenig betroffen sind, während Vorgänge mit P - Wellenausbreitung (Sprengungen, z.T. auch Rammen) bei Wassersättigung wesentlich schwächer gedämpft werden als im trockenen Boden und dann erhöhte Immissionen verursachen.

Grundwasserspiegel:

Ein Grundwasserspiegel wirkt auf die Wellenausbreitung wie eine Bodenschichtung, wobei der untere Halbraum in der Regel als wassergesättigt angenommen werden kann. Mit dem Grundwasserspiegel ändern sich auch die Wege bei der Wellenausbreitung.

Aus theoretischen FE-Rechnungen [6-13,18b,21] hat man folgende Kenntnisse gewonnen: Auf die Ausbreitung von R-Wellen (Scherverformung) hat das Grundwasser keinen entscheidenden Einfluß. In der Nähe der Erschütterungsquelle ($R \leq 4$ bis $5\ \lambda_R$) treten jedoch infolge der am Grundwasserspiegel reflektierten Raumwellen starke Interferenzen auf. Für größere Entfernungen von der Quelle ist normales Verhalten zu erwarten, wenn der Wasserspiegel tiefer als $0.1\ \lambda_R$ unter der Geländeoberkante liegt. Andere FE-Rechnungen ergeben für alle Grundwassertiefen eine Reduktion um ca. 20% gegenüber dem Halbraum ohne Grundwasser.

Insgesamt dürfte demnach der beobachtete Effekt, daß sich Erschütterungen im Grundwasser besonders gut ausbreiten, vornehmlich auf die P-Wellenausbreitung im quellnahen Bereich und auf die oben diskutierte geringere Dämpfung der P - Wellen zu beziehen sein.

Wenn im oberflächennahen Bereich das Bodenwasser gefriert, entspricht dies einer steiferen Deckschicht auf dem Halbraum. Die Ausbreitung von Oberflächenwellen in einem Bodenprofil mit einer gefrorenen Deckschicht von 0,6 bis 1,2 m wurde in [6-9] wie ein massiver Störkörper mit einer FE-Rechnung untersucht. Zum Ergebnis wird nur mitgeteilt, daß die Amplituden an der Oberfläche um den Faktor 3-4 schwächer abnehmen als theoretisch zu erwarten ist. Ferner

soll die Oberflächenwelle bei gefrorenem Boden theoretisch keine Amplitudenabnahme mit der Tiefe mehr aufweisen. Eine experimentelle Bestätigung steht noch aus.

6.2.4 Inhomogenität

Den in Abschnitt 6.1 behandelten idealen Halbraum gibt es in der Realität nicht. Nicht nur Materialdämpfung und Bodenwasser, sondern auch die natürlich vorgegebenen Strukturmerkmale wie Inhomogenitäten, Schichtung und Schieferung (Anisotropie) mit horizontalen und geneigten Grenzflächen, sowie die Veränderung der Bodenkennwerte mit der Tiefe führen zu Abweichungen und Komplikationen gegenüber dem Idealverhalten.

Für die kontinuierliche Veränderung der Bodenkennwerte in einem Halbraum ohne ausgeprägte Schichten ist nur soviel bekannt, daß der Elastizitätsmodul und Schubmodul für Scherwellen mit der Tiefe linear zunimmt und bei allseitig gleichem Bodendruck die Wellengeschwindigkeiten c_S und c_P mit der 4. Wurzel von der Tiefe z abhängen [6-18a]. Allgemein gültige Ansätze existieren nicht [6-11]. Zur Beschreibung der Baugrund-Fundament-Wechselwirkung verwendet man z.B. Ersatzgrößen wie den Schubmodul in "repräsentativer" Tiefe.

Sind im Ausbreitungssystem Schichten mit unterschiedlichen Dichten und Wellengeschwindigkeiten vorhanden, oder wird in einer bestimmten Tiefe der Halbraum von einer steifen Schicht oder dem Grundwasserspiegel begrenzt, dann treten komplizierte Vorgänge der Reflexion, Brechung und Umwandlung von Raumwellen auf. Es bilden sich neue Wellentypen wie polarisierte Scherwellen, Love-Wellen in Schichten und dispergierende Pseudo-Rayleigh-Wellen, die schneller als mit 1/R abnehmen. Raumwellen, die in eine Schicht mit größeren Wellengeschwindigkeiten eindringen, werden bei einem bestimmten Einfallwinkel als kritisch refraktierte Wellen an die Oberfläche zurückgeführt. Trotz des längeren Ausbreitungsweges treffen sie ab einer bestimmten Entfernung von der Quelle als sogenannte Kopfwellen vor den direkten Wellen am Beobachtungspunkt ein und verstärken damit die Erschütterungen (Bild 6.7). Aufgrund der Interferenzen derartig verschiedener Wellensysteme ist eine einfache monotone Amplitudenabnahme mit der Entfernung nicht mehr zu erwarten. Damit ist in komplex aufgebauten realen Böden auch eine angenäherte analytische Beschreibung der Ausbreitung nicht mehr möglich.

Einzelne meßtechnische Befunde geben zuweilen einen Einblick in eine spezifische Situation, z.B: der Effekt der Anisotropie des Gebirgsaufbaus, der im Kapitel Sprengerschütterungen mit

Tabelle 5.2 die unterschiedliche Amplitudenabnahme parallel und quer zur Schichtung aufzeigt. Einen weiteren Hinweis gibt [6-8], wo für die Sprengerschütterungen die Ausbreitungsformeln (6-1) für die geometrische Dämpfung und (6-2) für die Materialdämpfung verwendet und große Schwankungen der Exponenten n und α als Dämpfungswerte für verschiedene Gebirgsarten in der BRD aufgelistet werden.

Im allgemeinen ist in geschichteten Böden die Wellenausbreitung nur mit FE-Modellen näherungsweise zu beschreiben. Neben den charakteristischen Kennwerten Schubmodul G, Querkontraktionszahl ν und Dichte ρ kommt für die Schicht als vierter Parameter die Dicke H der Schicht hinzu. Bereits an dem einfachen Modell der homogenen Schicht (statt Halbraum) erkennt man, wie die Rayleigh-Welle von der dispergierten Pseudo-Rayleigh-Welle (c_R hängt von der Frequenz ab) ersetzt wird. Während Halbraumlösung und Schichtlösung für hohe Frequenzen ineinander übergehen, gibt es im langwelligen Bereich nach [6-7] eine Grenzfrequenz

$$f_g = h(\nu)\,\frac{c_s}{2H} \qquad \text{mit} \qquad h(\nu=0.25) = 0.86 \tag{6-6}$$

unterhalb der keine Pseudo-Rayleigh-Welle mehr existiert. Die elastische Schicht zeigt demnach eine scharfe Filterwirkung, und Frequenzen unterhalb f_g werden nicht weitergeleitet.

In [6-7] werden die theoretischen Amplitudenabnahmen mit der Entfernung in einer Schicht für die harmonische und impulsartige Erregung untersucht und Hinweise zum Abnahmeexponenten n gegeben (Bild 6.8). Abschließend wird für die Schicht in [6-7] ausgeführt, daß die harmonische Erregung nahe der Resonanzfrequenz f_g zu erhöhten Erschütterungen führt, die außerdem noch über einen Abstand $R \approx 4H$ von der Quelle etwa konstant bleibt. Bei einer Impulserregung, die in der Schicht mit dem Abstand wie im Halbraum abnimmt, ist allerdings ein längeres zeitliches Nachschwingen zu verzeichnen. Verzögert einsetzende Verstärkungen und Nachschwingen werden in [7-4] nicht mit Hilfe von FE-Rechnungen, sondern mit Hilfe eines Randelement-Verfahrens direkt im Zeitbereich untersucht und nachgewiesen (Bild 7.1).

6.2.5 Künstliche Störungen im Boden

Natürliche und künstlich Inhomogenitäten im Boden verändern in gleicher Weise die Fortpflanzungsbedingungen der Bodenschwingungen und verursachen Wellenumwandlungen, -brechungen und -reflexionen. Wenigen experimentellen Hinweisen aus Feldversuchen stehen einige theoretische Untersuchungen mit Hilfe von FE-Rechnungen zum Einfluß von Störkörpern und zur Abschirmung durch Schlitze gegenüber, deren Bestätigung z.T. im Labormodell, bisher

jedoch noch nicht im Feldversuch gelungen ist. Alle vorliegenden Kenntnisse zu diesem Punkt gehen von der Erschütterungsausbreitung durch Oberflächen- bzw. Rayleigh-Wellen aus.

Aus Feldmessungen läßt sich ableiten, daß eine Schichtgrenze vor allem die horizontale Schwingungskomponente in Ausbreitungsrichtung beeinflußt. Dies kann physikalisch durch das Kippen der Rayleighwellen-Ellipse infolge von Phasenverschiebungen erklärt werden [6-5a]. Dieser Effekt dürfte auch das Ergebnis einer Felduntersuchung zum Einfluß einer tief gegründeten Straße auf die quer dazu verlaufende Erschütterungsausbreitung beeinflussen. Die Störung durch den Straßenkörper führte zu einer Reduzierung der vertikalen Schwingungskomponente um etwa 1/3 bei gleichzeitigem Anstieg der horizontalen Schwingungskomponente um 2/3 gegenüber der Ausbreitung im ungestörten Gelände [6-24].

Mit FE-Rechnungen wurde der Einfluß von künstlichen Störungen wie Damm, Einschnitt und Schlitze auf die Erschütterungsausbreitung untersucht. In [6-25] wird gezeigt, daß die Erregung auf einem Damm und im Einschnitt im Fernfeld zusätzlich eine Amplitudenabnahme von etwa 1/4 für einen breiteren Frequenzbereich bewirkt. Zu Störkörpern im Inneren des Bodens, z.B. Kanäle, Leitungen, wird ausgeführt, daß sie nur dann einen abschwächenden Einfluß auf die Ausbreitung im Fernfeld haben, wenn die geometrischen Abmessungen wie Tiefenlage und Größe etwa der Wellenlänge entsprechen.

Zur Abschirmung von offenen Schlitzen bzw. massiven Einbauten wird in [6-18a] ausgeführt, daß die Wirkung nicht von der Querschnittsform, sondern nur von der auf die Wellenlänge λ_R bezogenen Querschnittsfläche B(reite) * T(iefe) abhängt. In Bild 6.9 aus [6-18a] wird für das Modell "Beton im natürlichen Boden" der Reduktionsfaktor als Funktion der bezogenen Querschnittsfläche

$$\bar{\alpha} = \frac{BT}{\lambda_R^2} \qquad (6\text{-}7)$$

dargestellt und die Wirkung im Nahfeld zu Fernfeld ins Verhältnis gesetzt. Daneben wird mit zwei Skizzen anschaulich gemacht, wie ein tiefer, schmaler Störkörper vor allem durch Abstrahlung in den Halbraum und eine breite, flache Platte vor allem durch Interferenzerscheinungen hinter dem Störkörper eine Minderung der Amplituden an der Oberfläche bewirken. Weitere Aussagen sind: Störkörper im Nahfeld einer Oberflächenquelle schirmen besser ab als im Fernfeld, was sich mit der Wirkung von Schallschirmen in der Akustik deckt. Höhere Steifigkeiten als das gewählte Material Beton zeigen keine Verbesserung. Weiches, leichtes Material hat als breite, flache Platte eine stärkere Wirkung als Beton. Diese Wirkungen

beruhen letztlich auf die Beeinflussung der Wellengeschwindigkeit über den Elastizitätsmodul.

In einer neueren Arbeit [7-17] wird die Schirmwirkung von Schlitzen für vertikale und horizontale Erregung und Oberflächenschwingungen im Nah- und Fernfeld der Quelle mit Hilfe der Randelement-Methode im Frequenzbereich untersucht.

Für eine Immissionsprognose stellt sich auch die praxisnahe Frage, ob durch die Schirmwirkung störender Einbauten im Boden bereits innerhalb großflächiger Industrieanlagen und Produktionshallen mit vielen Fundamenten die Erschütterungsamplituden zusätzlich reduziert werden können. Dynamisch beaufschlagte Fundamente erzeugen ein primäres Wellenfeld, das die Nachbarfundamente beeinflußt und diese zur Erzeugung von sekundären Wellenfeldern anregt. Diese Wechselwirkung zwischen Fundamenten wird z.B. in [7-4,5,8,18] untersucht. Es wird qualitativ ein Einfluß von Fundamentgruppen auf die Wellenausbreitung in der freien Oberfläche durch die Sekundärwellen sowie die Existenz der "Absorptionsfähigkeit" nachgewiesen. Quantitative Ergebnisse aus Felduntersuchungen sind in der Literatur nicht zu finden. Den ersten Hinweis einer zusätzlichen inneren Abschirmung von etwa -10dB durch betriebseigene Fundamente bei Ausbreitungsmessungen von Hammererschütterungen wurde in [6-3] erwähnt. Überprüft man diesen Befund in grober Näherung anhand der Formel (6-7) und Bild 6.9, so erhält man mit den spezifischen Betriebsdaten der betreffenden Gesenkschmiede (11 Hammerfundamente auf 40 m Hallenlänge, d.h. auf Hallenmitte bezogen ist B≈20m, Fundamenttiefe T ≈ 3m, gemessene Wellenlänge λ_R = 10m) ein $\bar{\alpha}$ = 0.6 und einen Reduktionsfaktor durch Abschirmung von ≈ 0,4 oder -8dB. Obwohl die gute Übereinstimmung von Messung und Abschätzung mehr zufällig sein dürfte, scheint nach diesem Vergleich die Berücksichtigung "innerer Dämpfungen" bei großflächigen Emittenten in praxisbezogenen Prognosen angezeigt zu sein. Der Wissensstand hierzu sollte verbessert werden.

6.3 AUSBREITUNGSMODELLE

6.3.1 Eingeführte Amplituden-Abnahme-Formeln

Die in den letzten Abschnitten diskutierten Effekte kann man wie folgt zusammenfassen. Die reale Wellenausbreitung im Boden findet nur sehr selten in einem homogenen Halbraum statt, dafür um so häufiger in einem inhomogenen, anisotropen und oft mit störenden Einbauten durchsetzten Untergrund, dessen Eigenschaften im Hinblick auf den Wasser-Sättigungsgrad und

Grundwasserspiegel auch noch im Verlaufe der Zeit schwanken können. Normalerweise kann bei Kenntnis der Art der Quelle und der Wellenart die geometrische Dämpfung und bei Kenntnis der dynamischen Kennwerte des Bodens die Materialdämpfung (Absorption) formuliert werden. Diese Effekte sind in der Regel mehr oder weniger überlagert von den strukturell bedingten zusätzlichen Energieverlusten der Oberflächenwellen durch Abstrahlung in den Halbraum infolge von Wellenbrechung, -umwandlung und Reflexion (Anisotropie). Darüberhinaus werden in ausgeprägt geschichteten Böden durch die Frequenzabhängigkeit der Wellengeschwindigkeit (Dispersion) die Schwingungsamplituden in doppelter Weise beeinflußt. Einerseits bewirkt die Führung der Wellenenergie in der Schicht niedriger Wellengeschwindigkeit eine geringere Amplitudenabnahme als im Halbraum, andererseits zerfließt der Wellenzug aufgrund der verschiedenen Gruppengeschwindigkeiten während der Ausbreitung, er wird länger und die Maximalamplituden werden stärker reduziert als das normalerweise der Fall ist.

In entsprechenden Böden treten die genannten Einflüsse gleichzeitig auf, und die reine Materialdämpfung läßt sich nicht mehr isoliert betrachten. Dies bedeutet in der Regel, daß in realen Böden die Amplituden mit der Entfernung von der Quelle stärker reduziert werden, als es die reine Geometrie- und Materialdämpfung erwarten lassen. Phänomenologisch besitzt der reale Boden also einen höheren "Absorptionskoeffizienten" als der homogene Voll- oder Halbraum.

Normalerweise geht man bei der Formulierung der Erschütterungsausbreitung bzw, Transmission von einer monotonen Amplituden-Abnahme mit wachsendem Abstand zur Quelle aus. Dies darf nicht erwartet werden im Nahbereich der Quelle für $R<R_1$ (R_1=Bezugsabstand) und in heterogenen bzw. geschichteten Böden im mittleren Abstand von 4 bis 5 Wellenlängen. Ebenso ist die P-Wellenausbreitung in wassergesättigten Böden gesondert zu betrachten. Wegen dieser Voraussetzungen hat sich in der Literatur auch eine differenzierte analytische Formulierung herausgebildet. Für die mehr oberflächennahen Maschinen- und Verkehrserschütterungen überwiegt die R-Wellenausbreitung in flachen, relativ homogenen Bodenbereichen. Im Ausbreitungsgesetz ist deshalb eine Trennung nach Geometrie- und Materialdämpfung mit den Exponenten n und α' näherungsweise möglich. Zusammengefaßt ergeben (6-1) und (6-4) das häufig verwendete Abstandsgesetz

$$v = v_1 \left[\frac{R}{R_1} \right]^{-n} \cdot \exp \left[-\alpha' \frac{R-R_1}{\lambda} \right] = v_1 G^* A^*. \qquad (6\text{-}8)$$

Für die räumliche Ausbreitung von Sprengerschütterungen mit einem Gemisch von P -, S - und R - Wellen in einem stark inhomogenen Boden sind die verschiedenen Effekte nicht mehr

auseinander zu halten. Man bevorzugt eine summarische Darstellung nur durch einen abstandsbezogenen Exponenten m

$$v = v_1 \left[\frac{R}{R_1} \right]^{-m} \qquad (6\text{-}9)$$

oder das sogenanntes Abstand-Lademengen-Gesetz (siehe Abschnitt 5.2.1) in der Form

$$v = k\ L^b\ R^{-m} \quad . \qquad (6\text{-}10)$$

Mit den Formeln (6-8) und (6-10), die unter den oben genannten Voraussetzungen als Näherungen anzuwenden sind, wird auch der Wissensstand im Norm-Entwurf der DIN 4150 [1-1] festgehalten.

In Anlehnung an die in der Akustik üblichen Pegelschreibweise lassen sich die Abstandsformeln umschreiben. Mit dem Schwinggeschwindigkeitspegel $L_v = 20 \cdot \lg (v / v_0)$ und dem Bezugswert $v_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ mm/s erhält man dann nach (6-8):

$$L_v\ [\text{dB re } v_0] = 20 \log \left[\frac{v_1}{v_0} \right] - 20\ n \log (R\text{-}R_1) - 8.7\ \alpha' \frac{(R\text{-}R_1)}{\lambda} \qquad (6\text{-}11)$$

und (6-9) schreibt sich - wiederum nicht dimensionsrein -

$$L_v\ [\text{dB re } v_0] = 20\ [\ \log k + b \log L - m \log R\ ] + 66 \quad . \qquad (6\text{-}12)$$

Es gelten die bereits früher gegebenen Definitionen der verwendeten Größen. Die vorgenannten Abstandsformeln beziehen sich nach allgemeinem Verständnis auf die Maximalwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden, andere Darstellungsweisen werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

Während das Abstands-Lademengen-Gesetz (6-10) nur den Amplitudenwert abschätzt, nimmt die Ausbreitungsformel (6-8) zumindest Bezug auf die maßgebliche Frequenz bzw. Wellenlänge der Emission, d.h. sie geht von einer sinusförmigen Erregung aus. Über $\lambda = c/f$ kann man verschiedene Frequenzen diskret berücksichtigen.

6.3.2 Analytische Erweiterungen

6.3.2.1 Inkohärente Linienquellen und Dämpfungen

Entgegen dem Trend in praktischen Anwendungen obiger Formeln, alle Dämpfungen durch Anpassung in den Exponenten des geometrischen Terms hineinzupacken, konnte nur in zwei Arbeiten der Versuch einer erweiterten analytischen Anwendung von (6-8) festgestellt werden.

In [6-11] wird für eine Reihe von n gleichzeitig einwirkenden, unabhängigen Punktquellen, d.h. für eine inkohärente Linienquelle der Länge L (z.B. Zug) eine mittlere Dämpfung a_0 für die Entfernung R eingeführt mit

$$a_0(R,\alpha) = e^{-\alpha r_0} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e^{-\alpha r_i} = \frac{e^{-\alpha R} - e^{-\alpha r_1}}{(r_1 - R)} \qquad (6\text{-}13)$$

worin r_1 die Entfernung des Bezugspunktes zum Ende der Linienquelle bei symmetrischer Stellung und r_i die direkte Entfernung zu den einzelnen Punktquellen ist. Der Absorptionsterm lautet dann in der Schreibweise von (6-8) nach [6-11]:

$$H(R,\alpha) = \exp[-\alpha\,(R-R_1)] = \frac{a_0\,(R,\alpha)}{a_0\,(R_1,\alpha)} \cdot \frac{1}{(1-0.4\sqrt{\alpha})} \qquad (6\text{-}14)$$

Es wird allerdings nicht deutlich ausgedrückt, für welche Abstände R eine gute Abschätzung zu erzielen ist.

6.3.2.2 Normalverteiltes Emissionsspektrum

In [6-5a/b,6] wird theoretisch aus den Wellengleichungen abgeleitet, wie die für eine Sinuserregung geltende Formel (6-8) zu ergänzen ist, wenn sich ein breiteres Emissionsspektrum vom Bezugsabstand R_1 aus im Fernfeld ausbreitet. Für die Berechnungen wurde - gestützt auf die Meßdaten für relativ homogene Bodenverhältnisse - als Vereinfachung ein dispersionsarmes Medium, ein lineares Phasenspektrum der Quelle und ein Amplitudenspektrum in Form einer Normal- bzw. Gaußverteilung nach

$$A(R_1,\omega) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left[\frac{-(\omega-\omega_0)^2}{2\sigma^2}\right] \qquad (6\text{-}15)$$

angenommen. Damit erhält das Abstandsgesetz (6-8) zu

$$v = v_1 \left[\frac{R}{R_1} \right]^{-n} \cdot \exp \left[-\omega_0 \frac{\alpha'}{2\pi c} (R-R_1) + \frac{\sigma^2}{2} \cdot \left[\frac{\alpha'}{2\pi c} \right]^2 (R-R_1)^2 \right], \qquad (6\text{-}16)$$

in dem lediglich der zweite Exponentialterm zu (6-8) hinzuzufügen ist. Das normalverteilte Emissionsspektrum besitzt die Zentralfrequenz $\omega_0=2\pi f_0$ und die Breite σ. Der neuartige Term der Form exp [β $(R-R_1)^2$] beschreibt die Ausbildung eines diffusen "Streuhintergrundes" als Folge der Bodeninhomogenität. Da er mit der Entfernung von der Quelle ansteigt muß die Wirkung aus Energieerhaltungsgründen räumlich begrenzt werden. Zwei Voraussetzungen, die in Bild 6.10 veranschaulicht sind, sind zu erfüllen:

- o die Breite σ ist klein gegen die Zentralfrequenz ω_0, d.h.

$$1 \ll \frac{1}{2} \left[\frac{\omega_0}{\sigma} \right]^2 \qquad (6\text{-}17)$$

- o der erlaubte, auf die Wellenlänge λ_0 bezogene Abstandsbereich ist begrenzt durch

$$\frac{(R-R_1)}{\lambda_0} \ll \frac{1}{\alpha'} \left[\frac{\omega_0}{\sigma} \right]^2 . \qquad (6\text{-}18)$$

Die Anwendung von (6-16) zur Abschätzung der Amplitudenabnahme von Hammererschütterungen in einem fast dispersionsfreien Boden bringt unter Ansatz von n = 0.5, $\omega_0 / \sigma \approx 5$ und $\lambda_0 \approx 13$ m eine gute Näherung zu den Meßwerten [6-5a]. Der gültige Abstandsbereich liegt im Fernfeld und wird durch die Kennwerte des Bodens (α', c) und des Spektrums (ω_0, σ) maßgeblich bestimmt. Er entspricht mit einigen hundert Metern durchaus den realistischen Reichweiten technisch erregter Erschütterungen. In [6-5a] wird auf die Erweiterung von (6-16) durch Approximation eines beliebigen Emissionsspektrums durch eine Summe von Gaußfunktionen mit verschiedenen Amplitudenhöhen, Zentralfrequenzen und Breiten hingewiesen. Einziger freier Parameter bliebe nach wie vor die Absorptionskonstante α'. Weitergehende Untersuchungen unter Einbeziehung der Dispersion, des Einflusses von Wellentyp, der Geometrie und der Kohärenz der Abstrahlung auf die Ausbreitung werden angeregt.

6.3.2.3 Berücksichtigung der Wellenarten

In [6-14,17] wird die aus der Wellengleichung für den klassischen Halbraum resultierende Verschiebung eines Bodenteilchens in radialer und vertikaler Richtung als eine Kombination der Verschiebungskomponenten der P -, S - und R - Welle aufgefaßt. Die übliche Lösung, die der

Formel (6-8) entspricht, wird in der Form

$$u_{P,S,R} = \frac{A(\omega)}{r^n} \exp\left[i\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \exp(-\alpha r) \qquad (6\text{-}19)$$

analysiert, mit den von der Wellenart abhängigen Größen Exponent n_i (R-Welle n=0,5; P- und S-Welle n=2), Wellengeschwindigkeit c_i, Absorptionskoeffizient α_i und Amplitude $A(\omega)_i$. Die den Boden kennzeichnenden Wellengeschwindigkeiten c_i und die Dämpfungsparameter α_i (mit i=P,S,R) sind als Verhältniswerte in Abhängigkeit der Querkontraktionszahl ν in Bild 6.11 graphisch aufgetragen und zwar für verschiedene Qualitätsfaktoren $Q = 1/2D = \omega / 2c_i\alpha_i$, D=Lehrsche Dämpfung. Die Kurven genügen für den Übergang von einer Geschwindigkeit zur anderen; von c_i ausgehend läßt sich α_i berechnen und davon sind die restlichen Dämpfungen abzuleiten.

Es wird darauf hingewiesen, daß das in der Literatur i.a. angenommene Übergewicht der Oberflächenwelle mit 67% nicht unbedingt richtig ist. In [6-15] wird z.B die Ausbreitungsdämpfung an Schienenverkehrswegen mit verschiedenen Energieaufteilungen zwischen R - und P - Wellen theoretisch angenähert. Und [6-17] berichtet von der relativ besten Anpassung von Schienenverkehrserschütterungen (Korrelationen zwischen 0,96 und 0,77) durch folgendes Verhältnis γ / γ_0 der Bewegungen bzw. Beschleunigungen an zwei Punkten im Abstand r_0 und r mit

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = A_0 + \frac{A_P}{r^2} \exp(-\alpha_P r) + \frac{A_S}{r^2} \exp(-\alpha_S r) + \frac{A_R}{\sqrt{r}} \exp(-\alpha_R r) \qquad (6\text{-}20)$$

6.3.3 Pauschale Ergänzungen

Will man die Erschütterungsausbreitung mit den genannten analytischen Formeln abschätzen, so ist die Möglichkeit realer Bodeneinflüsse im Einzelfall zu prüfen. Auf einige pauschale Korrekturen und Hinweise, die sich aus den vorangegangenen Kapiteln ergeben und keineswegs erschöpfend sein können, soll aufmerksam gemacht werden.

- Bei Ausbreitung von und innerhalb großflächiger Strukturen mit künstlich gestörtem Baugrund kann eine zusätzliche "innere Dämpfung" nach [6-3] mit einem Faktor k_i in (6-8) berücksichtigt werden; $k_i \approx 0.1$ bis 1.0 bzw. 20 log $k_i \approx 0$ bis -10dB.
- Durchlaufen Oberflächenwellen eine geneigte (vertikale) Schichtgrenze, dann kann dies nach meßtechnischer Erfahrung eine Verstärkung der horizontalen Schwingungskom-

ponenten in Ausbreitungsrichtung von 40 bis 50% und eine Reduzierung der vertikalen Komponenten von 20 bis 30% bewirken [6-5a,24].

- Bei ausgeprägter Schieferung eines Gebirges kann der Entfernungsexponent m in (6-10) um einen Anisotropiefaktor von 0.4 bis 1.0 zwischen paralleler und senkrechter Ausbreitung zur Schichtung schwanken [6-8].
- Wird eine weiche Schicht auf steifem Untergrund technisch zu Schwingungen anregt, dann sind deutlich größere Erschütterungen zu erwarten gegenüber der identischen Erregerquelle auf steifem Grund. Eine Verstärkung um das Fünffache konnte z.B. im Vergleich gewachsener Boden zu aufgeschütteter, verdichteter Deponie gemessen werden [6-5a].
- Böschungskanten können in Resonanz angeregt werden und lokal begrenzt überhöhte Schwingungen aufweisen. Als Meßpunkte zur Ermittlung von Ausbreitungsdämpfungen sind diese Stellen nicht geeignet.

6.3.4 Darstellungsformen

6.3.4.1 Physikalische Größe und Schwingungsrichtung

Abnahmegesetze der Form (6-8),(6-10) und (6-19) beschreiben die Erschütterungsausbreitung im Boden anhand der Maximalamplituden des zeitlichen Verlaufs eines Schwingungssignals. Als Lösung der Wellengleichung ist zunächst der Verschiebungsvektor eines Bodenteilchens, d.h. der Schwingweg u gegeben [6-5a,13,17]. Für die abgeleiteten physikalischen Größen Schwinggeschwindigkeit $\dot{u}$ (=v) und Schwingbeschleunigung $\ddot{u}$ ändert sich zwar die frequenzunabhängige geometrische Abnahme $\sim R^{-n}$ nicht, dafür aber die frequenzabhängige Abnahme infolge Absorption $\sim \exp(-\alpha' R/\lambda)$ wegen der Unterscheidung jeweils um den Faktor ω der Kreisfrequenz. Geht man z.B. von einer breitbandigen Erregung mit einem konstanten Wegspektrum u aus dann läßt sich über den quadratischen Mittelwert von u, $\dot{u}$ und $\ddot{u}$ einfach zeigen [6-13], daß der Absorptionsterm eine unterschiedliche Amplitudenabnahme für die Größen

$$|u| \sim R^{-0.5} \; ; \qquad |\dot{u}| \sim R^{-1.5} \; ; \qquad |\ddot{u}| \sim R^{-2.5} \tag{6-21}$$

zusätzlich zur geometrischen Abnahme bewirkt. Obige Abnahmegesetze können also nur für die zugehörige physikalische Größe gelten. Dies wird wegen der Anpassung an Meßwerte in der Regel die bevorzugte Größe der Schwinggeschwindigkeit sein.

Im Hinblick auf die meßtechnische Praxis muß man fragen, wie die Abnahmegesetze auf die Schwingungskomponenten in den üblichen drei orthogonalen Meßrichtungen anzuwenden sind. Außer der mehr physikalischen Berücksichtigung der Wellenarten mit ihren bevorzugten Schwingungsrichtungen (Abschnitt 6.3.2.3) konnte in der Literatur keine unmittelbare Unterscheidung der Abnahmegesetze nach Richtungskomponenten gefunden werden. Allerdings ist ein starkes Übergewicht der vertikalen Schwingungskomponente festzustellen, für die - oft nicht explizit angegeben - die Abnahmeformeln gelten. Aus einer Vielzahl von meßtechnisch ermittelten Abnahmekurven wird in [6-5a] das Resümee gezogen, daß sich die Ausbreitungsdämpfung der Scheitelwerte oberflächennaher Quellen unterschiedlich für die drei Schwingungsrichtungen

x = horizontal quer zur Ausbreitungsrichtung (überwiegend Scherwelle)
y = horizontal in Ausbreitungsrichtung (überwiegend Rayleigh-Wellen-Komponente)
z = vertikal (überwiegend Rayleigh-Wellen-Komponente)

erweist. In allen Fällen begrenzter Quellengeometrie nehmen v_x und v_z stärker als $R^{-0.5}$, zum Teil stärker als R^{-1} ab. Noch schwächer nimmt v_y ab, und obwohl in der Emission oft wesentlich kleiner als v_z, kann v_y ab 100 m bis 150 m Abstand von der Quelle die v_z-Komponente übertreffen. Während v_y und v_z als Komponenten derselben Bodenbewegung (retrograde Rayleigh-Wellen-Ellipse) miteinander verknüpft sind und eventuell ihre Resultierende das beste Maß darstellen könnte, ist davon unabhängig die Scherwellenkomponente v_x in der Regel als der schwächste und als ein oft vernachlässigbarer Schwingungsanteil einzustufen.

Diese Differenzierungen werden in der DIN 4150 [1-1] nicht angesprochen. Die dort zur Abschätzung angegebene Formel (6-8) gilt für die "Abnahme der Schwinggeschwindigkeit v ", d.h. weder die Amplitudengröße noch die Schwingungsrichtung sind erwähnt. Es ist nicht zu erkennen, ob damit eine allgemeinere Anwendung dieser Näherungsformel als zulässig angenommen wird. Eine Präzisierung wäre wünschenswert.

6.3.4.2. Mittelwerte und Fraktile

Außer dem bereits behandelten zeitlichen Maximalwert können als mögliche Amplitudengrößen, für die ein Abnahmegesetz formuliert ist, auch in Frage kommen:

- quadratische Mittelwerte des zeitlichen Schwingungsverlaufs (Effektivwert, RMS-Wert),
- spektrale Anteile bzw. einzelne Frequenzen,

o verschiedene Fraktile einer Häufigkeitsverteilung

Als ein Ergebnis der Literaturstudie ist festzuhalten, daß es keine analytische Formulierung eines Abnahmegesetzes für eine der genannten Größen gibt. In [6-5a,13] wird auf Zusammenhänge zwischen Maximalwerte und Effektivwerte und zum Spektrum der Schwingung hingewiesen. Da wegen der Materialdämpfung Abnahmegesetze frequenzabhängig sind, gilt für den quadratischen Zeitmittelwert ein gemitteltes Abnahmegesetz, in dem die einzelnen Anteile entsprechend dem Frequenzinhalt der Erregung gewichtet sind. Bei Dominanz einer Frequenz ist das Abnahmegesetz im Zeit- und Frequenzbereich gleich. Ein theoretisches Beispiel für die Abnahme einer breitbandigen Erregung in ihren Frequenzanteilen und im Effektivwert zeigt Bild 6.12 aus [6-13]. Ein experimentelles Beispiel für die unterschiedliche Abnahme von Spitzenwerten und Effektivwerten einer breitbandigen Erregung zeigt Bild 6.13 aus [6-5a]. Die Amplitudenabnahme der Mittelwerte ist schwächer gedämpft als die Abnahmekurve der Spitzenwerte (siehe auch Abschnitt 6.1.2, vorletzter Absatz).Theoretisch ist allerdings nach [6-5a] für monofrequente Signale und schmalbandige Gaußspektren eine identische Amplitudenabnahme mit dem Abstand für Effektivwerte und Spitzenwerte zu erwarten. Erst für den Ansatz eines beliebigen breitbandigen Erregerspektrums, das durch eine Summe von verschiedenen Gaußspektren approximiert werden kann (siehe Abschnitt 6.3.2.2), wird die Abstandsabnahme von Spitzen - und Effektivwerten im allgemeinen verschieden und nur für größere Abstände stimmen sie asymptotisch überein.

Als weitere Amplitudengrößen eines Abnahmegesetzes sind z.B. die Überschreitungsfraktile einer Summenhäufigkeitsverteilung denkbar, wenn eine Prognose anhand statistischer Erschütterungsgrößen durchzuführen ist. Dieses Vorgehen bietet sich bei der Behandlung stark schwankender Erschütterungen an, die infolge vieler Einflußparameter nicht mehr analytisch beschreibbar sind (z.B. Sprengerschütterungen). Theoretische Arbeiten zum Ausbreitungsverhalten statistischer Größen konnten mit der Recherche nicht aufgefunden werden. Zur statistischen Auswertung von Sprengerschütterungsmessungen sind Hinweise in Abschnitt 5.2.2 zu finden.

Für verschiedene Maschinen- und Verkehrserschütterungen und für unterschiedliche Abstände zur Quelle wird nur in [6-5a] die Summenhäufigkeit gemessener Schwinggeschwindigkeitsamplituden gebildet und die Überschreitungshäufigkeit graphisch dargestellt. Der in Bild 6.14 wiedergegebene Vergleich einer stationären, transienten und stochastischen Erregung läßt nicht nur die jeweils unterschiedliche Signaldynamik erkennen, sondern erfaßt auch quantitativ die Änderung der Dynamik mit wachsender Entfernung. Diese Veränderung des Schwingungsignals

im Verlauf der Wellenausbreitung u.a. infolge Absorption und Dispersion, konnte bislang nur qualitativ festgemacht werden (Hinweis in Abschnitt 6.3.1). Die Darstellung im Wahrscheinlichkeitspapier weist die Besonderheit auf, daß eine Normal- bzw. Gaußverteilung der Amplituden als Gerade dargestellt wird und Geraden unterschiedlicher Neigung auf die Existenz verschiedener Quellen (z.B. Maschinenerschütterungen und allgemeiner diffuser Hintergrund bzw. Fremdquelle) hinweisen.

Die im Bild 6.14 enthaltenen Informationen lassen sich in der üblichen Weise als Amplituden-Abnahmegesetz darstellen. Derartige Abnahmekurven zeigt Bild 6.15 für die Erschütterungsausbreitung verschiedener Quellen in verschiedenen Abstandsbereichen und in Abhängigkeit der Überschreitungshäufigkeit 50%, 10%, 1% und 0.1%. Es wird deutlich, daß bei hohen Fraktilen die Abnahme gegen Null geht, wenn der 100% - Hintergrundpegel im Meßgebiet überall gleich ist. Wichtiger ist es festzustellen, daß die Abnahmen des 1% - und 0.1% Fraktils bereits einander sehr ähnlich sind und der 0.1% - Wert gut mit gemessenen Spitzenwerten und ihren Abnahmekurven korrespondiert [6-5a].

Zu beachten ist auch die Wahl der Auswertezeit, in der die Klassierung der Schwingungsamplituden vorgenommen wird. Für die hohen Fraktile hängt die Abnahmekurve entscheidend davon ab, ob nur die jeweiligen Ereignisse klassiert (z.B. Hammerimpulse) oder eine kontinuierliche Auswertung (z.B. Verkehrserschütterungen) vorliegt. Bild 6.15 gibt auch hierzu einen Hinweis, wenn man die verschiedenen Erregerarten mit entsprechend unterschiedlicher Mittlungszeit betrachtet. Bei den Hammerimpulsen weist das 50% - Fraktil eine unverändert starke Abnahme ~ $R^{-1.5}$ auf, während die Verkehrserschütterungen, deren Spitzenwerte mit ~ $R^{-0.5}$ abnehmen ein vom Abstand unabhängiges, konstantes 50% - Fraktil aufweisen. Brauchbare Abnahmegesetze für Fraktile sind also nur zusammen mit Festlegungen zur Art der Signalauswertung zu erhalten.

6.3.5 Diskrete Rechenmodelle

Die Erschütterungsausbreitung in realen Systemen ist theoretisch mit einigem Aufwand und als Näherung anhand numerischer Lösungsverfahren wie der Methoden der Finiten Elemente oder Finiten Differenzen oder der Randelement - Methode [7-4] nachzuvollziehen. Es lassen sich damit der Wellenausbreitungsvorgang bzw. der Energietransport im Boden und die Wechselwirkungen zwischen Fundamenten und dem Boden beschreiben. Hierauf wurde bereits bei den Möglichkeiten zur Abschätzung der Emission in Abschnitt 4.3.1 hingewiesen.

Aus Kapazitätsgründen kann die Ausbreitung immer nur in einem endlichen, begrenzten Ausschnitt des Halbraumes berechnet werden. Unter der üblichen Annahme einer klassischen Linearität kann auch das diskretisierte Gesamtsystem in Subsyteme wie Fundament, Baugrund und Halbraumausschnitt mit unterschiedlich großen, diskreten Elementen unterteilt werden. Zur Lieferung der Bewegungsgleichung können finite Zeitelemente oder - rechentechnisch vorteilhafter - direkte Zeitintegrationsverfahren verwendet werden. Wie üblich werden die Bewegungsgleichungen für die Teilsysteme einzeln gelöst und unter Wahrung von Gleichgewichts- und Stetigkeitsbedingungen miteinander gekoppelt.

Neu ist in den diskreten Rechenmodellen, daß an den künstlich eingeführten Rändern Reflexionen auftreten, die zu stehenden Wellen führen und keine Wellenausbreitung wie im offenen Halbraum zulassen. Um dies zu verhindern müssen besondere Randelemente an den vertikalen Rändern und an der horizontalen unteren Grenzfläche - häufig als Dämpfungsglieder - die Reflexion verhindern. Die Fortleitung der Wellenenergie an den Bereichsrändern stellt ein Problem dar, das mit den verschiedensten Ansätzen, die in der Fachliteratur beschrieben sind, mehr oder weniger gut gelöst wird. Für die praktische Anwendung ist von Interesse, wie sich durch die Diskretisierung und Abgrenzung des Systems künstliche Vorgänge im Rechenmodell physikalisch auswirken, z.B. neben den erwähnten Reflexionen an Rändern treten Resonanzerscheinungen in geschichteten Böden auf und es werden höhere Frequenzen herausgefiltert. Mit entsprechenden Eigenschaften der FE - Netze müssen diese unerwünschten Nebeneffekte kompensiert werden, um eine brauchbare Beschreibung der Erschütterungsausbreitung zu erhalten. Einzelheiten zur Anwendung diskreter Rechenmodelle im Hinblick auf die Ausbreitung von Maschinen- und Verkehrserschütterungen sind [6-13,19,25,26] und [4-3b,3c] zu entnehmen.

Eine neuere Methode vermeidet das Reflexionsproblem an den Rändern, indem die Bewegungsgleichungen in Randintegralgleichungen transformiert werden und die Problemformulierung auf die Berandung des Gebietes reduziert wird. Diese Randelement-Methode wurde bereits kurz in Kapitel 4.3.1 zitiert. Anwendungen finden sich z.B. in [7-4,17]. Mit dieser Methode kann man sowohl endliche als auch unendliche Gebiete beschreiben und Abstrahlungsverluste berücksichtigen.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle nur folgendes festgehalten werden: Die Beschreibung der Erschütterungsausbreitung mit diskreten Rechenmodellen ist heute ziemlich weit fortgeschritten und entsprechende Computerprogramme stehen zur Verfügung [2-3]. Vorteilhaft ist die Berücksichtigung von Systemdetails und die Durchführung von Parameterstudien, um im

Rahmen von Prognosen die Wirkung der vielen Einflußgrößen zumindest in der Tendenz abzuschätzen. Zu beachten ist der große Aufwand, der auch zu vereinfachenden Voraussetzungen zwingt, z.B. zur Symmetrisierung der Problemstellung und zur Reduzierung der räumlichen Ausbreitung auf ein ebenes Modell. Die Vereinfachung und Begrenzung des Systems kann bei dynamischen Berechnungen zu Verfälschungen der Ergebnisse führen. Manches FE - Rechenergebnis erweist sich bei näherem Hinsehen insofern als realitätsfremd, weil in großer Vereinfachung die harmonische, vertikale, punktförmige Erregung an der Halbraum-Oberfläche angenommen wird. Trotz wertvoller und interessanter Ergebnisse konnte in keiner der zitierten Arbeiten die theoretisch berechnete Erschütterungsausbreitung in überzeugender Weise durch experimentelle, umfassende Untersuchungen untermauert werden. Hier besteht für typische Prognosefälle sicher ein Nachholbedarf zur Validierung der theoretischen Methoden, die infolge preisgünstigerer und schnellerer Rechneranwendungen zunehmend von Interesse sein dürften.

6.4 ERMITTLUNG VON BODENKENNWERTEN

6.4.1 Wellengeschwindigkeiten

Den vorangehenden Kapiteln ist zu entnehmen, daß zur Abschätzung der Erschütterungsausbreitung sowohl

- o Kennwerte der Emission, wie
  - Signalcharakteristik
  - Quellengeometrie
  - Frequenzzusammensetzung und emittierte Wellenart,

als auch

- o Kennwerte des Bodens. wie
  - Schubmodul G
  - Dichte ρ
  - Querkontraktionszahl ν
  - Dämpfungsgrad D

bekannt sein müssen. Außer der Materialdämpfung dienen die übrigen Bodenkennwerte dazu, letztlich die Wellengeschwindigkeit c_i (i=P,S,R) zu bestimmen mit Hilfe der Beziehung

$$c_p = \left[\frac{2(1-\nu)\, G}{(1-2\nu)\, \rho} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (6\text{-}22)$$

$$c_S = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (6\text{-}23)$$

$$c_R \approx (0.87 \text{ bis } 0.96)\, c_S \,; \qquad \nu = 0 \text{ bis } 0.5 \qquad (6\text{-}24)$$

und zwar ungedämpft in rein elastischer Umgebung. Im gedämpften Medium gilt mit $\bar{c}_i (i=P,S;R)$

$$\bar{c} = c_i \frac{(1+4D^2)^{1/4}}{\cos\Theta}, \qquad \Theta = \frac{1}{2} \arctan^2 D \qquad (6\text{-}25)$$

Vereinfacht kann für normale Böden von den Relationen $c_p \approx \sqrt{3}\, c_S$ und $c_R = 0.92\, c_S$ ausgegangen werden. Für einen genauen Übergang von einer Wellengeschwindigkeit zur anderen genügen die Kurven der Verhältnisse c_S / c_P, c_R / c_P, α_P / α_R und α_S / α_P als Funktion von ν in Bild 6.11.

Bei realen, häufig inhomogenen Böden variieren die Dichten und die Wellengeschwindigkeiten sogar für dasselbe Material je nach örtlichen Verhältnissen. In der Regel sollte deshalb ein Bezug zum real vorgegebenen Problem hergestellt werden und die Genauigkeit bei der Bestimmung der Bodenkennwerte zur Vermeidung "unnötigen" Aufwandes dem Problem angepaßt sein.

Für grobe Abschätzungen aufgrund von Erfahrungen kann man Tabellenwerte vergleichbarer Böden nutzen (z.B. Tabelle 6.2 und 6.3). Da aber die Übertragbarkeit im Einzelfall nicht so ohne weiteres gegeben ist und die Tabellen teilweise nur sehr grobe Wertebereiche angeben, sind Untersuchungen konkreter Bodenproben im Labor oder noch besser, relativ einfache Feldversuche vorzuziehen.

Zur Ermittlung dynamischer Bodenkennwerte anhand von Proben können im Labor Dreiachsial-, Scher- und Resonant-Column- Versuche durchgeführt werden. Diese Verfahren sind in der einschlägigen Literatur beschrieben [z.B.6-18b] .

Wird in einem Gelände die Erschütterungsausbreitung an mehreren Punkten im Abstand R_i von einer Quelle meßtechnisch erfaßt, so lassen sich Wellengeschwindigkeiten, Dämpfung und Dispersion von Rayleighwellen relativ einfach gleichzeitig mitbestimmen.

Im einfachsten Fall einer harmonischen, nichtdispersiven Wellenausbreitung erhält man die Wellengeschwindigkeit aus dem Laufzeitunterschied Δt zwischen zwei Meßpunkten im Abstand d zu $c = d/\Delta t$, wenn der Signaleinsatz deutlich zu erkennen ist. Bei beliebigen Signalformen und Frequenzgemischen kann mit Hilfe der Fourieranalyse der Seismogramme an zwei Meßpunkten aus dem Phasenspektrum $\varphi(\omega)$ der Kreuzleistungsdichte die Gruppengeschwindigkeit u abgelesen werden zu

$$u = \left[\frac{\Delta\omega}{\Delta\varphi} \right] d = 2\pi d - \frac{\Delta\phi}{\Delta\varphi} . \qquad (6\text{-}26)$$

Mit dieser Gruppengeschwindigkeit bewegt sich die Energie weiter, die in einem Wellenzug bzw. Erschütterungssignal transportiert wird. Ist $\Delta\omega/\Delta\varphi$ im energiereichen Frequenzband konstant, dann ist der Ausbreitungsvorgang nichtdispersiv, die Gruppengeschwindigkeit u ist gleich der Phasengeschwindigkeit c und stellt somit die Wellengeschwindigkeit dar. Im Fall der Dispersion sind u und c verknüpft über

$$u = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} . \qquad (6\text{-}27)$$

Zur praktischen Anwendung sei auf Beispiele in [6-5a] verwiesen.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeit besteht in der Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen zwei Meßpunkten im Abstand d. Aus der Zeit τ des 1. Maximums erhält man $c = d/\tau$. Diese Methode ist jedoch nicht so gut geeignet wie die Ableitung aus der Phase des Kreuzleistungsspektrums, da man die Lage des Maximums der Einhüllenden schätzen muß.

6.4.2 Materialdämpfung

Mit den Meßergebnissen v_i an den soeben mehrfach erwähnten Meßpunkten in den Abständen R_i zur Quelle erhält man für das untersuchte Gelände gleichzeitig die Ausbreitungsdämpfung α [m^{-1}] entlang des Meßprofils. Stellt man Gleichung (6-4) nach

$$\alpha = \frac{1}{R_i - R_1} \ln \left[\frac{v_1}{v_i} \left(\frac{R_1}{R_i} \right)^n \right] \qquad (6\text{-}28)$$

um und trägt die Meßwerte in der Form ln(...) über R auf, dann ergibt die Steigung der Regressionsgeraden den Abklingkoeffizienten α. Da man üblicherweise die Messungen im Fernfeldbereich anlegt und damit das Wellenbild deutlich ist, läßt sich der Exponent n festlegen (z.B. R-Welle als Energieträger: n=0.5). Mit der Messung der Wellengeschwindigkeit c und der maßgeblichen Frequenz f erhält man $\lambda = c / f$ und damit den frequenzunabhängigen Dämpfungsgrad D über $\alpha \lambda = \alpha' = 2 D$.

7. WECHSELWIRKUNGSEFFEKTE

7.1 METHODEN

In Kapitel 2.1 werden als Wechselwirkungsbereiche des Prognosesystems die Kopplungen zwischen den Fundamenten der Emissions- und Immisionsstruktur einerseits und dem ungestörten Boden andererseits angesprochen. Das dynamische Verhalten dieser gegründeten Strukturen wird sowohl bei aktiver Erregung im Emissionsbereich als auch bei passiver Erregung im Immissionsbereich durch die Wechselwirkung der Fundamentkontaktfläche mit dem Baugrund beeinflußt. Die Prognose von Strukturantworten kann gegenüber einer starren Gründung durch die Berücksichtigung des Dämpfungseinflusses des Baugrundes aufgrund von Wellenabstrahlung (geometrische Dämpfung) und durch Hystereseverluste (Materialdämpfung) verbessert werden. Diese Wechselwirkungseffekte hängen von der Erregerart, vom Fundamenttyp sowie von den Materialeigenschaften und dem strukturellen Aufbau des Baugrundes ab.

In den Disziplinen Baugrund- und Gebäudedynamik zielen in der Regel die Methoden darauf ab, die Wechselwirkungseffekte bei der Berechnung von Konstruktionsbeanspruchungen zu berücksichtigen. Im Rahmen von Immissionsprognosen geht es jedoch darum, den Einfluß der Wechselwirkung auf das Schwingungsverhalten und den Wellenausbreitungsvorgang darzustellen. Die Teilsysteme Baugrund und Bauwerk werden entweder anhand analytischer Ersatzmodelle (Federn und Dämpfer als konzentrierte Bauelemente - lumped parameter method) oder anhand diskreter Rechenmodelle (die in 4.3.1 und 6.3.5 erwähnte FE- und Randelemet-Methode) beschrieben. Zur Berechnung der Wechselwirkung bieten sich dann zwei Vorgehensweisen an:

- o die direkte Methode, bei der Bauwerk und Boden in einem Gesamtmodell abgebildet werden, was in realen Fällen nur mit Hilfe der diskreten Rechenmodelle zu leisten ist, z.B. in [6-13] und [7-4];

- o die Substruktur-Methode, bei der Bauwerk und Boden getrennt beschrieben und dann über gemeinsame Kopplungsbedingungen miteinander verknüpft werden, z.B. in [4-3].

Analytische Lösungen sind in [7-2,16] zusammengestellt. Die Untersuchungen der BAM [6-13] und des CRI [4-3b,3c] liefern Beispiele, wie komplizierte Wechselwirkungseffekte und Ausbreitungsvorgänge mit Finite-Elemente-Modellen analysiert werden. Und seit etwa drei Jahren wird auch das neue Randelement-Verfahren zum Studium der Schwingungsausbreitung zunehmend eingesetzt, hierzu sind vor allem Veröffentlichungen der Ruhr-Universität Bochum zu nennen [7-4,5,16,17,18]. Zur Boden-Bauwerk-Interaktions-Analyse im Zeitbereich werden Anwendungen in [7-9] vorgetragen, eine methodische Zusammenfassung kann man auch in [2-10] finden.

7.2 QUELLE (MASCHINENFUNDAMENT) - BAUGRUND

Ein guter Überblick zur Schwingungsberechnung von Fundamenten auf dem Baugrund wird in [7-11] gegeben. Fundamentdämpfungen auf inhomogenem Baugrund behandelt auch [7-10] und speziell Pfahlgründungen sind in [7-12] beschrieben. Auf die Emission komplizierter Wellenfelder, ihr Abklingen mit der Entfernung und die Festlegung des Übergangs von Nahfeld zu Fernfeld wurde bereits in Kapitel 4.3 eingegangen. Dazu läßt sich aus [7-1] hinzufügen, wie die in der Praxis bei Fundamenten stets flächenhaft im Zentrum konzentrierte Erregerkraft ersetzt werden kann. Der Ersatz der Flächenlast durch die Punktlast im Zentrum führt im Fernfeld zu einer Überschätzung der Erschütterungsamplituden um 15-20%, was dem Sicherheitsspielraum einer Prognose nur dienlich sein kann. Während für die Berechnung der Reaktion und Beanspruchung einer dynamisch belasteten Struktur nach [7-1] die Fernfeldlösung erst ab etwa $5\lambda_R$ (λ_R- Rayleigh-Wellenlänge) angesetzt werden darf, ist für eine Abschätzung der Erschütterungen im Gelände die Fernfeldlösung ab etwa 0.5 λ_R hinreichend genau.

In [7-6] wird für ein starres Kreis- und Rechteckfundament auf einer dicken, inhomogenen Schicht mit Dämpfung gezeigt, daß die statischen und dynamischen Steifigkeiten bei Böden, deren Schubmodul mit der Tiefe ansteigt, aus praktischer Sicht recht gut durch die bekannten Steifigkeits- und Dämpfungswerte auf dem homogenen elastischen Halbraum angenähert werden können. Zur Wechselwirkung von Fundamenten auf geschichtetem Baugrund werden einige Hinweise in Abschnitt 6.2.4 gegeben. Mit Hilfe der Randelement-Methode wird in [7-4] modellmäßig der Zeitverlauf der Fundamentantworten auf geschichtetem Baugrund infolge eines Erregerimpulses berechnet. In Bild 7.1 wird der Halbraumlösung die vertikale Fundamentantwort in Abhängigkeit von Schichtdicke und E-Modul gegenübergestellt. Man findet die bereits in Abschnitt 6.2.4 erwähnte Verstärkung der seitlichen Abstrahlung und das längere

zeitliche Abklingen der Reflexionen an der Schichtgrenze bestätigt und stellt die Einflußgrößen fest, die die Verstärkung der Fundamentbewegung dämpfen können.

Zum Thema Wechselwirkungseffekte liegt mit [7-16] ein Übersichtsbeitrag zur Baugrund-. und Fundamentdämpfung vor. Mit einem einfachen Baugrundersatzmodell wird der starke Einfluß der geometrischen Dämpfung auf die translatorischen Freiheitsgrade des Fundamentes (vertikal und horizontal) sowie die Beeinflussung von Kipp- und Torsionsschwingungen durch die Materialdämpfung nachgewiesen. Die Möglichkeit der Resonanzüberhöhung 1/2D von Fundamentschwingungen auf dem Baugrund entnimmt man einer Darstellung des Lehrschen Dämpfungsmaßes D für die verschiedenen Fundamentfreiheitsgrade aus Bild 7.2.a. Danach führt eine reduzierte geometrische Dämpfung z.B. bei Pfahlgründungen zu signifikanten Resonanzüberhöhungen in vertikaler Richtung. Fundamenteinbettungen dagegen erhöhen die Dämpfung wie Bild 7.2.b anhand des Amplituden-Frequenzganges zeigt. Ergänzend sei aus [7-4] die Dämpfung der Horizontal- und Kippbewegung des eingebetteten Fundamentes in Bild 7.3 anhand des Schwingungszeitverlaufs beigefügt.

Auf die Wechselwirkung von Maschinenfundamenten untereinander und die damit verbundene Zusatzdämpfung in großflächigen heterogenen Industrieanlagen wurde bereits in Abschnitt 6.2.5 eingegangen. In [7-5] wird dazu ein systematisch aufgebautes Fundamentfeld für eine von außen kommende Störwelle und für eine Erregung im Feldinnern theoretisch untersucht. Das homogene Fundamentfeld verhält sich wie ein neues Medium mit Absorption und einer von der freien Oberfläche abweichenden Wellengeschwindigkeit. Diese Faktoren können zur Auslegung eines dynamisch "gutmütigen" Fundamentsystems eingesetzt werden.

7.3 BAUGRUND - EMPFÄNGER (GEBÄUDE)

Die soeben für den Emissionsbereich diskutierten Wechselwirkungseffekte sind im Prinzip auch auf die gegenseitige Beeinflussung von Baugrund und Immissionsstruktur anzuwenden. Da aber nur externe Quellen in der vorliegenden Studie in Betracht zu ziehen sind, liegt ausschließlich der Fall der passiven Erregung vor. Ausgangspunkt sind also die unverzerrten "Freifeld"-Schwingungen der oberen Bodenschichten ohne Empfängergebäude. Ein tatsächlich vorhandenes Gebäude verändert jedoch dieses Schwingungsfeld des Bodens. Denn während der Gebäudeschwingungen wirken dynamische Auflagerkräfte auf die Fundamente. Diese sind nachgiebig, führen Bewegungen aus und prägen diese dem Baugrund zusätzlich auf. Ein

derartiger Effekt entspricht dem sekundären Wellenfeld, das passiv erregte Maschinenfundamente abstrahlen (siehe Abschnitt 6.2.5).

Ein Gebäude tritt unter Einwirkung der Freifeldschwingungen zunächst als Ganzes in Wechselwirkung mit dem Baugrund. Wie noch darzustellen ist, wird das Gebäudeverhalten im Zusammenspiel der Eigenfrequenzen von Wänden und Decken mit der Boden-Bauwerk-Eigenfrequenz bestimmt. Da aber speziell die Fundamentschwingungen als eine der Immissionsgröße zu prognostizieren sind, soll dieser Teil der Wechselwirkung an dieser Stelle für sich beschrieben werden. Die Gebäudedynamik wird in Kapitel 8 unter Immission behandelt.

Bei der Anregung eines Gebäudes durch die Freifeldschwingungen läuft die Erschütterung z.B. mit der Geschwindigkeit der Rayleighwelle c_R und erreicht die einzelnen Fundamentpartien zu verschiedenen Zeiten. Mit der Fundamentbreite b bedeutet dies für eine bestimmte Frequenz f eine Phasendifferenz von $\varphi = 2\pi\, f\, b/c_R$. Die phasenverschiedenen Bewegungen macht ein starres Fundament nicht mit, da es sich sonst verformen müßte. Es reagiert nur auf den Mittelwert der phasenverschiedenen Schwingungskomponenten, wodurch sich die resultierende Erschütterungserregung um den in [6-3] als k_w benannten Faktor reduziert. Es gilt in etwa nach [6-25]

$$k_w = \frac{v_{Fundament}}{v_{Freifeld}} \approx \frac{1}{\pi}\frac{\lambda_R}{b} \sin\frac{\pi\, b}{\lambda_R} \qquad (7\text{-}1)$$

Danach macht sich die Reduktion besonders für hohe Frequenzen, niedrige Wellengeschwindigkeiten und breite Fundamente bemerkbar. Im Zusammenhang mit der Erdbebensicherheit von Kernkraftwerken wurde die Baugrund-Bauwerk-Interaktion genauer untersucht und man stellte eine Abhängigkeit der Wechselwirkungen von bestimmten Relationen fest:

- Bauwerkshöhe zur Gründungstiefe
- Bauwerksgewicht zum Gewicht des Bodenaushubs
- Bauwerkssteifigkeit zur Bodensteifigkeit.

Gehen diese drei Verhältnisse gegen Eins, so sind die Einflüsse der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung vernachlässigbar, d.h. k_w=1 und die Fundamentbewegung ist gleich der Freifeldbewegung. In der Regel ist aber diese Wechselwirkung für im Immissionsschutz betrachtete Gebäude auf dem Erdboden zu berücksichtigen.

Die Methoden zur Modellbildung wurden bereits erläutert. Zur Quantifizierung des Fundamentfrequenzganges kann man stark vereinfacht die Bauwerk-Boden-Wechselwirkung als

- o Ein-Massen-Modell für tiefe Frequenzen und
- o vereinfachtes Stabmodell für hohe Frequenzen

mit Bodenfedern und Dämpfern beschreiben. Im Zusammenwirken von Boden, Fundament, Gebäudewänden und Decken ergeben sich drei typische Frequenzen, deren Verhältnis das Schwingungsverhalten der Immissionsstruktur bestimmen [8-8,9,10] und [6-25]. Wand- und Deckeneigenfrequenzen werden im nächsten Kapitel erläutert. Der Fundamentfrequenzgang soll in diesem Abschnitt erläutert werden. Es gilt vereinfacht

$$k_w = \frac{v_{Fundament}}{v_{Freifeld}} = \frac{c+ir\omega}{c+ir\omega-m^2\omega} = \frac{1+i2D\,\eta}{1+i2D\,\eta-\eta^2} \qquad (7\text{-}2)$$

$m = \rho\ F\ H$ m = Gebäudemasse, ρ = Dichte, F = Fundamentfläche, H = Gebäudehöhe

$c = \frac{4G}{1-\nu}\sqrt{\frac{F}{\pi}}$ c = Bodensteifigkeit, G = Schubmodul, ν = Querkontraktionszahl

$r = \frac{3{,}4 \cdot \sqrt{G\,\rho} \cdot F}{(1-\nu)\cdot\pi}$ r = Dämpfung des Fundamentes auf dem Boden

$D = \frac{1}{2}\frac{1}{\sqrt{cm}} = 0.85\sqrt{\frac{R^3\rho}{m(1-\nu)}}$ D = Dämpfungsmaß in der Resonanz, $R = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$ äquivalenter Fundamentradius.

$\eta = \frac{f}{f_0}$ mit der herauszuhebenden Boden-Bauwerks-Frequenz f_0:

$$f_0 = f_B \cdot \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c}{m}} \qquad (7\text{-}3)$$

die also von den Bodeneigenschaften G, ν, ρ und den Gebäudeparametern F und m bestimmt wird. Die Dämpfung in der Eigenfrequenz f_B hängt im wesentlichen vom Verhältnis m zu F ab und ist i.a. so groß, daß in der Praxis keine wesentlichen Resonanzüberhöhungen auftreten. Dies wird auch in Bild 7.4 durch die meßtechnischen Ergebnisse bestätigt. Oberhalb der Resonanzfrequenz verläuft die Reduktion der Amplituden nach

$$k_w = \frac{2D}{\eta} = \frac{1}{2\pi f}\cdot\frac{r}{m} = \frac{1}{2\pi f}\cdot\frac{3{,}4}{(1-\nu)\pi}\cdot\frac{F}{m}\cdot\sqrt{G\,\rho} \qquad (7\text{-}4)$$

mit dem Wellenwiderstand $\sqrt{G\rho}$ des Bodens geringer und mit der quasistatischen Flächenpressung m / F stärker. Für ein vorgegebenes Gebäude hängt also die Reduzierung der Freifeldschwingungen von der Wurzel des Schubmoduls des Bodens ab. Da der Schubmodul zwischen sehr weichen Böden und absolut steifem Felsuntergrund Werte von 10^7 bis 10^9 N/m^2 aufweist, kann k_w entsprechende Werte von 0.1 bis 1.0 annehmen. Ein in der Praxis sehr häufig für niedrige Wohngebäude auf Lockerboden angesetzter Reduktionsfaktor von $k_w \approx 0.5$ ist als mittlerer Schätzwert also durchaus akzeptabel.

Der bisher anhand einfachster Modelle theoretisch abgeleitete Fundamentfrequenzgang kann durch meßtechnische Erfahrungen im Prinzip bestätigt werden. Zur Prognose der Wechselwirkungsreduktion (coupling losses in dB) stellt [6-10,21] sehr nützliche Diagramme für verschiedene Fundament-Gebäude-Kombinationen zur Verfügung. Diese Frequenzgangkurven, die die Erfahrung bei stochastischer Erregung durch Verkehr beinhalten, sind in Bild 7.5 wiedergegeben. Sie lassen sich aber auch allgemeiner anwenden wie die zusätzlich eingetragenen Meßwerte des TÜV für ein viergeschossiges Gebäude [6-22] und der BGR für ein Einfamilienhaus bei Sprengerschütterungen zeigen.

Wertet man bei Sprengungen Raumwellen (≈ 30Hz) und Oberflächenwellen (≈ 6Hz) getrennt aus [5-5], dann konnte z.B. eine Freifeld-Fundament-Abschwächung von $k_w \approx 0.19$ bzw. $k_w \approx 0.93$, d.h. ein Unterschied um den Faktor 5 entsprechend dem Frequenzverhältnis der beiden Wellenarten gemessen werden. Dies bestätigt $k_w \sim 1/f$ in Formel (7-4). Für das Sprengerschütterungskataster Norddeutschland [5-12] erhält man aus den Summenhäufigkeiten der Erschütterungszahlen I (siehe Abschnitt 5.2.1) für die Freifeld-Fundament-Abschwächung ein $\Delta I = 0.25$, d.h. ein $k_w = 0.55$. Der Praxiswert $k_w \approx 0{,}5$ scheint also auch für impulsartige oder transiente Erregungen ein guter Prognose-Schätzwert zu sein.

Die vorgetragenen Kenntnisse konnten durch die Auswertung von Transferfunktionen zahlreicher Messungen präzisiert werden, so daß insgesamt die Wechselwirkung Freifeld-Fundamentschwingung der Immissionsstruktur auch in der Vornorm [1-1] genauer gefaßt werden müßte und nicht nur in den Erläuterungen erwähnt wird.

8. IMMISSION ODER ERSCHÜTTERUNGSEINWIRKUNGEN

8.1 ÜBERBLICK UND METHODEN

Nach der Übertragung der Freifeld-Schwingungen vom Boden in Gebäude (Kapitel 7) ist mit dem Schwingungsverhalten von Gebäuden das letzte Glied in der Kette des Erschütterungsausbreitungssystems zu behandeln. Wiederum liegt eine äußerst komplexe Situation vor, die durch

- o die Vielfalt der Gebäude als Immissionsstruktur in Form, Konstruktion, Bauausführung und Innenausstattung,
- o die Vielfalt der physikalischen Schwingungsvorgänge wie Dynamik der Struktur und Ausbreitung von Wellen in Festkörper und Gasen,
- o die Vielfalt der Anregungsmöglichkeiten des Gebäudes und der Bauteile wie Fundamente, Wände, Stützen und Geschoßdecken

gekennzeichnet ist. Folgerichtig resultieren daraus auch

- o die Vielfalt der in Kapitel 2.3 aufgeführten Prognosekenngrößen wie frequenz- und zeitbewertete Schwingstärken (KB-Werte), Schwingungsamplituden und Schwingfrequenzen an verschiedenen Stellen der Immissiosstruktur und der von der Struktur abgestrahlten Körperschall als sekundärer Luftschallpegel im Gebäudeinneren.

Am deutlichsten im gesamten Prognosesystem vereinigt die Immissionsstruktur die schwingungstechnischen Elemente eines Resonanzkörpers, eines Frequenzfilters, eines Dämpfers und eines Strahlers. Entsprechend breit gefächert kommen verschiedene methodische Vorgehensweisen der theoretischen Modellbildung und der Lösungsansätze zur Anwendung.

Eine alle Effekte umfassende, einheitliche Beschreibung ist unmöglich, so daß zur Immissionsprognose von Schwingungen und/oder Körperschallpegeln entsprechend der jeweiligen Problemstellung zwangsläufig unterschiedliche Verfahren einzusetzen sind. Ein wesentlicher physikalischer Gesichtspunkt ist nach wie vor das Verhältnis von geometrischen Abmessungen der Struktur zur Wellenlänge der dynamischen Erregung. Nach der Problemstellung ist es dieses Verhältnis, das letzlich die elementare Zweiteilung der Anwendung von

- o Schwingungstheorie im Bereich tiefer Frequenzen

und

- o Wellentheorie im Bereich hoher Frequenzen

bestimmt.

Die Schwingungstheorie zielt auf die Erfassung stationärer Resonanzzustände der Struktur ab, die im tieffrequenten Bereich mehr oder weniger separierbar sind. Mit Ansteigen der Frequenz und der Systemfreiheitsgrade rücken die Resonanzen immer dichter zusammen und werden ununterscheidbar. Phänomene der Wellenfortpflanzung im Festkörper analog zur Ausbreitung im Boden werden maßgeblich. Während man bei Schwingungsproblemen üblicherweise Feldgrößen wie z.B. Kräfte, Spannungen, Beschleunigungen betrachtet, empfehlen sich in der Wellentheorie auch Energiebetrachtungen mit Hilfe einer mittleren (Körperschall-) Energiedichte [8-34]. Aus der Energiebilanz lassen sich dann die Mittelwerte der Feldgrößen ableiten. Der damit verbundene Verlust an Genauigkeit ist im allgemeinen akzeptabel, denn ein Fehler von 25% entspricht einem Dezibel im Körperschallpegel, ein Unterschied, der praktisch nicht wahrnehmbar ist.

Zur Anwendung von Schwingungs- oder Wellentheorie gibt es keine starren Grenzen. Da Körperschallprognosen hier nur im Zusammenhang mit abgestrahltem Luftschall interessieren, kommt dafür generell der Bereich der hörbaren Frequenzen (16Hz - 16kHz) in Betracht. In der Praxis werden beide Methoden in einem mittleren überlappenden Frequenzbereich von etwa 50Hz bis 100Hz angewandt. Da die Immisionsprognose den Frequenzbereich von 1 Hz bis 315 Hz abdecken soll, ist zu fragen, welchen Hinweis zur Anwendung der genannten Methoden das Regelwerk gibt.

Das Regelwerk legt für Schwingungsmessungen (DIN 4150, DIN 45669) die obere Frequenz bei 80Hz und für bauakustische Messungen (DIN 4109, DIN 52210) die untere Frequenz bei 100Hz fest. Darüberhinaus ist für Schwingungsmessungen im Immissionsschutz (DIN 45669) ein erweiterter Frequenzbereich bis 315Hz angegeben, womit der Erfassung des sekundären Luftschalls in Gebäuden Rechnung getragen werden soll. In den zur Zeit existierenden Normen und Standards gibt es weder eindeutige Hinweise zur Anwendung der Schwingungstheorie bzw. der Wellentheorie in der mittleren Frequenzzone noch eine Anleitung zur Prognose von Körperschallpegeln.

8.2 GEBÄUDEDYNAMIK

8.2.1 Modellansätze und Vorgehensweise

Zur Beschreibung der Bauwerksschwingungen werden die bereits in Kapitel 6 und 7 skizzierten Modelle und Rechenmethoden eingesetzt. Im Bereich tiefer Frequenzen lassen sich die Bewegungen des Gesamtgebäudes anhand ein- oder zweidimensionaler Masse-Feder-Systeme ermitteln. Typische Hochbaukonstruktionen werden üblicherweise als Stabmodelle oder Rahmentragwerke idealisiert. Verteilt man die Massen über die Höhe, so kommt man zu Balkenmodellen, konzentriert man die Massen in Höhe der Geschoßdecken, so erhält man ein Feder-Masse-System bzw. eine Schwingerkette.

Wichtige Erkenntnisse zum dynamischen Verhalten von Bauwerken und Bauteilen bringen für praktische Abschätzungen bereits der Einfreiheitsgrad-Schwinger oder der eingespannte Biegestab. Für komplexe Bauwerksstrukturen ist wieder die Diskretisierung des Kontinuums "Tragwerk" anhand finiter Elemente erforderlich. Auf die mathematischen Formulierung der Bewegungsgleichungen anhand der FE-Methode wurde bereits an anderer Stelle eingegangen. Zur näheren Betrachtung muß auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden [z.B. 2-1,2]. Eine Übersicht der einfachen Idealisierung von Hochbaukonstruktionen und der Berechnungsverfahren wird auch in [8-1] gegeben.

Für Prognosen in komplizierten und hohen Bauwerksstrukturen kann man auf computergestützte umfangreiche Berechnungen unter Einbeziehung der Details zum Einzelfall nicht verzichten. Ein konkretes Beispiel wie ein schwingungserregtes Gebäude als relativ einfaches Masse-Feder-Ersatzsystem abgebildet und aus den berechneten Antwortspektren der Außenwände und Deckenmitten der KB-Wert gebildet wird, ist z.B. ausführlich in [8-11] dargestellt. Aber selbst an diesem "einfachen" Modell erkennt man den erheblichen Aufwand, sobald rechnerische Prognosen in Gebäuden erforderlich werden. Für Prognosen in durchschnittlichen Bauwerken wie ein- bzw. mehrgeschossigen Mauerwerks- oder Betonbauten, d.h. für den häufigen Fall einer betroffenen Wohnbebauung, kann man brauchbare Abschätzungen aus Erkenntnissen theoretischer Parameterstudien und meßtechnischer Untersuchungen gewinnen.

8.2.2 Einfluß der Baugrunddämpfung

Einen guten Einblick in das Schwingungsverhalten von zwei- bis dreigeschossigen Gebäuden auf unterschiedlichem Baugrund erhält man aus den Modellrechnungen der BAM, die in [8-8,9,10] und [6-13], teilweise redundant, dargestellt sind. Der Wechselwirkungseffekt Baugrund-Gebäude wurde im Hinblick auf das Fundament bereits in Abschnitt 7.3 anhand des Fundamentfrequenzganges charakterisiert. Darüberhinaus beeinflußt der Baugrund aber auch Wand- und Deckenresonanzen. Neben der Boden-Bauwerks-Eigenfrequenz f_B nach Formel (7-3) sind für Prognoseabschätzungen außerdem von Bedeutung die

- erste Wandeigenfrequenz

$$f_w = \frac{v_L}{4H} \tag{8-1}$$

- erste Deckeneigenfrequenz

$$f_D = \frac{11.2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \tag{8-2}$$

mit:

v_L = Longitudinalwellengeschwindigkeiten des Wandmaterials

H = Gebäudehöhe

l = Deckenspannweite

EJ_y = Biegesteifigkeit

F = Querschnittsfläche

ρ = Dichte des Deckenmaterials

Die Deckeneigenfrequenzen, die nach (8-2) etwas zu hoch geschätzt werden, sind für bestimmte Formen und Auflagerungen aus [8-10] in Bild 8.1 für eine 20cm dicke Betondecke angegeben. Die Umrechnung auf andere Materialien und Abmessungen läßt sich einfach durchführen nach

$$f_D \sim \frac{d_D}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{d_D \, v_L}{l^2} \tag{8-3}$$

mit: d_D = Dicke der Decke und E = Elastizitätsmodul.

Danach weisen u.a. eingespannte Decken höhere Eigenfrequenzen auf als gelenkig gelagerte Decken. Ein umfangreiches Tabellenwerk zur Bestimmung der Eigenfrequenzen von rechtwinkligen Decken ist in [8-7] zu finden. Aus [8-8,9,10] sollen nachfolgend Schwerpunkte für die Prognoseabschätzung aufgeführt werden.

Horizontale Gebäudeerschütterungen werden oberhalb der tieffrequenten Horizontaleigenfrequenz des Gesamtgebäudes (ca. ≤ 5Hz) stark reduziert, da in diesem Frequenzbereich die Erschütterungen im wesentlichen durch Verformungen der untersten Stockwerke aufgefangen werden [8-8].

Die vertikalen Gebäudeschwingungen und damit die Auflagerschwingungen der Geschoßdecken sind meistens entscheidend. Durch die aufgehenden Wände ist das Gebäude vertikal wesentlich steifer. Unterhalb der Wandeigenfrequenz f_w werden die Freifeld-Schwingungen nahezu 1:1 in die einzelnen Stockwerke übertragen, die ihrerseits durchaus mit unterschiedlichen Phasen schwingen können. Bei der ersten Wandeigenfrequenz schwingt das Gebäude in sich und die Amplituden nehmen zur Gebäudespitze hin zu.

Eine Wandresonanz bei f_w tritt lediglich bei sehr steifem Baugrund auf. Ist das Gebäude auf Lockerboden (Lehm bis Sand) gegründet werden die Freifeld-Schwingungen stärker reduziert (siehe Abschnitt 7.3), dieser Effekt kompensiert die Überhöhung bei der Wandresonanz.

Das Gebäudeverhalten ist durch das Verhältnis von Bauwerk-Boden-Eigenfrequenz f_B und Wandeigenfrequenz f_w entscheidend geprägt, das nach

$$\frac{f_B}{f_W} = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{c\,H}{E\,F}} \qquad (8\text{-}4)$$

im wesentlichen dem Verhältnis der statischen Steifigkeiten des Fundamentes (c) und des Gesamtgebäudes (EF/H) entspricht. Das Verhältnis wird groß für steife Böden, großflächige Gründungen und hohe Gebäude mit geringer Wandsteifigkeit. Bei Lockerböden mit $f_B < f_w$ tritt die Baugrund-Gebäude-Resonanz hervor. Bei sehr steifem Felsuntergrund kann $f_B > f_w$ werden und es tritt die Wandresonanz hervor. Insbesondere ein Gebäude mit weichem Wandmaterial weist auf steifem Baugrund ein großes Übertragungsverhältnis auf.

8.2.3 Einfluß der Strukturdämpfung

In Fällen unwesentlicher Baugrundwechselwirkung fehlt die sonst maßgebliche Baugrunddämpfung und die Strukturdämpfung des Bauwerks stellt dann den wesentlichen Teil der Gesamtdämpfung dar. Im weitesten Sinne sind hierunter Einflüsse von nichttragenden Bauteilen und Verkehrslasten, die Reibungsdämpfung an Fügestellen, die Bildung von Mikrorissen, das Verdrängen von Luftschichten und die Verformung von Zwischenschichten und Verbindungselementen zu verstehen. Diese komplexe Strukturdämpfung ist heute noch nicht kontrollierbar

und schon garnicht vorhersagbar. Obwohl sie als modale Dämpfung für die Amplitudenbegrenzung in Resonanzen und das schnelle zeitliche Abklingen der freien Bauteilschwingungen bestimmend ist, hat der Planer im besten Fall nur Schätzwerte zur Verfügung. In Ermangelung von planbaren Strukturelementen tritt in fertig bezogenen Gebäuden eine große Streuung der inneren Dämpfung auf. Auf diese Schwachstelle in der Prognose wird nochmals weiter unten bei der unterschiedlichen Bauausführung von Geschoßdecken aufmerksam gemacht. In der Literatur kann man zum Thema Design und Dämpfung eine kritische Wertung in [8-44] finden. Eine gute Einführung in die Fügestellendämpfung gibt [8-45]. In [8-6] wird experimentell im Frequenzbereich 4 bis 35Hz für weitgespannte Decken gezeigt, daß die Einbauten in ein Gebäude die anfänglich vorhandene Dämpfung von 1 bis 3% durch zusätzliche Strukturdämpfung auf 6 bis 14% erhöhten. Der Innenausbau hat danach einen wesentlichen Einfluß auf die Dämpfung und die Impedanzen von niederfrequenten Resonanzstellen. Will man im Rahmen einer Immissionsprognose das Resonanzverhalten von Geschoßdecken ermitteln, dann sollten Impedanzmessungen nicht in Rohbauten, sondern nur nach dem Innenausbau bzw. mit entsprechender Simulation vorgenommen werden.

Für hohe Gebäude auf steifem Baugrund wird in [8-4] eine Schätzformel für die modale Dämpfung ξ in Abhängigkeit der Auslenkung an der Gebäudespitze χ_H vorgestellt. Ausgehend von der in Schwingungsrichtung größten geometrischen Abmessung D im Geländeniveau und der Gebäudehöhe H erhält man

$$\xi\ [\%] \;=\; \frac{46}{H} + 10^{0.5\sqrt{D}} \cdot \frac{\chi_H}{H} \;. \qquad (8\text{-}5)$$

Diese Dämpfung gilt für die stationäre harmonische Anregung und ist bei stochastischer Anregung auf etwa 1/3 zu reduzieren.

Zur Bestimmung der ersten und einiger höherer Eigenfrequenzen von großen Gebäuderahmenkonstruktionen wird eine Anleitung für den Planer in [8-45] gegeben. Aus der niedrigsten und höchsten Eigenfrequenz und der Anzahl der Stockwerke wird ein dimensionsloser Parameter abgeleitet, der anzeigt, ob das Gebäude insgesamt linear schwingt, eine Biege- oder eine Scherbewegung macht. Weitere Hinweise zur Ermittlung der 1. und 2. Eigenfrequenz hoher Gebäude sind in [8-3] zu finden. Dort wird auch kritisch die im "Uniform Building Code" (USA,) benutzte Eigenfrequenzformel kommentiert, die zu Überschätzungen der Periode bei Wandkonstruktionen und zur Unterschätzung bei Stockwerksrahmen bis zu 100% führen kann. Interessante Ergebnisse bringt eine Studie [8-46], die sich mit dem Einfluß variierender Massen

und Steifigkeiten in Stockwerksrahmen von einheitlicher Geometrie sehr ausführlich beschäftigt und mit den Möglichkeiten des Uniform Building Code vergleicht.

8.2.4 Schwingungen der Geschoßdecken

Entscheidend für die Prognose sind in den meisten Fällen die Geschoßdeckenschwingungen. Die Resonanzüberhöhung in der Deckeneigenfrequenz hängt von der Phasenlage der Schwingungen der Deckenauflager ab. Sie wird durch die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung etwa im Verhältnis der Scherwellengeschwindigkeit bzw. der Wurzel der Steifigkeit des Baugrundes reduziert.

Die Reduktion der Deckenresonanzen beruht also auf der Wirkung des Baugrundes, der einerseits eine Dämpfung durch die Möglichkeit der Energieabstrahlung zur Verfügung stellt. Andererseits ermöglicht seine Nachgiebigkeit eine Schwingungstilgung im Bereich der Wand - und Deckenresonanzen. Aus diesem Grund sind die Schwingungen bei den Deckeneigenfrequenzen unter Einbeziehung der Baugrund-Wechselwirkung und der Einspannbedingungen theoretisch nicht einfach zu bestimmen. Der Einfluß der Wand-Decken-Kopplung kann nur mit komplexeren Gebäudemodellen berücksichtigt werden. Nach [8-8] scheint eine genaue Prognose der Deckeneigenfrequenzen und der zu erwartenden Resonanzüberhöhung kaum möglich zu sein.

Als Summe verschiedener Modellrechnungen von Beton- und Mauerwerksbauwerken, unterschiedlicher Stockwerkzahl und Baugrundsteifigkeiten zeigt das Bild 8.2 aus [8-10] die Abhängigkeit der Deckenresonanzüberhöhung V vom Verhältnis f_B / f_D. V kann mit einem Korrelationagrad von r = 0,97 durch die Regressionsgrade

$$V = -4.1 + 15.5 \frac{f_B}{f_D} \qquad (8\text{-}6)$$

beschrieben und pauschal abgeschätzt werden. Für die "Standardstruktur", einem zweigeschossigen Bauwerk auf weichem Baugrund (f_B / $f_D \approx 0.9$) wird ein Überhöhungsfaktor von etwa 9 von Freifeld zu Geschoßdecke - in der Terminologie von [6-3] ist dies $k_w \cdot k_R$ - ausgewiesen. Dies entspricht recht gut dem mittleren Erfahrungswert bei Wohngebäuden. Im Verhältnis zum Standardfall steigt der Überhöhungsfaktor bei weicherer Struktur und steiferem Baugrund an und nimmt bei steiferer Struktur, sowie schwereren bzw. höheren Gebäuden ab. Zur Orientierung sind einige Überhöhungsfaktoren der Decken gegenüber der Freifeldanregung, die durch Parametervariation eines Standardgebäudes theoretisch ermittelt wurden [8-10] in Tabelle 8.1(a) für eine harmonische und breitbandige Erregung, verschiedene

Stockwerkszahlen und Bodensteifigkeiten (Scherwellengeschwindigkeiten C_S) zusammengestellt. Für das Beispiel eines zweigeschossigen Wohngebäudes, auf Lockerboden gegründet, können zur ersten Schätzung der Verstärkung von Decken- gegenüber Freifeldschwingungen für harmonische Erregung (z.B. Vibrationsramme) ein V ~ 6 und und für breitbandige Erregung (z.B. Verkehr) ein V ~ 2.5 angesetzt werden. In [6-13] wird dazu noch ausführlicher erläutert, daß im Verhältnis zur maximalen Resonanzüberhöhung V = 1/2 D bei Rauschanregung recht gut gilt:

$$V_{Rauschen} \approx (V_{Resonanz})^{1/2} \qquad (8\text{-}7)$$

Auf weichem Baugrund ist die Rauschantwort eher kleiner als $(V_{Resonanz})^{1/2}$. Bei Impulsanregung (z.B. Sprengungen) erhält man theoretisch wegen des breiteren Frequenzspektrums etwa die Überhöhung der Rauschanregung. Die Überhöhung des zeitlichen Maximalwertes ist noch geringer, so daß die Deckenresonanz bei Impulsanregung in der Praxis häufig keine wesentliche Rolle spielt. Aus [5-3] sind bei Gewinnungssprengungen Werte von V = 1.0 bis 2.5 je nach Resonanzeinfluß gemessen worden. Meßtechnisch gewonnene Übertragsverhältnisse, die von den Mitarbeitern des Normenausschusses DIN 4150, Teil 1 [1-1] zusammengestellt wurden und den Erfahrungsstand von 1984 repräsentieren, sind in Tabelle 8.1 unter (b) den theoretischen Werten unter (a) gegenübergestellt.

Als Fazit muß man feststellen, daß der Schwingungsübergang vom Freifeld auf Gebäudefundamente einigermaßen sicher anhand der Tabellenwerte und der Frequenzgänge in Bild 7.5 in eine Prognose eingebaut werden kann. Bei der Weiterleitung der Schwingungen vom Fundament in die aufsteigenden Wände (d.h. ins Bauwerk) sind - abhängig vom Frequenzverhältnis f_B/f_W nach Formel (8-4) - zumeist Verstärkungen bis 1:2 und bei stationärer Anregung auch darüber zu erwarten. Nach Aussagen in [6-13] zeigt sich eindeutig die Tendenz zu geringeren Werten bei höheren Frequenzen. Oberhalb von 20Hz kehrt sich das Verhältnis in eine Abschwächung um - ausgenommen sind die Wandeigenfrequenzen.

Am unsichersten sind die Übertragungsverhältnisse zu den Geschoßdecken. Je nach Anregungsart, Resonanzkopplung und Dämpfung durch den Baugrund sind Verstärkungen von 1:1 bis 1:20 zu erwarten [1-1]. Hinzu kommt der starke Einfluß der baulichen Ausführung der Fertigdecke gegenüber einer Rohbaudecke und nicht zuletzt eine weitere Dämpfung durch die sogenannten Verkehrslasten.

Das Schwingungsverhalten der Geschoßdecken, die ja wichtiger Bezugsort zur Ermittlung von Immissions-Beurteilungsgrößen sind, stellt nach heutigem Stand der Technik eindeutig eine Schwachstelle in der Immissionsprognose dar, zumal die Erfassung der Dämpfungen nicht

allgemein aus Konstruktionszeichnungen und technischen Daten möglich ist. Hier ist man auf Erfahrungen und experimentelle Untersuchungen angewiesen, die aber in Folge der unbekannten Emission und großer Schwankungen nur mit größter Vorsicht auf vergleichbare Situationen übertragen werden dürfen.

8.2.5 Meßtechnische Details zur Deckenschwingung

Da aufwendige theoretische Berechnungen aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nur in bedeutenderen Einzelfällen in Frage kommen, sind für eine pauschale Anwendung In der Prognose auch Kenntnisse über Details von Nutzen, sofern sie sich übertragen lassen. Auf einige Detaileinflüsse soll nachfolgend hingewiesen werden.

Die Dämpfung der Eigenfrequenzen von Geschoßdecken wird im wesentlichen von der Abstrahlungsdämpfung in den Baugrund bestimmt und nicht von der Materialdämpfung des Bauteils, was anhand der gemessenen hohen Dämpfungen von Betondecken zu belegen ist. Für die Prognose sind ggfls. folgende Angaben zu verwenden: In [6-13] werden Dämpfungen D von 3.5% bis 6% und in [8-10] von "mindestens" 3% als Ansatz für die verschiedensten Beton- und Holzbalkendecken vorgeschlagen. Aus vielen Messungen des TÜV (auf Einzeldokumentationen muß verzichtet werden) ergibt sich folgender Hinweis:

- Die Ermittlung der Eigenfrequenzen und Dämpfungen von Geschoßdecken kann gleichwertig durch Stoßanregung der Decke und Messen der Impedanzfunktion oder durch Anregung des Baugrundes vor dem Gebäude und Messen des Übertragungsverhältnisses Boden-Geschoßdecke (Transferfunktion, Transmissibility) erfolgen. In jedem Fall werden stets mindestens zehn Funktionen gemittelt. Die Nutzung von Transferfunktionen wird z.B. auch in [8-5] kommentiert.

- Erfahrungswerte der Dämpfung D, nach den genannten Methoden ermittelt sind:

  Betondecken:

  Im Bereich der niedrigsten Eigenfrequenz: $f_1 \approx$ 17Hz...34Hz beträgt D = 2%...11%

  im Bereich der zweiten Eigenfrequenz: $f_2 \approx$ 41Hz...77Hz beträgt D = 3%...28%

  Holzbalkendecken:

  Im Bereich der niedrigsten Eigenfrequenz: $f_1 \approx$ 9Hz..22Hz beträgt D = 8%...13%

Zu den Einflüssen verschiedener Deckenausführungen auf die Schwingungen in der Bezugs- bzw. Aufstellungsebene konnten im Hinblick auf externe Erregung von Gebäuden keine Arbeiten gefunden werden. Die umfangreiche Literatur zu bauakustischen Problemstellungen

trifft nicht den Sachverhalt. Eher sind schon Angaben über die schwingungstechnische Auslegung von Gebäudedecken in [8-41,44] im Hinblick auf die unmittelbare Impulserregung interessant. Es werden Diagramme zur Bestimmung der Eigenfrequenzen orthotroper rechtwinkliger Platten in Weiterführung von [8-7] bereitgestellt, sowie die empfindlichste Stelle für die Anregung der Platten und eine einfache Beziehung zwischen der vertikalen Schnelle und der Zahl der Eigenfrequenzen unterhalb 40Hz (N_{40}) angegeben (siehe Bild 8.3).

Aus Untersuchungen des TÜV können zwei Einzelergebnisse mitgeteilt werden:

- o Zum Einfluß unterschiedlicher Deckenausführungen ergibt sich nach [8-12] aus vergleichenden Messungen auf derselben Decke mit identischer externer, breitbandiger Erregung (Rohdecke (RD), Verbundestrich (VE) und schwimmender Estrich (SE) wurden nacheinander realisiert) :
  - Schwimmender Estrich kann zusätzlich Resonanzen erzeugen

$$\frac{\hat{v}_z(SE)}{\hat{v}_z(RD)} \leq 2$$

  - Verbundestrich kann höhere Resonanzen der Rohdecke dämpfen, da diese aber in der Regel nicht pegelbestimmend sind ist keine Schwingungserniedrigung zu verzeichnen.

$$\frac{\hat{v}_z(VE)}{\hat{v}_z(RD)} \leq 1.2$$

- o Zum Einfluß von Zwischenböden in Rechenzentralen ergibt sich nach [8-13] aus einer Simultanmessung auf der Rohbaudecke und dem Computerboden eine frequenzabhängige Übertragungsfunktion, die in Bild 8.4 für verschiedene Schwingungsrichtungen und Deckenlasten aussagt, daß
  - in horizontaler Richtung eine mit der Frequenz anwachsende Vertärkung bis etwa 20Hz (maximal +15dB), dann mit sehr scharfem Einsatz eine Abschwächung vorliegt. Einzelne Resonanzspitzen sind möglich, die durch Deckenlasten gedämpft werden.
  - in vertikaler Richtung spielt die Deckenlast (Geräteaufstellung ist zu berücksichtigen) auf das Übertragungsverhalten eine wesentliche Rolle. Unbelastet ist der Frequenzbereich mit Verstärkung ausgeprägter (24 - 80Hz, maximal +20dB) als mit den Gerätelasten (20...38Hz, maximal +10dB). Im tieffrequenten Bereich ist unabhängig von der Deckenlast ist eine mittlere Abschwächung von -10dB unterhalb von 20Hz vorhanden.

Die vorgenannten Beispiele können nur ausschnittsweise eine Vorstellung von den vielen konstruktionsbedingten Einflüssen geben und zeigen, wie spektakulär zuweilen die Immissionsgröße von spezifischen Details abhängt, die einer Prognose kaum zugänglich sind.

8.2.6 Antwort - Spektrum - Methode

Alle bisherigen Ausführungen zur Prognose im Immissionsbereich kann man letztlich als eine Erfassung bzw. Kontrolle von Resonanzzuständen der Immissionsstruktur auffassen, die infolge Baugrund- und Strukturdämpfung mehr oder weniger stark ausgeprägt sind. Als Alternative zu sehr komplexen und z.T. doch ungenauen Berechnungen versucht man mit dem Antwort-Spektrum-Verfahren (response-spectra-Methode) die Auswirkung von Erschütterungen auf ein Bauwerk mit einer relativ einfachen Vorgehensweise zur sicheren Seite hin abzuschätzen. Das Verfahren ist aus der Erdbebenberechnung hinreichend bekannt. Man versteht darunter die Darstellung der maximalen Schwingungsantwort eines gedämpften Einmassenschwingers auf eine bestimmte Erregerfunktion in Abhängigkeit von der veränderlichen Eigenfrequenz des Schwingers. Die Überlagerung der gewichteten maximalen Einzelantworten der verschiedenen Eigenformen ergibt dann die endgültige Schwingungsantwort des Bauwerks. Die extremale Antwort wird zunächst als Auslenkung ermittelt. Werden daraus durch Multiplikation mit der Kreisfrequenz ω bzw ω^2 die Schwinggeschwindigkeit bzw. Beschleunigung abgeleitet, dann spricht man von Pseudo-Antwort-Spektren. Für Entwurfsberechnungen wird in der Regel aus mehreren Erregerfunktionen (Freifeldschwingungen) ein geglättetes statistisch aufbereitetes Antwort-Spektrum (design-spectra) ermittelt. Es hat den Vorteil einer einmaligen Aufbereitung der Erreger- bzw. Belastungsfunktion, die dann für verschiedene Bauwerksstrukturen benutzt werden kann. Natürlich erfordert auch dieses Verfahren einfache Modellannahmen und die Festlegung einer modalen Bauwerksdämpfung, die für normale Wohngebäude mit etwa 3% bis 5% angesetzt wird. Zu mathematischen Formulierungen sei z.B. auf [2-1] und [8-1] verwiesen.

Im Zusammenhang mit Immissionsprognosen wird das Antwort-Spektrum-Verfahren bisher nur bei Sprengerschütterungen zur Ermittlung von Belastungsfunktionen vorgeschlagen, um Einwirkungen auf Gebäude im voraus abschätzen zu können. Für den "Lastfall Sprengerschütterungen" liegen Beispiele aus den USA [5-8,9] und der Bundesrepublik [7-13] und [8-1] vor. Aus einer umfangreichen Untersuchung an mehr als 60 Wohnhäusern mit 1 und 2 Stockwerken [5-9] wurden mit 5% Dämpfung die Antwort-Spektren in Form von Pseudo-Relativgeschwindigkeiten (PSRV) gebildet und auf die mittleren radialen Schwinggeschwindigkeiten des Bodens normiert. Die maximale und mittlere Gebäudeantwort ist in Bild 8.5 wiedergegeben. Verbindet man ein derartiges Ergebnis mit einem Abstands-Lademengen-Gesetz

entsprechend Formel (5-1), so erhält man die Überhöhungsfaktoren vom Freifeld zum Bauwerk frequenzabhängig und für verschiedene Abstände zum Sprengort. In Bild 8.5 ist ein Musterfall angegeben, der mit den in Abschnitt 5.2.3 erwähnten unterschiedlichen Fundamentabschwächungen für Druck- und Oberflächenwellen tendenziell übereinstimmt. Die Gebäudeantwort hängt danach vom Abstand zur Quelle ab, mit zunehmender Gebäudereaktion unter 10Hz und mit abnehmender Reaktion für höhere Frequenzen. Die zu prognostizierenden Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeit reichen also im Grunde als Beurteilungsgröße von Gebäudeschäden nicht aus.

In ähnlicher Weise wurde in [7-13] auf der Meßdatenbasis aus 28 Steinbrüchen in NRW und Baden-Würtemberg ein Beschleunigungs-Antwort-Spektrum ermittelt, mit dem unter Berücksichtigung des Abstand-Lademengen-Abstandsgesetzes (5-1) die Bauwerksantwort nach der Schätzformel

$$b = 14{,}14 \; \bar{b} \; \frac{\sqrt{L}}{A} \qquad (8\text{-}8)$$

zu berechnen ist. Das einhüllende Antwort-Spektrum ist in Bild 8.6 mit einer Erklärung der verwendeten Größen dargestellt. Es kann für alle Erregerkomponenten (x,y,z-Richtung) und alle Gesteinsarten verwendet werden. Die berücksichtigte Bauwerksdämpfung liegt zwischen 2% und 5%. Die für eine Abschätzung der Bauwerksbeanspruchung notwendige Vorgehensweise wird erläutert.

Das einhüllende Antwort-Spektrum wird in der Mehrzahl der Fälle zu unrealistisch hohen Beanspruchungswerten führen. Es wäre deshalb sinnvoll, die Erregerfunktion statistisch aufzubereiten und z.B. Spektren mit der in der Baustoffnormierung verwendeten Überschreitungswahrscheinlichkeit von 5% einzusetzen. Hier könnte eine Verbindung zum Amplituden-Abnahmegesetz für Fraktile (Abschnitt 6.3.4.2, Bild 6.13) und zur Ausbreitung des normalverteilten Emissionsspektrums (Abschnitt 6.3.2.2, Formel 6-16) hergestellt werden.

Der in [5-8] ausgesprochenen Empfehlung, es sollte eine vereinfachte Methode nach dem Antwort-Spektrum-Verfahren für praktische Voraussagen bei beliebigen Erregerspektren entwickelt werden, sollte man wegen der Vorteile nachgehen.

8.3 KÖRPERSCHALL

8.3.1 Problemstellung

Die Ausführungen in Abschnitt 8.1 sind durch die klare Feststellung zu ergänzen, daß zur Immissionsprognose bei externen Erschütterungsquellen nicht die klassischen Probleme der Gebäudeakustik wie

- o Schalldämmung von Wänden
- o Trittschall
- o Flankenübertragung

zu betrachten sind, obwohl auch hier Körperschallphänomene eine wichtige Rolle spielen. Z.B. finden sich wervolle Hinweise in [8-19] zur Körperschallausbreitung bei der Flankenübertragung.
Im vorliegenden Fall geht es um die beiden hintereinander geschalteten Fragestellungen

- o Körperschallausbreitung in der Struktur und
- o Körperschallabstrahlung in die Umgebung.

Die Antwort darauf ermöglicht erst die Prognose der akustischen Immissionsgröße "Sekundärer Luftschall". Darüberhinaus gehen die höherfrequenten mechanischen Biegeschwingungen auch in die schwingungstechnischen Immissionsgrößen "Bewertete Schwingstärke" und "Schwinggeschwindigkeit eines Bauteils" ein. Da die Körperschallphänomene im Festkörper sehr viel komplizierter sind als die Schallausbreitung in Gasen, soll kurz die Physik der Wellenfortpflanzung im Festkörper angesprochen werden, bevor ausführlicher auf die Körperschallausbreitung und -abstrahlung eingegangen wird.

Zuvor jedoch ein ergänzender Hinweis auf die Methode der statistischen Energie-Analysen, die bereits in Abschnitt 8.1 kurz angesprochen wurde. Die SEA-Methode wurde aus folgendem Grund entwickelt: In endlichen Strukturen von Platten und Stäben liegen die Eigenfrequenzen und Moden oberhalb der 2. Eigenform so dicht, daß statt exakter schwingungstheoretischer Lösungen das ungefähre Verhalten der Struktur anhand einer mittleren (Körperschall-) Energie mit geringerem Aufwand betrachtet wird. Mit dieser SEA-Methode läßt sich der Energiefluß zwischen Teilen der Struktur analog zur Thermodynamik berechnen. Statt Eigenmoden genau zu bestimmen wird nun die modale Energie, d.h. die in einem Frequenzband $\Delta\omega$ vorhandene Gesamtenergie E pro Zahl der Eigenfrequenzen N in $\Delta\omega$, zur zentralen Größe. Durch Aufstellen der Energiebilanzen lassen sich dann Transmissionsfaktoren und somit die Körperschallausbreitung in endlichen Strukturen bestimmen. Neben den Grundlagen zur Leistungsbetrachtung in [8-2,34] sind in verschiedenen Artikeln Anwendungen der SEA-Methode zur

Lösung von Körperschallproblemen zu finden [8-22,30]. Da aber die Aufstellung von Energiebilanzen die Kenntnis von Energie-Kopplungsfaktoren und Energie-Verlustfaktoren erfordert, finden diese Modelle auch ihre Kritiker. Sie dürfte als Methode für eine Immissionsprognose wahrscheinlich nicht in Betracht kommen. Weitere Literaturhinweise gibt [8-17].

8.3.2 Wellenfortpflanzung im Festkörper

Die Dynamik von Bauteilen, d.h. ihr Ansprechen auf mechanische Erregungen wird überwiegend, wie im Abschnitt 8.2 gezeigt, mit strukturdynamischen Methoden im Bereich der niedrigsten Eigenmoden behandelt. Hier sind die Strukturen gut definiert. Für höhere Frequenzbereiche sind Randbedingungen und Struktur nicht adäquat zu definieren, und jede Anregung in einer Frequenz erzeugt Antworten in den verschiedensten Moden. Die lokale Antwort eines Bauteils nähert sich mit wachsender Frequenz der eines unendlich ausgedehnten Systems. Damit können - wie z.B. im Boden - phasenverschobene Bewegungen auftreten und sich als Welle in der Konstruktion fortpflanzen. In Relation zu den kurzen Wellenlängen liegen zwischen Anregungspunkt und der nächsten Unstetigkeit längere Ausbreitungsstrecken, so daß reflektierte Wellenteile stark geschwächt und vernachlässigbar werden, d.h. für den Anregungspunkt praktisch nicht existieren. Die Strukturmodellierung grenzt praktisch auf ein- oder zweidimensionale Elemente ein (Stäbe, Platten und Schalen), nimmt nur lineare Vorgänge an und geht im Normalfall davon aus, daß nach einer Unstetigkeitsstelle die Ausbreitung auch weiterhin ohne Reflexionen verläuft. Trotz dieser Vereinfachung gestaltet sich die Körperschall-Wellenausbreitung noch kompliziert genug, da im Festkörper die verschiedenen Wellenarten gleichzeitig auftreten und an Unstetigkeiten ineinander umgewandelt werden können. Tabelle 8.2 gibt einen Überblick der möglichen Wellentypen in Festkörpern. Theoretische Abhandlungen zur Wellenausbreitung im Festkörper mit Bezug zum Körperschallthema sind in [8-2,18,21,35,38] zu finden.

In Platten und Stäbe sind die Biegebewegungen für die Auslenkungen senkrecht zur Strukturoberfläche verantwortlich. Diese werden nicht nur leicht wahrgenommen, sondern vor allem auch als sekundärer Luftschall abgestrahlt. Für die Schallabstrahlung sind Longitudinal-, Scher- und Torsionswellen zwar von untergeordneter Bedeutung, doch wichtig für den Transport der Schwingungsenergie in der Struktur. Überall wo eine Unstetigkeit besteht (Ecken, Querschnittssprünge, Kreuz- und T-Verbindungen) treten Energie- bzw. Wellenumwandlungen auf, so daß auch nach außen unbemerkte Scherenergie beispielsweise als Biegewellenenergie auftaucht und zur Schallabstrahlung einen zusätzlichen Beitrag leistet. Deshalb weisen Strukturverbindungen oft nicht die erwartete Körperschalldämmung auf und entferntere Punkte können größere Schnellen aufweisen als näher zur Einleitungsstelle gelegene Punkte.

Neben den Bauteilparametern Steifigkeit und Masse spielt für das Körperschallverhalten auch die Strukturdämpfung infolge Dissipation in dreierlei Hinsicht eine wichtige Rolle: Strukturdämpfung verstärkt die räumliche Abnahme, verkürzt das zeitliche Abklingen und vermindert die Schwingungsantworten bei resonanznaher oder breitbandiger Erregung. Dem Standardwerk zum Körperschall [8-2] können u.a. Kenndaten zu Materialdämpfung von Metallen und Baustoffen entnommen werden. Als Faustregel ist danach für geschweißte Stahlkonstruktionen ein Verlustfaktor von $\eta = 10^{-3}$, für vernietete und geschraubte Bleche $\eta = 2 \cdot 10^{-2}$ und bei Baustoffen wie Mauerwerk und Beton ein $\eta = 2$ bis $3 \cdot 10^{-2}$ anzusetzen. Die Eigenschaften der Baustoffe hängen jedoch stark von der jeweiligen Zusammensetzung und Herstellungsart ab. Die für homogenes Material geltenden Dämpfungen werden durch konstruktiv eingebrachter Inhomogenitäten (z.B. geschichtete Platten) wesentlich erhöht, wie in [8-2] detailliert nachzulesen ist.

8.3.3 Körperschallausbreitung

8.3.3.1 Impedanzen

Die Körperschallanregung eines Bauwerkes durch externe technische Erschütterungsquellen erfolgt über die Wechselwirkung zwischen Baugrund und Fundament. Auf die am Fundament eingeleitete Kraft F reagiert das Bauteil mit einer zur Kraft proportionalen Bewegung, die sich z.B. als Schwinggeschwindigkeit oder Schnelle v messen läßt. Als Eingangswiderstand des Bauteils definiert man die mechanische Impedanz Z

$$Z = \frac{F}{v} \qquad [Ns/m] \quad , \tag{8-9}$$

die im allgemeinen eine komplexe Funktion der Frequenz ist. Eingeführt ist auch der Kehrwert 1 / Z als Admittanz. Die Fortpflanzung der Fundamenterregung in das Bauwerk hinein wird - wie bereits erwähnt - mit der ebenen Wellentheorie mit und ohne Dämpfung durch Lösen der Differentialgleichungen für Longitudinal- und Biegewellen beschrieben. Zumindest wird dies im Ansatz jeweils stückweise versucht, indem Stützen und Skelettstrukturen als ein System von homogenen Stäben, sowie Wände und Decken als homogene Platten aufgefaßt werden. An jeder Unstetigkeit treten jeweils wieder Eingangsimpedanzen auf, die die Übergangs- bzw. Transmissionsverluste bestimmen. Die Ausbreitung von Körperschall abzuschätzen bedeutet demnach die Formulierung

- der Eingangsimpedanzen von Stäben und Platten sowie
- der Transmission und Reflexion an Übergangsstellen in der Konstruktion.

Die Details sind ausführlich abgeleitet in [8-2]. Die weiteren Ausführungen sind diesem Lehrbuch entnommen, wobei besonders die Hinweise auf praktische Anwendungen interessierten. Vorab muß aber gesagt werden, daß auch in [8-2] dem erkennbaren Bemühen zur praxisnahen Darstellung durch die Komplexität eines Gesamtbauwerks Grenzen gesetzt sind. So muß sich eine Zusammenstellung von Fakten für die Prognose ebenfalls auf die Einflüsse von Elementen der Struktur beschränken. Die Übertragung auf die Realität kann wieder einmal nur durch den Vergleich mit Meßergebnissen näherungsweise versucht werden. Eine Zusammenstellung von Impedanzformeln, die in jeweils drei Versionen formuliert sind, gibt Tabelle 8.3. In der für numerische Berechnungnen am geeignetsten zweiten Version, wird der Eingangswiderstand durch die Materialdichte ρ, die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_2 im jeweiligen Material durch die Frequenz f und die Stab- oder Plattendicke h ausgedrückt. S bedeutet jeweils die Querschnittsfläche eines Stabes. Tabelle 8.4 ergänzt die Impedanzformeln für endliche Stäbe und Platten. Einige Beispiele von berechneten Kraftimpedanzen für verschiedene Materialien sind in Bild 8.8 eingetragen. Eingangsimpedanzen von dicken Platten werden in [8-37] behandelt.

Treffen die Körperschallwellen auf Stellen, an denen sich das Material oder die Bauweise ändert, dann wird an dieser Unstetigkeit ein Teil der Energie reflektiert und der Rest wird zum Teil unter Wellenumwandlung weitertransportiert. Es ist unmöglich, diese Dämmwirkung von allen praktisch vorkommenden Baukonstruktionen zu erfassen, und so können auch in [8-2] nur typische Fälle herausgegriffen und durch die Transmissionsgrade τ und Reflexionsgrade $\rho = 1\text{-}\tau$ beschrieben werden. So gelten unter der Voraussetzung gleicher Stoffe an der Unstetigkeitsstelle die nachfolgenden Beziehungen. Es ist: $\sigma = h_2/h_1$ das Verhältnis der Plattendicken oder $\sigma = \frac{S_2}{S_1}$ das Verhältnis der Balkenquerschnittsflächen, $\beta^2 = \left[\frac{c_B}{c_L}\right]^2 = 1{,}8\,\frac{f\,h}{c_l}$ und das Schalldämm-Maß

$$R = \lg\left[\frac{1}{\tau}\right] \tag{8-10}$$

8.3.3.2 Querschnittssprung

Die Wellenübertragung ist in Bild 8.9 (a) als Schalldämm-Maß R in Abhängigkeit des Dickenverhältnisses ρ dargestellt, dem liegen folgende Transmissionsgrade τ zugrunde:

Longitudinalwellen:

$$\tau = \frac{4}{(\sigma^{1/2} + \sigma^{1/2})^2} \tag{8-11}$$

Biegewellen:

$$\tau = \left[\frac{\sigma^{-5/4} + \sigma^{-3/4} + \sigma^{3/4} + \sigma^{5/4}}{0{,}5\sigma^{-2} + \sigma^{-1/2} + 1 + \sigma^{1/2} + 0{,}5\sigma^{-2}} \right]^2 \qquad (8\text{-}12)$$

Man erkennt, daß Longitudinalwellen selbst bei größeren Querschnittssprüngen keine wesentliche Dämmung erfahren. Bei gleichen Baustoffen dürften in der Praxis kaum größere Werte als $\sigma = 5$ bzw. kleinere Werte als $\sigma = 0.2$ vorkommen. Dies würde maximal zu einer Dämmung von 3dB führen können. Die Biegewellen werden in diesem σ-Bereich nicht wesentlich stärker gedämmt (z.B $\sigma = 0.5$: R=0.5dB).

8.3.3.3 Biegesteife Ecken

Wichtiger als Material und Querschnittssprung sind die rechtwinkligen Übergänge in Konstruktionen. Im Gebäude sind dies aneinandergrenzende Wände eines Zimmers, auf Stützmauern ruhende Decken und die aus Profilen zusammengesetzten Rahmenkonstruktionen. Als Besonderheit tritt neben der Reflexion auch die Umwandlung von Wellenarten auf, d.h. ein beachtlicher Biegewellenanteil wird in Longitudinalwellen und in umgekehrter Weise an der folgenden Ecke umgewandelt. Die einfallende Biegewellenenergie wird nach

$$\rho_{BD} + \rho_{BL} + \tau_{BB} + \tau_{BL} = 1, \qquad (8\text{-}13)$$

jedoch unterschiedlich für tiefe und hohe Frequenzen aufgeteilt.

Biegewellen:

Für tiefe Frequenzen (β ->o) werden nur Biegewellen durchgelassen und reflektiert. Bild 8.9(b) liegt der Transmissionsgrad

$$\tau = \frac{2}{(\sigma^{-5/4} + \sigma^{5/4})^2} \qquad (8\text{-}14)$$

zugrunde, der bei gleicher Wandstärke (σ=1) die minimale Dämmung von 3dB aufweist.

Für höhere Frequenzen ($\beta_1=\beta_2=\beta$, $\beta_{max} = 1/3$) treten zusätzlich eine reflektierte und eine durchgelassene logitudinale Welle auf. Die Doppelindizes von τ und σ geben den anregenden (1. Stelle) und den erhaltenden (2. Stelle) Wellencharakter an. Mit der Abkürzung $1/\gamma = 2+6\beta+9\beta^2$ gilt:

$$\tau_{BB} = \gamma (1 + 2\beta^2) \qquad (8\text{-}15)$$

$$\tau_{BL} = \gamma (5\beta + 8\beta^2) \qquad (8\text{-}16)$$

$$\rho_{BB} = \gamma (1 - \beta^2) \qquad (8\text{-}17)$$

$$\rho_{BL} = \gamma \beta \tag{8-18}$$

Diese Energieaufteilung beim Auftreffen auf eine Ecke wird in Bild 8.10 (a) dargestellt. Mit τ_{BL} wird ein beachtlicher Anteil in Longitudinalwellenenergie umgewandelt. Es interessiert demnach auch die longitudinale Anregung der Ecke.

Longitudinalwellen:

Es gelten die in Bild 8.10 (b) gezeigten Beziehungen mit

$$\tau_{LL} = \gamma \beta^2 \qquad \tau_{LB} = \tau_{BL} \tag{8-19}$$

$$\rho_{LL} = 2 \gamma \qquad \rho_{LB} = \rho_{BL} \tag{8-20}$$

Für tiefe Frequenzen (β -> 0) tritt demnach Totalreflexion der Longitudinalwellen ein.

Für hohe Frequenzen wird ein merklicher Anteil in Biegewellen umgesetzt. Beispielsweise ist dieser Anteil bei 200Hz und einer 20cm dicken Betonplatte $\tau_{LB} \approx 1/3$, während ein Anteil von $\rho_{LL} \approx 2/3$ reflektiert wird.

8.3.3.4 Gelenkige Ecke

Die gelenkige Ecke ist z.B. bei Decken realisiert, die lose auf einer Stützmauer aufliegen. Da an Ecken normalerweise der Schallübertragung bei tiefen Frequenzen praktisch nur über den Momenten-Übertrag läuft, dieser Effekt aber bei gelenkigen Ecken nicht möglich ist, sind hier drastische Reduzierungen zu erwarten. Es gilt:

$$\tau_{BB} = 0$$

$$\tau_{BL}\ (i=2) = \tau_{LB}\ (i=1) = \frac{4\beta_i}{2+2\beta_i + \beta_i^2} \tag{8-21}$$

$$\rho_{BB} = \frac{2 - 2\beta_2 + \beta_2^2}{2 + 2\beta_2 + \beta_2^2} \tag{8-22}$$

Die Longitudinalwellen verhalten sich ähnlich wie in biegesteifen Ecken. Und bei tiefen Frequenzen (β -> 0) tritt mit ρ_{BB}=1 für die Biegewellen eine Totalreflexion ein.

8.3.3.5 Rechtwinklige Verzweigungen

Häufiger als reine Ecken sind in Gebäuden die rechtwinkligen Verzweigungen von Platten und Stabelementen anzutreffen. Setzt man voraus, daß die in jeweils gleicher Richtung liegenden Bauteile gleichartig sind und nur die abzweigenden Elemente eine andere Dicke haben, dann

erhält man mit den Bezeichnungen in Bild 8.11 (a) für das Wandkreuz und in Bild 8.11 (b) für die Wandabzweigung die folgenden Transmissionsgrade

Wandkreuz:

$$\tau_{13} = \frac{0{,}5}{1+2\sigma^{5/2} + \sigma^{5}} \tag{8-23}$$

$$\tau_{12} = \tau_{14} = \frac{0{,}5}{(\sigma^{5/4} + \sigma^{-5/4})^2} \tag{8-24}$$

Für die reine Biegewellenübertragung in gleicher Richtung erhält man nach τ_{13} für die seitliche Abstützung durch eine sehr dünne kreuzende Wand (σ -> 0) ein minimales Dämm-Maß R_{13} von 3dB. Bei Plattengleichheit (σ = 1) erhält man 9dB, bei Dickenverdopplung (σ =2), z.B. Mauern von Voll- und Halbsteinziegeln kreuzen sich, ergeben sich theoretisch bereits 20dB. Für die Übertragung "Über Eck" erhält man nach τ_{12} bei Plattengleichheit ein minimales Dämm-Maß R_{12} von 9dB, bei Dickenverdopplung von 12dB. Das Dämm-Maß R_{12} bezieht sich auf den Leistungsübertrag, die Differenz der Schnellpegel ΔL_v erhält man nach

$$\Delta L_v = R_{12} - 10 \lg \frac{m_1' \, c_{B_1}}{m_2' \, c_{B_2}} \tag{8-25}$$

Dagegen kennzeichnet das Dämm-Maß R_{13} auch gleich die Differenz der Schnellepegel.

Wandabzweigung:

$$\tau_{13} = \frac{1}{2+2\sigma^{5/2} + 0{,}5\sigma^{5}} \tag{8-26}$$

$$\tau_{12} = \tau_{21} = \frac{1}{(\sqrt{2}\,\sigma^{-5/4} + \sqrt{0{,}5}\,\sigma^{5/4})^2} \tag{8-27}$$

Analog zum Wandkreuz erhält man bei sehr dünner Abzweigung (z.B. nichttragende Leichtbauwand) wieder ein minimales Dämm-Maß R_{13} von 3dB und den hier etwas verzögert einsetzten monotonen Anstieg von R_{13} mit σ. Für R_{12} ergibt sich wieder der Schnellepegel nach (8-25) und die minimale "Über Eck"-Übertragung gibt es jetzt bei σ = 1.32 mit R_{12} = 6dB.

Die Körperschalltransmission durch Verzweigungen wird anhand gekoppelter Wellengleichungssysteme in [8-18,21] exakt berechnet und die prinzipielle Eignung für Longitudinal- und Biegewellen in Aussicht gestellt. Dies müßte an einem einfachen Labormodell einer T-Verzweigung mit verschweißten Koppelstellen überprüft und die Umwandlung von Biegewellen in Longitudinalwellen nachgewiesen werden. Es ist ein eindimensionales Modell, das Angaben zum Kopplungsgrad benötigt.

8.3.3.6 Elastische Zwischenschichten

Wird in einen Stab oder eine Platte eine elastische Zwischenschicht eingebaut, um die vor allem in Betonbauten ziemlich gute Körperschallausbreitung zu reduzieren, so erhält man mit der Schichtdichte l und den Materialdaten E_2, ρ_2 und der Querschnittsfläche S_2 die folgenden Übergänge, deren Schalldämm-Maße in Bild 8.12 für das gezeigte Beispiel "Kork" wiedergegeben sind.

Longitudinalwellen

$$\tau = \left[1 + \left[\frac{\omega Z_1}{2 s_2}\right]\right]^{-1} \qquad \text{mit} \quad s_2 = \frac{E_2 S_2}{l} \tag{8-28}$$

Es kommt demnach entscheidend auf die Steife s_2 der Zwischenschicht an.

Biegewellen

Im uns interessierenden Frequenzbereich bis etwa 300Hz kann man die komplizierten Verhältnisse kennzeichnen durch die Durchlaßfrequenz

$$f_D \approx \frac{c_B}{\lambda_D} \simeq \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1 h^2 l}} \tag{8-29}$$

und oberhalb von f_D mit einem Anstieg des Schalldämm-Maßes nach

$$R \simeq \text{konst} + 30 \log f \tag{8-30}$$

8.3.3.7 Sperrmassen

Eine Dämmwirkung von Sperrmassen ist im Frequenzbereich bis 300Hz weder für Longitudinalwellen noch für Biegewellen von Bedeutung. Regelmäßig verteilte Sperrmassen, im Hochbau z.B. in Rippendecken realisiert, haben den Effekt, daß bestimmte Frequenz-Sperrbereiche und -Durchlaßbereiche auftreten. In [8-17] wird auf Arbeiten hingewiesen, die dieses Verhalten analytisch in räumlich periodischen Strukturen und meßtechnisch in der Spanten-Platten-Struktur von Schiffen untersucht haben.

8.3.3.8 Parallele Platten

Hier kommt vor allem der konstruktive Aufbau von Geschoßdecken zum Tragen, z.B. schwimmender Estrich oder auch Leichtbaudecken auf fachwerkartigen Stahlträgern. Normalerweise wird in der Literatur die direkte Anregung der oberen Platte im Rahmen des Trittschallschutzes

behandelt. Im Fall der Körperschallausbreitung interessiert aber die Eingangsimpedanz an den Auflagern mit der nachfolgenden Schallabstrahlung der mehrschichtigen Deckenplatte. Die einzige praktische Anwendung der Wellentheorie für die Körperschallprognose in einem geplanten Gebäude konnte in [8-15] gefunden werden. Der Rechengang wird allerdings nur angedeutet und nachträgliche Messungen ergaben insgesamt ungünstigere Werte gegenüber der Vorabschätzung, was mit einer schlechten Bauausführung und Körperschallbrücken erklärt wird.

Eine Zusammenstellung der Transmissionsgrade für Longitudinal- und Biegewellen und Formeln für untere Grenzfrequenzen f_u (erst für $f_2 > f_u$ beginnt die Wirkung) liefert Tabelle 8.5.2.

Insgesamt werden die ausführlichen, theoretisch ermittelten Schalldämm-Maße von [8-2] selbst kritisch beurteilt. In Laboranordnungen konnten die Dämm-Maße nicht einhellig nachvollzogen werden. Kleinste Abweichungen von einer idealen biegesteifen Verbindung führten zu großen Änderungen im τ_{BB}-Wert Dies verwundert nicht wenn man bedenkt, daß bei einer gelenkigen Ecke die Biegewellentransmission völlig unterbunden ist. Andererseits wird in [8-21] von Laboruntersuchungen zur Drehfedernachgiebigkeit an einem symetrischen Decken-Wand-Knoten mit unterschiedlichen Fugen berichtet. Man stellte fest, daß die üblichen Maßschwankungen keinen nennenswerten Einfluß auf die Nachgiebigkeit haben und daß die Berücksichtigung der gemessenen Drehfedernachgiebigkeiten bei Körperschallberechnungen zu einer deutlichen Abnahme des Transmissionsgrades der Biegewelle geführt haben.

Der Hinweis in [8-2], daß im Hochbau der Putz alle Ausführungsfehler zudeckt, gibt Anlaß, die bisher in der Praxis festgestellte Körperschalldämmumg für die Ausbreitung in realen Gebäuden und nicht nur in idealisierten Bauteilen für Abschätzungen zusammenzustellen.

8.3.4 Meßtechnischer Befund zur Körperschallausbreitung

Die Abnahme der Körperschallenergie, die sich vertikal und horizontal in einem realen Bauwerk ausbreitet, wird nach dem derzeitigen Wissensstand noch nicht beherrscht. Dämpfungseigenschaften von Deckenkonstruktionen und Stoßstellen, sowie Ableitungseigenschaften der miteinander vernetzten Innen-. und Außenwände werden von unzähligen Varianten in den konstruktiven Details und in den Bauausführungen bestimmt. Die bekannt gewordenen Laboruntersuchungen an modellierten Konstruktionselementen können zur Durchführung von Immissionsprognosen auch keinen Beitrag leisten. Wie schon an anderen Stellen in dieser Studie muß auch hier die meßtechnische Erfahrung abgefragt werden. Die ersten systematischen

Untersuchungen zur Körperschallausbreitung in großen Wohngebäuden sollten Kenntnisse zur Neufassung der DIN 4109 bereitstellen [8-33]. Sie verfolgten zwar bauakustische Ziele, doch ihre Ergebnisse an der Frequenzuntergrenze von 200Hz bis 300Hz geben doch Hinweise für den im Immissionsschutz relevanten Frequenzbereich unter 300Hz. Danach kann für unterschiedliche Stahlbetonbauten, massiv oder in Stahlskelettbauweise, oder mit Wänden aus Gasbetonschalen bzw. Lochziegeln pauschal folgendes festgehalten werden:

- Die Dämpfung der Körperschallausbreitung nimmt mit steigender Frequenz zu.
- In vertikaler Ausbreitungsrichtung beträgt im Mittel die Dämpfung pro Stockwerk ca. 5dB bei etwa 300Hz. Für die uns interessierenden tieferen Frequenzbereich bis f < 100Hz läßt sich daraus eine Abnahme pro Stockwerk von etwa 3dB ableiten. Dies ist in Übereinstimmung mit dem minimalen Dämm-Maß R_{13} in Abschnitt 8.3.3.5. Bezüglich der verschiedenen Baukonstruktionen treten erstaunlicherweise keine großen Schwankungen auf.
- In horizontaler Ausbreitungsrichtung hängt die Dämpfung pro Raum deutlich von der Bauweise und Konstruktion ab. Bei 300Hz steigt sie von 3dB im Stahlbetonskelettbau über 6dB im Stahlbetonbau auf 9dB im Gasbetonschalenbau. Die im Mittel schwache Frequenzabhängigkeit ist nicht einheitlich ausgeprägt.
- Eine nützliche Zusammenstellung der Verlustfaktoren η und der Längendämpfung $D_l = 13.6\ \eta\ /\ \lambda_B$ in [dB / m] für die verschiedensten Baustoffen ist in Abhängigkeit von der Frequenz in Bild 8.13 zu finden.

Die offensichtlichen Unterschiede in der horizontalen und vertikalen Körperschallausbreitung werden noch nicht gut verstanden. Es könnte damit zusammenhängen, daß in vertikaler Richtung die lastabtragenden Bauteile relativ homogen und kraftschlüssig durchgehend sind. In horizontaler Richtung wird die Ausbreitung dagegen durch Zwischenwände, Unterzüge, unterschiedliche Verkehrslasten u.ä. wesentlich stärker gestört. Bei tiefen Frequenzen dominiert das Eigenschwingverhalten der Decken, doch bei etwas höheren Frequenzen, für die noch nicht das System als unendlich ausgedehnt erscheint, könnten nach [8-17] Stützen und Unterzüge zu Sperr- und Durchlaßbereichen in der Körperschallausbreitung Anlaß geben (siehe Abschnitt 8.3.3.7).

Nützliche Daten für moderne Hochbauten, die auf japanische Untersuchungen in einem Stahlbetonskelettbau [8-28] zurückgehen, werden in [6-21] vorgestellt, woraus Tabelle 8.6 entnommen ist. Die Abnahme des Körperschallpegels wird als Funktion der Frequenz und des Abstandes von der Quelle, die unterhalb des Gebäudes stockwerksweise ermittelt. Während für mehrgeschossige Gebäude im allgemeinen eine Dämpfung von etwa 3dB pro Stockwerk angenommen wird, weist Tabelle 8.6 bei tiefen Frequenzen nur 1dB in den höheren Stockwerken und

3-4dB in den unteren Stockwerken aus. Diese Dämpfungen pro Stockwerk sind zusammen mit den Resonanzüberhöhungen von Stockwerksdecken, die auf Stützen oder Wandscheiben gelagert sind, in Bild 8.14 zur Anwendung in Prognoseschätzungen in Form von Frequenzgangkurven dargestellt.

Von Bild 8.14 stark abweichende Ergebnisse werden in [8-26] bei U-Bahnerregung angeführt. Die Körperschallpegelabnahme vom Keller zum 1.Obergeschoß wird in einem Stahlbetonskelettbau mit 6dB bei 50Hz und in einem Mauerwerksbau mit 10dB bei 16Hz und 18dB bei 63Hz festgestellt. In den darüberliegenden Stockwerken wurde in beiden Fällen keine weitere Abnahme registriert. Der aufgrund dieses Ergebnisses in [8-26] gezogene Schluß, die Schnellepegel aller Stockwerke gleich groß anzusetzen wie die Freifeldwerte, deckt sich nicht mit den allgemeinen Erfahrungen und ist als untauglich einzustufen.

Die vertikale Körperschallpegelabnahme je Stockwerk von verschiedenen Autoren wird in [8-16] frequenzabhängig in einem Diagram zusammengestellt. Aus Bild 8.15 ist je nach Bauweise eine Abnahme pro Stockwerk von 2 - 3dB bei 20Hz und 2.5 - 8dB bei 300Hz abzulesen. Das Bild (Kurve d) zeigt auch, daß die Pegelabnahme pro Stockwerk wesentlich steiler mit der Frequenz ansteigt, wenn die Pfeiler, die den Körperschall von unten in das Gebäude leiten, mit großen Fundamentenmassen verbunden sind.

Der letztgenannte Effekt könnte vielleicht, zusammen mit nicht vorhersehbaren Deckenresonanzen, auch die starken Schwankungen in der vertikalen Körperschallpegelabnahme erklären, die in [8-14] für drei auf Pfählen gegründete Bauteile eines 7 - 8 geschossigen Hotels bei U-Bahnerregung gemessen wurden. In den gleichförmig gestalteten Hotelzimmern schwanken im 1. und 3. Obergeschoß die Pegelabnahmen zwischen - 0,8dB und - 5,7dB und vom 3. bis 5. Obergeschoß zwischen + 0,2dB und + 5,6dB je Stockwerk. Nicht nur die erwartete Abnahme von ca. 3dB je Stockwerk bleibt aus, sondern in den höheren Stockwerken setzt sogar eine Verstärkung ein. Vorangegangene FE-Rechnungen konnten diese Effekte nicht voraussagen. Ein ähnliches Erscheinungsbild trat an anderer Stelle in einem 12 geschossigen Gebäude bei künstlicher Erregung in einem seitlich gelegenen U-Bahntunnel auf.

Aus den vorgestellten Daten kann man entnehmen, daß für eine erste grobe Schätzung mittlere Pegelabnahmen für normale Wohnhäuser zur Verfügung stehen. Für genauere Prognosen sind bei einfachen und erst recht bei mehrgeschossigen, komplexeren Gebäuden Messungen an bestehenden Strukturen durchzuführen. Die Schwankungsbreite, die aus einer Überlagerung verschiedener Resonanzzustände (Decken, Wände) und verschiedener Dämpfungseinflüsse

(Bodenabstrahlung, Struktur) resultiert, bleibt nach wie vor sehr groß und macht die Prognose der Körperschallpegel von Bauteilen in einem Gebäude ziemlich unsicher.

8.4 SEKUNDÄRER LUFTSCHALL

Zur Voraussage des Luftschalls in einem Raum, der durch die Schwingungen seiner Oberfläche entsteht und als sekundärer Luftschall bezeichnet wird, müssen bekannt sein:

- o der Körperschallpegel bzw. die Schwinggeschwindigkeiten auf den Begrenzungsflächen als Funktion der Frequenz und in ihrer räumlichen Verteilung,
- o der Abstrahlgrad der schwingenden Flächen und
- o die akustischen Randbedingungen des Raumes, also seine Geometrie und Absorptionseigenschaft.

Sind die Körperschallpegel der Raumbegrenzungsflächen erst einmal bestimmt, dann stellt die Prognose des sekundären Luftschalls kein Problem mehr dar. Sowohl Abstrahlgrad als auch Absorptionsvermögen sind bereits von der akustischen Disziplin her wohl definierte und beherrschbare Größen.

8.4.1 Körperschallabstrahlung

Schwingende Flächen bzw. Wände erzeugen in der angrenzenden Luft einen Wechseldruck. Die dabei abgestrahlte Schalleistung wird als Schalldruckpegel $L_p = 20\lg(\tilde{p}^2/\tilde{p}_0^2)$[dB] gemessen mit dem Effektivwert des Schalldruckes $\tilde{p}$ und der Bezugsgröße $\tilde{p}_0 = 2\cdot10^{-5}$ N/m². Schalldruckpegel L_p und Schnellenpegel L_v der Fläche sind direkt ineinander zu überführen, wenn in $L_v = 20\lg v / v_0$ [dB] der Effektivwert der Schnelle v auf die Größe $v_0 = 5\cdot10^{-8}$m/s bezogen wird.

Die Abstrahlung der Biegewellenenergie wird dann maximal, wenn die Biegewellenlänge λ_B größer ist als die Wellenlänge λ in Luft, d.h. wenn $\lambda_B > \lambda$ gilt. Für $\lambda_B < \lambda$ macht sich der hydrodynamische Kurzschluß bemerkbar, und es ergibt sich eine wesentlich kleinere Abstrahlung, die von der Kantenlänge und den Randbedingungen abhängt. Für $\lambda_B = \lambda$ erhält man die für die Abstrahlung wichtige Grenzfrequenz f_g. Mit

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{2\pi}{f}}\ \sqrt[4]{\frac{B}{m''}} \qquad \text{und} \qquad \lambda_B = \frac{c}{f} \tag{8-31}$$

erhält man die Grenz- bzw. Koinzidenzfrequenz zu

$$f_g = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B}} \qquad (8\text{-}32)$$

Es bedeuten:

c = Schallgeschwindigkeit in Luft = 340m/s

m" = Masse pro Flächeneinheit

B = EJ = Biegesteifigkeit der Fläche

E = Elastizitätsmodul

$J = h^3/12$ = Trägheitsmoment der rechtwinkligen Platte der Dicke h [m] bezogen auf die Breite.

Für homogene Platten vereinfacht sich die Formel zu

$$f_g = \frac{c^2}{1{,}8\, c_L h} \qquad (8\text{-}33)$$

mit c_L = Longitudionalwellengeschwindigkeit in der Platte. Für Betonplatten erhält man z.B. $f_g \simeq 19.5 / h$ [Hz].

Die Grenzfrequenz für Abstrahlung in Luft ist von verschiedenen Baustoffen dem Bild 8.16 zu entnehmen. Bei anisotropen Mehrschichtplatten (Sandwich) ist die Grenzfrequenz nach Formel (8-32) zu bestimmen; sie liegt in der Regel höher als die einer homogenen Platte.

8.4.2 Berechnung des Luftschallpegels

Um den Zusammenhang zwischen Körperschallpegel L_V und Schalldruckpegel L_P zahlenmäßig herzustellen, hat man in der Akustik den Abstrahlgrad σ bzw. das Abstrahlmaß 10lg σ eingeführt. Der Abstrahlgrad von Platten ist in Bild 8.17 (a) zusammengestellt und das Abstrahlmaß einer ebenen Platte abhängig vom Verhältnis λ_B / λ und der Kantenlänge in Bild 8.17 (b) wiedergeben. Die Berechnung des sekundären Luftschallpegels im diffusen Schallfeld erfolgt nach

$$L_P = L_V + 10\lg \sigma + 10\lg(4\, S/A)\ \text{dB} \qquad (8\text{-}34)$$

mit: S = schwingende Fläche und A = Absorptionsfläche des Raumes.
Die Absorptionsfläche läßt sich nach der Sabine'schen Formel

$$A = 0.163\, V / T \qquad (8\text{-}35)$$

aus der Nachhallzeit T (60dB Abklingzeit) und dem Raumvolumen V bestimmen.

Ist ein diffuses Schallfeld etwa unterhalb von 50 bis 80Hz nicht mehr gegeben, so müssen die akustischen Eigenschwingungen des Raumes berücksichtigt werden. Unterhalb der Raumeigenfrequenz herrscht überall im Raum der gleiche Druck und das Volumen wirkt als Feder. Die Berechnung nach (8-34) ist also im tieffrequenten Bereich nicht besonders gut geeignet. Deshalb wird in [8-32] vorgechlagen, für tiefe Frequenzen den Schalldruck nach

$$L_P = L_V + 20\lg (S/S_0) - 20\lg (V/V_0) - 20\lg (f/f_0) + 35 \text{ dB} \qquad (8\text{-}36)$$

zu bestimmen, mit

S = schwingende Fläche, $S_0 = 1m^2$

V = Raumvolumen, $V_0 = 1m^3$

f = Schwingfrequenz, $f_0 = 1Hz$

8.4.3 Meßtechnischer Befund zur Körperschallabstrahlung

Die empirisch gewonnenen Beziehungen zwischen Körperschall- und Luftschallpegel reichen von einfachen Zahlenangaben bis zu frequenzabhängigen Übertragunsfunktionen. Ein sehr einfacher Zusammenhang wird in [8-25] für die Körperschallanregung durch U-Bahnen angegeben, der aber nur Gültigkeit für das Maximum in der 63Hz-Oktav besitzt. Es gilt also eingeschränkt

$$L_A = L_V (63) - 15 \text{ dB (A)} \qquad (8\text{-}37)$$

mit:

L_A = A-bewerteter Schalldruckpegel

$L_V(63)$ = Schnellepegel des Fußbodens oder der Geschoßdecke in der 63Hz-Oktav.

In Bild 8-18 (a) aus [6-21] werden die Oktavpegel des sekundären Luftschallpegels zur Schwingbeschleunigung des Fußbodens ins Verhältnis gebracht. Der angezeigte Bereich wird am oberen Rand von schallharten Räumen und am unteren Rand von Räumen mit großem Absorptionsvermögen repräsentiert. In Bild 8.18 (b) aus [6-33] wird als Schmalbandspektrum die gemessene Pegeldifferenz zwischen Schalldruckpegel und Schnellepegel des Fußbodens den nach (8-34) und (8-38) berechneten Kurven von L_P-L_V gegenübergestellt. Mit der geschätzten Nachhallzeit eines typischen Wohnraumes und der Annahme, daß einmal nur der Fußboden abstrahlt (untere Linie) und zum zweiten alle Raumflächen gleichstark abstrahlen (obere Linie) wird eine relativ gute Anpassung an die Messung erzielt. Den berechneten Kurven liegt folgende grobe Schätzung des Abstrahlmaßes zugrunde:

$$10\log \sigma = 50 \log (f / f_g) \quad \text{für} \quad f_g/2 < f < f_g \qquad (8\text{-}38)$$
$$10\log \sigma = 16.7 \log (f / f_g) - 10\text{dB} \quad \text{für} \quad f < f_g / 2$$

mit f_g = 19.5 / h für Betonplatten mit Dicken von 10cm bis 15cm.

Die wenigen meßtechnischen Beispiele zeigen, daß bei gegebener Körperschall-Pegelverteilung auf den schwingenden Raumbegrenzungsflächen relativ gute Möglichkeiten zur Berechnug des sekundären Luftschallpegels im Rahmen von Prognosen zur Verfügung stehen.

9. ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG

9.1 AKTUELLE AUSGANGSSITUATION

9.1.1 Einsatzbereiche der Prognose

Einen ersten Anhaltspunkt für die Relevanz und das Einsatzfeld von Erschütterungsprognosen gibt mit abnehmendem Konfliktpotential die folgende Gruppierung der Emittenten, die keine vollständige Aufzählung sein kann.

1. Quellen, die unmittelbar im Boden große dynamische Kräfte freisetzen: Gewinnungssprengungen, Vibrations- und Fallrammen.
2. Einfach gegründete Maschinenanlagen mit hohem Arbeitsvermögen: Schmiedemaschinen (Hämmer und Pressen), Kolbenkompressoren, Mühlen, Brecher, Schwingförderer, Webereien. Sägegatter. Von einiger Bedeutung sind auch Abbruch - und Baugrubensprengungen.
3. Einfach gegründete Maschinenanlagen mit mittlerem und bei impulsartiger, höherfrequenter Erregung auch mit hohem Arbeitsvermögen: Schrottscheren, Shredder, Stanzen, Pressen. In dieser Gruppe sind auch die Bodenverdichtungsgeräte und der Güterverkehr einzustufen.
4. Maschinenanlagen mit hohem Arbeitsvermögen, die auf schwingungsisolierten Fundamenten gegründet sind sowie großflächige Industrieanlagen.

Die Bewertung der Emittenten in der genannten Reihenfolge entspricht im Mittel dem Erfahrungsstand der vorliegenden Studie. Abweichungen davon müssen in Betracht gezogen werden, da selbstverständlich örtliche Faktoren wie z.B. der Abstand zwischen Quelle und Empfänger, die Bodenausbreitungsbedingungen und die spezielle Gebäudedynamik stark variieren.

Bisher nicht so klar war die untergeordnete Bedeutung großflächiger Industrieanlagen bezüglich ihrer Erschütterungsemissionen. Dies liegt zunächst an der wichtigen Rolle, die Maschinen mit hohem Leistungsvermögen in den Produktionsprozessen übernehmen und zur Vermeidung von Betriebsausfällen auch ein gutes dynamisches Design aufweisen. Große Rotoren mit minimalen Unwuchten oder zyklisch arbeitende Maschinen mit optimiertem Massenausgleich bringen à priori geringere dynamische Kräfte in den Baugrund ein. Ferner sorgen die phasenverschobene

Erregung der vielen, auf einer großen Fläche verteilten Quellen und zusätzliche Abschirmeffekte innerhalb des Betriebsgeländes dafür, daß die Nachbarschaft nicht weiträumig belastet wird. Zu achten ist allerdings auf starke Einzelquellen im Randbereich einer großflächigen Industrieanlage, die lokal begrenzt ein Umweltproblem darstellen können.

Im Rahmen von Genehmigungsverfahren für gewerbliche Anlagen und / oder im Rahmen der Bauleit- bzw. Bebauungsplanung sollte also die Erfordernis einer Erschütterungs-Immisionsprognose in jedem Fall dann geprüft werden, sobald Betriebe aus den Branchen

- o Steine, Erden und Bergbau
- o Eisenschaffende Industrie
- o Stahlbau und Metallverarbeitung
- o Textilindustrie und Holzverarbeitung

beteiligt sind. Bei den unterschiedlichen

- o großflächigen Industrieanlagen

ist mindestens nachzuprüfen, ob Einzelanlagen bzw. Maschinen im Randbereich des Betriebsgeländes aufgrund ihrer Funktionsweise als stärkere Erschütterungsquelle in Frage kommen. Eine Prognose könnte sich evtl. dann auf diesen Teilbereich konzentrieren.

Obwohl Baustellen naturgemäß immer nur eine begrenzte Zeit existieren, scheint es aber erforderlich, konsequenter als bisher für jedes größere Vorhaben in Reichweite von Bauwerken und anderen zu schützenden Installationen eine Erschütterungsprognose zu veranlassen. Die Branche

- o Baugewerbe mit Tiefbau und Spezialbau

ist also in diesem Kontext mit aufzuführen.

Nicht zuletzt sind hier Verkehrswege in der Nähe bebauter Gebiete anzuführen, deren Umweltverträglichkeit auch im Hinblick auf Erschütterungs- und Körperschallimmissionen nachgewiesen werden muß. Verkehrserschütterungen von Straße und Schiene sind allerdings nicht in der vorliegenden Studie behandelt.

9.1.2 Komplexität und Unsicherheit der Prognose

Die Studie belegt deutlich das uneinheitliche Erscheinungsbild der angewendeten Methoden, die vielen Disziplinen entlehnt sind. Technische Zielrichtungen der Dynamik liegen in der optimalen Auslegung von Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen und Bauwerken. Die im Vordergrund stehenden Bemessungsfragen werden in der Regel getrennt von Sicherheitsfragen des Standortes betrachtet. Umweltprobleme sind in der Dynamik kein Thema und zu ihrer Lösung steht deshalb auch keine angepaßte Methodik zur Verfügung, in der insbesondere auch die Wechselwirkungen zwischen Fundamenten und Baugrund incorporiert wären. Die Durchführung einer Immissionsprognose zwingt jedoch geradezu zur Betrachtung des Gesamtsystems. Sie soll Ursache und Wirkung miteinander verknüpfen bzw. aus der Emission die Wirkung am Immissionsort ableiten. Diese Anforderung soll erfüllt werden, ohne daß dazu nach dem Stand von Wissen und Technik eine geschlossene Methodik zur Verfügung steht.

Die schwierige Ausgangssituation zur Durchführung von Erschütterungsprognosen wird am deutlichsten im Vergleich mit den bekannten Verhältnissen bei der Lärmbekämpfung. In der nachfolgenden Tabelle 9.1 sind die wesentlichen Aspekte einander gegenübergestellt. Sie vermitteln zunächst den richtigen Eindruck, daß eine einigermaßen handhabbare Erschütterungsprognose analog zur Schallprognose nicht zu leisten ist

In der Tat finden komplexe physikalische Ausbreitungsvorgänge in einem kompliziert aufgebauten und zum Teil unzugänglichen Ausbreitungssystem statt. Hinzu kommt, daß das Verhältnis der Wellenlängen zu den für den Immissionsschutz relevanten geometrischen Reichweiten - gewissermaßen das strukturelle Auflösungsvermögen - bei der Erschütterungsausbreitung etwa um den Faktor 100 bis 1000 schlechter ist als bei der Schallausbreitung. Dies führt in der Konsequenz dazu, daß für eine rein rechnerische Prognose der gesamte Prozeß nur in diskreten hochaufgelösten Modellen einigermaßen nachvollzogen werden kann. Mit einem hohen Rechenaufwand ist allerdings auch nur eine Genauigkeit zu erreichen, die von der Qualität und Verfügbarkeit der einzugebenden Systemkennwerte begrenzt ist. Unter dieser schwierigen Voraussetzung hat sich als geübte Prognosepraxis das Zusammenfügen von mehr pauschalen Einzelfakten herausgebildet. Dies sind Erfahrungswerte von vergleichbaren Situationen, zum Teil vage Annahmen über unbekannte Systemeigenschaften und die Verwendung tabellierter Kennwerte mit großer Schwankungsbreite. Ferner werden Teile des Ausbreitungssystems absolut idealisiert, um analytische Schätzungen durchführen zu können.

Bezug	Erschütterungen	Lärm
- Kenngröße	nicht vorhanden, vorläufig nicht zu leisten	Schalleistungspegel
- Ersatzgröße	Schwingungsgröße im Bezugsabstand R_1, der den Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld kennzeichnet	Schalldruckpegel auf Hüllfläche in 1m Abstand,
- Berechnung	analytisch nur Fundamentverschiebungen, Wellennahfeld nicht möglich, nur näherungsweise mit diskreten finite-Elemente-Modellen	nach Standardformeln zu bestimmen, für gängige Quellen existieren Dateien
- Messung	Amplitudenfrequenzgang und Zeitverlauf im Bezugsabstand R_1, in der Regel an der Geländeoberfläche, Abstrahlung in den Halbraum nicht fassbar	keine Probleme, Vergleichsmessungen sind reproduzierbar zu übernehmen
- Wechselwirkung mit Umgebung	starke Rückwirkung des Baugrundes auf die Quelle, nur mit Ersatzgrößen näherungsweise zu berücksichtigen	keine Rückwirkungen auf die Quelle. Meßergebnisse bzgl. Raumrückwirkung einfach korrigierbar
- Nahfeld	hängt von Quellengeometrie und Wellenlänge ab, häufige Ausdehnung in der Praxis 5 bis 30 m, im geschichteten Boden bis vierfache Wellenlänge möglich	einheitlich, maximale Ausdehnung 1 m
- Regelwerk	nicht vorhanden	vorhanden

Tabelle 9a	Durchführung von Immissionsprognosen Vergleich Erschütterungen und Lärm	Emission

Bezug	Erschütterungen	Lärm
- Ausbreitungsmedium	Festkörper: Böden mit großer Variation von Elastizitäts- und Schubmodul, in der Regel inhomogen, nicht überall zugänglich	Gas: Luft mit praktisch konstantem Elastizitätsmodul, homogen und zugänglich
- Energietransport	Verschiedene Wellentypen: P-, R-, S-Wellen u.a., Fortpflanzung im Raum und an der Oberfläche	Ein Wellentyp: P-Welle, Fortpflanzung im Raum
- Berechnung	Analytisch: Schätzformeln für ideale Ausbreitung im Fernfeld, Abstands-Lademengen-Gesetze mit individuellen Konstanten, reale Einflüsse mit Korrekturfaktoren aus Dateien getrennt berücksichtigen	Berechnung unter Berücksichtigung realer Effekte relativ einfach nach Vorschrift
- Messung	Schwinggeschwindigkeit, Zeitverlauf und Frequenz-Spektrum, drei Richtungskomponenten pro Meßpunkt. Wellengeschwindigkeiten; Bodenkennwerte und Absorption sind örtlich zu bestimmen	Schalldruckpegel in Terzen oder Oktaven, nur ein skalarer Wert pro Meßpunkt, Absorptionsverluste stehen allgemein formuliert zur Verfügung.
- reale Einflüsse	Absorption, Brechung, Reflexion, Wellenumwandlung und Dispersion	Absorption, Brechung und Reflexion
- Regelwerk	wenige Details für ideales Ausbreitungssystem als Normvorschlag	komplett vorhanden

Tabelle 9b	Durchführung von Immissionsprognosen Vergleich Erschütterungen und Lärm	Transmission

Bezug	Erschütterungen	Lärm
- Bezugsorte	Gebäudefundament, Wände, Geschoßdecken, d.h. innerhalb der Immissionsstruktur, Innenräume (Schallmessung)	außen vor dem geöffnetem Fenster, d.h. ein Punkt außerhalb der Immissionsstruktur
- Bezugsgrößen	Schwinggeschwindigkeit (Zeitverlauf und Frequenzen) an mehreren Punkten,	Schalldruckpegel (Terzspektrum)
	Körperschallpegel von Raumbegrenzungsflächen und sekundärer Luftschall in Innenräumen;	entfällt
	ggfl. in Apparate-Bezugsebene Schwingwege und Beschleunigung	entfällt
- Wechselwirkung mit Umgebung	Baugrund-Bauwerk-Wechselwirkung mit großem Einfluß, von Baugrundeigenschaften abhängig	entfällt
- Ausbreitung in der Struktur	Modales Schwingverhalten von Bauwerk und Bauteilen im tieffrequenten Bereich, d.h. Erfassen stationärer Resonanzzustände	entfällt
	Körperschallausbreitung im höherfrequenten Bereich, d.h. Wellenfortpflanzung verschiedener Wellen im Kontinuum mit Reflexion, Transmission und Umwandlung an Unstetigkeiten	entfällt
- Berechnung	Methoden der Strukturdynamik in kontinuum-Modellen und diskreten Modellen	entfällt
	Wellentheorie in Festkörpern für Körperschallausbreitung, nur idealisiert in Stäben und Platten abschätzbar	
	Körperschallabstrahlung in Innenräumen wird beherscht	
- reale Einflüsse	Abstrahlungsdämpfung in den Baugrund, Eigenschwingverhalten von Gebäude und Bauteilen, Strukturdämpfung von Einfluß, aber nicht kontrollierbar	entfällt
- Messung	Punkt-Eingangsimpedanzen von Bauteilen (Decken), Transferimpedanzen Fundament-Obergeschosse, Eigenfrequenzen, Dämpfung	entfällt
- Regelwerk	Bezugsorte sind definiert, nicht vorhanden für Pognose	entfällt

Tabelle 9c	Durchführung von Immissionsprognosen Vergleich Erschütterungen und Lärm	Immission

Beispiele dafür sind der Boden, modelliert als elastischer, homogener und isotroper Halbraum, oder das Rahmenwerk eines Gebäudes, modelliert als Einmassenschwinger bzw. als System unendlich ausgedehnter Stäbe und Platten. Dann sind eine Reihe exakt scheinender Rechenformeln nichts anderes als das empirisch gewonnene Ergebnis einer Regressionsanalyse. Sie beschreiben lediglich einen mittleren Erwartungswert, der mit zum Teil unbekannten, und möglicherweise großen Streubreiten behaftet ist. Schließlich wissen wir auch noch zu wenig über wesentliche Einflußgrößen, die die Ausbreitung und noch mehr die Strukturantworten bestimmen, nämlich die Dämpfung durch Wärmeverluste, Strahlungsverluste und Kopplungsverluste.

Um diese bewußt kritische Darstellung der Ausgangssituation abzuschließen, läßt sich zur Genauigkeit von Erschütterungsprognosen folgendes anmerken. Die Recherche hat zu der erzielbaren Prognosegenauigkeit leider keine gesicherten Erkenntnisse gebracht. Bisher durchgeführte Simulationsrechnungen in diskreten Ausbreitungsmodellen wurden noch nicht in praxisbezogenen Prognosefällen im direkten Vergleich mit experimentellen Untersuchungen verifiziert. In ganz wenigen Fällen wurden Finite-Elemente-Rechnungen in Systemteilen durchgeführt und mit meßtechnischen Daten gekoppelt bzw. verglichen, u.a. in [8-14], [6-13] und [4-3]. Zusammen mit den Erfahrungen bei weitgehend meßtechnisch bestimmten Prognosen, deren Nachprüfung einige Male möglich war, kommt der Verfasser zu folgender Einschätzung. Bei Immissionsprognosen von Erschütterungen und Körperschall liegen die Abweichungen der prognostizierten Werte gegenüber nachgemessenen Werten in der Spannbreite von 3 dB bis 10 dB. Als beste Prognosegenauigkeit scheint ein Fehler von 50% z.Zt. nur unter günstigen Umständen erreichbar zu sein, wenn die Dynamik eines vorhandenen Gebäudes meßtechnisch erfaßt werden kann. Wesentlich realistischer sind Werte zwischen 5 dB und 10 dB, d.h. ein Fehler bis zu etwa 300% muß in Betracht gezogen werden. In den vom Verfasser durchgeführten Untersuchungen lagen die nachgemessenen KB-Werte innerhalb der genannten Streubreite, aber jeweils unter den prognostizierten Werten. Bei einer Abweichung von bis zu 300% gehen bei diesem einseitigen Trend dann natürlich auch konservative Ansätze für bestimmte Einzelfakten ein, die der Prognose einen gewissen Sicherheitsspielraum geben. Diese Angaben zur Prognosegenauigkeit können wegen der geringen Datenbasis allerdings noch nicht als gesichert gelten.

9.2 VERFÜGBARE PROGNOSEMÖGLICHKEITEN

Nach der soeben beschriebenen Ausgangssituation muß man die Frage stellen, welche Möglichkeiten zur Zeit nach dem Stand der Technik denn zur Verfügung stehen.

Die Erregerstärken technischer Erschütterungsquellen liegen in einer Größenordnung, die das elastische Systemverhalten noch nicht verletzen. Die allgemein akzeptierte Grundlage aller Vorgehensweisen ist also die Annahme der Linearität, die im realen Ausbreitungssystem auch meßtechnisch bestätigt werden konnte. Die damit mögliche Aufteilung des Gesamtsystems in entkoppelte Teilstrukturen, die jeweils in den Teilen getrennt untersuchte Erschütterungsausbreitung und die multiplikative Anwendung der Teilergebnisse auf die Emission, sind Stand der Technik zur Prognose von Immissionen.

Ohne die verbindende Klammer einer einheitlichen Regelung mittels Norm oder Standard - auch die DIN 4150, Teil 1 [1-1] kann diese Aufgabe noch nicht erfüllen - werden in der Praxis im wesentlichen drei Vorgehensweisen benutzt.

- o Mathematisch - numerische Verfahren
- o Nutzung von Dateien
- o Analytisch-meßtechnische Verfahren

Diese Prognoseverfahren werden z.B. auch in [1-9] in der speziellen Anwendung auf Schienenverkehrserschütterungen erwähnt. Von den dort zitierten fünf möglichen Prognoseverfahren sind nach Meinung des Verfassers aber zwei Verfahren als redundant einzustufen.

Die drei genannten Vorgehensweisen können einzeln oder in Kombination je nach Planungssituation und Aufgabenstellung zur Anwendung kommen. In Tabelle 2.1 sind die im wesentlichen von der Erfahrung sachverständiger Ingenieure bestimmten Vorgehensweisen im Umriß skizziert. Die in dieser Studie gesammelten Fakten können bis zu einem gewissen Grad den dort aufgezeigten Rahmen mit den nachfolgenden konkreten Prognosemöglichkeiten ausfüllen.

9.2.1 Mathematisch - numerische Verfahren

Die Emissionsstruktur wird für analytische Berechnungen meistens vereinfacht als Ein- oder Mehrkörpersystem modelliert. Bei Vorgabe der dynamischen Erregerkräfte und unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Gründung erhält man durch Lösen der Bewegungsgleichungen die Verschiebungen an der Schnittstelle Fundament-Baugrund. Wahlweise ist die Darstellung als Zeitverlauf oder als Erregerfrequenzspektrum möglich. Die Baugrundverschiebungen lösen ein kompliziertes Wellenfeld aus, das in der Nähe der Quelle analytisch nicht mehr beschreibbar ist. Interferenzeffekte und richtungsabhängige Abstrahlung, sowie mangelhafte Kenntnis der konkreten Systemeigenschaften verhindern eine Charakterisierung der Emission in Form einer abgestrahlten Erschütterungsleistung. Die im Nahfeld der Quelle bestehende

rechnerische Lücke kann nur durch den Einsatz diskreter Rechenmodelle wie der Finite-Elemente-Methode oder der Randelement-Methode überbrückt werden.

Die Transmission oder Ausbreitung im Boden kann zunächst im direkten Anschluß an den Emissionsbereich im diskreten Modell weitergerechnet werden. Dies setzt wieder die Eingabe von Material- und Strukturkennwerten voraus. Auf die Probleme der Systembegrenzung des FE-Netzes wurde hingewiesen. Oder man versucht im Fernfeld der Quelle eine analytische Abschätzung anhand verschiedener Amplituden-Abnahmegesetze, die nur für ein idealisiertes Ausbreitungsmedium gelten. Der reale Boden ist insgesamt nicht mehr analytisch beschreibbar.

Für die Immissionsstruktur wird die Situation noch komplizierter. Im Bereich tiefer Frequenzen werden modalanalytische Methoden eingesetzt, um die Berechnung stationärer Resonanzzustände der Struktur durchzuführen. Dazu dienen Kontinuumsmodelle, also idealisierte Balkenmodelle oder Feder-Masse-Systeme bzw. Schwingerketten. Komplexere Bauwerke sind wieder in diskreten Modellen abzubilden. Die Baugrund - Fundament - Wechselwirkung und das Schwingungsverhalten des Gesamtbauwerks lassen sich näherungsweise bestimmen. Die Berechnung der Schwingungsamplituden an verschiedenen Stellen im Gebäude ist dagegen mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Aufgrund der vielfältigen Gebäude- und Bauteilkonstruktionen sind die unterschiedlichen Einflüsse der Baugrund-, Material-, und Strukturdämpfung im Einzelfall weitgehend unbekannt. Trotz ausgereifter strukturdynamischer Methoden sind deshalb rechnerische Prognosen der Bauteilantworten infolge der Freifelderregungen das schwächste Glied in der Ausbreitungskette.

Der Körperschallpegel kann schwingungstheoretisch im Prinzip nicht richtig berechnet werden. Eine grobe Annäherung ist allerdings dann möglich, wenn das gesamte Schwingungsverhalten eines Bauteils im wesentlichen von einem einzelnen beschreibbaren Eigenmode bestimmt wird. In der Regel ist im höherfrequenten Frequenzbereich des Körperschalls die Wellentheorie in Stäben und Platten anzuwenden. Die Erregung der Bauteile durch Körperschallwellen wird mittels Impedanzfunktionen berechnet. Die Ausbreitungsdämmung der Wellen an den Unstetigkeitsstellen der Struktur wird anhand von Reflexions- und Transmissionskoeffizienten analytisch formuliert. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt auch hier wesentlich von der, größtenteils im voraus nicht kontrollierbaren Dämpfung und Dämmung ab. Die Methode der statistischen Energieanalyse zur Körperschallbestimmung ist für die Berechnung in einem Gesamtbauwerk bisher nicht eingesetzt worden. Da die Kenntnis von Energie - Kopplungsfaktoren und - Verlustfaktoren erforderlich ist, wird diese Methode für die praktische Prognose vorläufig nicht geeignett sein.

Der sekundäre Luftschall kann hinreichend genau bestimmt werden, wenn die Körperschallpegel und der Abstrahlgrad der Begrenzungsflächen bekannt sind.

9.2.2 Nutzung von Dateien

Für eine erste grobe Prognoseabschätzung kann man auf die Daten identischer oder vergleichbarer Situationen zurückgreifen. Dazu sind zwei wichtige Schritte zu beachten. Zunächst müssen die Randbedingungen des Prognosefalles möglichst genau definiert werden und zwar im Hinblick auf die Intensität und Art der Erregung, auf die Ausbreitungsbedingungen und Bodenbeschaffenheit im Plangebiet, sowie auf die Konstruktion und Ausstattung der betroffenen Bauwerke.

Im zweiten Schritt ist ein vorhandener Datenfundus auf vergleichbare Fälle zu sichten. Das größte Problem besteht darin, bei den vielen Einflußgrößen die Vergleichbarkeit sicherzustellen. Einen vergleichbaren Gesamtkomplex der Ausbreitung wird es nie geben. Aber im Rahmen einer herabgesetzten Genauigkeitsanforderung und wegen der zugrunde gelegten Linearität des Systems können Datensätze für Teilaspekte ausgesucht und additiv (Pegel) bzw. multiplikativ (Faktoren) für das Gesamtsystem zusammengestellt werden. Das Anzapfen verschiedener Dateien sollte solange möglich sein, wie die Schichtung dieser Datenmengen eine hinreichend genaue Beschreibung des betreffenden Prognosefalles zuläßt.

Liefert die Datei für eine Einflußgröße einen Wertebereich, so sollte die Prognose sowohl für den unteren als auch für den oberen Wert durchgeführt werden. Dies trifft häufiger auf tabellierte Materialkennwerte zu, z.B. Verlustfaktoren oder Wellengeschwindigkeiten im Boden. Auf diese Weise wird auch die ungenaue Kenntnis von Systemeigenschaften des betreffenden Prognosesystems sicherer abgedeckt.

In Anbetracht der bisher nicht geregelten Erhebungsmethoden im Erschütterungsschutz und der verschiedenen Zielrichtungen der beteiligten Disziplinen sind Dateien von sehr unterschiedlicher Qualität verfügbar, wie die folgende Aufzählung zeigt.

- Physikalische Material- und Strukturkennwerte, in Tabellenwerken als einzelner Zahlenwert oder mit z.T. großen Schwankungsbreiten zusammengestellt.
- Ergebnisse zu Schwingungsmeßgrößen als Einwertangabe für bestimmte Meßorte, z.B. Amplituden oder Frequenzen für den Bezugsabstand R_1, oder resultierende Schwinggeschwindigkeiten am Gebäudefundament, jeweils als lineare Größe oder als Pegel angegeben.

- o Amplituden-Abnahmekurven in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle für spezifische Ausbreitungssituationen in graphischer Form dargestellt, z.B. für Amplitudenspitzenwerte oder auch als frequenzabhängige Kurven.
- o Analytische Formeln für den Erwartungswert einer Kataster-Datenmenge, mit Hilfe einer statistischen Regressionsanalyse optimiert und manchmal auch mit statistisch abgesicherten Vertrauensbereichen versehen, z.B. Abstands-Lademengen-Gesetze.
- o Antwort-Spektren (response-spectra) für bestimmte Erreger- bzw. Belastungsfunktionen zur Prognose der Bauwerksbeanspruchung.
- o Komplexe Übertragungsfunktionen wie Eingangs- und Transferimpedanzen, in der Regel als schmalbandiger Frequenzgang für spezifische Systemabschnitte meßtechnisch ermittelt, mit Phasenbeziehungen und Kohärenz, z.B. als Ausbreitungsdämpfung im Boden oder als Übertragungsfunktion Fundament - Geschoßdecke.

Da für die Immissionsprognose bei normaler Wohnbebauung theoretische Berechnungen nach Abschnitt 9.2.1 kaum in Frage kommen, ist für eine erste grobe Vorausschätzung in einem frühen Planungsstadium und ohne Messungen im Planungsgebiet die Nutzung eines vielfältigen Datenfundus unumgänglich. Aus diesem Grund sind die im Rahmen der Studie gefundenen Daten gewissermaßen als unsystematische Datei entweder im Tabellen- und Bildteil dokumentiert, oder es wird auf die entsprechenden Quellen verwiesen. Hier sind nochmals die einzigen, systematisch aufgebauten Erschütterungskataster zu erwähnen, die für Sprengbetriebe in der Bundesrepublik [5-3,4,5,12] und in den USA [5-20,23] erstellt wurden.

Die Erarbeitung von Dateien bzw. eines Katasters für Maschinen- und Verkehrserschütterungen auf der Basis vorhandener Meßdaten wurde 1981 mit einer Voranfrage an alle sachverständigen Stellen in der Bundesrepublik in die Wege geleitet [9-2]. Der daraus resultierende Vorschlag, einen Quellen-Reichweite-Katalog auf statistischer Grundlage zu schaffen und eine Erhebung zur Erschütterungsausbreitung unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten durchzuführen, wurde vom UBA allerdings nicht weiter verfolgt.

9.2.3 Analytisch - meßtechnische Verfahren

Unter dem Zwang in der Mehrzahl der Fälle mit vertretbarem Aufwand und mit einer für die planrechtliche Entscheidung hinreichenden Genauigkeit Erschütterungsprognosen durchführen zu müssen, hat sich in der gutachterlichen Praxis eine dritte Vorgehensweise etabliert. Dabei hat die Schwingungsmessung im Plangebiet bzw. an vergleichbaren Teilsystemen den Vorrang. Auf diese Weise erfaßt man die theoretisch nicht beherrschbaren und z.T. auch nicht

bekannten, realen Details in ihrer Wirkung auf die Erschütterungsausbreitung, ohne sie selbst kennen zu müssen.

Mit der gleichzeitigen Schwingungsmessung am Eingang und Ausgang eines Teilsystems erhält man über die fourieranalysierten Signale die Übertragungseigenschaften dieser "black box". Da es sich um ein lineares System handelt, lassen sich die Erregerfunktion, die Systemantwort und die Durchlässigkeit, d.h. die Filterwirkung des Systems als komplexe Spektralfunktionen darstellen. Auf diese Weise können z.B. Schwinggeschwindigkeitsspektren des Bezugsabstandes mit frequenzabhängigen Übertragungsverlusten des Bodens und mit Frequenzgangkurven der Freifeld-Fundament-Wechselwirkung gefaltet werden, um aus einer Erregung die Bauwerksantwort abzuleiten.

Nun kann man derartige Messungen nur in einem wirklich vorhandenen System durchführen. Dieses Vorgehen setzt also eine Planungssituation voraus, bei der z.B. in einem gegebenen Gelände entweder eine technische Anlage (Quelle) errichtet wird, oder / und neue Wohnhäuser (Empfänger) gebaut werden sollen. Ein geplanter Erreger ist für die Ausbreitung am geplanten Standort möglichst getreu zu simulieren. Die reale Ausbreitungsdämpfung und die Wellengeschwindigkeit Im vorgesehenen Plangebiet sollte immer meßtechnisch bestimmt werden. Die Dynamik eines geplanten Gebäudes wird durch gute Vergleichsmessungen oder mittlere Erfahrungswerte in der Prognose berücksichtigt. Die letztgenannte Möglichkeit befriedigt natürlich nicht, ist z.Zt. aber noch hinzunehmen. In wichtigen Fällen sind dazu Finite-Elemente-Rechnungen durchzuführen.

Analytisch wird diese Prognosemethode genannt, weil dem meßtechnischen Vorgehen die bereits in Kapitel 2.1 erwähnte Vorstellung zugrundeliegt. Danach läßt sich die Schwingungsausbreitung in einem konkreten Prognosesystem als eine Kette verschiedener Übertragungsglieder darstellen. Jedes Subsystem (black box) wird in der Analogie eines mechanischen Zweipols durch die Eingangs- und Ausgangsgrößen beschrieben. Sind diese Quell- und Abschlußimpedanzen bekannt, dann kann man das Übertragungsverhalten auch rechnerisch nachvollziehen. Die Systembeschreibung wird soweit vereinfacht, daß das Lösen komplizierter Gleichungssysteme der Strukturmechanik durch einfaches algebraisches Rechnen mit Impedanzen ersetzt wird. Kennt man die Durchgangsverluste der Teilsysteme, entweder meßtechnisch oder rechnerisch über Impedanzverhältnisse bestimmt, dann sind die Immissionen durch multiplikative Anwendung (Faltung) der Übertragungsfunktionen nach Formel (2-1) aus der Emission abzuschätzen.

Die Anwendung der analytisch-meßtechnischen Methode lehnt sich möglichst nah an die Realität an und kann flexibel für verschiedene Planungssituationen eingesetzt werden. Die meßtechnischen Erhebungen erfordern eine moderne Meß- und Analysetechnik, die heute zu angemessenen Bedingungen verfügbar ist. Ein Beispiel, das die Körperschallausbreitung in Teilsystemen eines Schienenverkehrsweges anhand analytischer Impedanzformeln abschätzt und mit Messungen vergleicht, wird in [6-22] vorgestellt. An anderer Stelle [9-4] wird ebenfalls in Erwägung gezogen, die Erschütterungsausbreitung durch Impedanzen, Zweipole und Kettenmatritzen zu beschreiben, ohne daß dazu bereits schon konkrete Anwendungen vorliegen.

9.3 ANWENDUNGSKRITERIEN

Der Einsatz der beschriebenen Prognosetechniken sollte von Kriterien wie Planungsstand und Prognosesystem, Prognosegenauigkeit und Aufwand bestimmt werden. Wie in Abschnitt 9.1.2 bereits erwähnt wurde, erbrachte die Recherche zunächst keine einzige Arbeit, die sich generell mit der erreichbaren Prognosegenauigkeit auseinandersetzt - sieht man einmal von den statistischen Überlegungen zu den Sprengerschütterungen ab. Genauso wenig ist zum Thema Aufwand und problemangepaßter Einsatz von Prognosen zu erfahren. Die bestehenden Unsicherheiten werden nicht artikuliert. Sie treten manchmal in Streitfällen zutage, wenn zum selben Prognosesachverhalt konträre Gutachteraussagen nach dem Stand der Technik akzeptiert werden müssen.

Im Rahmen dieser Studie kann der problemangepaßte Einsatz der verschiedenen Prognosemöglichkeiten nur durch die nachfolgende Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile ein wenig erhellt werden.

9.3.1 Mathematisch - numerische Verfahren

Die Vorteile numerischer Modellrechnungen bestehen in folgenden Punkten:

- Prognoseabschätzungen sind bereits im frühen Stadium anhand umfassender, d.h. Emissions-, Transmissions- und Immissionsstruktur betreffender Planungsunterlagen möglich.
- In Finiten-Elemente-Modellen ist die Berücksichtigung realer Details des Prognosesystems möglich, d.h. diskrete Modelle eignen sich insbesondere auch für komplizierte Fälle und sind im Prinzip universell einsetzbar.

- o Parametereinflüsse lassen sich simulieren und damit ist die Wirkung von Maßnahmen abzuschätzen.

Demgegenüber sind folgende Nachteile aufzuführen:

- o Berechnungen sind immer sehr aufwendig und erfordern hohen Sachverstand, d.h. für die Mehrzahl der "normalen" Fälle ist die Verhältnismäßigkeit der Mittel nicht gegeben.
- o Geschlossene Berechnungen für ein gesamtes Prognosesystem sind nach dem Wissensstand der vorliegenden Studie bisher nicht dokumentiert. Im wesentlichen steht eine experimentelle Verifizierung noch aus, so daß der Entwicklungsstand bzgl. Erschütterungsprognosen in etwa dem Übergang von der Experimentierphase zur Erprobungsphase entspricht.
- o Die Prognosegenauigkeit ist durch die Qualität und Verfügbarkeit der einzugebenden Systemkennwerte begrenzt. In Planungssituationen sind nicht immer alle erforderlichen Daten verfügbar und bestimmte Einflußgrößen sind a priori nicht kontrollierbar (z.B. Gebäudestrukturdämpfung).

9.3.2 Nutzung von Dateien

Die Vorteile einer Nutzung von Dateien sind:

- o Bereits im frühen Planungsstadium kann schnell und relativ einfach eine erste grobe Einschätzung erfolgen. Voraussetzung sind definierte Randbedingungen zur Erregung und zur Systemstruktur, damit vergleichbare Daten benutzt werden.
- o Sind die benutzten Datenblöcke statistisch abgesichert, dann läßt sich die Prognosegenauigkeit in etwa abschätzen.

Als Nachteile muß man nennen:

- o Es gibt kaum systematisch aufbereitete und statistisch abgesicherte Dateien. Katasterdaten liegen praktisch nur für Sprengerschütterungen in einigen Gebieten vor. Die Verfügbarkeit ist also sehr gering.
- o Die Prognosegenauigkeit reicht in der Regel nur zur ersten Orientierung, die für genehmigungsrechtliche Entscheidungen i.a. nicht ausreichen dürfte.
- o Eine nachgeschaltete, genauere Prognose im fortgeschrittenen Planungsstadium ist erforderlich.

9.3.3 Analytisch - meßtechnische Verfahren

Die Vorteile einer analytisch - meßtechnischen Vorgehensweise bestehen in folgenden Punkten:

- o Die Methode ist in verschiedenen Planungssituationen und auch in komplexen Systemen anwendbar. Der Aufwand ist nicht zu hoch.
- o Für die meßtechnisch erfaßten Teilsysteme sind keine Kenndaten erforderlich.
- o Die Ausbreitungsverluste der meßtechnisch untersuchten Teilsysteme sind exakt bestimmt, womit die Prognosegenauigkeit für das Gesamtsystem erhöht wird.
- o Geplante, d.h. noch nicht existierende Teilsysteme lassen sich anhand von geeigneten Vergleichsmessungen an anderer Stelle in das Plangebiet übertragen.
- o Die gemessenen Impedanz- und Übertragungsfunktionen lassen sich als Spektralfunktionen in Rechenprogrammen weiter verarbeiten.

Als Nachteile sind zu verzeichnen:

- o Eine Vorermittlung am "grünen Tisch" ist nicht möglich. Es ist der Zutritt zum Planungsgebiet erforderlich.
- o Das Verfahren verlangt Sachverstand und eine moderne Meß- und Analysetechnik auf digitaler Basis.

Nachdem nun die verschiedenen Prognosemöglichkeiten mit ihren Vor- und Nachteilen aufgezeigt wurden, sind für die künftige Arbeit Vorschläge zu unterbreiten, wie trotz aller Komplexität eine Verbesserung in der Immissionsprognose für Erschütterungen und Körperschall zu erreichen ist. Um Aufgabenstellungen zum weiteren Vorgehen formulieren zu können, sollen zuvor die Erkenntnisdefizite nochmals deutlich genannt werden.

9.4 DEFIZITE

9.4.1 Lücken der Studie

Bereits in Kapitel 3.3 wird auf die Lücken in der Literaturrecherche hingewiesen. Im Verlauf der Bearbeitung kamen weitere interessante Informationsquellen ins Blickfeld, die in einem 4. Suchlauf gezielt zum vorhandenen Thema ausgewertet werden müßten (z.B. Design und Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden oder interne Erschütterungsquellen und Bauteilverhalten).

Die Verkehrserschütterungen als wesentliche Immission sind in der vorliegende Studie nicht aufgenommen. Aufgrund der umfangreichen Literatur sollte diese Lücke unbedingt in einem zweiten Teil der Studie geschlossen werden.

Weitere Aspekte der Erschütterungsprognose, die in der Studie fehlen, sind

- o Einwirkungen auf empfindliche Einrichtungen und Status von Gerätespezifikationen
- o Erzeugung sekundärer Erschütterungen durch Luftdruck und Infraschall.

Im vorgegebenem Rahmen der Studie war es nicht möglich, die Anwendungen der vielen Einzelfakten in Musterbeispielen zu typischen Prognosefällen anschaulich vorzuführen.

9.4.2 Lücken im Wissensstand

Die in der Studie an den verschiedensten Stellen hervorgetretenen Wissenslücken werden nach den Prognosebereichen Emission, Transmission, Immission und nach rechnerischen und meßtechnischen Methoden geordnet in loser Reihenfolge aufgezählt, es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

- o Die Erfassung der Erschütterungsemission anhand einer Schwingungsleistung (analog zur Schalleistung in der Akustik) wäre wünschenswert, ist praktisch aber noch nicht möglich. Ersatzweise wird eine Schwingungsgröße in einem Bezugsabstand definiert. Die komplizierte Abhängigkeit von der Geometrie der Quelle, von der Art der Erregung, von Richtwirkung und Wellenart ist noch nicht befriedigend bzw. garnicht geklärt.
- o Emissions-Kenndaten von industriellen und gewerblichen Erschütterungen sind bisher nicht in aufbereiteter Form verfügbar. Man kann deshalb für Prognoseschätzungenä in diesem wichtigen Einsatzfeld nicht auf Dateien zurückgreifen.
- o Die Erschütterungsausbreitung in inhomogenen Böden wird nicht hinreichend beherrscht. Es fehlen Hinweise, wie Korrekturen in die Prognose einzubringen sind. (z.B. Schichtung oder Zusatzdämpfung durch Hindernisse).
- o Die allgemein eingeführte Amplituden-Abnahmeformel (6-8) für relativ homogene Ausbreitungssituationen setzt eine harmonische Erregung voraus und ist nicht ausreichend differenziert beschrieben. Es bleibt unklar, wie das Gesetz aussieht für verschiedene Meßgrößen, Mittelwerte und Fraktile, für breitere Emissionsspektren und für verschiedene Wellenarten.

- Im Bereich der Immissionsstruktur bestehen noch sehr große Unsicherheiten in der Beschreibung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung. Das Schwingungsverhalten der Geschoßdecken stellt eine Schwachstelle in der Immissionsprognose dar. Der Einfluß der Baugrunddämpfung wird noch nicht gut verstanden. Darüberhinaus ist die komplexe Strukturdämpfung eines Bauwerks nicht kontrollierbar und läßt sich nicht prognostizieren. Eine genaue Vorausermittlung von Deckeneigenfrequenzen und der zu erwartenden Resonanzüberhöhung ist also heute noch nicht möglich.
- Die Prognose des Körperschalls in einem Gebäude ist methodisch nicht klar entwickelt. Im höherfrequenten Bereich wird die Wellenfortpflanzung in idealisierten Bauelementen (Stäbe, Platten) angewendet. Im tieferfrequenten Bereich ist die modale Eigenwertanalyse, d.h. die Ermittlung stationärer Resonanzzustände üblich. Im Übergangsbereich (etwa 40 bis 100 Hz) besteht eine Grauzone. Es fehlt eine systematische Darstellung und die Angleichung von Ergebnissen nach beiden Methoden.
- Die Ausbreitung des Körperschalls im hörbaren Frequenzbereich hängt von Inneren Systemdämpfungen ab, die noch nicht kontrollierbar sind (z.B. Fügestellen). So sind auch Unterschiede in der horizontalen und vertikalen Körperschallausbreitung in einem mehrgeschossigen Gebäude noch nicht theoretisch prognostizierbar.
- Die Prognose auf statistischer Grundlage ist nicht entwickelt, u.a. wird der mögliche Einsatz der Antwort-Spektrum-Methode nicht weiter verfolgt.
- Dem Einsatz modernen Meß- und Analysetechniken auf digitaler Basis unter Einbeziehung von PC's wird zu wenig Raum gegeben und die Nutzung zur Durchführung von komplexen Prognosen wird noch weitgehend ignoriert.

9.4.3 Regelbedarf in der Handhabung

In Anbetracht des sehr komplexen Erscheinungsbildes der physikalischen Vorgänge und der vielfältigen Immissionsschutzanforderungen besteht ein großer Bedarf, eine einheitliche Verfahrensweise für die Prognose aufzuzeigen.

Während in den letzten Jahren Normen zur Schwingungsmessung und Auswertung sowie zur Beurteilung der Immissionen erarbeitet wurden, entspricht der geregelte Stand der Prognosetechnik für Erschütterungen immer noch der Vornorm DIN 4150, Teil 1 aus dem Jahre 1975. Der verbesserte Entwurf von 1986 [1-1] ist z.Zt. als unverbindlicher Vorschlag einzustufen. Die noch bestehenden großen Lücken lassen sich bei dieser widerspenstigen Materie leider nicht

alle schließen, doch wären zur Handhabung einer Prognose unbedingt Ergänzungen nötig und auch möglich.

Zunächst müßten in [1-1] oder in einem anderen Standard die vorhandenen Prognosemöglichkeiten mit Anwendungen erläutert werden. Das Amplituden-Abstandsgesetz für ideale Ausbreitungsbedingungen läßt manche Fragen nach dem Einsatzbereich, der Darstellung verschiedener Meßgrößen und der Berücksichtigung realer Einflußgrößen offen. Die Ausbreitungsproblematik im Bereich der Immissionsstruktur wird überhaupt nicht behandelt, einige Übertragungsfaktoren in den Erläuterungen sind nur bedingt nützlich. Die gesamte Körperschallproblematik ist in der Norm nicht existent. Die Ermittlung der Emission wird nicht konkret, sondern nur mit allgemeinen Bemerkungen kommentiert.

Es ist das Fazit zu ziehen, daß die Durchführung von Immissionsprognosen für Erschütterungen und Körperschall noch in keinem Regelwerk, auch noch nicht in [1-1], mit der erforderlichen Klarheit beschrieben wird. Der Hinweis auf den Sachverstand der Gutachter, der an dieser Stelle gerne bemüht wird, trägt nicht unbedingt zu einer einheitlichen Verfahrensweise bei, zumal wirklich Wissenslücken bestehen und es offensichtlich keine klaren Vorstellungen zur Prognosegenauigkeit gibt.

Ferner ist ein Regelbedarf hinsichtlich modernen Meß- und Analyseverfahren, die im Rahmen von Prognosen eine wichtige Rolle spielen, anzumelden. Auch die neueren Regelwerke berücksichtigen nicht konsequent genug die Entwicklung der digitalen computergestützten Signalanalyse. Die traditionelle Bindung an die analoge Meßtechnik, mit der letzlich auch die Eingrenzung auf die Betrachtung harmonischer Schwingungen im Regelwerk zusammenhängt und die zunehmend kritischer beurteilt wird [9-5,6], sollte gelockert bzw. aufgegeben werden.

Schließlich wird die Handhabung statistischer Methoden (Regressionsanalyse, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Antwort-Spektrum-Methode, evtl. Schallenergieanalyse) nirgendwo geschildert und zielgerichtet als mögliches Prognoseinstrument behandelt.

Um die aufgezeigten Erkenntnisdefizite und Unsicherheiten abzubauen, werden im abschließenden Kapitel 10 Vorschläge zur Bearbeitung von Problemlösungen unterbreitet und mögliche Vorgehensweisen zur Durchführung von Immissionsprognosen diskutiert.

10. WEITERES VORGEHEN

10.1 TECHNISCH - WISSENSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNGEN

10.1.1 Fortsetzung der Studie

Während der Literaturauswertung und weiteren Bearbeitung ergaben sich im Verlauf von 18 Monaten neue Gesichtspunkte, tauchten zusätzliche aktuelle Veröffentlichungen auf, die zeitlich nicht mehr beschafft werden konnten aber von Bedeutung sind, und es mußte wegen des begrenzten Rahmens der Studie der gesamte Komplex der Verkehrserschütterungen ausgelagert werden.

Nach dem derzeitigen Stand ist dringend zu empfehlen, die vorliegende Studie mit einem zweiten Teil fortzusetzen, der die unbedingt notwendige Ergänzung der Verkehrserschütterung enthält und vielleicht einige bereits behandelte, aber für die Prognose wichtige Punkte, vertieft. Da bereits heute an Güterverkehrsstrecken erhebliche Belästigungen auftreten und der Ausbau der Schnellstrecken im vollen Gange ist (Güterzüge bis 160 km/h sind geplant), andererseits zahlreiche Untersuchungen zu Verkehrserschütterungen mit z.T. hoher Qualität vorliegen, dürfte eine Studie zum Stand der Prognosetechnik diesen wichtigen Bereich nicht auslassen. Die Fortsetzung der Studie sollte möglichst ohne Verzögerung erfolgen, um die Vorteile einer kontinuierlichen Bearbeitung zu nutzen.

Neben der homogenen Ergänzung der vorliegenden Studie sind unabhängig davon zwei weitere Problemfelder zu nennen, für die Immissionsprognosen bei ungeklärtem Sachstand durchzuführen sind :

- o Erschütterungseinwirkungen auf empfindliche Einrichtungen in Gebäuden (siehe Abschnitt 2.3).

  In zunehmendem Maße werden Prognosen für Rechenzentralen, hochauflösende Laborgeräte, Alarmanlagen usw. verlangt. Immissionsbezugspunkte und -größen sowie der Vergleich mit Gerätespezifikationen sind festzulegen und einheitlich zu gestalten. Insbesondere ist dies erforderlich, um mögliche Konflikte im Hinblick auf die neue Produkthaftung regeln zu können.
  Ähnliches gilt für die Erschütterungseinwirkung auf erdverlegte Rohrleitungen.

- Erzeugung sekundärer Erschütterungen in Folge von Luftdruckstößen und Infraschall:

  Die Stoßanregung von Bauwerken durch Explosionsknalle (Sprengung, Verpuffung) und die tieffrequente Resonanzanregung durch vibrierende, großvolumige Aggregate (Maschinen, Anlagen und Fahrzeuge) können u.U. größere Gebäude- bzw. Bauteilschwingungen hervorrufen als die Bodenerschütterungen. Für die identischen Immissionsgrößen ist die Prognose aber über einen anderen Einwirkungsmechanismus abzuwickeln.

10.1.2 Technisch - anwendungsorientierte Vorschläge

Nachfolgend werden einige Arbeiten genannt, die weitgehend auf der Basis vorhandener Informationen und Daten durchgeführt werden könnten und zwar mit dem Ziel, die komplizierten Sachverhalte einer praktischen Anwendung zugänglicher zu machen und noch nicht ausgeschöpfte Möglichkeiten für die Prognose zu nutzen. Nachfolgend sind unter den Arbeitstiteln die Vorschläge nur stichwortartig skizziert.

- Orientierungshilfe zur Durchführung von Prognosen.

  Explizit vorgeführte Prognosebeispiele für wenige typische Fälle; die wesentlichen Merkmale der Emissionsarten, der Ausbreitungswege und der Empfängerstruktur sind abzudecken; diese Beispiele nach den drei beschriebenen Methoden entwickeln und wo nötig auch meßtechnisch belegen; Durchführung der Prognose für Erschütterungen und Körperschall in bestimmten Planungssituationen als Orientierungshilfe und zunächst nicht als verbindlicher Leitfaden gedacht.

- Verbesserung der einfachen Prognoseschätzung mittels Datensammlungen.

  Die in der Studie ansatzweise vorgestellte unsystematische Datei vor allem für Industrie und Gewerbeanlagen, sowie für Kfz- und Schienenverkehr systematisch erweitern; Nutzung aller in Abschnitt 9.2.2 aufgezählten Informationsmöglichkeiten; Datensätze in aufbereiteter und möglichst statistisch abgesicherter Form; Module für bestimmte Abschnitte des Ausbreitungssystems; Prüfung, ob an Umfrage [9-2] angeknüpft werden kann.

- Entwicklung einer Prognosemöglichkeit auf statistischer Basis.

  Antwort-Spektrum-Methode generell auf technisch erzeugte Erschütterungen ausdehnen (bisher nur Erdbeben und Sprengerschütterungen); für wichtige Quellen durch Freifeldmessungen repräsentative Erregerfunktionen aufbauen; die Antworten beliebiger Gebäude nicht nur zur Schadensbeurteilung, sondern auch für andere Immissionsgrößen nutzen; Prognosesicherheit wird mit Gestaltung des Erregerspektrums variabel (maximale

Einhüllende, wählbare Fraktile einer Wahrscheinlichkeitsverteilung); evtl. mit statistisch formuliertem Ausbreitungsgesetz (z.B. nach Bild 6.15) kombinieren; Vorteile: Prognosegenauigkeit ließe sich schätzen und auf neue Erkenntnisse der Wirkungsforschung könnte mit veränderten Fraktilen reagiert werden.

- Entwicklung einer Prognosemöglichkeit auf analytisch - meßtechnischer Basis.

  Vorhandene Ansätze dieser Methode in [6-22] und [9-3] konsequent unter Nutzung modernster Technik ausbauen; Ausbreitungssystem "Emission-Transmission-Immission" in Module unterteilen, die die spezifische physikalische Information des Teilsystems enthalten; Bestandsaufname vorhandener Daten; Module mit Datensätzen aufbauen;EDV-Programme für Rechenprozedur erstellen; Programme flexibel aufbauen; Rechnung im Frequenz- und Zeitbereich auf schnellen PC's; direkte Einspeisung von Meßdaten auf mehreren parallelen Kanälen ist zu ermöglichen.

10.1.3 Wissenschaftlich - grundlagenorientierte Vorschläge

Erkenntnisdefizite, die entscheidend das Prognoseergebnis und die Prognosegenauigkeit bestimmen, sollten verringert werden. Die aufgezeigten Schwachstellen in der Prognosekette tauchen demnach hier als Schwerpunkt wissenschaftlich orientierter Untersuchungsziele auf. Bei allen Vorschlägen muß das Hauptaugenmerk auf eine Kombination von Simulationsrechnung und meßtechnischer Nachprüfung am gleichen Objekt gerichtet sein. Entsprechend ihrer Bedeutung werden einige mögliche Aufgaben nachfolgend genannt.

- Verifizierung theoretischer Erkenntnisse zur Boden-Baugrund-Wechselwirkung.

  Auswahl einiger typischer Gebäude (z.B. in Anlehnung an die BAM-Modelle); Messen des Schwingverhaltens bei verschiedenen Freifelderregungen; Modellbildung des real existierenden Gebäudes und entsprechende Simulationsrechnungen durchführen, Vergleiche anstellen.

- Untersuchung der Strukturdämpfung in Gebäuden.

  Insbesondere von typischen Deckenaufbauten, Vorgehensweise wie zuvor; Verkehrslasten und Innenausstattung variieren, Vergleiche anstellen.
  Als Einstiegsmöglichkeit, prognostizierte Gebäudereaktionen mit Meßwerten von der fertigen Konstruktion zu vergleichen (KB-Werte und Körperschallpegel), könnten vorliegende TÜV-Ergebnisse für ein Objekt [8-14] speziell ausgewertet werden.

- o Untersuchung der Körperschallausbreitung in Gebäuden.

  Messung in mehrgeschossigen Gebäuden bei harmonischer und stochastischer Erregung; Modellierung des realen Gebäudes nach schwingungstheoretischen und nach wellentheoretischen Prinzipien; Berechnung des Körperschallpegels nach beiden Methoden; evtl. mit Baugrund-Boden-Wechselwirkung koppeln; Vergleiche anstellen.

- o Anwendung der Randelement-Methode zur Erschütterungsprognose.

  Vorhandene aufwendige Methode mit schnellen PC-Programmen für Praxis nutzbar machen; Vorteil: Simulierung von Schwingungszeitverläufen in inhomogenen, begrenzten Systemen; es eröffnet sich die Möglichkeit, die praktisch vorkommenden Ausbreitungssysteme besser zu verstehen und Spitzenwerte des Schwingungssignals prognostizierbar zu machen; Untersuchung Emission / Baugrund und "innere" Dämpfung durch Störfundamente in großflächigen Anlagen.

10.2 DURCHFÜHRUNG DER IMMISSIONSPROGNOSEN

Die vorliegende Studie bündelt eine Fülle von Fakten, die die Literaturrecherche in den verschiedenen Sprachen der beteiligten Ingenieurdisziplinen erbracht hat. Es müssen viele Details zusammengestellt werden, um eine Prognose im Gesamtsystem von der Quelle bis zum Empfänger durchzuführen.

Der Stand der Technik zur Durchführung der Immissionsprognose von Erschütterungen und Körperschall besagt:

- o Es gibt kein einheitliches Vorgehen.
- o Die vorhandenen Möglichkeiten schwanken extrem zwischen sehr einfachen pauschalen Abschätzungen und sehr aufwendigen theoretischen Modellrechnungen, deren Genauigkeit im speziellen Anwendungsfall nicht bekannt ist.
- o Problemangepaßte Verfahren auf analytisch- meßtechnischer Basis sind für das Gesamtsystem in der Entwicklung, für die Anwendung in bestimmten Teilbereichen in der Praxis bereits erprobt. Man erwartet eine hinreichende Genauigkeit, um Planungsentscheidungen sinnvoll treffen zu können.

Dieser unbefriedigende Zustand wird in absehbarer Zeit nicht grundsätzlich zu ändern sein, da komplizierte physikalische Ausbreitungsvorgänge mit vielfältigen Anforderungen des Erschütterungsschutzes zusammenkommen.

Um trotz dieser Widrigkeiten einigermaßen praktikabel eine Erschütterungsprognose erstellen zu können, schlägt der Verfasser eine abgestufte Vorgehensweise vor. In Anlehnung an ISO Standards [1 - 5,7] kann die Durchführung von Erschütterungsprognosen je nach Aufwand, Genauigkeit und Bedeutung des Projektes in folgende drei Klassen eingeteilt werden.

1. Übersichtsschätzung (survey method)

   - o Diese Methode ist anwendbar in einfachen Fällen wenn keine Störungen aus der Umgebung vorliegen und eindeutige Verhältnisse den Vergleich mit ähnlichen bekannten Systemen zulassen.
   - o Benötigt werden pauschale Eingabedaten und einfache Abnahmekurven bzw. Übertragungsfaktoren (Nutzung von Dateien und Katastern).
   - o Die Ergebnisse werden als pauschale Einwertangaben mit Anhaltswerten verglichen.

2. Analytisch - meßtechnisches Verfahren (engineering method)

   - o Diese Methode ist anwendbar, wenn das Ausbreitungssystem in wesentlichen Teilen meßtechnisch erfassbar ist und / oder eine vereinfachende Modellierung zuläßt.
   - o Meßtechnisch werden Eingangsimpedanzen und Transferimpedanzen als komplexe Funktionen im Frequenzbereich erfaßt und ggfl. Krafterregerspektren bzw. Schnellespektren des Bezugabstandes R_1 verwendet.
   - o Rechnerisch kann im tieffrequenten Bereich das Struktur-Resonanzverhalten modalanalytisch untersucht werden. Im höherfrequenten Bereich wird die Körperschalldämmung nach der Wellentheorie vorausgesagt.
   - o Ergebnisse werden spektral dargestellt und eignen sich auch zur Auslegung von Schutzmaßnahmen.

3. Exakte Berechnungen (precision method)

   - o Dynamische Beanspruchungen und Ausbreitungsvorgänge werden in diskretisierten Modellen mit der Finite-Elemente- oder Randelement-Methode untersucht. Rechnungen im Frequenz- und im Zeitbereich sind möglich. Geometrische und physikalische Randbedingungen können berücksichtigt werden.
   - o Benötigt werden Erregerfunktionen bzw. -kräfte, sowie Material- und Systemkennwerte.
   - o Werden ergänzende meßtechnische Erhebungen erforderlich, so sind moderne digitale Signalanalysen anzuwenden.
   - o Ergebnisse werden spektral oder als Zeitverlauf dargestellt. Parameterstudien liefern im Modell die Auswirkungen von Systemveränderungen, z.B. von Schutzmaßnahmen.

Der Einsatz einer bestimmten Methode hängt ab von :

- o der Bedeutung des Planungsobjektes,
- o der Komplexität des konkreten Ausbreitungssystems und
- o dem Planungszustand.

Neben einer angemessenen Wahl der Methode ist außerdem eine zeitliche Staffelung nach dem Planungs- und Baufortschritt angezeigt, insbesondere, wenn es sich um größere Projekte handelt. Dabei kann durchaus eine Abstufung in der Genauigkeitsklasse zweckmäßig sein.

Soll z.B. in einem sehr frühen Planungsstadium ohne Zugang zu einem bestimmten Planungsgebiet die Frage beantwortet werden, ob das Vorhaben bzgl. der Erschütterungen umweltverträglich ist, kann die einfache Schätzmethode anhand von Dateien ausreichend sein. Wenn eine Prognose mit der obersten Kennwertgrenze (konservative Schätzung) die Einhaltung vorgegebener Richtwerte ergibt, kann die Planung zunächst weiter verfolgt werden.

Liegen bereits genaue Standortbedingungen und die Detailplanung vor, dann ist in jedem Fall ein meßtechnisches Vorgehen angebracht, das je nach vorhandenem und geplantem Teilsystem analytisch zu ergänzen ist. Auch im erstgenannten Beispiel wäre zu diesem Planungszeitpunkt eine Präzisierung der Schätzprognose erforderlich. Bei bedeutenden Projekten ist das dynamische Antwortverhalten mit Hilfe von Modellrechnungen zusätzlich zu untersuchen.

Die analytisch-meßtechnische Vorgehensweise beinhaltet auch weitere Untersuchungen in einem fortgeschrittenen Bauzustand, wenn z.B. Entscheidungen über konkrete Schutzmaßnahmen zu treffen sind. Im Falle von Gewährleistungen und zur Kontrolle der Einhaltung der behördlichen Auflagen sind nach Fertigstellung entsprechende Nachweismessungen in gleicher Qualität wie die Prognoseuntersuchung durchzuführen.

Die vorgeschlagene abgestufte Durchführung von Erschütterungsprognosen orientiert sich an den gegebenen Möglichkeiten und verfügbaren Mitteln und versucht mit fortschreitender Planung und mit angepaßtem Aufwand eine zunehmende Prognosegenauigkeit zu erzielen.

10.3 SCHLUSSFOLGERUNG

Der durch die Studie beschriebene Stand der Technik weist deutlich auf eine Reihe von Unzulänglichkeiten in der Durchführung der Immissionsprognose für Erschütterungen und

Körperschall hin, die primär in der Komplexität des Ausbreitungssystems begründet sind. Hinzu kommt die Schwierigkeit, Bezugsgrößen verschiedenster Art im Frequenzbereich bzw. im Zeitbereich für verschiedene Bezugspunkte prognostizieren zu müssen.

Dieser immense Unterschied zur Lärmprognose wird noch dadurch potenziert, daß die Erschütterungs- und Körperschall-Bezugsorte im Inneren der Bauwerke liegen. Damit wird sowohl die Durchführung, als auch das Ergebnis von Erschütterungsprognosen entscheidend von der individuell ausgeprägten Immissionsstruktur bestimmt. Da in einem Planungsgebiet die prognostizierten Freifeldschwingungen nur in gleichen Gebäuden auch vergleichbare Immissionen ergeben, im Regelfall aber Konstruktion und Ausstattung der Gebäude differieren, müßten wesentlich mehr Bezugsorte beurteilt werden, als dies bei Lärmuntersuchungen der Fall ist. Einer praktischen Umsetzung dieser strengen Vorgaben wird durch Umfang und Kosten sehr schnell Grenzen gesetzt. Häufig einigt man sich dann auf sogenannte "repräsentative" Gebäude - setzt also Übertragbarkeit voraus - und auf sogenannte "mittlere Überhöhungsfaktoren", um die unbekannten dynamischen Eigenschaften eines geplanten Gebäudes in der Prognose in etwa zu berücksichtigen. Die komplexe Prognosesituation zwingt also gewissermaßen zu drastischen Vereinfachungen, die die Genauigkeit sicher nicht verbessern. Wie aussagekräftig eine Immissionsprognose im konkreten Einzelfall dann sein kann, ist nicht abzuschätzen, insbesondere wenn sie ein noch nicht existierendes Gebäude mit einbeziehen muß. Naturgemäß wird man dem erhöhten Risiko einer Fehleinschätzung der Immission durch die Inanspruchnahme von Sicherheitsspielräumen begegnen, was evtl. zu ungerechtfertigt strengen, kostenintensiven Auflagen führt.

In der Konsequenz stellt sich also die Frage, wie überhaupt unter Wahrung der Verhältnismäßigkeit der Mittel eine Immissionsprognose für Erschütterungen und Körperschall verantwortlich durchgeführt werden kann.

- Die erste Antwort darauf ist die vorgeschlagene flexible Vorgehensweise, die eine an das jeweilige Projekt angepaßte Abstufung der Prognose bzgl. Qualität und Zeitablauf vorsieht.

- Die zweite Antwort besteht in einem Plädoyer für den modernsten Stand der Prognosetechnik, d.h. Integration digitaler Meß- und Analyseverfahren, Schaffung praxisbezogener EDV-Programme, Einsatz von Personalcomputern im Feldversuch mit on-line-Bewertung und schließlich eine forcierte Festlegung im Regelwerk und die Berücksichtigung in technischen Anleitungen.

Aber ein grundsätzliches Problem ist nicht aus dem Weg zu räumen. Dämpfung und Strukturdämmung eines Gebäudes entziehen sich vorläufig der Vorhersage, und damit bleibt ein wichtiger Einfluß auf das schwächste Glied in der Prognosekette unkontrollierbar. Selbst meßtechnisch können nur zwischen zwei Punkten und mit hohem Aufwand Gesamtwirkungen erfaßt werden, die sich aus der Überlagerung vieler verschiedener Einflüsse ergeben.

- Als dritte Antwort liegt also die Schlußfolgerung nahe, die mit dem Gebäude verbundenen Schwierigkeiten von der Freifeldausbreitung abzutrennen, den Immissions-Bezugspunkt vom Bauwerk loszulösen und in den ungestörten Boden vor das Objekt zu verlagern.

  Sind die Freifeldschwingungen für die Bezugspunkte in einem Planungsgebiet prognostiziert, dann lassen sich in einem getrennten Schritt daraus die Bauwerks- bzw. Bauteilantworten ableiten, indem man z.B. die Antwort-Spektrum-Methode einsetzt. Die Prognosegenauigkeit für diesen Teil der Prognose ließe sich über eine statistisch aufbereitete Freifeld- bzw. Erregerfunktion in Grenzen einstellen.

Diese zweistufige Vorgehensweise stellt eine Parallele zum Lärmkonzept dar und könnte auch formal die Zuständigkeit zwischen Verursacher und Betroffenen klarer abgrenzen und Interessenkonflikte entzerren.

Je nach Problemstellung der Immissionsprognose kann man ein Splitting in der folgenden Weise vorsehen:

- Bei vorhandener Nachbarschaftsbebauung und Planung von genehmigungspflichtigen Anlagen (Tabelle 2.1, Pkt. 1) gelten wie bisher die Bezugspunkte im Inneren der Gebäude und die gebäudedynamischen Einflüsse sind hinreichend genau meßtechnisch für die Prognose zu erfassen. Die vorhandene Wohnbebauung genießt quasi den Bestandsschutz.

- In allen Prognosefällen, in denen die Immissionsstruktur nicht besteht bzw. geplant wird (Tabelle 2.1, Pkt. 2,3,4) gelten die Bezugspunkte im Gelände am Ort der geplanten Bebauung. Im Rahmen der Bauleitplanung beziehen sich dann Festsetzungen zu Nutzungsbeschränkungen auf die Flächen und nicht mehr auf die Bauwerke. Um den Schutz gegen Erschütterungseinwirkungen im Gebäude sicherzustellen, sind dann zusätzliche bautechnische Auflagen erforderlich, wie dies bereits in (9-1) angeregt wird.

  Bei einer derartigen Regelung wird die bestehende große Prognoseunsicherheit auf das Gebäude eingegrenzt, d.h. auf das zuständige Prognoseteilsystem konzentriert. Die zu-

vor für das Prognosegesamtsystem resultierenden Sicherheitsmargen werden damit nicht mehr den Freifeldschwingungen, bzw. dem Erschütterungsverursacher zugeschlagen. Im Fall der Bauleitplanung ist der Sicherheitsspielraum dann mit bautechnischen Auflagen abzudecken, und bereits vorhandene Betriebe genießen quasi den Bestandsschutz. Voraussetzung ist, daß die Freifeldimmissionen hinreichend unter den Anhaltswerten der Gebäude-Bezugspunkte liegen.

Natürlich kommen andere Kriterien ins Spiel, wenn bewußt eine Betriebssanierung bzw. -verlagerung vorgesehen ist. In jedem Fall ist der Schutzanspruch der Bewohner vor unerwünschten Schwingungseinwirkungen auch in geplanten Gebäuden unverändert beizubehalten.

Der Verfasser ist der Meinung, daß für die vorgeschlagene Regelung das Normenwerk zur Messung und Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (1-2,3) im Prinzip nicht geändert werden muß. Es wäre wünschenswert, Anhaltswerte für die Freifeldimmission, die im Regelfall die Immissions-Anhaltswerte im Inneren des Gebäudes abdecken, in der Norm DIN 4150 festzulegen.

Insgesamt sollte sich mit der differenzierten Vorgehensweise die Immissionsprognose für Erschütterungen und Körperschall einfacher sowie eindeutiger und eventuell genauer durchführen lassen.

11. LITERATURVERZEICHNIS

REGELWERKE, STANDARDS, GESETZE

1-1 DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen, Teil1: Grundsätze, Vorermittlung und Messung von Schwingungsgrößen. Entwurf für eine Vornorm, September 1986.

1-2 DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Entwurf Oktober 1990.

1-3 DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen, Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Mai 1986.

1-4 BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 15.03.1974.

1-5 ISO/DIS 4866 (E): Mechanical vibration and shock-vibration of buildings - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings 1990.

1-6 ISO/DP 10137: Bases for design of structures-Serviceability of buildings against vibration 1990.

1-7 ISO/DIS 3741 bis 3746: Various methods for determining the sound power levels of noise sources 1976-1977.

1-8 VDI 2062, Blatt 1: Schwingungsisolierung, Begriffe und Methoden 1976.

1-9 VDI 2716 E: Luft- und Körperschall bei Schienenbahnen des städtischen Nahverkehrs. Z.Zt. interne Beratungsvorlage, August 1990.

LEHRBÜCHER, MONOGRAPHIEN

2-1 GASCH, R.; KNOTHE, K.: Strukturdynamik Bd. 1 Diskrete Systeme. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1987.

2-2 NATKE, H.G.: Baudynamik, Einführung in die Dynamik mit Anwendungen aus dem Bauwesen. BG Teubner Stuttgart, Reihe: Leitfaden der angewandten Mathematik und Mechanik, Bd. 66, 1989.

2-3 VDI-BERICHTE 786: Computerprogramme zur Berechnung der Schwingungen von Maschinen und Bauwerke. Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Heidelberg, VDI Verlag Düsseldorf, 1989.

2-4 N.N.: Bodendynamik, Grundlagen und Anwendung, Hrsg.: W. Haupt. Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 1986.

2-5 KRÄMER, E.: Maschinendynamik. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1984.

2-6 KLOTTER, K.: Technische Schwingungslehre, Bd. I u. II. Springer Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1978 u. 1969.

2-7 N.N.: Projektgruppe Lärmbekämpfung beim Bundesminister des Innern, Arbeitskreis 18 "Erschütterungen", S. 1119-1190, Herausgeber: Umweltbundesamt Berlin, 1978.

2-8 STUDER, J.; ZIEGLER, A.: Bodendynamik. Springer Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1986.

2-9 WHITE, J.E.: Seismic Waves, Radiation, Transmission and Attenuation. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1965.

2-10 WOLF, J.P.: Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain. Prentice-Hall; Englewood Cliffs, NJ., 1985.

KAPITEL 4

4-1 MELKE, J.; FUCHS, J.: Hochdruckkolbenverdichter, Erschütterungsimmissionen in der Ortslage W. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/105013/01, 1987.

4-2 KRAFT, A.; MELKE, J.: Schwingungstechnische Immissionsprognose für das Kraftwerk N. TÜV Rheinland e.V, Bericht 948/205002, 1985 und Bericht 933/053001/06, 1983.

4-3 NATKE, H.G.; THIEDE, R.; ELMER, K.: Untersuchungen der von Webereien ausgehenden Schwingungsemissionen und Hinweise zu Websaal-Bauplanungen. Verband der Nord-Westdeutschen Textilindustrie, Schriftenreihe Wissenswertes-grundlegend und aktuell, Heft 66, 1985.

4-3a N.N: Forschungsvorhaben Untersuchungen der von Webereien ausgehenden Erschütterungen, Teil 1: Feststellung des Ist-Zustandes durch Schwingungsmessungen. CRI Universität Hannover, Institutsberichte CRI-F-2/80; -3/80; -1/81.

4-3b N.N.: Forschungsvorhaben Untersuchungen der von Webereien ausgehenden Erschütterungen, Teil 2: Theoretische Untersuchungen der Übertragungseigenschaften der Fundamente und Gründungen einschließlich Zwischenkonstruktionen. CRI Universität Hannover, Institutsberichte CRI-F-3/81; -1/82.

4-3c N.N.: Forschungsvorhaben Untersuchungen der von Webereien ausgehenden Erschütterungen, Teil 3: Theoretische Untersuchungen der Übertragungseigenschaften des Erdbodens. CRI Universität Hannover, Institutsberichte CRI-F-4/81; -7/83.

4-4 MELKE, J.; FUCHS, J.: Erschütterungsimmission Aluminium-Walzwerk N., Prognose zur geplanten Betriebsänderung. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/209013/01, 1990.

4-5 MELKE, J.; KRAFT, A.: Untersuchung der Erschütterungs-Immission im Bereich der Weberei W. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/205005, 1985.

4-6 WECK, M.; GROSSE, B.: Berechnungsprogramm für Fallhammeranlagen, Möglichkeiten zur Verringerung der Erschütterungsemission. Industrie Anzeiger Bd. 104 (1982) Nr. 29/30, S. 26-29.

4-7 MEYER-NOLKEMPER, H.: Vergleichende Untersuchungen von Gesenkschmieden-Hämmern und Pressen. Verband Deutscher Gesenkschmieden Hagen, 1972.

4-8 KRAFT, A.; FUCHS, J.: Erschütterungsprognose für die künftige Fertigung im Werk 11 der S.L. AG in B. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/209001, 1989.

4-9 FUCHS, J.: Erschütterungsmessung an einer 1600 kN Ziehbank. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/070001/02, 1990.

4-10 MELKE, J.; FUCHS, J.: Erschütterungsmessungen bei Betrieb von Spindelpressen. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/208001, 1988.

4-11 MELKE, J.; MARTINEZ, S.C.: Gutachten zur Beweissicherung in einem Wohnhaus über Lärm- und Erschütterungseinwirkungen durch eine Presse. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/208003, 1988.

4-12 MELKE, J.; FUCHS, J.; SCHULTZE, P.: Planungsgutachten und Feststellungsmessung nach Inbetriebnahme zu Geräusch- und Erschütterungsimmissionen durch eine Großschrottschere. TÜV Rheinland e.V., Berichte 933/304004, 1974 und 933/305003, 1975.

4-13 MELKE, J.: Erschütterungsimmissionen durch die Gesenkschmiede K. in S., Teil I: Messungen; Teil II: Ermittlung der Ausbreitungsverhältnisse und Abschätzung der Wirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/305002, 1976.

4-14 FUCHS, J.; HOLM, P.; MELKE, J.: Erschütterungsgutachten zur Modernisierung einer Schmiedehalle der Firma D. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/307003/03, 1978.

4-15 MELKE, J.; FUCHS, J.: Erschütterungsimmissionen der Freiformschmiede Hammerwerk E. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/309003/02, 1979.

4-16 MELKE, J.; SWITAISKI, B.; FUCHS, J.: Bestandsaufnahme und Immissionsprognose, Teil 2: Erschütterungen, Gesenkschmiede C.S. in S. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/044007/02, 1984.

4-17 SWITAISKI, B.; FUCHS, J.: Bestandsaufnahme und Immissionsprognose, Teil 1: Erschütterungen, Gesenkschmiede F. u. W.H. in S. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/304031/01, 1985.

4-18 SWITAISKI, B.: Bestandsaufnahme und Immissionsprognose, Teil 1: Erschütterungen, Gesenkschmiede P.S. in S. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/304022/01, 1985.

4-19 KOCH, H.W.; HÜFFMANN, G.: Neuere Erkenntnisse über Erschütterungen in der Umgebung von Fall- und Gegenschlaghämmern. Schmiedetechnische Mitteilungen 88 (1966) Nr. 13, S. 45-51.

4-20 UMBACH, R.; LÖWEN, J.: Erschütterungsemission von Schmiedemaschinen und mögliche Maßnahmen zu deren Minderung. wt Zeitschrift für industrielle Fertigung 67 (1977), S. 655-659.

4-21 KOCH, H.W.: Erschütterungsuntersuchungen in der Nachbarschaft von Schmieden. Stahl und Eisen 78 (1958) Nr. 19, S. 1320-1336.

4-22 PIEPER, J.; FUCHS, J.: Schwingungstechnische Untersuchung zu Verpuffungen in einer Shredder-Anlage. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/208011, 1989.

4-23 PIEPER, J.; FUCHS, J.: Schwingungstechnische Immissionsprognose für eine Shredderanlage im Hafen Köln-Deutz. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/207004, 1987.

4-24 PIEPER, J.; FUCHS, J.: Schwingungstechnische Immissionsprognose für eine Shredderanlage im Hafen Köln-Deutz. TÜV Rheinland e.V., Bericht 948/208007, 1988.

4-25 N.N.: Erschütterungsuntersuchung an einer Shredderanlage in Duisburg. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/300002, 1980.

4-26 N.N.: Erschütterungsuntersuchung an einer auf Pfählen gelagerten Shredderanlage in Düsseldorf. TÜV Rheinland e.V., Bericht 933/204959/01.

4-27 THURAT, B.: Maschine-Fundament-Baugrund. Bestimmung des Gesamtverhaltens bei statischer und dynamischer Beanspruchung, gezeigt am Beispiel von Werkzeugmaschinen. Fortsch.-Ber. VDI-Z, Reihe 1, Nr. 67, 1980, VDI Verlag Düsseldorf.

4-28 JONES, J.M.; NEW, B.M.: Vibration caused by underground construction. Transport and Road Research Laboratory Crowthorne, Tunnelling'82, London, Selbstverlag 1982, S. 217-229.

4-29 WISS, J.F.: Construction vibrations: State-of-the-art. Journal of the geotechnical engineering division (1981), Jg. 107, Nr. 2, S. 167-181.

4-30 PALLOKS, W.: Erschütterungen beim Sprengen von Brückenpfeilern in Wasser. Bauplanung-Bautechnik 37. Jg., Heft 8, 1983, S. 356 ff, KDT Berlin.

4-31 DAVIES, J.V.: Ground vibrations from tunnel blasting. Tunnels and Tunnelling, May 1970, S. 141-144.

4-32 ARNOLD, K.: Sprengerschütterungen bei unterirdischen Vortrieben in der Nähe von Wohnbereichen. Nobel-Hefte 1, Januar-März 1982, S. 23-37.

4-33 SELBY, A.R.: Acquisition by microcomputer of some ground vibration data during pile driving. Proceedings of the international symposium on computer and physical modelling in geotechnical engineering, Bangkok 1986, S. 133-147, Edited: Balasubramaniam et.al; 1989 Balkema/Rotterdam.

4-34 MELKE, J.: Vibrationen durch Erdbauverfahren - mögliche Schäden. Schriftenreihe der Kölnischen Rück (1984), Heft 6, S. 45-64.

4-35 VAN KOTEN, N.: Bewegingen von grond en gebouwen T.G.V. Heien (Rammerschütterungen). Technische Universiteit Delft, (1989), unveröffentlicht.

4-36 SELBY, A.R.; SWIFT, J.S.: Recording and processing ground vibrations caused by pile driving. School of Engineering and Applied Science, (1989), Univ. of Durham, UK.

4-37 MESECK, H.: Ausbreitung von Erschütterungen bei der Herstellung von Verdrängungspfählen. Vortragsband der 3. Jahrestagung der DGEB, 1986, Hannover, S. 181-188.

4-38 UHRIG, R.: Zur Ausbreitung von Erschütterungen im Baugrund beim Ziehen von Spundbohlen mit Hilfe eines Vibrators. Vortragsband der 3. Jahrestagung der DGEB, 1986, Hannover, S. 189-198.

4-39 HAIDIG, G.; PALLOKS, W.: Einfluß von Rammerschütterungen auf erdverlegte Rohrleitungen. Bauplanung-Bautechnik, Jg. 37, Heft 8, August 1983, S. 354-356.

4-40 NEW, B.M.: Ground vibration caused by civil engineering works. TRRL Crowthorne, Research Report No. 53 (1986), 19 S.

4-41 MARTIN, D.J.: Ground vibrations caused by road construction operations. TRRL Crowthorne, Research Report No. 328 (1977), Supplementary, Report 328 (1977).

4-42 BAULE, H.: Vergleichende Untersuchungen über Geräusche und Erschütterungen beim Einsatz schwerer Ramm- und Rüttelgeräte. Forschungsbericht 1967, Arbeits- und Sozialminister des Landes Nordrhein-Westfalen.

4-43 SIMONS, H.: Rammen und Rütteln in verschiedenen Böden. Vorträge der Baugrundtagung der DGEG, 1968.

4-44 ATTEWELL, P.B.; FARMER, I.W.: Attenuation of ground vibrations from pile driving. Ground Engineering, Vol. 3, No. 7, 1973.

4-45 SCHOMANN, A.: Erschütterungen durch umstürzende Bauwerke bei Abbruchsprengungen. Nobel Hefte 3/4 (1983), S. 79-88.

4-46 MELKE, J.; FUCHS, J.: Meßtechnischer Vergleich der Erschütterungen und Geräusche beim Einsatz verschiedener Rammverfahren, Köln, U-Bahn-Baulos D1. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 933/309011, 1980.

4-47 MELKE, J.; FUCHS, J.: Erschütterungsmessungen bei Rammarbeiten an der Ringstraße in E. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/208010, 1988.

4-48 MELKE, J.; FUCHS, J.: Schwingungsmessungen an einer Treibstoffleitung an der L 288, a) bei Bodenverdichtungsarbeiten, b) bei Bohr- und Rammarbeiten. TÜV Rheinland e.V., a)Bericht Nr. 948/206005, 1986 und b) Bericht Nr. 948/206007, 1986.

4-49 FUCHS, J.: Erschütterungsmessungen bei Rammarbeiten am Gemmenicher Tunnel in Aachen. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/209014, 1989.

4-50 MELKE, J.; PIEPER, J.: Erschütterungsprognose für Rammarbeiten nach dem Franki-Pfahl-Verfahren. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/206011, 1987.

4-51 MELKE, J.; FUCHS, J.: Erschütterungs-Immissionsprognose Zubringerstraße Hafen-Landeskriminalamt Düsseldorf. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/208013, 1989.

4-52 GERASCH, W.J.: Ermittlung von Rammerschütterungen im Nahbereich der Erregung. VDI-Berichte 419 (1981), S. 163-170.

4-53 WOLF, M.: Sprengerschütterungen in Verbindung mit Dükersprengungen. Nobel Hefte 4/6 (1985), S. 73-82.

4-54 SWITAISKI, B.; FUCHS, J.: Erschütterungsmessungen beim Einsatz verschiedener Bodenverdichter in Düren. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 944/047202, 1990.

4-55 MELKE, J.; FUCHS, J.: Erschütterungsmessungen zu einem Bauvorhaben in Mönchengladbach. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/206009, 1986.

4-56 MELKE, J.; FUCHS, J.; MACKENSTEIN; WISSKIRCHEN: Gutachten zur Gefährdung einer NATO-Fernleitung durch Rammerschütterungen, Neubau Justizvollzugsanstalt A. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/209003, 1989.

4-57 HOLM, P.; PELZING, R.: Bericht über Erschütterungsmessungen an einer Spindelpresse HSPRZ 630. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 933/308003, 1979.

4-58 MELKE, J.; PIEPER, J.; FUCHS, J.: Erschütterungs-Immissionsprognose Neubau Bundesstraße 236, Winterberg. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 944/047203, 1990.

KAPITEL 5

5-1 N.N.: Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover: Erschütterungen im Bauwesen, 1. Bericht, Zusammenstellung und Auswertung der Literatur und Stand der Untersuchungen, 1970.

5-2 N.N.: Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover: Erschütterungen im Bauwesen, 5. Bericht, Beurteilungssystem für Sprengerschütterungen, 1973.

5-3 BÖTTCHER, G.; LÜDELING, R.; WÜSTENHAGEN, K.: Forschungsbericht Sprengen II, Untersuchungen zur Schematisierung von Erschütterungsintensitäten und deren Wirkungen am Beispiel von Sprengungen im Fränkischen Jura. Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung, München, 1977.

5-4 BÖTTCHER, G.; LÜDELING, R.: Forschungsbericht Sprengen III, Auswirkungen gewerbliche Sprengungen im Alpenraum und deren Schadenswirksamkeit, Methoden der Erfassung, Möglichkeiten der Verminderung. Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung, München, 1978.

5-5 BÖTTCHER, G.: Größe, Auswirkungen und Bekämpfung von Sprengerschütterungen im Bayerischen Wald; Sonderteil: Immissionsmessungen im Eschenloher Moos. Forschungsvorhaben Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung, München, 1980.

5-6 SCHUBART, H.; THÜMMEL, E.: Einfluß der Sprengtechnik und der Lagerstättenstruktur auf die Stärke und Ausbreitung von Bodenerschütterungen bei Gewinnsprengungen. Geol. Jb., EC (1976) S. 11-30, Hannover.

5-7 LICHTE, P.: Berechnungsanleitung Sprengerschütterungen. VEB Geophysik Leipzig - u.a. veröffentlicht in: Bohr- und Sprengtechnik (1975) S. 22-25.

5-8 NAIK, T.R.: Predictions of damage to low-rise buildings due to ground vibrations created by blastings. American Concrete Institute-ACI-Detroit, Vibration of concrete structures, Selbstverlag 1979, S. 249-264.

5-9 MEDEARIS, K.: Rational damage criteria for low-rise structures subjected to blasting vibrations. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1978, 65, Sept.

5-10 SPLITTGERBER, H.: Einflüsse auf die Stärke von Erschütterungen bei Gewinnungssprengungen. Landesanstalt für Immissionsschutz NW, Schriftenreihe (1977), Heft 42, S. 86-105.

5-11 BÖTTCHER, G.; LÜDELING, R.; WÜSTENHAGEN, K.: Zum Immissionsschutz bei Sprengerschütterungen. Nobel Hefte 2, April-Juni 1979, S. 33-63.

5-12 LÜDELING, R.: Erschütterungsemissionen von Sprengungen in Norddeutschland. Forschungsbericht 82-105 02 802, Umweltbundesamt Berlin, 1982.

5-13 HINZEN, K.G.; LÜDELING, R.: Erschütterungsprognose und Erschütterungskataster. Vortragsband der 3. Jahrestagung der DGEB, 1986, Hannover, S. 153-168.

5-14 BY, T.L.: Vibrations in rock and soil - Norwegian practice regarding damage criteria and ground vibration limits in urban areas. Proceedings Symposium Underground Structures in Urban Areas Prag: Metrostav. 1985, S. 36-45.

5-15 GHOSH, A.; DAEMEN, J.J.K.: Statistics - A key to better blast vibration predictions. 26th US Symposium on Rock Mechanics/Rapid City, SD June 1985; Research and Engineering Applications in Rock Masses, Vol. 2, Rotterdam.

5-16 BÖTTCHER, G.; LÜDELING, R.: Auswirkungen von Sprengerschütterungen auf ausgewählte Gebäude. Forschungsbericht 84-105 02 808, Umweltbundesamt Berlin, 1986.

5-17 HINZEN, K.G.; LÜDELING, R.: Minderung der Erschütterungsemission durch Entwicklung problemangepaßter Sprengtechniken. Forschungsbericht 87-105 02 809, Umweltbundesamt Berlin, 1987.

5-18 ARNETZL, H.: Zu Fragen der Sprengtechnik bei der seismischen Lagerstättenexploration auf Steinkohle. Nobel Hefte April-Sept. 1982, S. 98-108.

5-19 STAGG, M.; SISKIND, D.; STEVENS, M.; DOWDING, Ch.: Effects of Repeated Blasting on a Wood Frame House. RI 8896, 1984, Bureau of Mines; US Dep. of the Interior.

5-20 SISKIND, D; STAGG, M.; KOPP, J.; DOWDING, Ch.: Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. RI 8507, 1980, Bureauf of Mines, US Dep. of the Interior.

5-21 TAQIEDDIN, S.A.: Ground vibration levels: prediction and parameters. Mining Science and technology. 3 (1986), S. 111-115.

5-22 WEBER, G.: Die Beanspruchung von Wohnhäusern durch Sprengungen. VDI-Berichte Nr. 355, 1979, S. 117-123.

5-23 SISKIND, D.E.; et.al.: Structure Response and Damage Produced by Airblast from Surface Mining, RI 8485, 1980, Bureau of Mines, US Department of the Interior.

5-24 KAMPERMAN, G.: The Transfer Function of Quarry Blast Noise and Vibration into Typical Residential Structures. Environmental Protection Agency, Washington DC, USA, 1977.

KAPITEL 6

6-1 DYM, C.L.: Attenuation of ground vibration. Sound and vibration, Jg. 10, 1976, S. 32-34.

6-2 GUTOWSKI, T.G.; DYM, C.L.: Propagation of ground vibration: A review. Journal of sound and vibration (1976), 49 (2), S. 179-193.

6-3 MELKE, J.: Ausbreitung technisch erregter Erschütterungen - Probleme der Vorhersage zum Immissionsschutz. VDI-Berichte Nr. 284, 1977, S. 89-96.

6-4 SHIODA, M.: An Experimental Study for the Factory Vibration Propagation Prediction. inter-noise 85, München 1985, S. 617-620.

6-5 MELKE, J.; FUCHS, J.; JÜNGLING, K.; RUNOW, P.: Anlagenbezogene Untersuchungen zur Ausbreitung von Maschinenerschütterungen als Voraussetzung zur Ermittlung von Einwirkungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz. UBA-Forschungsbericht Nr. 105 02 601, TÜV Rheinland e.V., 1981. a) Band 1 und 2, 1981, b) Kurzfassung Band 3, 1981.

6-6 MELKE, J.; JÜNGLING, K.: Untersuchungen zur Ausbreitung von Maschinen- und Verkehrserschütterungen im Zusammenhang mit dem Bundesimmissionsschutzgesetz. 11. Internationaler Kongreß für Akustik 1983, Paris, Proceedings S. 145-148.

6-7 AUERSCH, L.: Wellenausbreitung durch eine Bodenschicht. Die Bautechnik Heft 7, 1981, S. 229-236.

6-8 HABETHA, E.; LANGER, M.: Der Einfluß des geologischen Aufbaus des Untergrundes auf Druckwellenausbreitung und Bauwerkserschütterungen. VDI-Berichte Nr. 113, 1967, S. 89-93.

6-9 HAUPT, W.; KANY, M.: Erschütterungsabschirmung in gefrorenem Boden. Kurzberichte aus der Bauforschung, Dezember 1985, Nr. 167, S. 703-706.

6-10 NELSON, J.; SAURENMANN, H.: Prediction procedure for rail transportation groundborne noise and vibration. Transportation Research Record 1143, USA, 1987.

6-11 HAUPT, W.: Ausbreitung von Erschütterungen an Schienenverkehrswegen. DGEB-Publikation Nr. 1 zur 3. Jahrestagung, Hannover 1986, S. 217-229.

6-12 ZORN, N.F.: Schwingungsausbreitung bei weichen Bodenschichten. DGEB-Publikation Nr. 1 zur 3. Jahrestagung, Hannover 1986, S. 231-240.

6-13 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. BMFT-Forschungsbericht TV 8329 (2 Bände), BAM Berlin, 1986.

6-14 GIRARDI, L.: Propagation des vibrations dans le sols homogenes on stratifies. Annales del Institute Technique du Batiment et des Travaux Public, Heft 397, Paris, 1981, S. 30-66.

6-15 VERHAS, H.P.: Measurement and Analysis of Train-Induced Ground Vibration. Noise Control Engineering, Vol. 13, Nr. 1 (1979), S. 28-41.

6-16 N.N.: Arbeitsgemeinschaft Schwingungsausbreitung: Schwingungsausbreitung an Schienenverkehrswegen. Studie im Auftrag des BZA München der Deutschen Bundesbahn, 1981.

6-17 N.N.: Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden. ORE, Frage D 151, Bericht Nr. 3, Utrecht 1983.

6-18 HAUPT, W.: a) Ausbreitung von Wellen im Boden, b) Dynamische Bodeneigenschaften und ihre Ermittlung. Bodendynamik, Grundlagen und Anwendung, Hrsg. W. Haupt, Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1986, a) S. 53-109, b) S. 225-279.

6-19 HETTWER, H.; HEIMANN, E.; KUNZ, J.; STEFFENBRÖER, R.: Erschütterungen an Verkehrswegen. Eine Literaturauswertung zur Entstehung, Ausbreitung, Wirkung und Abschirmung. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen, Heft 39, Universität Essen, 1986.

6-20 VAN STAALDUINEN, P.C.: Rekenmodellen voor de bepaling van de trillingstransmissie door ondergrond. IBBC/TNO-rapport B-88-316, 1988.

6-21 O'CONNELL; BUDIANSKII: Viscoelastic properties of fluid saturated cracked solids. Journal Geophys. Res. 82 (1977).

6-22 MELKE, J.: Noise and vibration from underground railway lines: Proposals for a prediction procedure. Journal of Sound and Vibration (1988) 120 (2), S. 391-406.

6-23 MELKE, J.: Unterirdischer Schienenverkehr und Umweltschutz, eine praxisorientierte Prognosemethodik. Verkehr und Technik, Heft 9, 1989, S. 341-343.

6-24 MELKE, J.; FUCHS, J.; STEYMANS, K.: Schwingungstechnisches Gutachten zu Schienenverkehrserschütterungen , W.E. Straße, Stadt B.H. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/209009/01, 1990.

6-25 BMFT-Forschungsvorhaben TV 7954-AP 09: Untersuchungen zur Ausbreitung und Minderung von Erschütterungen an Trassen des schienengebundenen Nahverkehrs in Gelände-Niveau, 1983.

6-26 ELMER, K.-H.; THIEDE, R.; NATKE, H.-G.: Modellierung der Erschütterungsausbreitung im Erdboden beim Betrieb von Webmaschinen. VDI-Berichte Nr. 536, 1984, S. 367-384.

KAPITEL 7

7-1 HOLZLÖHNER, U.: Vibrations of the elastic halfspace due to vertical surface loads. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 8, (1980), S. 405-414.

7-2 HOLZLÖHNER, U.: Zusammenstellung analytischer Lösungen, 1. Techn. Bericht, Rad/Schiene-Forschungsprogramm. BMFT Vorhaben TV 78172, Teil D, 1979.

7-3 ACHILLES, S.; HEIDRICH, W.; PALLOKS, W.: Dynamische Standortuntersuchung für den Neubau schwingungsempfindlicher Produktionsstätten. Bauplanung-Bautechnik, Berlin, 41 (1987) H. 12, S. 541-544.

7-4 ANTES, H.; VON ESTORFF, O.: Erschütterungsausbreitung im Boden und dynamische Interaktionseffekte, Untersuchung mit einer Randelement-Methode im Zeitbereich. Bauingenieur 62 (1987), S. 201-208.

7-5 KOVACS, I.: Zum Entwurf der Gründung schwingungsempfindlicher Produktionsstätten, Teil I: Dynamische Wechselwirkung zwischen Baugrund und Fundamentgruppen. Bautechnik, Jg. 64, 5, (1987), S. 145-158.

7-6 WAAS, G.; WERKLE, H.: Schwingungen von Fundamenten auf inhomogenen Baugrund. VDI-Bericht Nr. 536 (1984), S. 349-366.

7-7 KRAMER, H.: Einwirkung von Bodenerschütterungen auf Bauwerke. Bauingenieur 60 (1985), S. 281-285.

7-8 SARFELD, W.; FRÖHLICH, K.C.: Dynamische Wechselwirkung von Gebäuden und Fundamenten auf dem elastisch-isotropen Halbraum. Bauingenieur 55 (1980), S. 419-426.

7-9 WOLF, J.P.: Boden-Bauwerk-Interaktions-Analyse im Zeitbereich. DGEB-Publikation Nr. 1 zur 3. Jahrestagung, Hannover 1986, S. 139-152.

7-10 WERKLE, H.: Steifigkeit und Dämpfung von Fundamenten auf inhomogenen Baugrund. DGEB-Publikation Nr. 1 zur 3. Jahrestagung, Hannover 1986, S. 169-180.

7-11 HOLZLÖHNER, U.: Schwingungen von Fundamenten. Bodendynamik, Grundlagen und Anwendung, Hrsg. W. Haupt, Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1986, S. 141-188.

7-12 WAAS, G.: Pfahlgründung unter dynamischer Belastung. Bodendynamik, Grundlagen und Anwendung, Hrsg. W. Haupt, Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1986, S. 189-224.

7-13 N.N.: Untersuchung der Beanspruchung von Bauwerken unter Einwirkung von Erschütterungen. Forschungsbericht T 224/1 und T 224/2, 1975 und 1976, Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau.

7-14 WHITMAN, R.V.: Soil-structure interaction. Seismic Design for Nuclear Power Plants. The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1970, S. 245-269.

7-15 MACIAG, E.: Experimental evaluation of changes of dynamic properties of buildings on different grounds. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 14, (1986), S. 925-932.

7-16 GAUL, L.: Baugrund- und Fundamentdämpfung. VDI-Berichte Nr. 627, (1987), S. 201-230.

7-17 CHOUW, N.; LE, R.; SCHMID, G.: Vibration transmitting behavior of the soil. 1. European Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 90, Bochum 1990, Preprint Vol. 1, S. 675-682.

7-18 CHOUW, N.: Influence of the geometrical effects of the soil on the structure-soil-structure interaction. 1. European Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 90, Bochum 1990, Preprint Vol. 1, S. 667-674.

KAPITEL 8

8-1 KLIPPEL, P.: Bauwerksschwingung infolge nichtstationärer Erregung. ILR-Bericht 24, Berlin, 1977.

8-2 CREMER, HECKL: Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1982.

8-3 STAFFORD-SMITH, B.; CROWE, E.: Estimating periods of vibration of tall buildings. Journal of structural engineering, Jg. 112, 1986, S. 1005-1019.

8-4 JEARY, A.P.: Damping in tall buildings - a mechanism and a predictor. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 14 (1986), S. 733-750.

8-5 SPLITTGERBER, H.: Zur Übertragung von Erschütterungsimmissionen in Gebäuden. Aus der Tätigkeit der LIS, 1987, S. 57-63.

8-6 FAHY, F.J.; WESTCOTT, M.E.: Measurement of floor mobility at low frequencies in some buildings with long floor spans. Journal of sound and vibration (1978) 57 (1), S. 101-129.

8-7 LEISSA, A.: The free vibration of rectangular plates. Journal of sound and vibration, 31 (3), 1973, S. 257-293.

8-8 AUERSCH, L.: Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen. BAM Forschungsbericht 108, Berlin, 1984.

8-9 AUERSCH, L.: Berechnung des Schwingungsverhaltens von Gebäuden bei Einwirkung von Erschütterungen. Bauingenieur 59 (1984), S. 309-317.

8-10 AUERSCH, L.; EBNER, B.: Erschütterungsimmissionen in Gebäuden. Eine Parameterstudie und meßtechnische Untersuchungen zur Deckenresonanz. Bautechnik 65 (1988), H. 8, S. 271-276.

8-11 SONG, C.M.: Erschütterungs- und Körperschallisolation von Gebäuden gegen Immissionen aus Schienenfahrzeugschwingungen unter Berücksichtigung stochastischer Windkräfte. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 11, 1987, Nr. 105, S. 1-186.

8-12 MELKE, J.; KRAFT, A.; FUCHS, J.: Erschütterungseinwirkungen eines Straßenbahnbetriebshofes auf eine Wohnanlage. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 933/304016, 1984.

8-13 MELKE, J.; FUCHS, J.: Schwingungstechnische Untersuchung zur Standortsicherung eines geplanten Computerraumes-Tiefgarage WRM/ML und Kölner Philharmonie. TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/105012, 1985.

8-14 MELKE, J.; KRAFT, A.; PIEPER, J.: Immissionsprognose Erschütterungen und Körperschall für ein schwingungsisoliertes Hotel in Bonn (Prognose, Realisierung, Nachmessung). TÜV Rheinland e.V., Bericht Nr. 948/206013 (1987); 948/207003 (1988); 948/207002 (1989).

8-15 GRUNDMANN, F.H.; MÜLLER, F.H.; MÜLLER, R.; STALLER, A.: Errichtung eines Wohn- und Geschäftshauses im innerstädtischen Bereich mit teilweiser Gründung auf einem S-Bahn-Tunnel. Bauingenieur 61, (1986), S. 427-435.

8-16 KATH, U.; KUHL, W.: Untersuchungen zur Körperschall-Pegelabnahme in Gebäuden. Acustica Vol. 40 (1978), S. 272-273.

8-17 UNGAR, E.E.: Structureborne sound in buildings: Needed practical research in light of the current State of the Art. National Bureau of Standards, USA, Report NBS-GCR 80-248, 1980.

8-18 GIESSELMANN, K.: Körperschallempfindlichkeit von Bauten. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, BMBau FE-Bericht F 1698, 1980.

8-19 SHARP, B.H.; et.al.: Sound transmission through building structures - review and recommendations for Research. National Bureau of Standards USA, Report NBSIR 80-250, 1980.

8-20 ROSENHOUSE, G.; et.al.: Modell zur Berechnung der Körperschallübertragung durch flankierende Bauteile. Institut für Bauphysik der Fraunhofergesellschaft Stuttgart, Heft 53, 1980.

8-21 GOTTSCHALK, A.; BURKHARDT, G.: Verbesserung der Vorausberechnung der Schalltransmission durch statische Messungen. Bauinformation Wissenschaft und Technik (BWT), Jg. 25, (1982), H. 5, S. 39-40.

8-22 GIBBS, B.M.; GILFORD, C.L.: The use of power flow methods for the assessment of sound transmission in building structures. Journal of Sound and Vibration (1976) 49 (2), S. 267-286.

8-23 GHILADI, A.; FUCHS, H.V.; RIEHLE, R.: Bestimmung des Abstrahlgrades von leichten Bauteilen. Fortschritte der Akustik-DAGA'85, (1985), S. 369-372.

8-24 FÖLLER, D.: Luftschallabstrahlung von krafterregten Strukturen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 32, (1985), S. 163-165.

8-25 VOLBERG, G.: Tieffrequenter Luftschall in Gebäuden. DAGA '80 VDE-Verlag, 1980 S. 305-308.

8-26 KURZE, U.; VOLBERG, G.: Zusammenhang zwischen Körperschall im Untergrund und in dem darauf zu errichtenden Gebäude. DAGA '81 VDE-Verlag, 1981, S. 413-416.

8-27 BUHLERT, K.J.; FELDMANN, J.: Ein Meßverfahren zur Bestimmung von Körperschallanregung und -übertragung. Acustica, Vol. 42, (1979), S. 108-113.

8-28 ISHII, K.; TACHIBANA, H.: Field measurement of structure-borne sound in building. Proc. 9th Int. Congress on Acoustics (1977), P 39, paper C39, S. 117.

8-29 BUHLERT, K.: Bestimmung von Körperschallanregung und Körperschallübertragung durch Reziprozitätsuntersuchungen. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 43, 1981.

8-30 GUYADER, J.L; BOISSON, L.; LESUEUR, C.: Energy transmission in finite coupled plates. Part I: Theory (81-92), Part II: Application to an L shaped structure (93-105). Journal of sound and vibration, (1982), 81 (1).

8-31 MAYSENHÖLDER, W.: Körperschallausbreitung in Gebäuden. Bauphysik 10 (1988), H. 4, S. 117-120.

8-32 PIORR, D.: Geräuschimmissionen aufgrund von Erschütterungseinwirkungen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 35, (1988), S. 78-82.

8-33 HECKL, M.; WESTPHAL, H.; GÖSELE, K.; et.al.: Körperschall in Gebäuden. Untersuchungen über die Schalldämmung. Berichte des Beirates für Bauforschung beim Bundesminister für Wohnungsbau B. 13, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1960.

8-34 HECKL, M.: Energiebetrachtungen zur Körperschallentstehung und -ausbreitung. Konstruktion 28 (1976), S. 353-358.

8-35 HECKL, M.: Wave propagation in structures in the audio frequency range. Recent advances in structural dynamics, Vol. 1, ISVR 1980, S. 331-343.

8-36 N.N.: Taschenbuch der Technischen Akustik. Hrsg. M. Heckl, H.A. Müller, Springer Verlag Berlin 1975.

8-37 HECKL, M.: Körperschallübertragung bei homogenen Platten beliebiger Dicke. Acustica, Vol. 49, (1981), S. 183-191.

8-38 HECKL, M.: Körperschalldämmende Systeme - Wirksamkeit, Abschätzverfahren, Grenzen der Anwendung. VDI-Berichte Nr. 437, 1982, S. 1-8.

8-39 HECKL, M.: Schallabstrahlung in Medien mit Kompressibilität und Schubsteife bei Anregung durch ebene Strahler. Acustica, Vo. 64, (1987), 5, S. 229-247.

8-40 BACHMANN, H.; AMMANN, W.: Schwingungsprobleme bei Bauwerken - Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen. Structural Engineering Documents 3d, 1987.

8-41 OHLSON, S.: Springiness and human-induced floor vibrations. A design guide. Svedish Council for Building Research, Selbstverlag Stockholm, 1988.

8-42 N.N.: Symposium/Workshop on serviceability of buildings (movements, deformations, vibrations). Proceedings Vol. I + II, Ottawa Canada, 1988.

8-43 SHIOYA, K.; MAEBAYASKI, K.: Micro-vibration control procedure for high-tech facilities. Proc. Symposium/Workshop on serviceability of buildings Vol. I, Ottawa Canada, 1988, S. 589-602.

8-44 OHLSEN, S.: Ten years of floor vibration. A review of aspects and some results. Proc. Symposium/Workshop on serviceability of buildings Vol. I, Ottawa Canada, 1988, S. 435-450.

8-45 OTTL, D.: Fügestellendämpfung. VDI-Berichte Nr. 627 (1987), S. 67-90.

8-46 BURDICK, R.B.: Structural Irregularity: A Comparative analysis of the differences between dynamic analysis and the Uniform Building Code. Master Thesis, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, 1987.

KAPITEL 9

9-1 N.N.: Projektgruppe Lärmbekämpfung beim Bundesminister des Innern, Herausgeber: UBA Berlin, 1978.

9-2 MELKE, J.; JÜNGLING, K.: Meßdatenerhebung und Statusbericht Erschütterungsausbreitung-Stufe 1: Vorbereitung der Meßdatenerhebung. UBA-Forschungsbericht 105 02 606/21, 1981.

9-3 VAN STAALDUINEN, P.C.: Gegevensbestand en rekenprocedure voor het prognosemodel verkeerstrillingen. IBBC/TNO-rapport B-88-318, 1988.

9-4 CAUBERG, J.J.M; HOPMANS, L.J.M.: Trillingshinder in de bebouwde omgeving; inventarisatie, kennis en knelpunkten en programmering onderzoek. Herausgeber: Stichting Bouwresearch, Rotterdam, 1990.

9-5 SWITAISKI, B.: Vergleichende Untersuchung verschiedener Meß- und Auswertemethoden zur Erfassung von Schwingungen und Körperschall. (Projektleitung : Melke,J.). VdTÜV-Forschungsvorhaben Nr. 196, 1987.

9-6 HINZEN, K.G.; FERBER, R.G.: DIN-gerechte Messung von Schwingungsimmissionen - eine zeitgemäße Technik? Herausgeber: BGR Hannover, 1988.

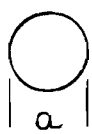
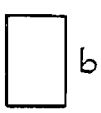
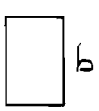
Problemstellung und Beispiel	Möglichkeiten und Vorgehensweisen
1 Prognose ohne Emissionsstruktur z.B. Planung einer genehmigungspflichtigen Anlage (Neubau, Erweiterung) bei vorhandener Nachbarschaftssituation	1.1 Emission eines vergleichbaren oder identischen Erregers am fremden Standort messen und in das Planungsgebiet übertragen
	1.2 Erschütterungsabnahme vom geplanten Erregerstandort bis zu den vorhandenen Geschoßdecken (eventuell mehrere) mit simulierter Erregung messen oder durch dynamische Berechnungen ermitteln
2. Prognose ohne Immissionsstruktur z.B. Planung einer Wohnbebauung o.ä. in der Nähe bestehender Betriebe	2.1 Imission des vorhandenen Erregers am Standort des geplanten Empfängers (eventuell mehrere) direkt messen
	2.2 Die weitere Ausbreitung von der Erdoberfläche in das geplante Gebäude und die Empfängerantwort entweder berechnen oder die Dynamik vergleichbarer Gebäude untersuchen bzw. pauschale Erfahrungswerte ansetzen
3. Prognose ohne Emissions- und Immissionsstruktur z.B. Ansiedlung neuer Betriebe oder Führung neuer Verkehrswege im Zusammenhang mit konkreter Bauleitplanung	3.1 Ermittlung der Emission nach 1.1
	3.2 Erschütterungsabnahme im Boden des Planungsgebietes mit simulierter Erregung messen, eventuell auf mehreren Meßprofilen, wenn mehrere Empfänger in verschiedenen Richtungen vorgesehen sind.
	3.3 Empfängerantwort nach 2.2 ermitteln
4. Prognose ohne reale Vorgabe eines bestimmten Ausbreitungssystems z.B. Flächennutzungsplan und Standortsuche	4.1 Emission schätzen oder nach 1.1 ermitteln
	4.2 Erschütterungsabnahme im Boden nach DIN 4150 Teil 1, Abschnitt 4.4 ansetzen oder mit typischen Bodenkennwerten oder Rechenmodell bestimmen
	4.3 Empfängerantwort nach 2.2 ermitteln

[1-1]

Typische Problemstellungen bei der Vorermittlung und Vorgehensweise LIS-Bericht Nr. 107	Tabelle 2.1

Bezug BImSchG [1-4]	Anwendungs-bereich	Typ derEmission			
		Maschinen Anlagen	Sprengung	Erdbau verfahren	Verkehr
§ 3, §41	Industrie und Gewebe				
	- Metallindustrie	X			
	- Textilindustrie	X			
	- Holzverarbeitung	X			
	- Chemie	X			
	usw				
	- Steine und Erden, Bergbau	(X)	X		(X)
	- Bauindustrie		(X)	X	(X)
§ 50, § 41	Verkehrswege				
	- Straße			(X)	X
	- Schiene			(X)	X

(x) = Quellen von untergeordneter Bedeutung und / oder nur vorübergehend eingesetzt, z.B. zum Bau

Geometrie der Quelle				
Symbol	Ausbreitungs-richtung	Benennung	Literatur	Bezugsabstand
•	radial	ideale Punktquelle	[6-13] [7-1]	$R_1 \approx \lambda$ $R_1 \approx 0.5\lambda$
	radial	Flächenquelle (kreisförmige Last)	[7-1]	$R_1 \approx 0.5(a+\lambda)$
	→	ideale Linienquelle	[6-13]	$R_1 \approx 0.5a+\lambda$
	↓	Flächenquelle (starres Fundament)	[6-13]	$R_1 \approx 0.5b+\lambda$ für $b/\lambda \leq 1$(*)
	→	Flächenquelle (starres Fundament)	[6-13]	$R_1 \approx 0.5a+\lambda$ $R_2 \approx b^2/\lambda$ für $b/\lambda > 1$ (*)
	→	Zug der Länge L -gleichphasige Anregung -stochastische Anregung	[6-13]	$R_2 \approx L^2/\lambda$ $R_2 \approx L$

(*) weitere Voraussetzungen sind der Literaturstelle zu entnehmen

Geometrie der Erschütterungsquelle und Bezugsabstand R_1, R_2	Tabelle 4.2
LIS-Bericht Nr. 107	

		Maschinenart: RÜTI-Luftdüsen-WM. L 5000	RÜTI-Schützenwebstuhl C	DORNIER-Stangengr.-WM.	SULZER-Projektil-WM.	Bemerkungen
Amplitude der vertik. Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung vom Webssaalgebäude Erregung: 9 Maschinenreihen $E_{dyn} = 2,0 \cdot 10^5$ kN/m² Erdboden: $\nu = 0,4$, $\varrho = 2,0$ kNs²/m⁴ Hallenbodenplatte: d = 20 cm	20 m	0,42	1,20	0,43	0,70	Aus Anlagen A 3.5 bis A 3.8
	30 m	0,33	0,96	0,33	0,56	
	40 m	0,26	0,76	0,26	0,45	Schwinggeschwindigk. in mm/s
	50 m	0,21	0,61	0,20	0,36	
	60 m	0,16	0,49	0,15	0,28	Einfluß der Masch.-zahl u.-anordnung s. Abschnitt 2.2.1.2 u. 2.2.1.3
	70 m	0,13	0,39	0,12	0,23	
	80 m	0,10	0,31	0,09	0,18	
Faktoren, mit denen obige Schwinggeschwindigkeitsamplituden zu multiplizieren sind zur Berücksichtigung der Einflüsse der Hallenbodenplatte des Baugrundes: dyn. Elast.-Modul E_{dyn} [kN/m²]	$0,3 \cdot 10^5$	5,9	6,2	7,4	10,2	Aus Anlagen A 6.1 bis A 6.4 Mittlere Werte f. 40 m Abst.
	$2,0 \cdot 10^5$	1,0	1,0	1,0	1,0	
	($3,0 \cdot 10^5$	0,8	0,9	0,6	0,75)	
	$4,0 \cdot 10^5$	0,7	0,8	0,4	0,6	
	($5,0 \cdot 10^5$	0,65	0,75	0,3	0,5)	
Querdehnung ν	0,25	0,80				Aus Abschn. 2.2.3.2
	0,30	0,85				
	0,35	0,91				
	0,40	1,00				
	0,45	1,12				
Dichte ϱ [kNs²/m⁴]	1,7	0,92				Aus Abschn. 2.2.3.3
	1,8	0,95				
	1,9	0,97				
	2,0	1,00				
	2,1	1,02				
	2,2	1,05				
Plattenstärke d [cm]	20 cm	1,0	1,0	1,0	1,0	Aus Anlagen A 4.1 bis A 4.4
	30 cm	0,84	0,71	0,87	0,8	
	(40 cm	0,75	0,58	0,76	0,77)	
	50 cm	0,67	0,49	0,69	0,73)	
	60 cm	0,6	0,43	0,64	0,7	
Plattenaufbau (elast. Zwischensch.)		Einfluß abhängig von Steifigkeit der elastischen Zwischenschicht				s. Abschnitt 2.2.2.2
Plattengröße		kein wesentlicher ansetzbarer Einfluß				s. Abschnitt 2.2.2.3

(···) Ermittelt durch Interpolation zwischen den Kurven der angegebenen Anlagen

Zusammenfassung der Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Schwinggeschwindigkeiten auf dem Erdboden in der Nachbarschaft von Webereien, V_z

[4 3]

Emission von Webmaschinen, numerische Übersicht zu Einflußgrößen LIS-Bericht Nr. 107	Tabelle 4.3

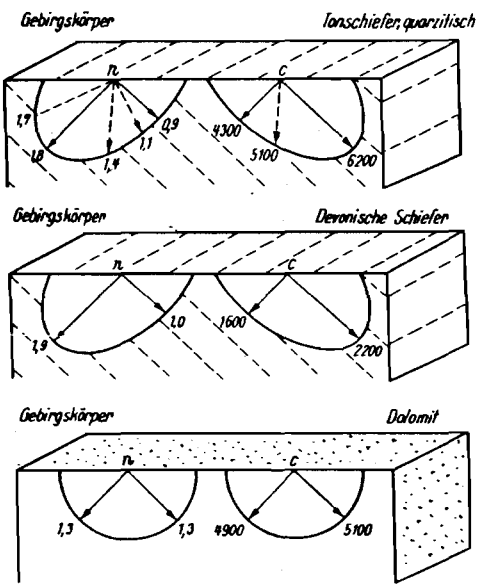
Nr	Quelle	Komponente	Bezugsort	b	m	k	S[%]	Literatur
1	Koch 1958	v_z		1/2	1	50-80		Zitat in 5-1 s.22-25
2	Lichte 1967			2/3	2	3000		"
3	Stötzner 1967			1/2	2	2000		"
4	Bendel 1968			1/2	3/2	1400	50	"
5	Raab 1970			1/2	3/2	1760		"
6	Schubarth 1976 Kalkstein	v_x v_z		0.53 0,61	1,22 0,82	19 168		5-6 5-6
7	USA 1978	v_z		2/3	1.04	466		5-9
8	USA Arizona 1985							
	Kohlenmine A	v_r		0,77	1,34	25		5-15
	Kohlenmine B	v_x		0,80	1,50	38		5-15
9	Lichte DDR 1975							
	Normalbereich			2 / 3	3 / 2	650		5-7
	Nahbereich			2 / 3	1,8	2100		5-7
10	Splittgerber 1977 NRW	v_R	Fundament	0.5 0.7	1,3 1,4	4700 9450	95 95	5-10 5-10
11	Fränkischer Jura 1977 Kalkstein	v_{res}		2 / 3 2 / 3	1,58 1,58	1226 2900	50 90	5-3 5-3
12	Niedersachsen 1982 Kalkstein	v_{res}	Freigelände	0,59	1,52	1060 2000 3470	50 84 95	5-12 5-12 5-12
13	Bayrischer Wald 1980	v_{res}	Freigelände					
	Werkstein(Schwarzpulver)			0,82	1,27	240		5-5
	Schotterwerke			0,65	1,13	340		5-5
14	Oberpfalz 1982 Franken							
	Schichtgestein		Freigelände	0,59	1,52	969		5-13
	Hartgestein		Freigelände	0,80	1,30	206		5-13
15	Norddeutschland 1982 Gemischtes Gestein	v	Freigelände	0.64 0.63	1,58 1,58	1529 3630	50 90	5-12 5-12
16	ISO 10137 1990		Freigelände	0.48- 0.81	1,46- 1,87	130 - 343		1-6 B.3.3.5

Empirische Kennwerte b, m, k für die Abstands - Lademengen - Beziehung

$v = k \cdot L^b \cdot R^{-m}$; S[%] = Unterschreitenswahrscheinlichkeit

Empirische Kennwerte b, m und k für die Abstands-Lademengen-Beziehung LIS-Bericht Nr. 107	Tabelle 5.1

Gesteinsart	Meßrichtung zur Schichtung	m	Anisotropie-faktor
Dolomit. kompakt	senkrecht	1 . 3	1
" "	parallel	1 . 3	
Gips. Anhydrit	senkrecht	2 . 3	0.4
" "	parallel	1 . 1	
Gneis	senkrecht	2.0	0.9
"	parallel	1.7	
Tonschiefer. quarzitisch	senkrecht	1 . 8	0.5
" "	parallel	0 . 9	
Steinbruch Drügendorf Malm-Beta/Gamma	senkrecht	1 . 62	0.9
" "	parallel	1 . 44	



[5-3]

[6-8]

Bild Anisotropie der Druckwellenausbreitung (in Abhängigkeit von der Gebirgsstruktur)

n Dämpfungsgröße c Druckwellengeschwindigkeit in m/s

Absorptionseigenschaften verschiedener Gebirgsarten - Anisotropiefaktor LIS-Bericht Nr. 107	Tabelle 5.2

Kürzel	Wellenart	Erregungsart	Quellengeometrie	Exponent
PQ/O/HS	Oberfläche	Harmonisch / stationär	punktförmig	0,5
LQ/O/HS	"	"	linienförmig	0
PQ/V/HS	Raum	"	punktförmig	1 (2)*
LQ/V/HS	"	"	linienförmig	0,5 (1)*
PQ/O/I	Oberfläche	impulsartig	punktförmig	1
LQ/O/I	"	"	linienförmig	0,5
PQ/V/I	Raum	"	punktförmig	1,5
LQ/V/I	"	"	linienförmig	1

Geometrische Amplitudenabnahme im Idealfall nach [6-13] und [1-1]

* - Werte für Messungen an der Oberfläche nach [6-2]

Geometrische Amplitudenabnahme im Idealfall

LIS-Bericht Nr. 107

Tabelle 6.1

(a) diskrete Werte aus [6-3]

Bodenart	α [m^{-1}]	α' [m^{-1}]	c_R [m / s]	c_P [m / s]
Fein-			110	300
Sande Mittel-	0,01	0,5 - 0,6	160	550
Kies-			250	480
Lehm	0,06 - 0,1		140 - 200	750 - 1900
feucht - trocken				
Ton	0,06 - 0,1	0,15 - 0,35	120 - 700	
Lehm u. Sand		0,4		
Lehm u. Kies		0,1	750	
Moorboden			30 - 80	
Humus				
Buntsandstein				
verwittert -				
unverwittert	0,01 - 0		500 - 1100	1950
Kleupersandstein				
verwittert -				
unverwittert			250 - 650	1000 - 1750
Granitschotter				
Fels, massiv		0,03	130	

(b) typische Spannbreite

Kenngröße / Bodenart	D [-]	d_n [%]	α' [-]	Q [-]	c_R [m/s]	c_P [m/s]
Fels	0.005	1	0,03	100	-	-
Kohäsiver Boden (Ton)	0,01	2	0,06	50	100	300
nicht kohäsiver Boden						
(Sand/Kies)	0,06	20	0,6	5	300	2000
häufiger Wert	0,02	5	0,2	20	200	~ 500
(grobe Schätzung)						

$d_n = 2D = 1/Q = \alpha'/\pi \cdot \alpha\lambda/\pi \cdot \alpha c/\pi f$; Größen nach VDI 2062 [1-8]

d_n = spezifische Dissipationskonstante oder Verlustfaktor
D = Lehrsche Dämpfung oder Dämpfungsgrad
Q = Qualitätsfaktor oder Resonanzschärfe
α' = logarithmisches Dekrement oder dimensionloser Absorptionskoeffizient
λ = Wellenlänge, c = Wellengeschwindigkeit, f = Frequenz

Kennwerte für Materialdämpfung und Wellengeschwindigkeiten im Boden

LIS-Bericht Nr. 107

Tabelle 6.2

WAVE PROPAGATION PROPERTIES OF SOIL AND ROCKS.

Unger, Bender : int. noise 75, S. 491 - 497

Material	Wavespeed c(ft/sec) Longitudinal	Wavespeed c(ft/sec) Transverse	Density ρ (g/cm³)	Loss Factor $\eta = d_n$
Brick	10,000-12,000(1,2)		1.9-2.2(1)	.01-.02(1)
Concrete, dense porous	9,600(2)-12,300(1) 5,600(1)	6,400-8,200(2)	2.3(1)-2.4(2) 0.6(1)	.004-.008(1) .01(1)
Granite	14,000(2)	8,700(2)	2.7(2)	
Limestone	13,000(2)	8,400(2)	2.65(2)	
Marble	14,500(2)	9,100(2)	2.8(2)	
Sandstone	8,600(2)	5,400(2)	2.5(2)	
Moist clay, clayey soil silty clay wet clay	4,900(2)	500(3)	1.75(3)	.04-.40(3,4),.01-2(8. .3-.7(8) .5-.8(8)
Loess, at natural moisture	2,600(3)	850(3)	1.65(3)	.1-.35(4)
Sand, dry	320-550(3)	500-1300(6)	1.5(1)	.06-.12(1),.03(6)
Dense sand and gravel 30-60% gravel, plus sand and silt	1,600(3)	820(3)	1.65(3)	.04-.12(4) .06-.14(8)
Fine-grained sand water-saturated water-saturated, frozen	940(6),1,000(3)	360(3)	1.6(3)	.1-.35(4) .06-.2(4)
Medium-grained sand	1,800(3)	520(3)	1.6(3)	
Medium-sized gravel	2,500(3)	590(3)	1.75(3)	
Sandy silt	1,750(6)			

Peferences:

(1) Data cited in L. Cremer and M. Heckl, *Körperschall*, Springer-Verlag, Berlin, 1967, page 211.
(2) Calculated from data given in R.J. Roark, *Formulae for Stress and Strain*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1954. Page 373.
(3) D.D. Barkan, *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1962. Pages 67, 316.
(4) Calculated from data given by D.D. Barkan, *ibid.*. Page 347.
(5) From data cited in F.E. Richart, Jr., R.D. Woods, J.R. Hall, Jr., *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1970. Pages 150-168.
(6) R.D. Woods and F.E. Richart, Jr., "Screening of Elastic Surface Waves by Trenches," Proc. Intern. Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, University of New Mexico, Press, N.M., 1967. Page 275.
(7) Y.S. Chae, "The Material Constants of Soils as Determined from Dynamic Testing," *ibid.*. Page 759.
(8) From data cited in J.W.S. deGraft-Johnson, "The Damping Capacity of Compacted Kaolinite under Low Stress," *ibid.* Page 771.
(9) R.J. Krizek and A.G. Franklin, "Energy Dissipation in a Soft Clay," *ibid.* Page 797.

Notes:

(a) Behavior of Sand

Loss factor of sand varies little with water content, increases with increasing grain size (Ref. 3), increases with increasing amplitude (Ref. 7).

Shear wave speed increases with increasing confining pressure (Refs. 5,7), decreases with increasing void ratio (Ref. 5), decreases with increasing fluid content (Ref. 7).

(b) Behavior of Clay and Clayey Soils

Loss factor of clayey soil increases with increasing water content. (At 70% water, η was about 3 times that at 0% water, Ref. 3). Loss factor also increases with increasing stress (Ref. 8).

Kennwerte für Materialdämpfung
und Wellengeschwindigkeiten im Boden

LIS-Bericht Nr. 107

Tabelle 6.3 b

Wellengeschwindigkeit verschiedener Bodenarten Grundbau-Taschenbuch 3. Auflage Teil 1

Bodenart	v_S in m/sec	v_K in m/sec
Moorboden	30 80	–
Sande, je nach Zusammensetzung, Feuchtigkeitsgehalt und Dichte	100 250	150 -1000
Kies, je nach Korngröße und Lagerungsdichte	180 550	500 2000
Sandstein (Keuper verwittert)	250	1000
Buntsandstein, verwittert	500	
Keupersandstein, unverwittert	650	1700
Buntsandstein, unverwittert	1100	1950
Muschelkalk	420 620	830–1500
Tone, je nach Wassergehalt	120–700	
Mergel	200 -280	
Lehm	150 200	
Löß bei natürlichem Wassergehalt	260	800
Dichter Kiessand	250	480

Bodenart	v_R in m/sec
Sande, je nach Beschaffenheit	100–250
Sand und Kies	180–550
Lehm	150–200
Tone, je nach Wassergehalt	120–700
Keupersandstein, verwittert	250
Buntsandstein, unverwittert	1100

Bodenart	v_K in m/sec
Starkbindige Böden	1600–2000
Schwachbindige Böden	1000–1600
Nichtbindige Böden	200–1500
„Berliner" Sand	400– 600
Lehme und Tone, je nach Wassergehalt	750–1900
Fels	2000–6000
Sandsteine	2000–3500
Kalke	3250–5500
Tonschiefer	4800–5300
Quarzschiefer	5500
Granit	4500–5800
Basalt	5000–6000
Zum Vergleich	
See-Eis	3200
Süßwasser	1435
Meerwasser	1485

Bodeneigenschaften Weber, VDI-Bericht Nr. 35 1979

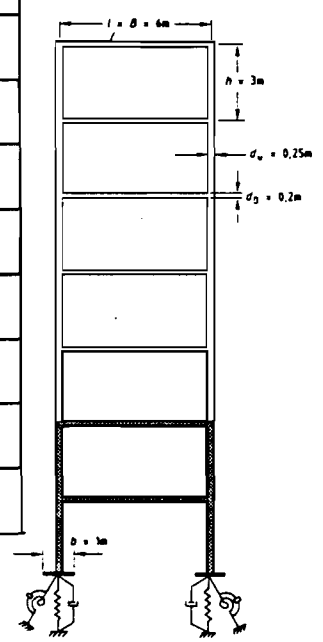
Bodenart	Gewicht [t/m³]	C_S seismische Geschw. [m/sec] min	max
Mutterboden (leicht, trocken)	1,36	180	270
Mutterboden (feucht, lehmiger Schlamm)	1,52	300	400
Mutterboden (tonig)	1,60	400	610
Mutterboden (halbverfestigt, sandiger Ton)	1,76	380	655
Nasser Lehm	1,68	-	60
Ton (stark feucht, abhängig von der Tiefe)	1,84	910	1800
Steinschutt oder Kies	-	600	800
Verkitteter Sand	2,32	850	975
Wassergesättigter Sand	2,00	-	1400
Sand	2,32	1400	2560
Sand-Ton	1,76	980	1160
Verkitteter Sand-Ton	2,32	1160	1280
Ton, toniger Sandstein	2,40	-	1800
Lose Felsböschungen	2,08	380	760
Verwitterter Fels	2,56	460	3050
Verwitterter Schiefer	2,40	2130	3350
Verwitterter Sandstein	2,56	1300	2750
Granit (leicht geschrammt)	2,72	-	3200
Kalkstein (massiv)	2,72	5000	6160

12-9.6

Anzahl Stock-werke n	Scher-wellen geschwin-digkeit m/s	Übertragungsverhältnis Decke zu Freifeld			Gebäude-modell
		harmonische Erregung		breitbandige Erregung	
		gleich-phasig	phasenver-schoben		
2	200	10.0	6.0	2.4	
2	300	20.9	12.5	3.8	
2	500	36.5	21.9	6.1	
6	200	7.8	4.7	1.5	
6	300	13.1	7.9	2.6	
6	500	33.6	20.2	6.1	
10	200	6.2	3.7	1.3	
10	300	-	-	-	
10	500	-	-	-	

f_0 =16Hz, dw=0.25m, d_D=0.2m, l=6m, h=3m, b=1m

V nimmt ab für $f > f_0$; V nimmt zu für $f < f_0$



(a) Übertragungsverhältnis V Decke zu Freifeld (Maximum aller Decken) für Standard-Rechenmodell [8-10]

Übertragungsverhältnisse für den Übergang von Freifeldschwingungen auf ein Gebäude LIS-Bericht Nr. 107	Tabelle 8.1 a

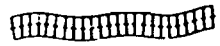
Erschütterungs-quelle	Übertragungsverhältnisse				
	Decke / Freifeld	Wand / Freifeld	Fundament / Freifeld	Decke / Fundament	Wand / Fundament
Sprengungen	0.5 - 8	0.5 - 4	0.5 0.2 - 0.9 0.3 - 0.9	1 - 7.3 max.12.4	1.3 - 3.3 1.1
Fallrammen Hämmer				2 - 13 3.5 - 8 4.5	2.3 - 7.5 1 - 2.2
Vibrationsrammen Rüttler				3 - 8 2 - 20 3.6 - 6	1-3.5 3 - 6 1 - 4
Straßenverkehr	1.6 - 4	1 - 3		1.5 - 6.6 2.5 ± 1.6	2.2 - 5.7
Eisenbahn	3 - 7		0.2 - 0.9	max.9	
Extremwerte aller Quellen	0.5 - 8	0.5 - 4	0.2 - 0.9	1 - 20	1 - 7.5

(b) Übertragungsverhältnisse aus meßtechnischen Erfahrungen
(zusammengestellt vom Arbeitskreis NABau II 13 zur DIN 4150/1 [1-1])

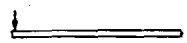
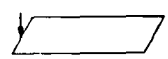
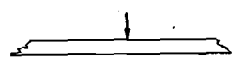
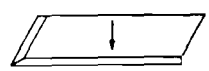
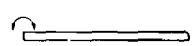
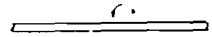
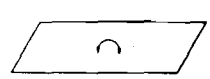
Übertragungsverhältnisse für den Übergang von Freifeldschwingungen auf ein Gebäude	Tabelle 8.1 b
LIS-Bericht Nr. 107	

Wellentypen in Festkörpern

Tabelle 8.2

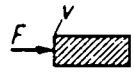
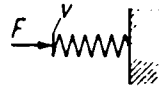
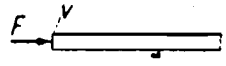
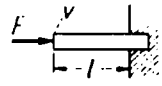
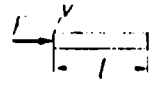
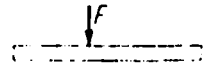
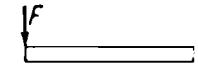
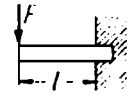
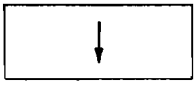
Typ	Schwingungsform	Ausbreitungsgeschwindigkeit	Bereich der Geschwindigkeit	wichtigste Meßgröße	Leistung	Bemerkungen
Reine Longitudinalwellen (in sehr großen Körpern)		$c_L = \sqrt{\frac{2G(1-\mu)}{\varrho(1-2\mu)}}$	1000 – 5000 m/s	v	wie bei Luftsch.	Grundtypen, aus denen alle anderen aufgebaut werden können
Reine Transversalwellen (in sehr großen Körpern und in kreiszylindrischen Stäben)		$c_T = \sqrt{G/\varrho}$	500 – 3500 m/s			
Dehnwellen (in Stäben)		$c_D = \sqrt{E/\varrho}$	50 m/s (Gummi) bis 5000 m/s (Metall)	v	$P = \overline{Fv}$	Gleichungen gültig im Bereich $f < c_D/6h$
Biegewellen (in Stäben und Platten)		$c_B = \sqrt[4]{\omega^2 B/m''}$	0 – 1500 m/s	v w	$P = 2c_B m'\overline{v^2}$	Gleichungen gültig im Bereich $f < c_D/20h$
		$c_B = \sqrt[4]{\omega^2 B'/m'}$				
Torsionswellen (in Stäben)		$c_S = \sqrt{T/\Theta}$	0 – 3000 m/s	w	$P = \overline{Mw}$	bei Kreiszylindern $c_S = c_T$
Rayleighwellen (an freien Oberflächen)		$c_R \approx 0{,}92 c_T$		v		erst für $f \gg c_D/20h$ möglich

E Elastizitätsmodul am jeweiligen Stab gemessen; G Schubmodul; μ Poissonkonstante; bei dünnen Stäben mit $\mu < 0{,}4$ gilt $G = E/(2 + 2\mu)$; ϱ Dichte; m'' Masse pro Flächeneinheit; B Biegesteife einer Platte bei homogenen Platten der Dicke h ist $B = Eh^3/(12(1 - \mu^2))$; m' Masse pro Längeneinheit; B' Biegesteife eines Stabes bei homogenen Rechteckstäben der Dicke h und Breite b ist $B' = Ebh^3/12$; T Torsionssteife; Θ Massenträgheitsmoment.

Stab, longitudinal		$Z = S\sqrt{E\varrho} = \varrho S c_L = \omega \varrho S \frac{\lambda_L}{2\pi}$
Stab, dünn, Biegung		$Z = \frac{1}{2}\varrho S c_B (1 + j)$ $\approx 0{,}67\,\varrho S \sqrt{c_L h f}\,(1 + j)$ $\approx \omega \varrho S \frac{\lambda_B (1 + j)}{4\pi}$
Stab, dünn, Biegung		$Z = 2\varrho S c_B (1 + j)$ $\approx 2.67\,\varrho S \sqrt{c_L h f}\,(1 + j)$ $\approx \omega \varrho S \frac{\lambda_B (1 + j)}{\pi}$
Platte, dünn, isotrop		$Z = 8\sqrt{B' \varrho h} \approx 2.3\, c_L \varrho h^2 \approx \omega \varrho h \frac{\lambda_B^2}{5}$
Platte, dünn, isotrop		$Z = 3{,}5\sqrt{B' \varrho h} \approx c_L \varrho h^2 \approx \omega \varrho h \frac{\lambda_B^2}{11{,}5}$
Stab, dick, Biegung		$\frac{1}{Z}$ siehe Gl. (78b)
Platte, dick, Biegung		$\frac{1}{Z}$ (siehe Gl. (78a)
Stab, dünn, Biegung		$W = \frac{1}{2}\varrho S c_B \frac{(1 - j)}{k_B^2}$ $\approx 0.03\,\varrho S \sqrt{c_L^3 h^3}\,\frac{(1 - j)}{\sqrt{f}}$
Stab, dünn, Biegung		$W = 2\varrho S c_B \frac{(1 - j)}{k_B^2}$ $\approx 0.12\,\varrho S \sqrt{c_L^3 h^3}\,\frac{(1 - j)}{\sqrt{f}}$
Platte, dünn, isotrop		$\frac{1}{W} = \left(1 - \frac{4j}{\pi} \ln 0{,}9\, k a\right) \frac{\omega}{16 B'}$ $\approx \left(1 - \frac{4j}{\pi} \ln 0{,}9\, k a\right) \frac{4.8 f}{c_L^2 \varrho h^3}$
Platte, dünn, isotrop		$\frac{1}{W} = (1 - 1.46\, j \ln 0{,}9\, k a) \frac{\omega}{5{,}3 B'}$

[8 - 2]

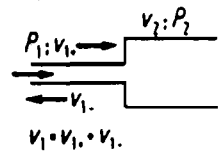
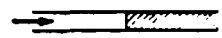
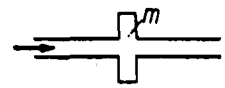
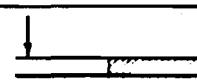
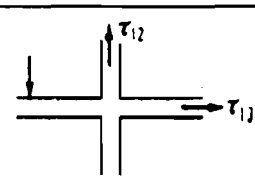
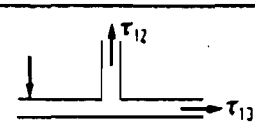
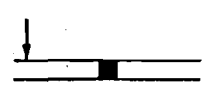
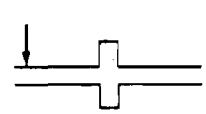
Zusammenstellung von Impedanzformeln.	Tabelle 8.3
LIS-Bericht Nr. 107	

starre Masse		$Z = j\omega m$
masselose Feder		$Z = s/j\omega$
unendlich langer Stab, longitudinal		$Z = S\sqrt{E\varrho}$
kurzer Stab, longitudinal, starre Einspannung		$Z = -jS\sqrt{E\varrho}\,\cot(\sqrt{\varrho/E}\,\omega l)$
kurzer Stab, longitudinal, ohne Einspannung		$Z = jS\sqrt{E\varrho}\,\tan(\sqrt{\varrho/E}\,\omega l)$
unendlich langer Stab, Biegung		$Z = 2\varrho S c_B(1+j)$
unendlich langer Stab, Biegung		$Z = \frac{1}{2}\varrho S c_B(1+j)$
kurzer Stab, Biegung		$Z = \frac{Bk_B^3}{j\omega}\,\frac{1+\cosh k_B l\,\cos k_B l}{\sin k_B l\,\cosh k_B l - \sinh k_B l\,\cos k_B l}$
unendlich große Platte, Biegung		$Z = 8\sqrt{D\varrho h} = 4h^2\sqrt{E\varrho/3}$
endliche Platte		$Z = \frac{\varrho h S_P}{4j\omega}\left\{\sum_n \frac{\varphi_n^2(x_0; y_0)}{\omega_n^2 - \omega^2}\right\}^{-1}$

Dimension der Impedanz Ns/m = kg/s oder dyn · s/cm = g/s. S Balkenquerschnitt, S_P Plattenfläche, E E-Modul (bei verlustbehafteten Medien komplex, s. Gl. (13)), B Biegesteife eines Stabes, D Biegesteife einer Platte, h Plattendicke, $k_B = \omega/c_B = \sqrt[4]{\omega^2\varrho S/B}$, $\varphi_n(x_0, y_0)$ Wert der Eigenfunktion an der Anregestelle, ω_n Eigenfrequenz s. Tabelle 1.7.

[E 36]

Zusammenstellung von Impedanzformeln für unendliche und endliche Systeme	Tabelle 8.4
LIS-Bericht Nr. 107	

a Longitudinalwellen Querschnittssprung		$\tau = 4[\sigma^{1/2} \cdot \sigma^{-1/2}]^{-2}$
Materialwechsel		$\tau = 4\left[\left(\frac{E_1\varrho_1}{E_2\varrho_2}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{E_1\varrho_1}{E_2\varrho_2}\right)^{-1/2}\right]^{-2}$
elastische Zwischenlage		$\tau = [1 + (f/f_u)^2]^{-1}$; mit $f_u = \frac{1}{\pi} \frac{s}{S_1\sqrt{E_1\varrho_1}}$
Sperrmasse		$\tau = [1 + (f/f_u)^2]^{-1}$; mit $f_u = \frac{1}{\pi} \frac{S_1\sqrt{E_1\varrho_1}}{m}$
b Biegewellen Querschnittssprung		$\tau = \left[\frac{\sigma^{-5/4} \cdot \sigma^{-3/4} \cdot \sigma^{3/4} \cdot \sigma^{5/4}}{\frac{1}{2}\sigma^{-2} \cdot \sigma^{-1/2} \cdot 1 \cdot \sigma^{1/2} + \frac{1}{2}\sigma^2}\right]^2$
Materialwechsel		$\tau = \left[\frac{2\sqrt{\varkappa\psi}(1+\varkappa)(1+\psi)}{\varkappa(1+\psi)^2 + 2\psi(1+\varkappa^2)}\right]^2$
Ecke		$\tau = 2[\sigma^{-5/4} \cdot \sigma^{5/4}]^{-2}$
Kreuzung		$\tau_{12} = \frac{1}{2}[\sigma^{-5/4} \cdot \sigma^{5/4}]^{-2}$ $\tau_{13} = \frac{1}{2}[1 \cdot 2\sigma^{5/2} \cdot \sigma^5]$
Verzweigung		$\tau_{12} = [\sqrt{2}\sigma^{-5/4} \cdot \sigma^{5/4}/\sqrt{2}]^{-2}$ $\tau_{13} = \left[2 \cdot 2\sigma^{5/2} + \frac{1}{2}\sigma^5\right]^{-1}$
elastische Zwischenlage		$\tau = [1 + (f/f_u)^3]^{-1}$ mit $f_u = \left(\frac{G_F^2}{1{,}8\pi^2\varrho_1\sqrt{E_1\varrho_1}\, h_1 l_F^2}\right)^{1/3}$ $= \left(\frac{G_F^2}{2\pi^3\varrho_1\sqrt{E_1\varrho_1}\, K_1 l_F^2}\right)^{1/3}$
Sperrmassen		$\tau = 1$ für $f < 0{,}5 f_s$ $\tau = [1 + f/f_u]^{-1}$ für $f > 2 f_s$ $f_s = \frac{1}{2\pi}\frac{K_1}{K^2}\sqrt{\frac{E_1}{\varrho_1}}$; $f_u = \frac{2\varrho_1 S_1^2 K_1\sqrt{E_1\varrho_1}}{\pi m^2}$

[8-36]

Zusammenstellung der Transmissionsgrade für Longitudinal- und Biegewellen LIS-Bericht Nr. 107	Tabelle 8.5

Frequency Hz	Floor Level Above Grade									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Floor-to-Floor Distance: 10 ft									
31	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
63	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1
125	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1
250	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
500	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3
1K	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3
	Floor-to-Floor Distance: 12 ft									
31	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
63	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1
125	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1
250	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2
500	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
1K	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4

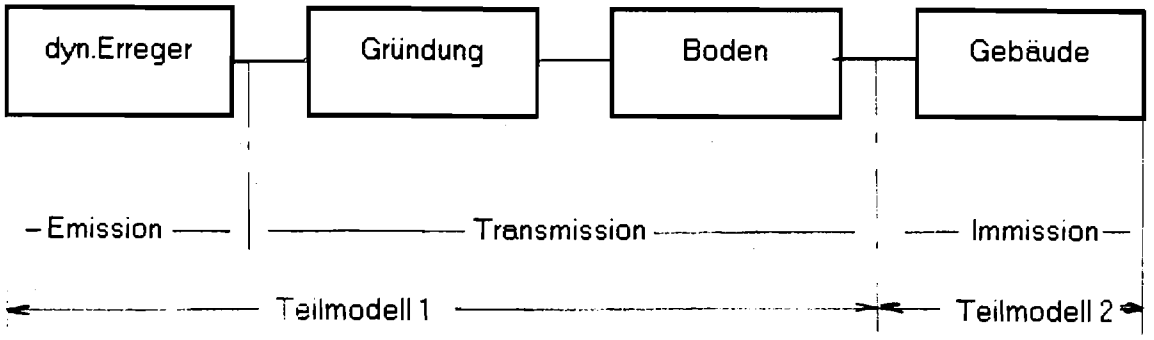
[8-28]

Dämpfung der Körperschallausbreitung pro Stockwerk in einem Stahlbetonskelettbau (Beschleunigungspegeldifferenz in dB)

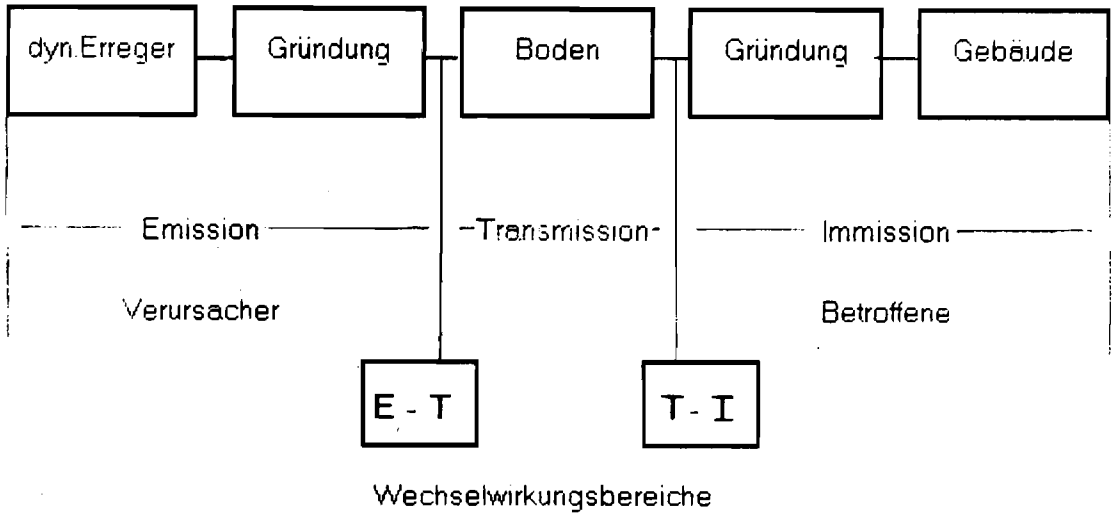
LIS-Bericht Nr. 107

Tabelle 8.6

a) Modellrechnungen



b) Praktische Anwendungen

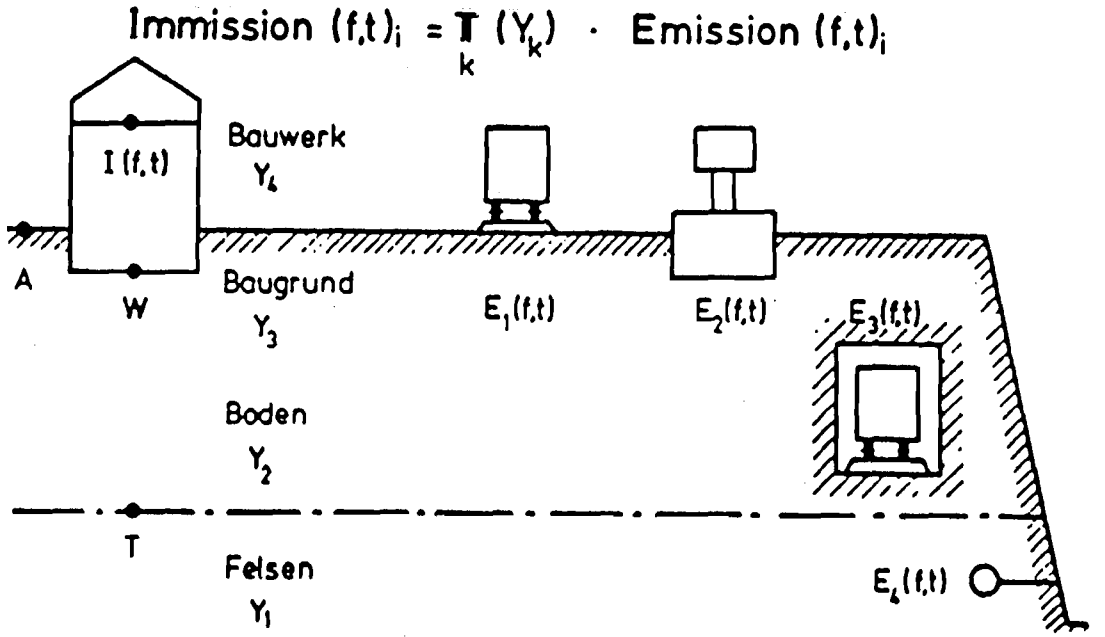


Wechselwirkungsbereiche

Unterteilung des Prognose - Gesamtsystems

LIS-Bericht Nr. 107

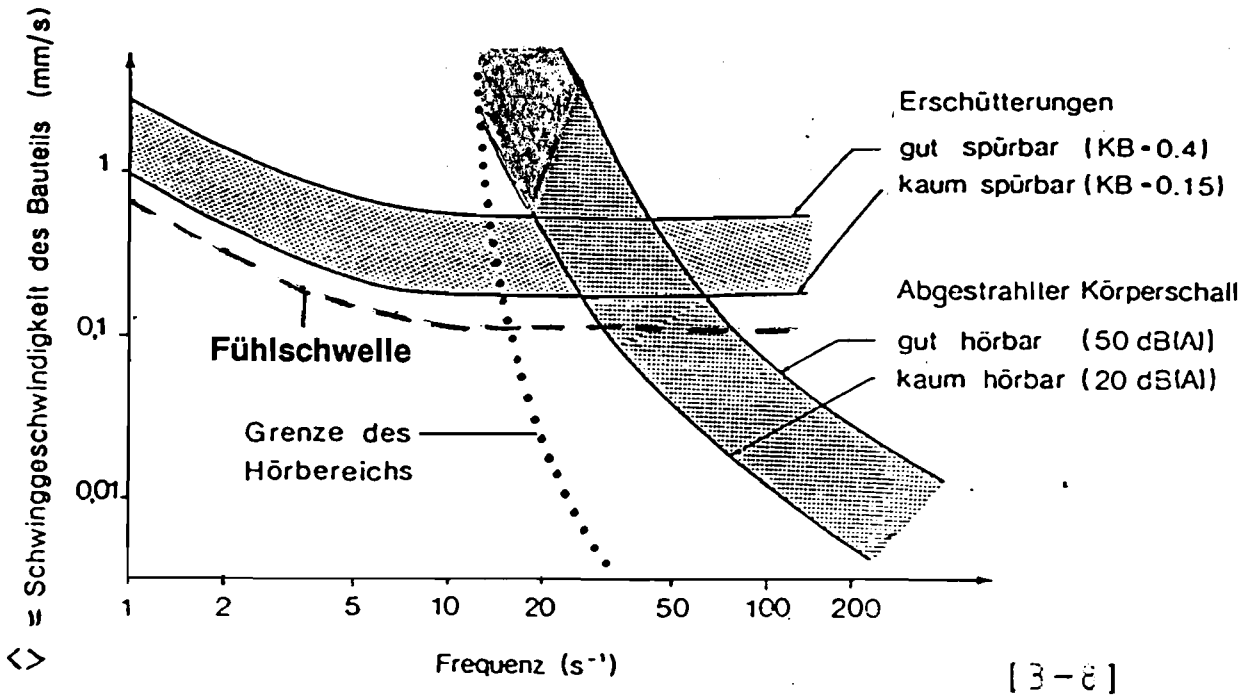
Bild 2.1



Gesamtsystem der Erschütterungsausbreitung für technische Erreger

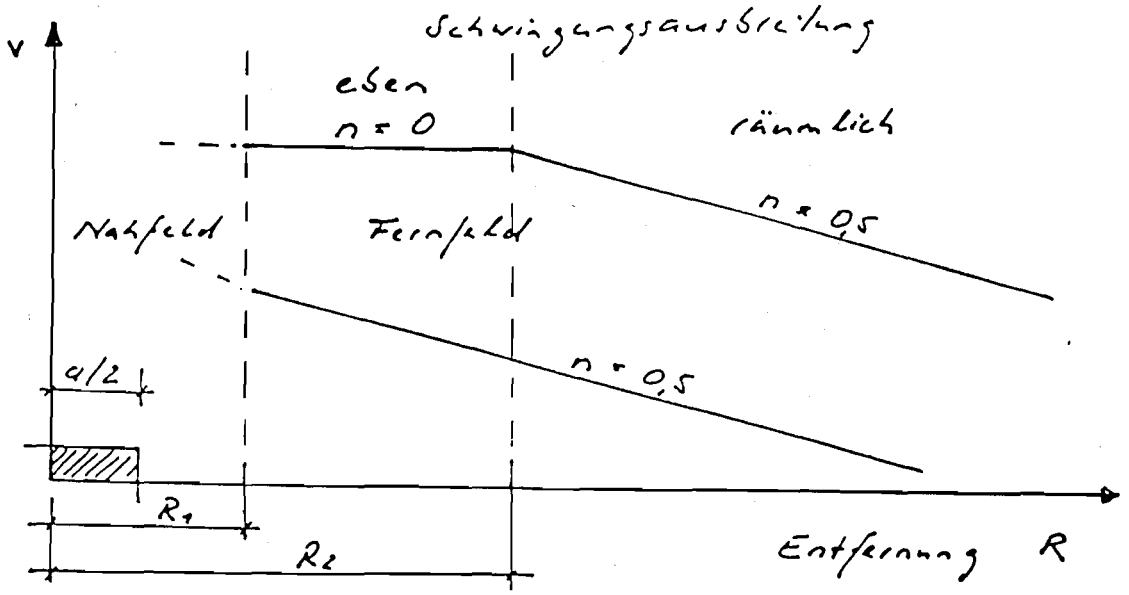
[6-3]

Erschütterungsausbreitung technischer Erreger	Bild 2.2
LIS-Bericht Nr. 107	



[3-8]

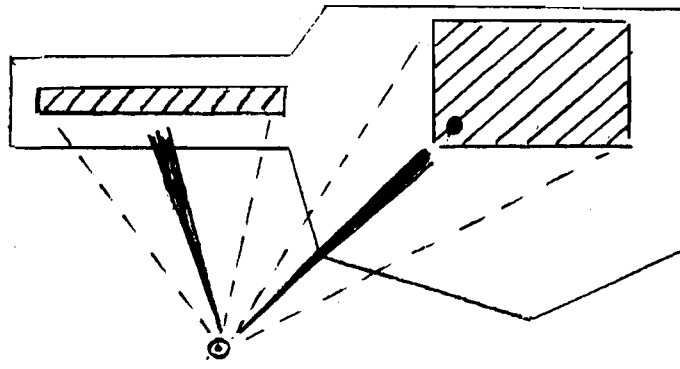
Maßgebender Bereich für Erschütterungen und Körperschall LIS-Bericht Nr. 107	Bild 2.3



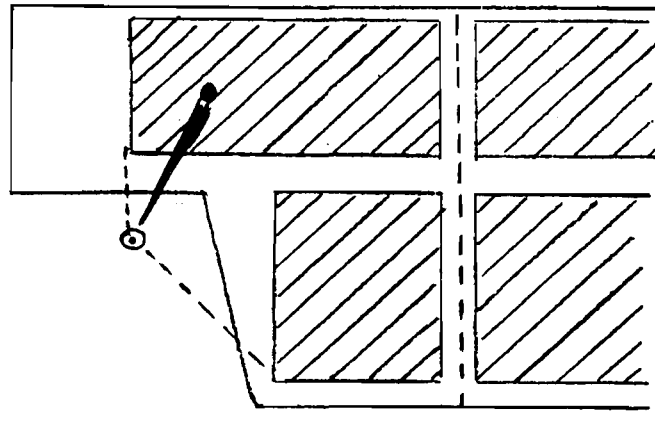
Definition der Bezugsabstände R_1 und R_2 am Beispiel harmonisch emittierender Quellen

[1-1]

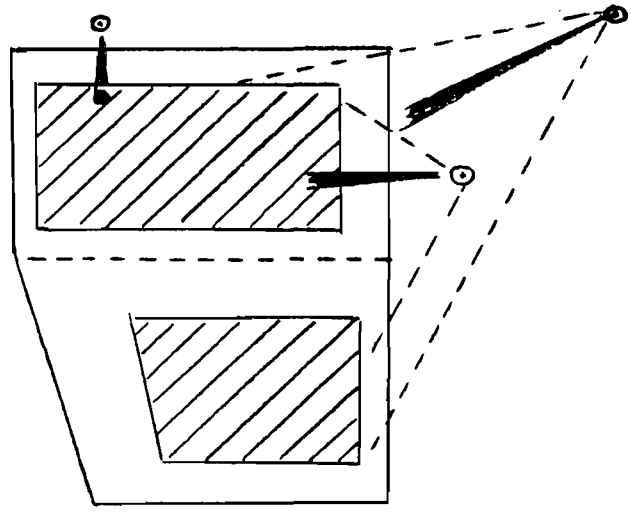
Definition der Bezugsabstände	Bild 4.1
LIS-Bericht Nr. 107	



≈M. 1:1[illegible] [4-2]



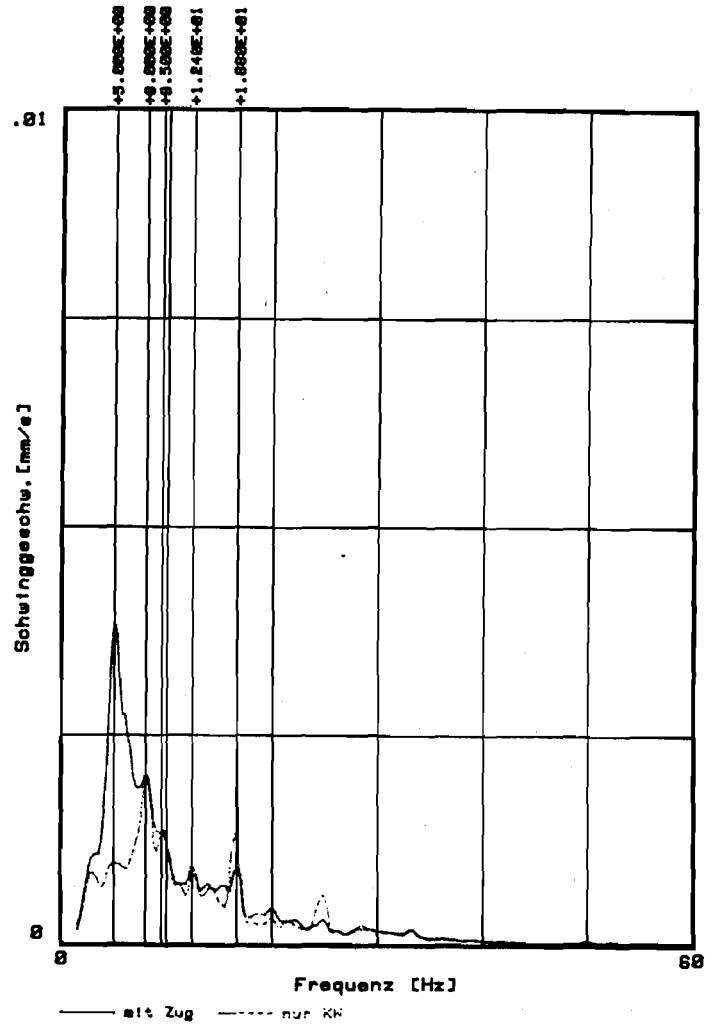
≈M. 1= 25[illegible] [4-1]



≈M.1=2[illegible] [4-4]

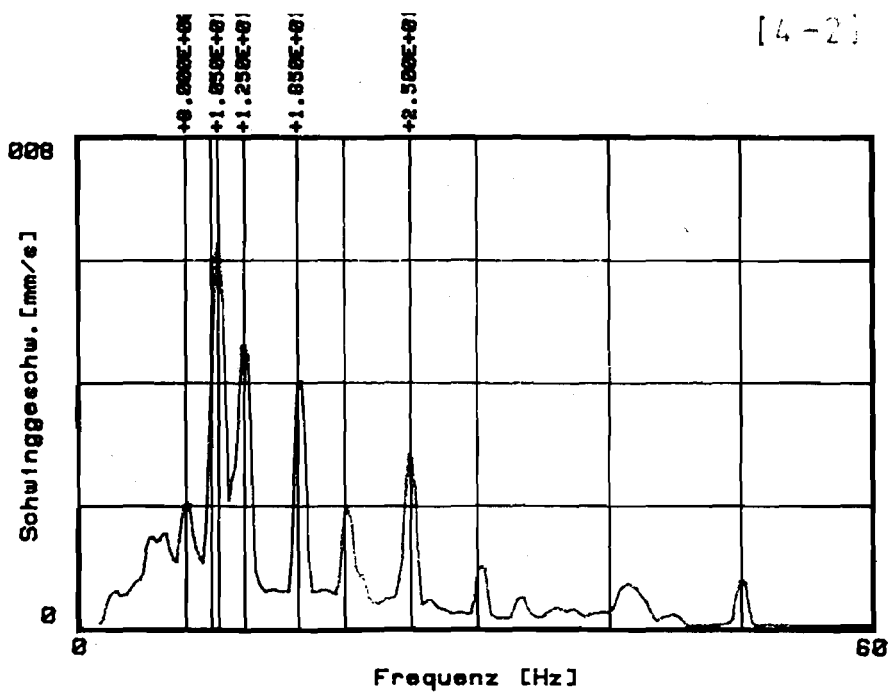
Beispiele großflächiger Industrieanlagen	**Bild** 4.2
LIS-Bericht Nr. 107	

(a)

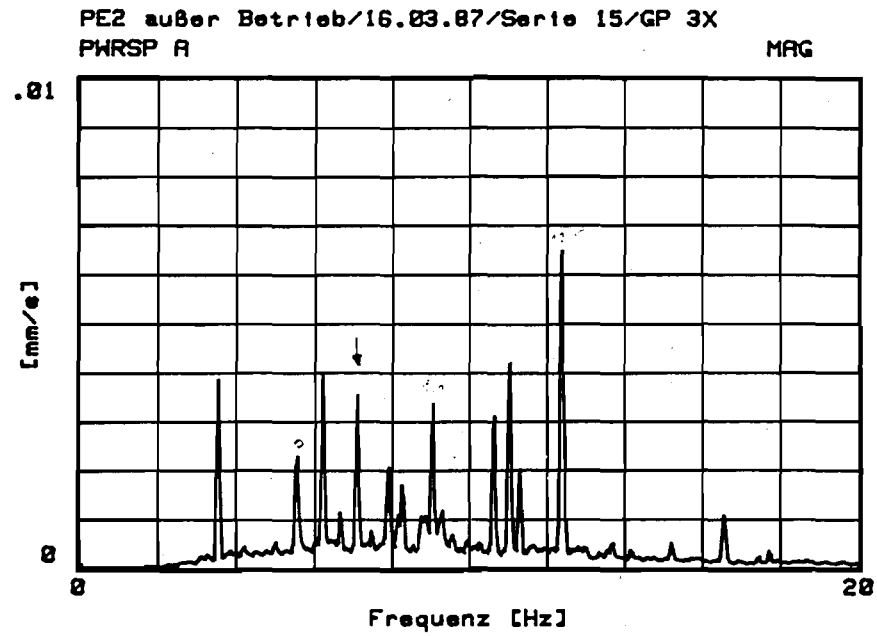


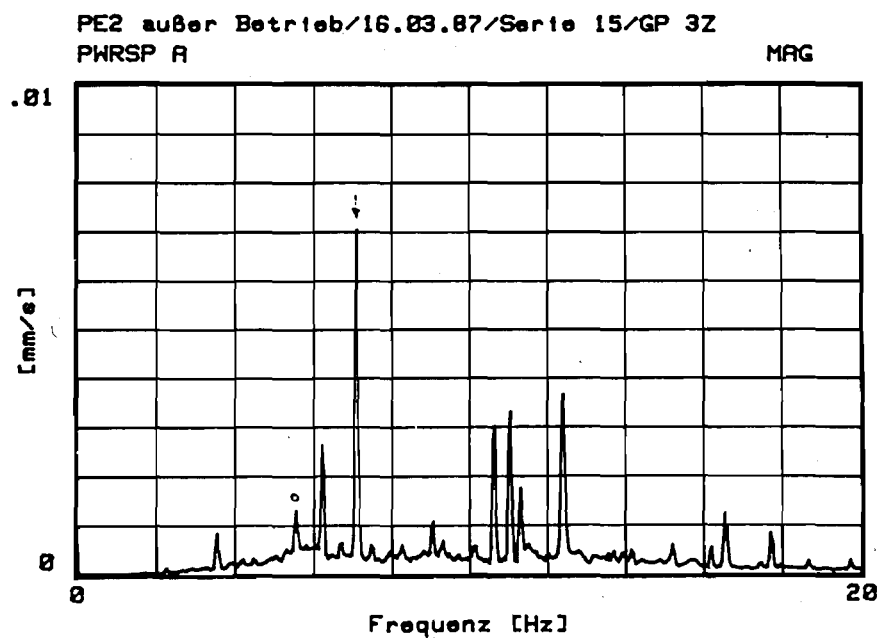
[4-2]

(b)



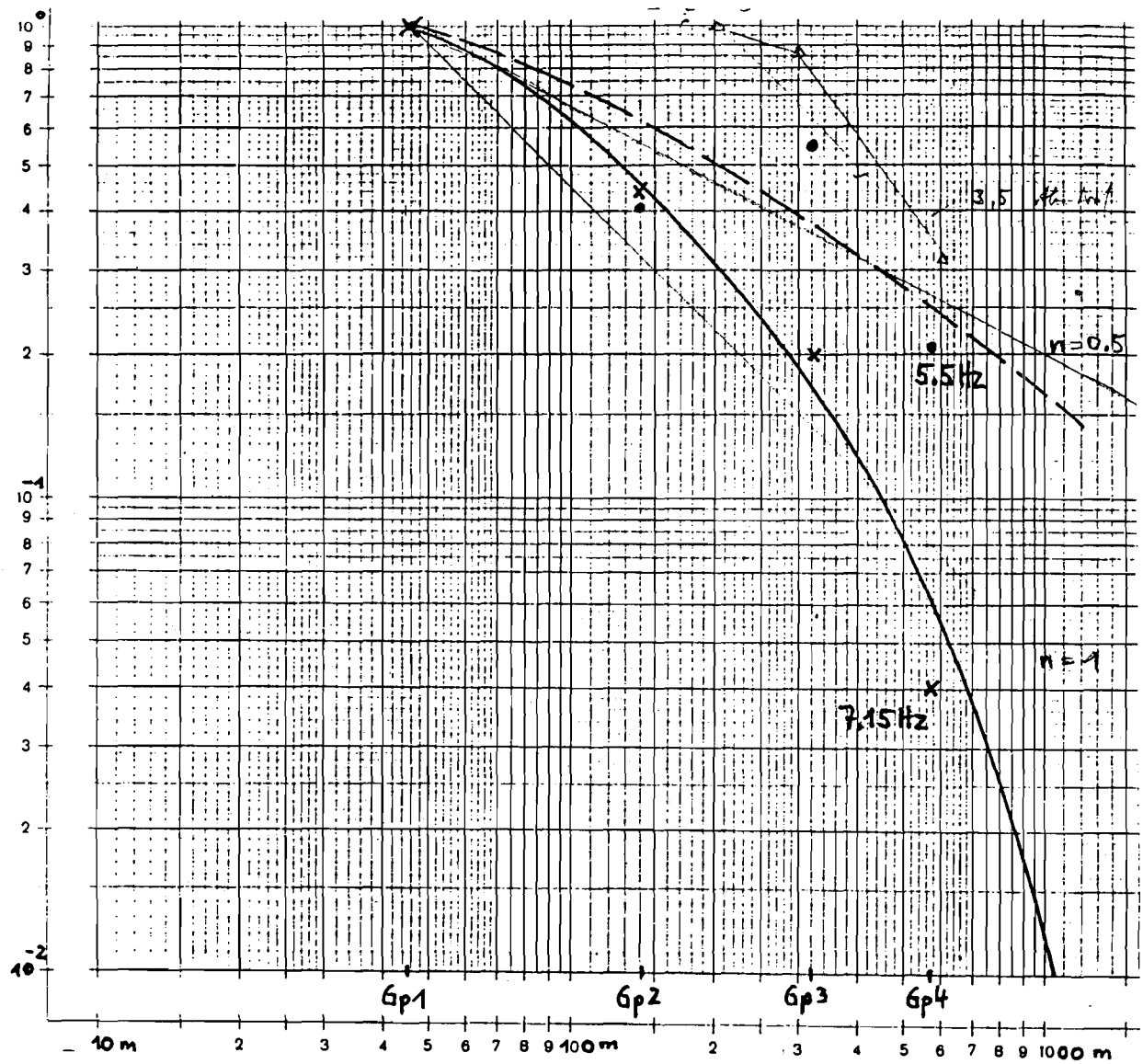
Emission von Kraftwerken a) Nr.1 in 350 m, b) Nr.2 in 700 m LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.3





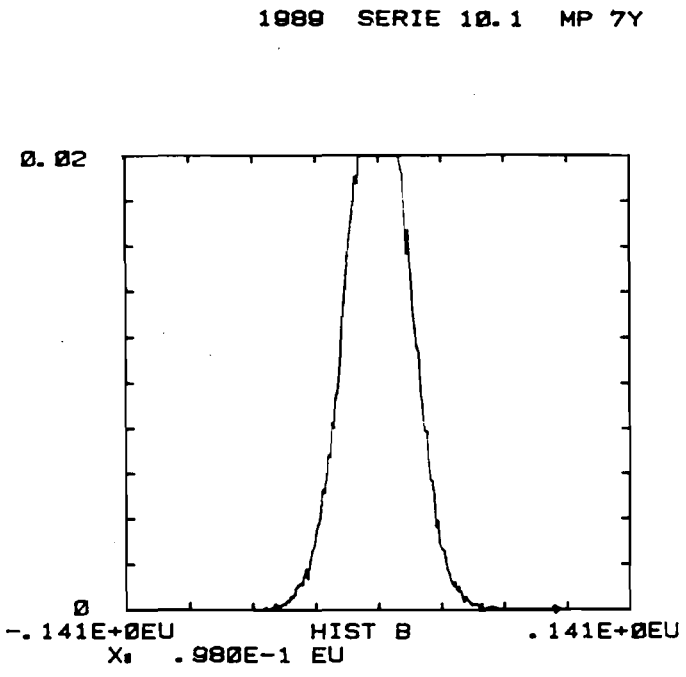
[4-1]

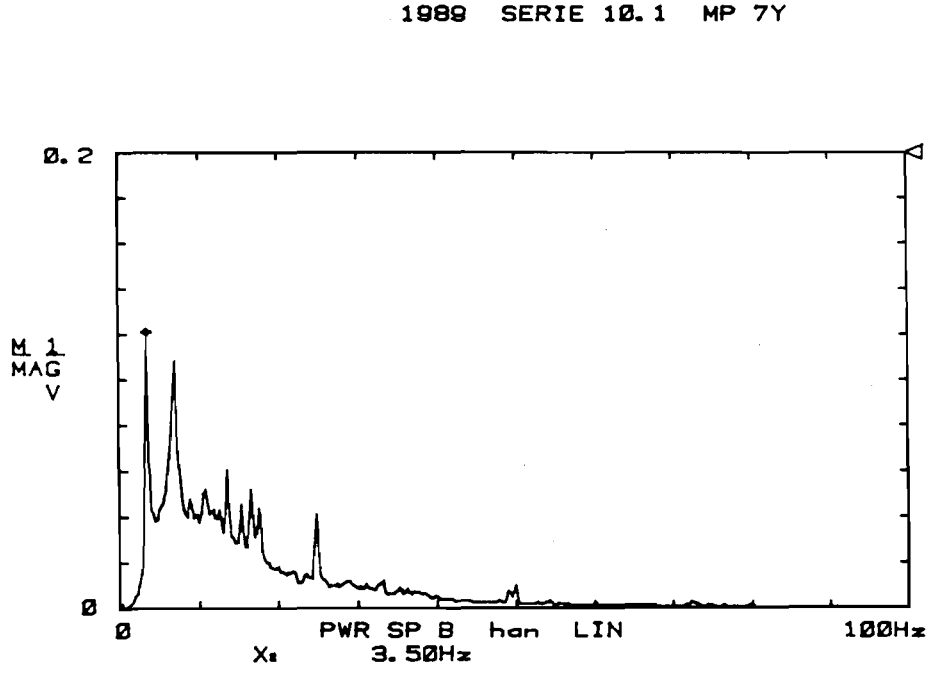
Emission einer petrochemischen Anlage an den Betriebsgrenzen LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.4



[4-1]

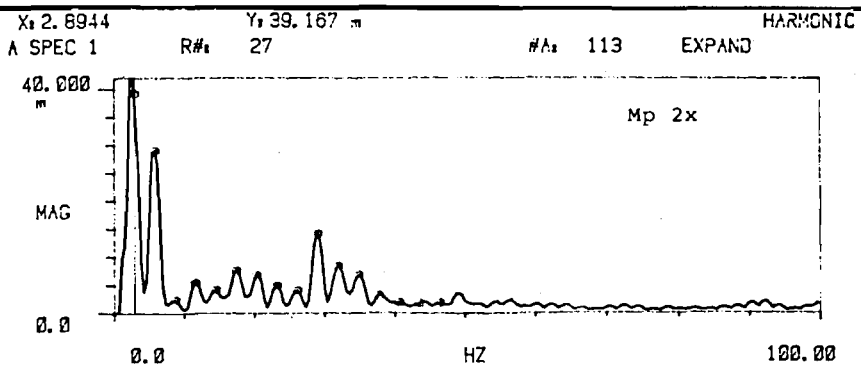
Petrochemische Anlage Amplitudenabnahme einer Kompressorenanlage LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.5

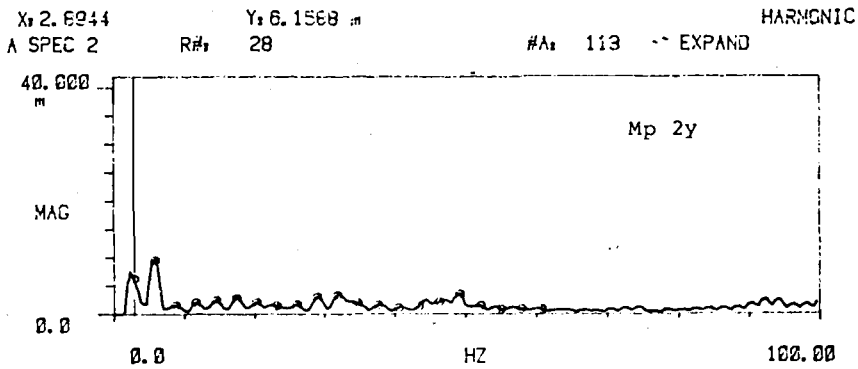


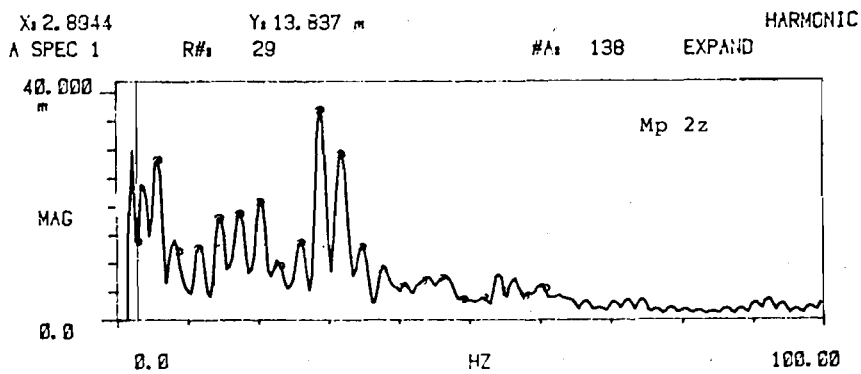


[4-4]

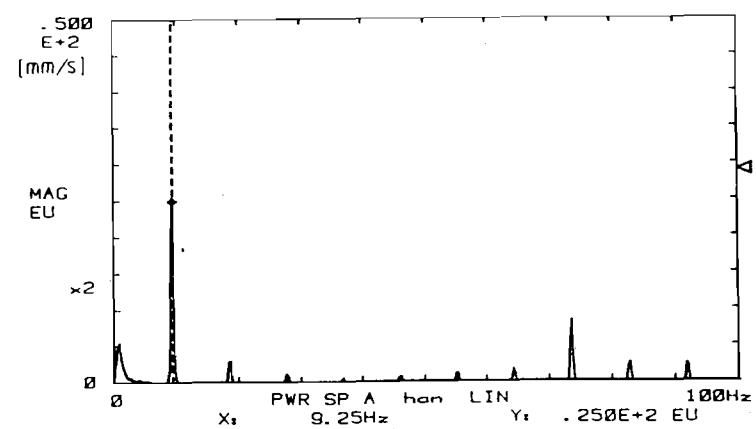
Emission eines Aluminiumwalzwerkes an der Betriebsgrenze LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.6







1989: PRESSE 251.FP 2

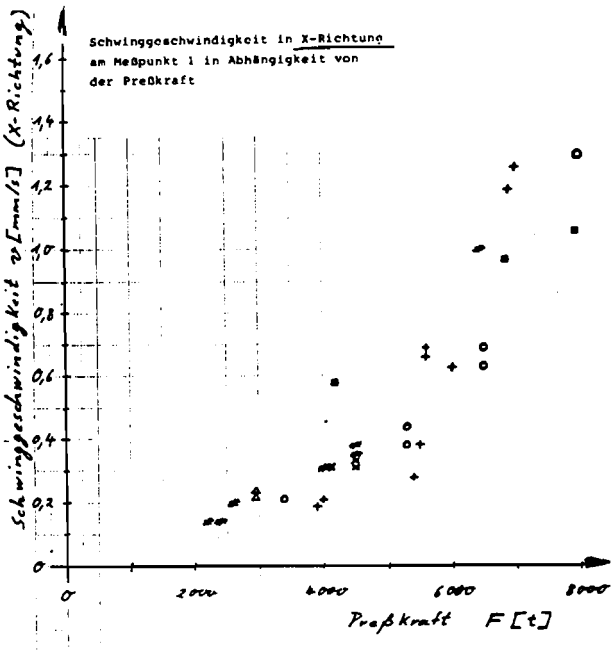


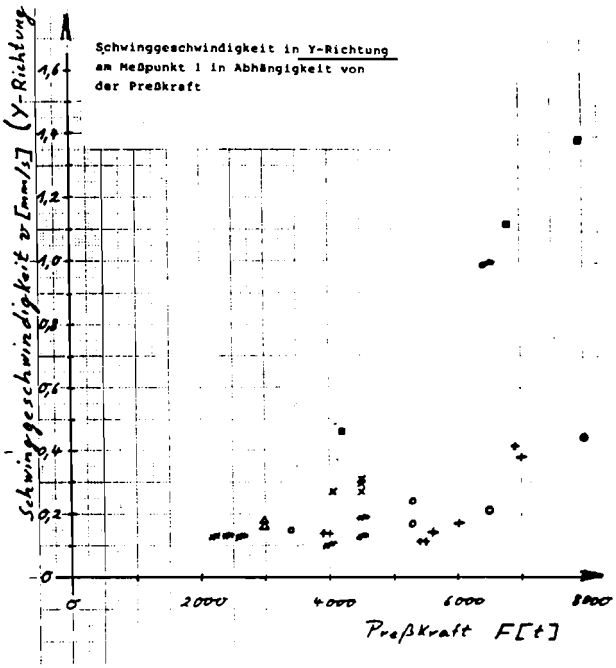
[4-8]

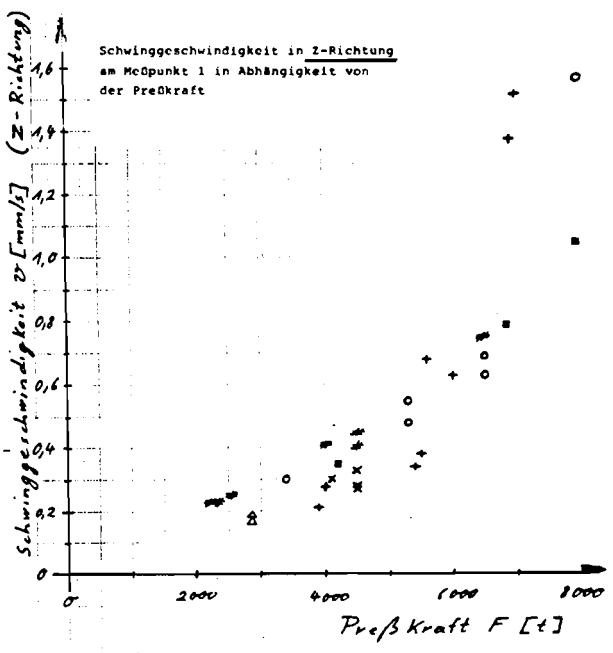
Emission verschiedener Pressen im Nahfeld

Bild 4.7

LIS-Bericht Nr. 107





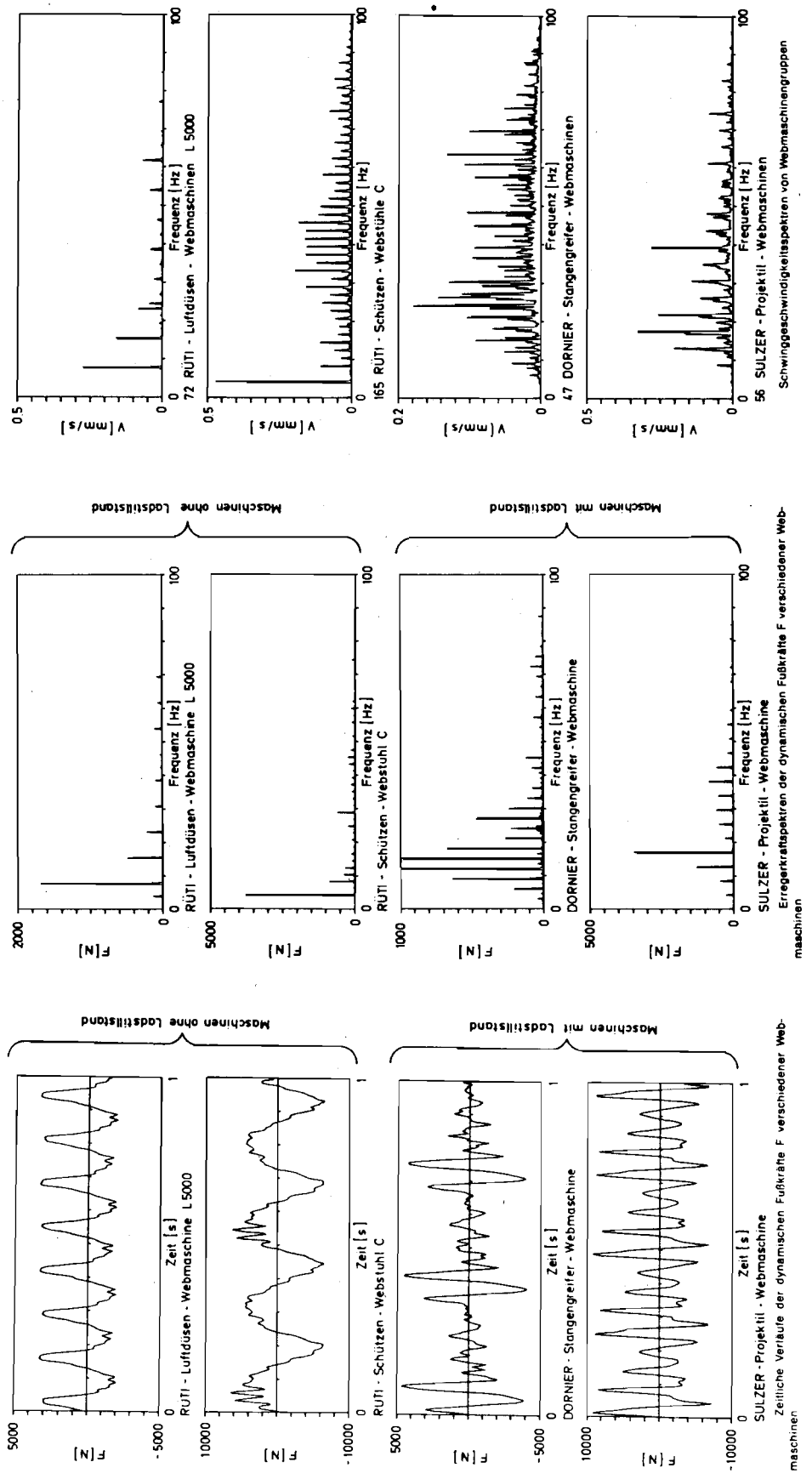


x horizontal quer
y horizontal parallel
z vertikal

\+ 1. Schlag auf Turbinenschaufel
o 2. Schlag auf Turbinenschaufel
× 1. Schlag auf Vorderachsträger
■ 2. Schlag auf Vorderachsträger
△ Schlag auf Rundling
Prellschlag

[→ 57]

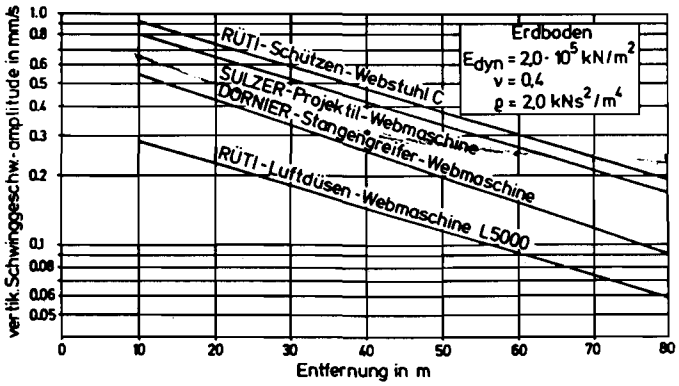
Emission einer großen Spindelpresse als Funktion der Preßkraft LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.7a



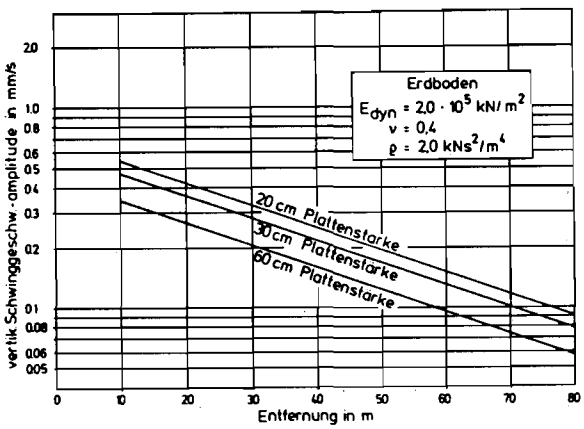
Emission verschiedener Webmaschinen im Nahfeld

Bild 4.8

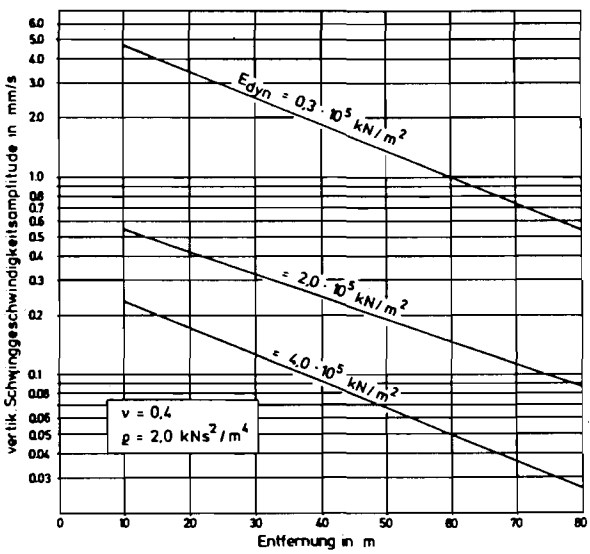
LIS-Bericht Nr. 107



Abnahmekurven der maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeits-amplituden bei unterschiedlichen Maschinenarten



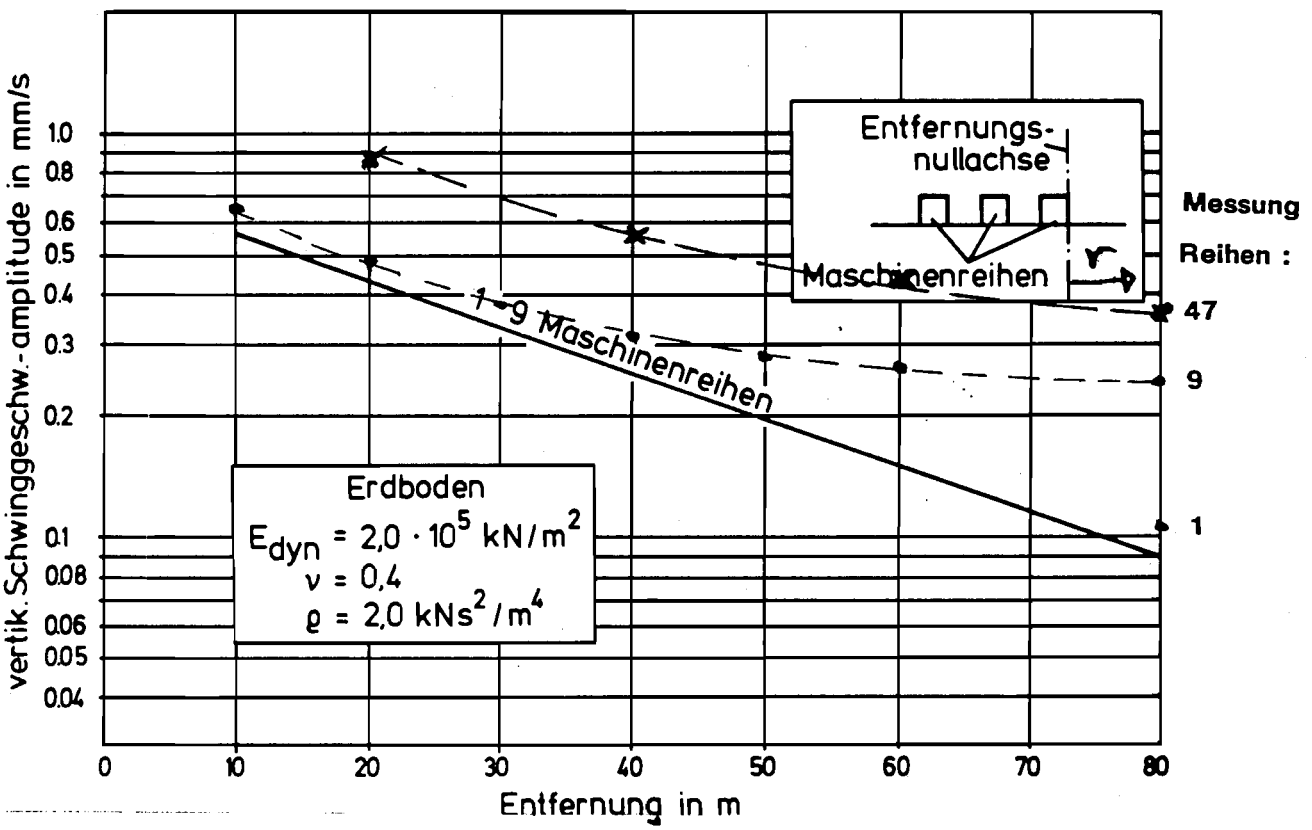
Abnahmekurven der maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeits-amplituden bei unterschiedlichen Hallenbodenplattenstärken.
Erregung: DORNIER-Stangengreifer-Webmaschinen



Abnahmekurven der maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeits-amplituden bei unterschiedlichen Erdbodenarten.
Erregung: 1 Reihe DORNIER-Stangengreifer-Webmaschinen

[4-3]

Amplitudenabnahme von Websaalerschütterungen als Funktion von Hallenbodenstärke und E - Modul des Bodens	Bild 4.9
LIS-Bericht Nr. 107	

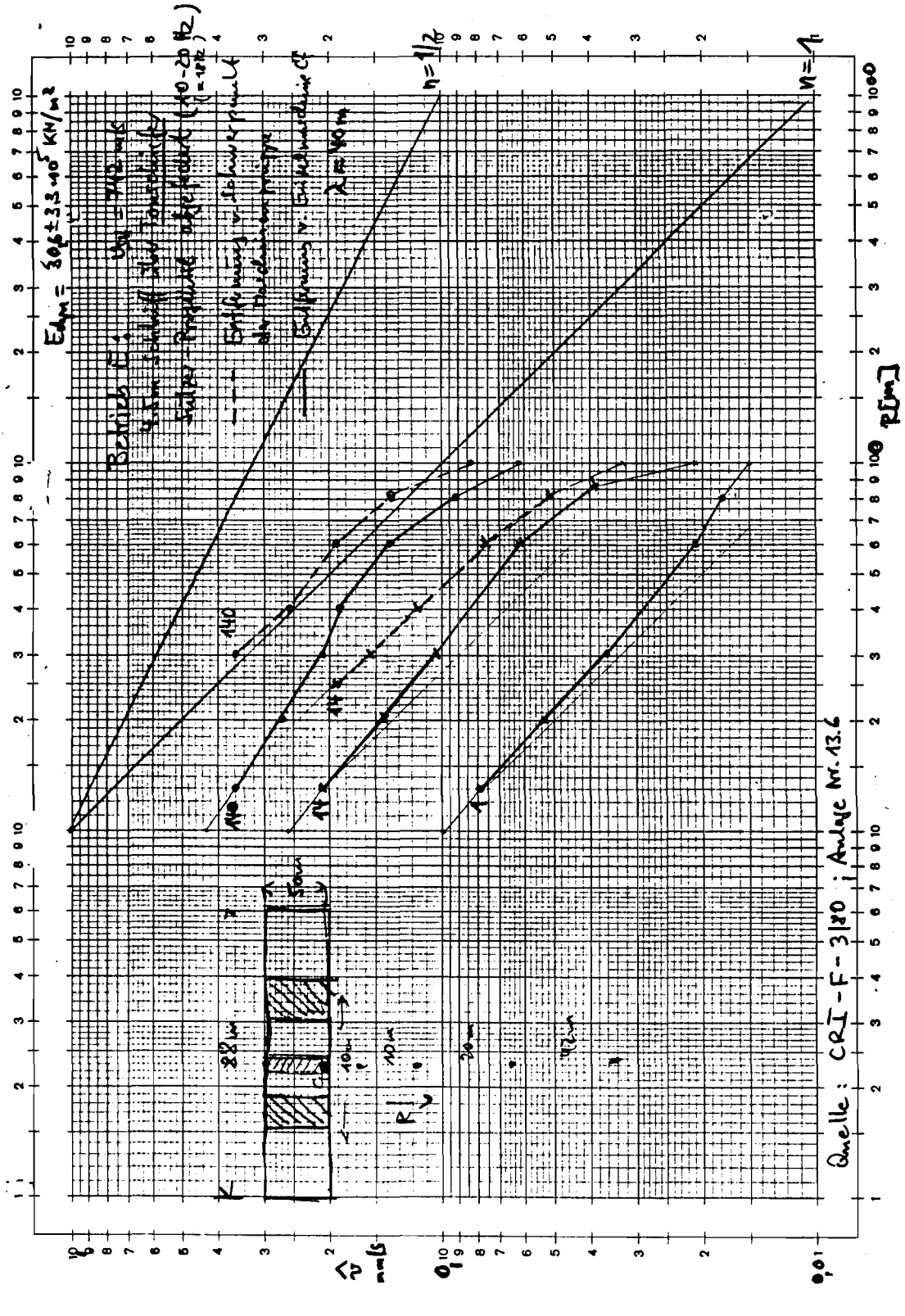


[4-3]

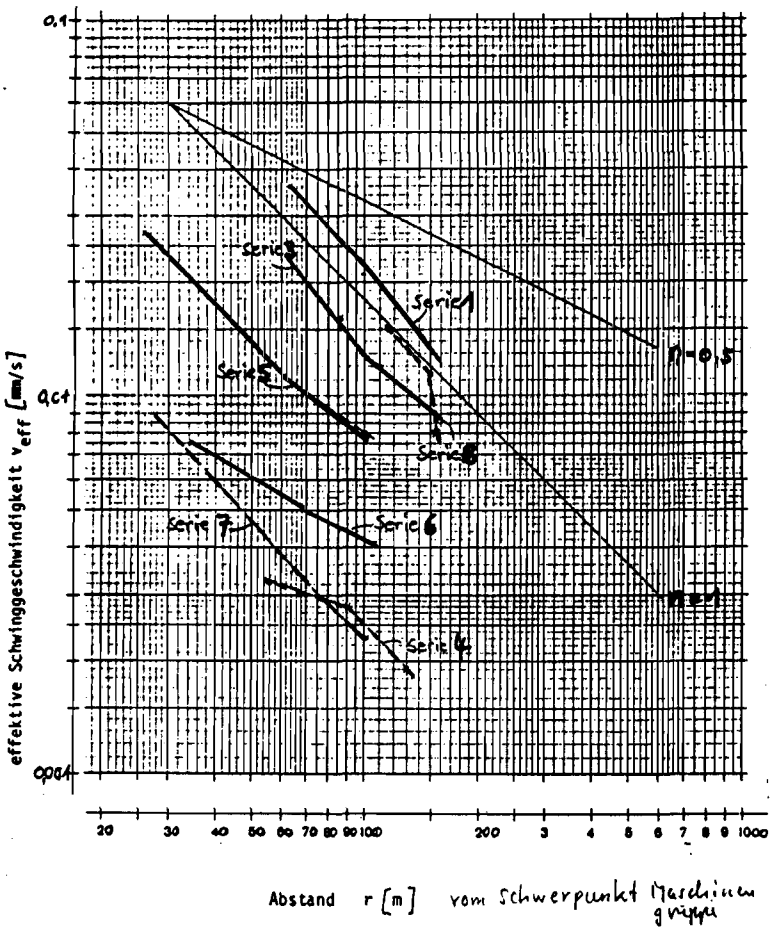
Vergleich gerechneter und gemessener Webmaschinenemissionen

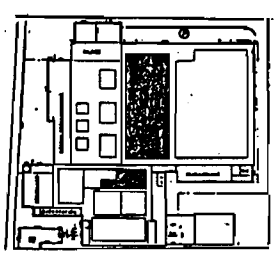
LIS-Bericht Nr. 107

Bild 4.10

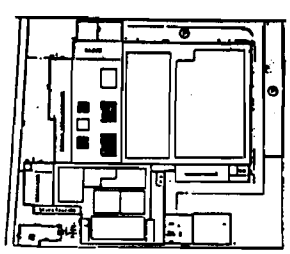


Amplitudenabnahme für Websaal mit abgefederten Projektil - Webmaschinen LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.11

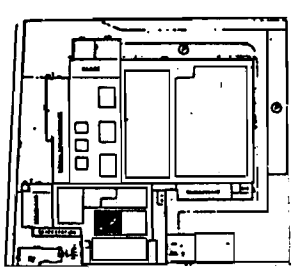




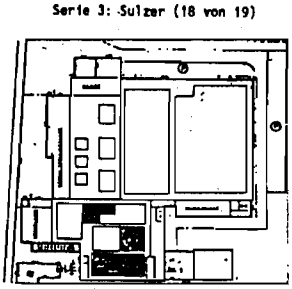
Serie 3: Sulzer (18 von 19)



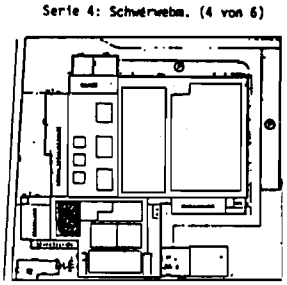
Serie 4: Schweriwebm. (4 von 6)



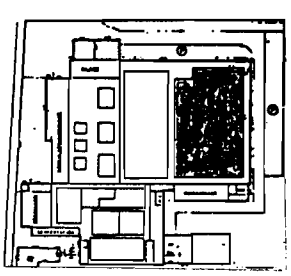
Serie 7: Picanol (4 von 4)



Serie 5: Dornier (11 von 15)



Serie 6: Rüti (6 von 8)



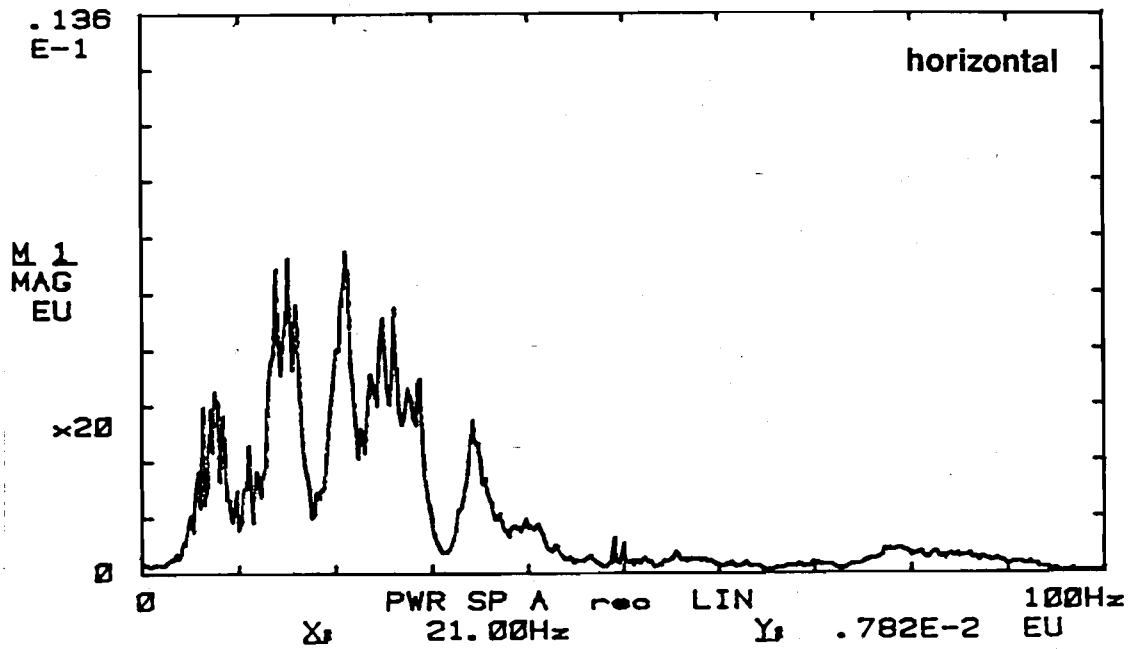
Serie 8: Sulzer (63 von 65)

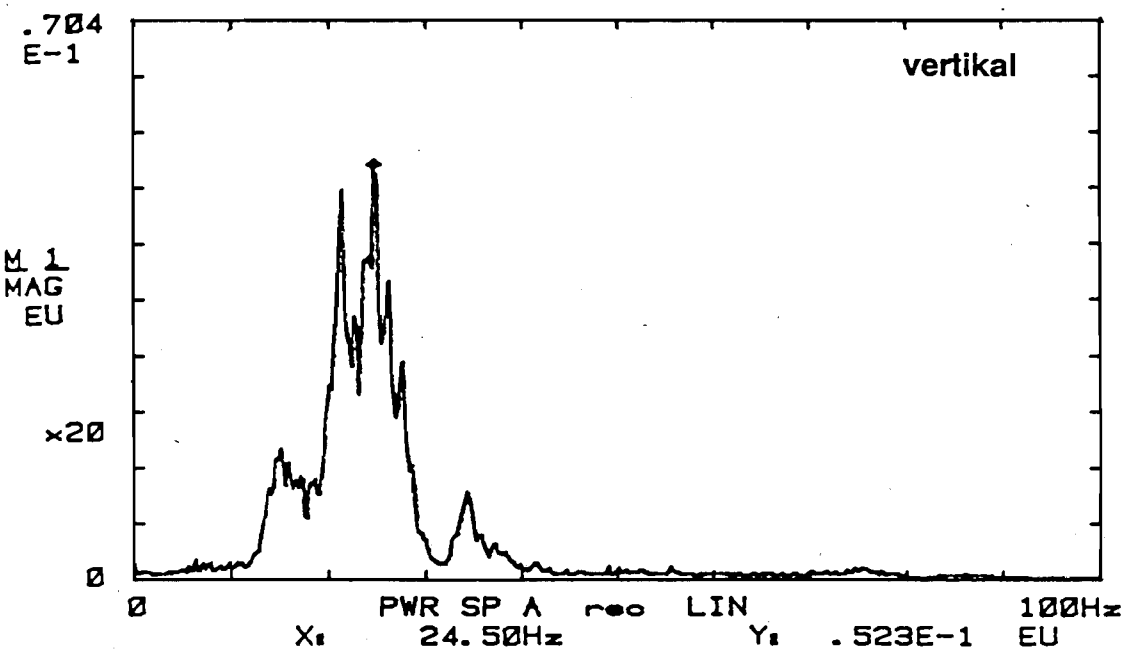
[4-5]

Amplitudenabnahme verschiedener Webmaschinengruppen

Bild 4.12

LIS-Bericht Nr. 107

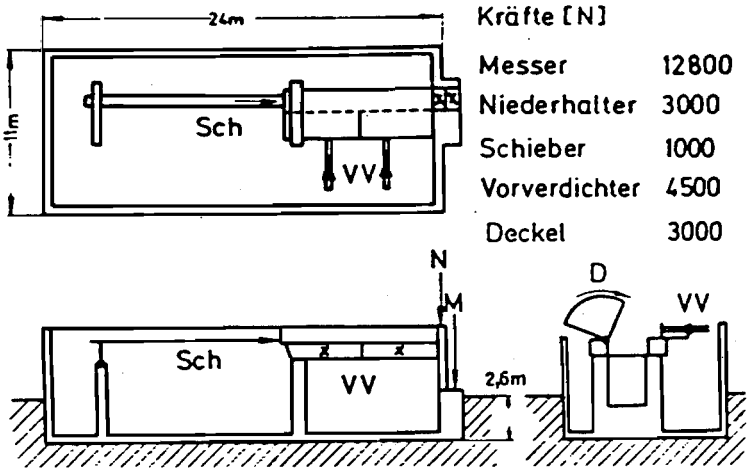




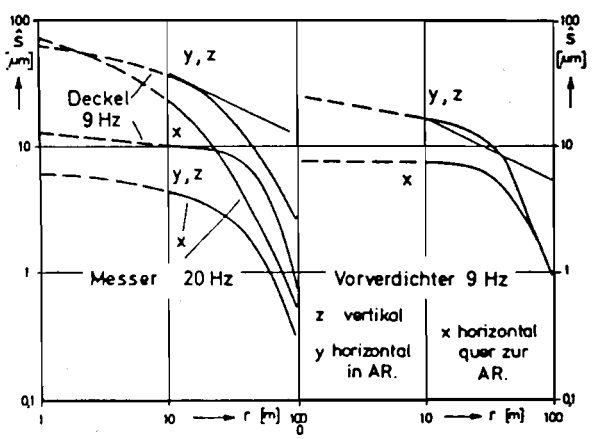
Emission einer Differenzwegpresse im Nahbereich

LIS-Bericht Nr. 107

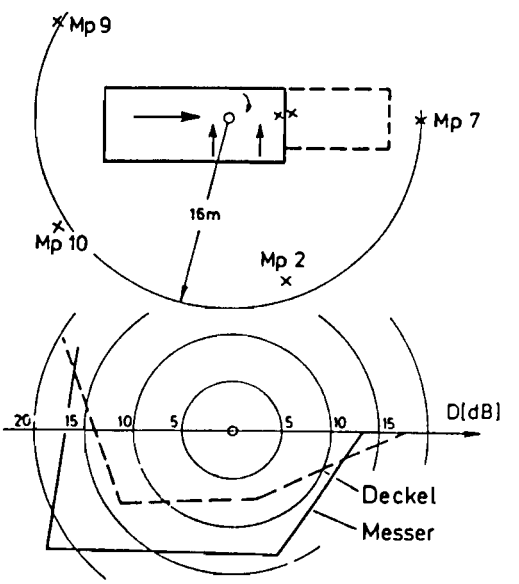
Bild 4.13



Funktionsprinzip und Gründung einer hydraulischen Scherenanlage [16]



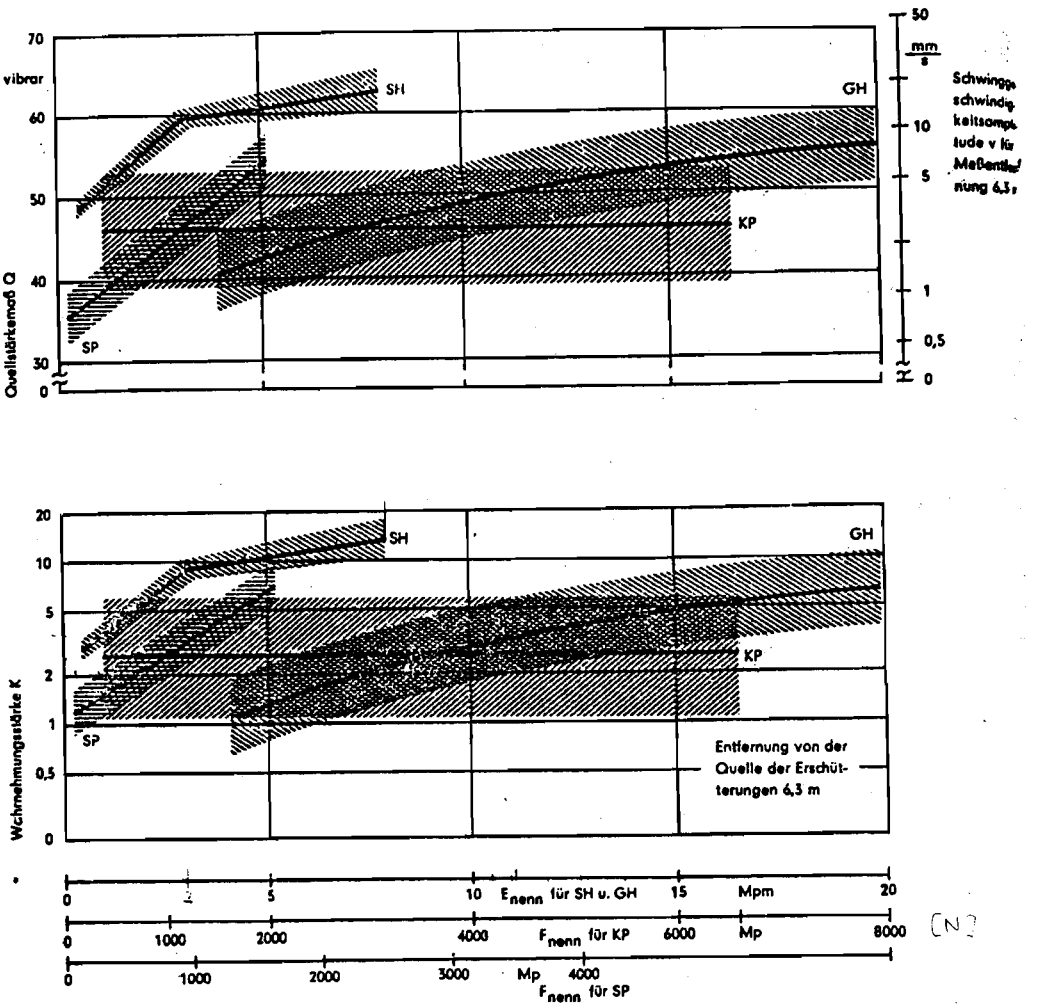
Gesamtdämpfung für unterschiedliche Anregungsarten einer hydraulischen Scherenanlage [16]



Richtcharakteristik der Emission einer hydraulischen Scherenanlage (Gesamtdämpfung der Vertikalkomponente bis zum Bezugsradius r_o = 16 m)

[6-3]

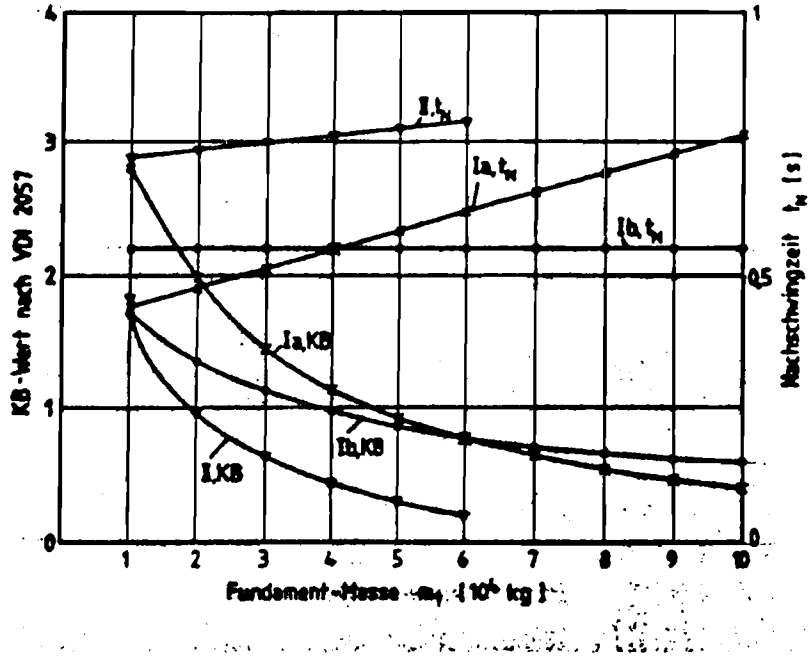
Beispiel einer zusammengesetzten und richtungsabhängigen Emission (Schrottschere) LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.14



[4-7]

Quellstärkemaß Q und Wahrnehmungsstärke K von Gesenkschmiede-Maschinen. (lineare Abhängigkeit von der Maschinengröße) Streubereich schraffiert gezeichnet. SH = Schabottehämmer, GH = Gegenschlaghämmer, SP = Spindelpresse, KP = Kurbelpresse

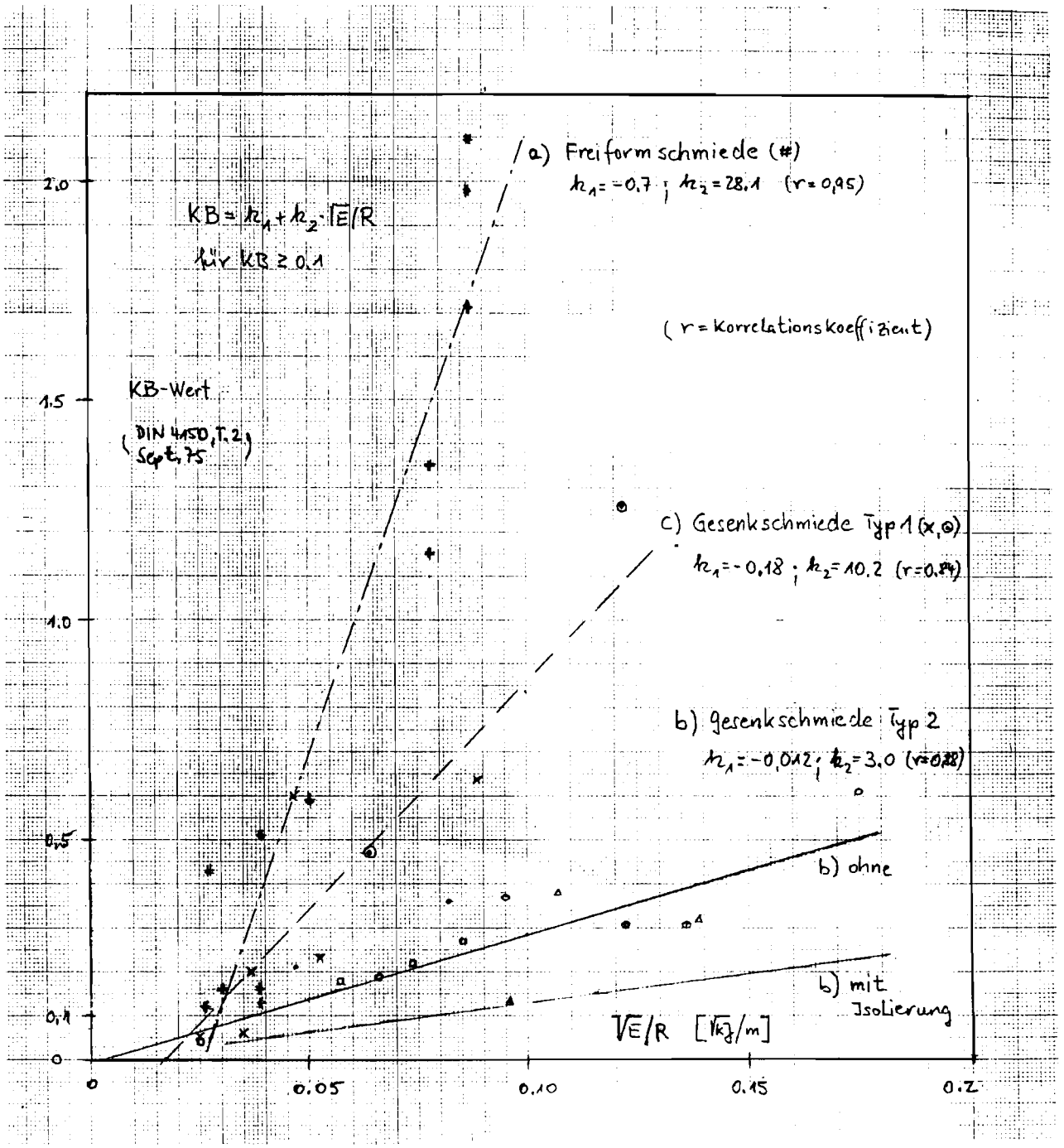
Emission von Hammeranlagen als Funktion der Schlagenergie LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.15



Berechnungsergebnisse für den Hammer auf Schwingfundament – mit elastischer Dämmschicht (Kurve Ia, Ib), mit Feder- und Dämpferelementen (Kurve II)

[4-6]

Berechnete Emission für Hämmer auf Schwingfundamenten LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.16



BAUGRUND:

a) Sand / Kies [4 - 13, 14, 15, 16, 17, 18]

c) Ton / Lehm

b) Raum Solingen

Emission von Schmieden als Funktion des Gesamtarbeitsvermögens und des Abstandes LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.17

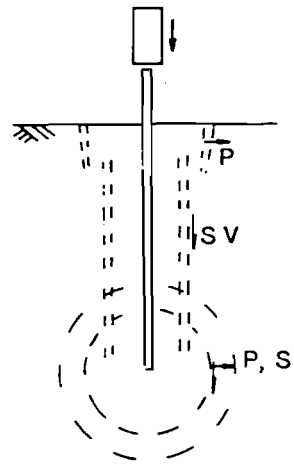


Figure Possible wave types.

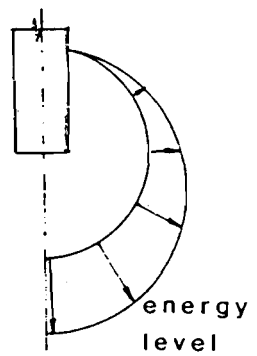
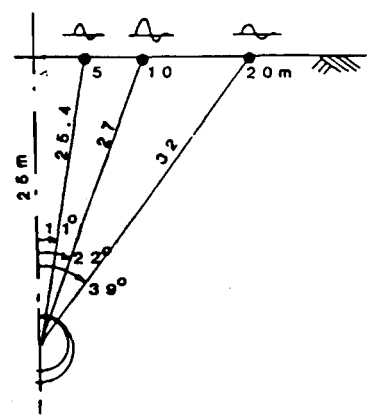


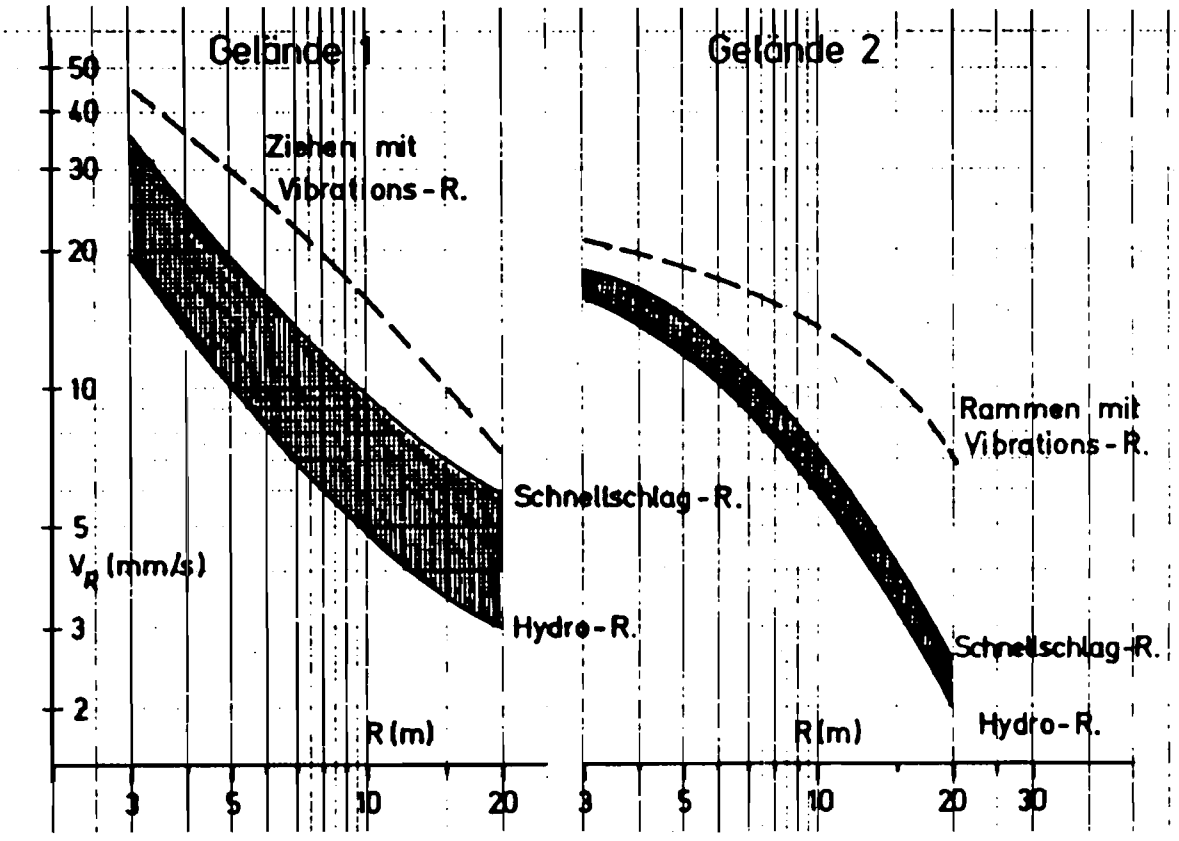
Figure Possible toe energy transfer.



[4-36]

Figure Possible propagation of toe waves.

Energieabstrahlung beim schlagenden Rammen LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.18

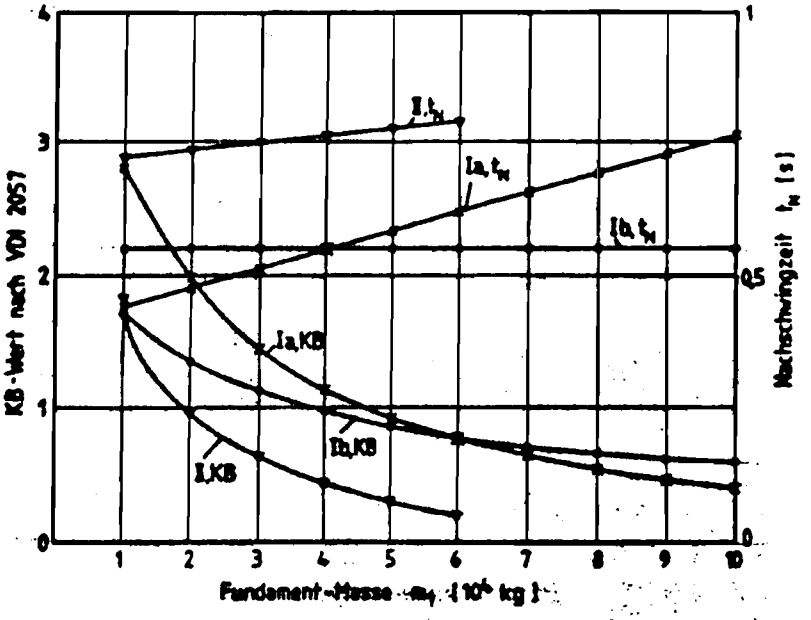


[4-34]

Amplitudenabnahme für verschiedene Ramm - und Rüttelvorgänge

LIS-Bericht Nr. 107

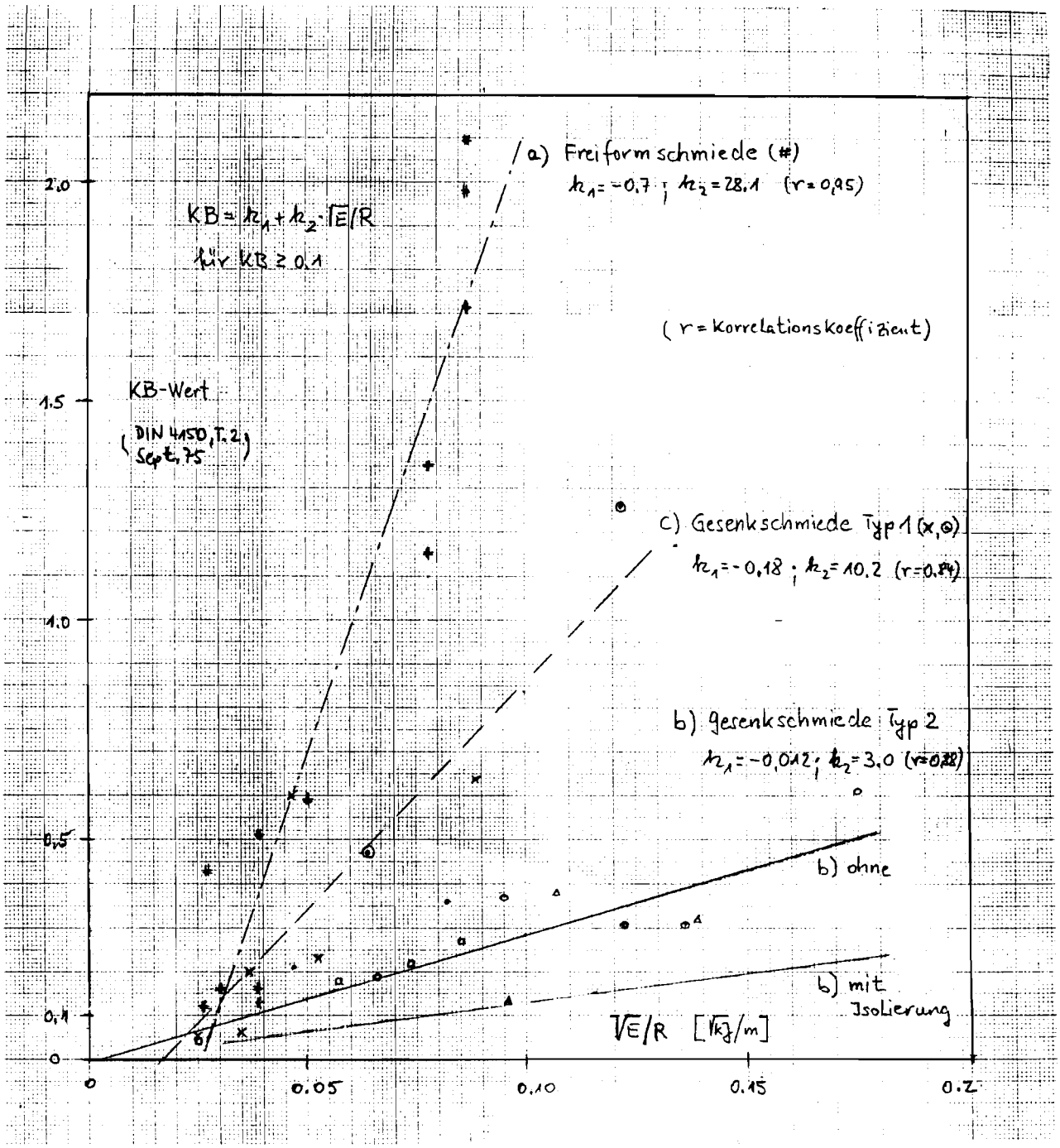
Bild 4.19



Berechnungsergebnisse für den Hammer auf Schwingfundament – mit elastischer Dämmschicht (Kurve Ia, Ib), mit Feder- und Dämpferelementen (Kurve II)

[4-6]

Berechnete Emission für Hämmer auf Schwingfundamenten LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.16



BAUGRUND:

a) Sand / Kies

c) Ton / Lehm

b) Raum Solingen

[4 - 13, 14, 15, 16, 17, 18]

Emission von Schmieden als Funktion des Gesamtarbeitsvermögens und des Abstandes LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.17

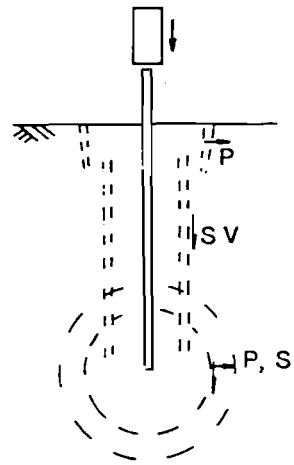


Figure Possible wave types.

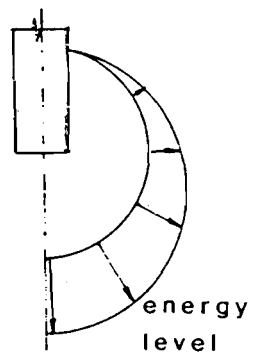
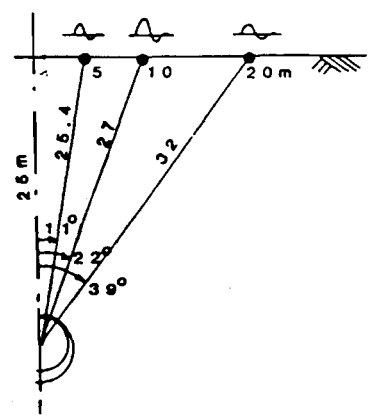


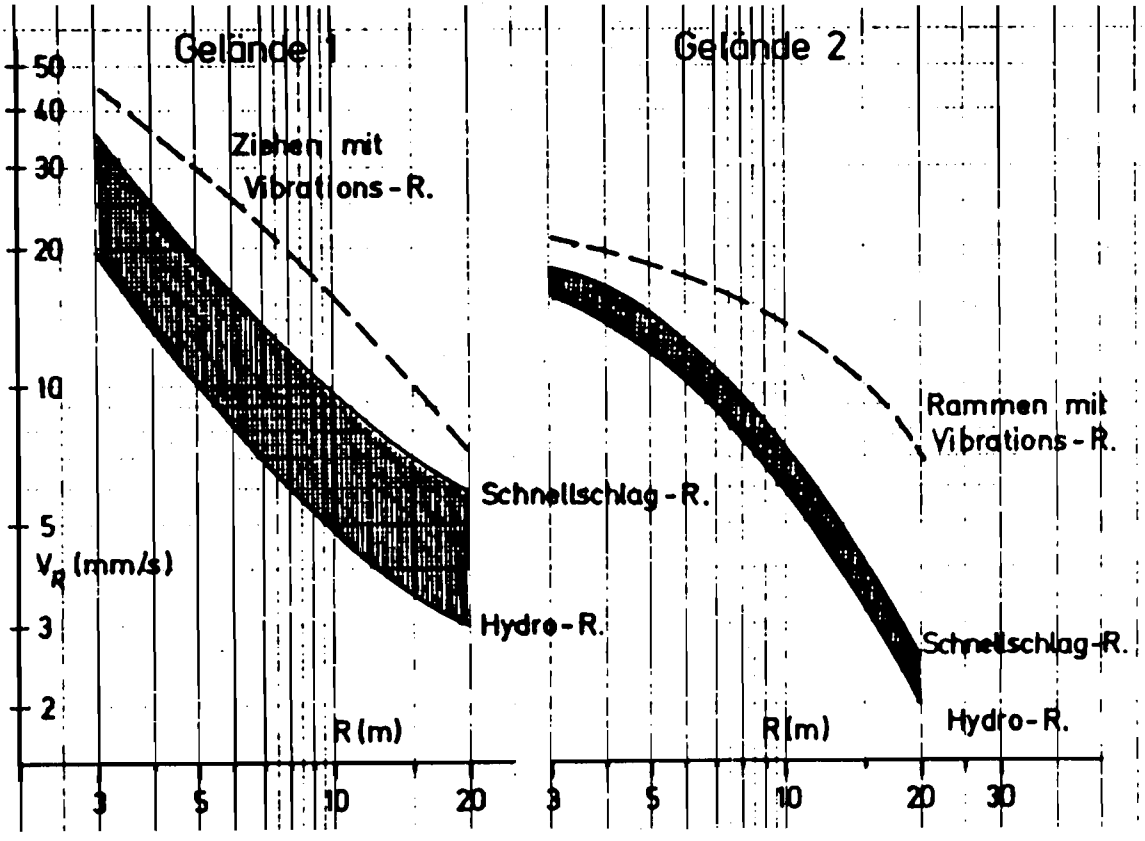
Figure Possible toe energy transfer.



[4-36]

Figure Possible propagation of toe waves.

Energieabstrahlung beim schlagenden Rammen LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.18



[4-34]

Amplitudenabnahme für verschiedene Ramm - und Rüttelvorgänge

LIS-Bericht Nr. 107

Bild 4.19

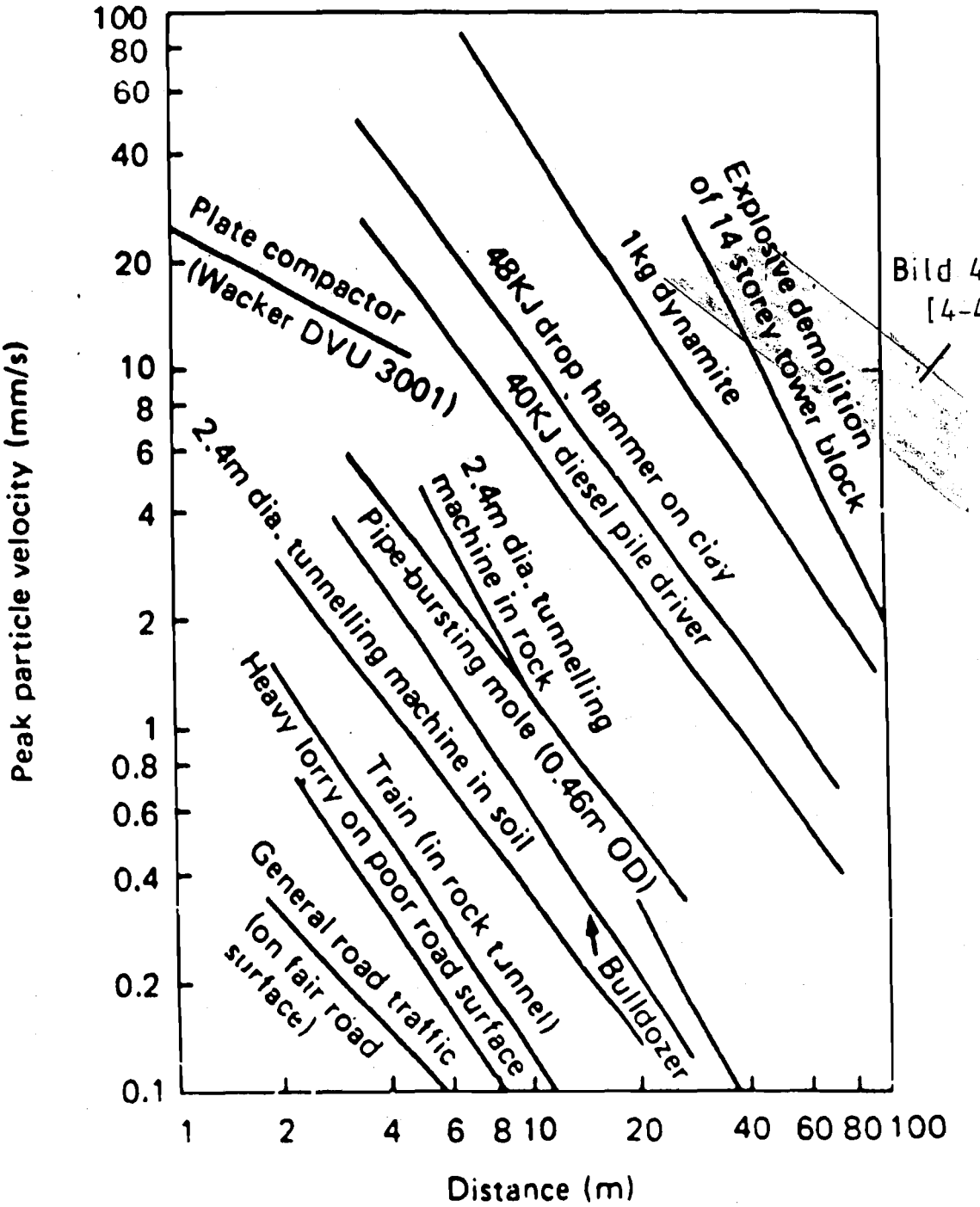


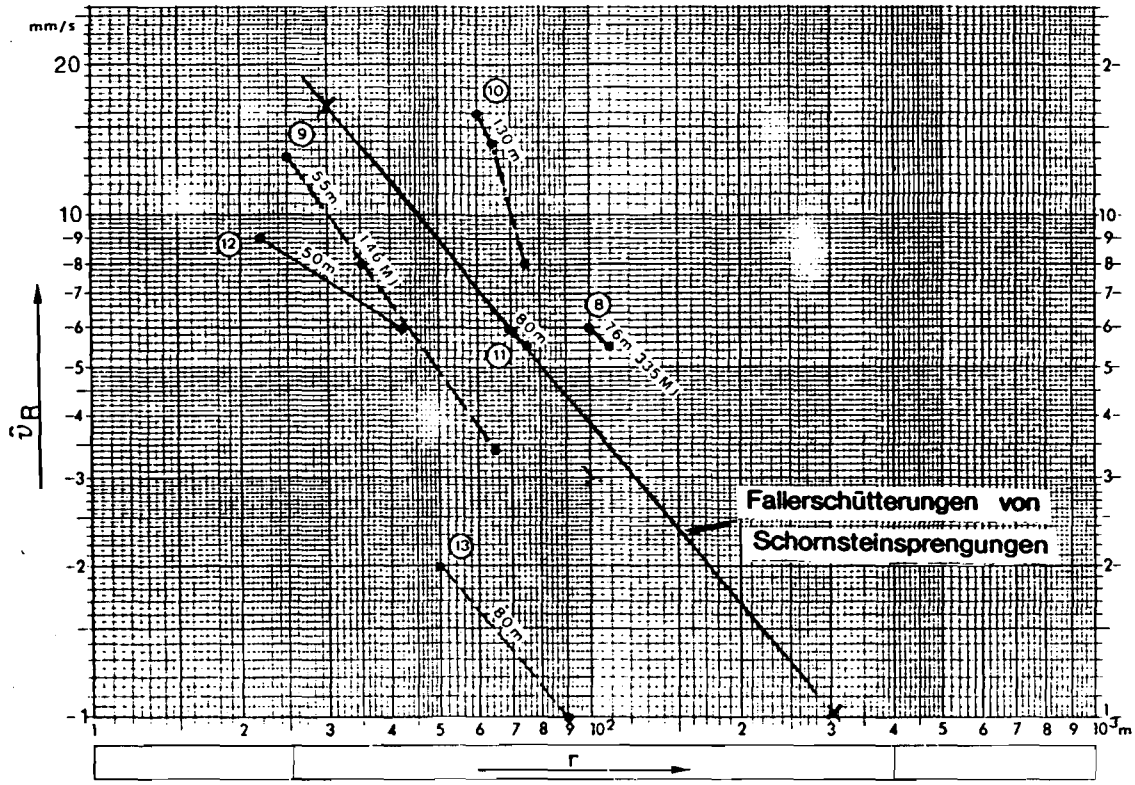
Bild 4.21 [4-45]

Relative PPV from various sources

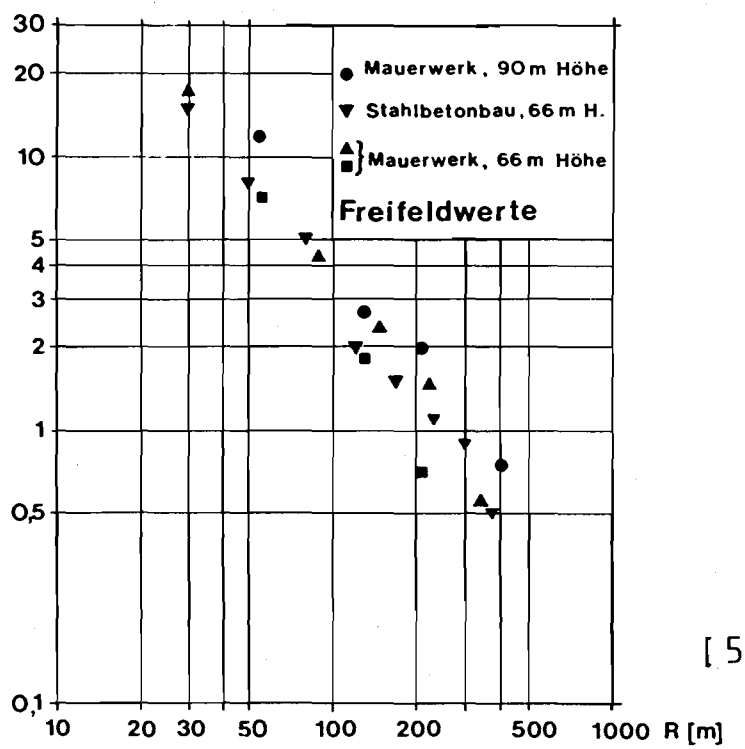
[4-40]

Emission nicht-explosiver Baustellenerschütterungen	Bild 4.20
LIS-Bericht Nr. 107	

Scheitelwerte der resultierenden Schwinggeschwindigkeiten $\hat{v}_R$ in Abhängigkeit von der Entfernung r für die Objekte 8 bis 13 der Zahlentafel.

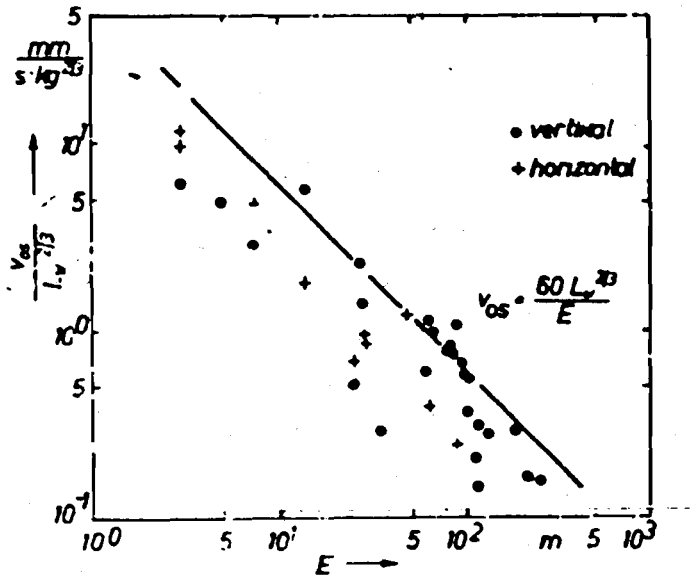


V_R [mm/s] [4-45]

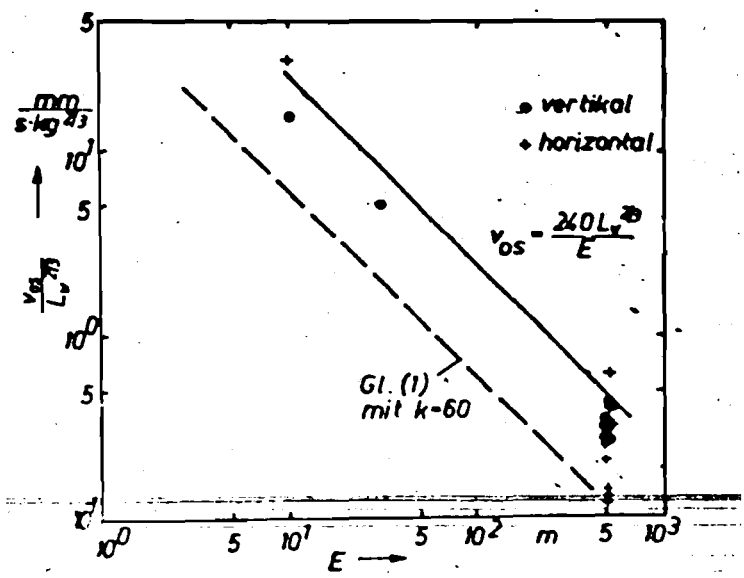


[5-11]

Emission und Amplitudenabnahme bei Abbruchsprengungen	Bild 4.21
LIS-Bericht Nr. 107	



Abhängigkeit zwischen Schwinggeschwindigkeit v_{os}, wirksamer Ladernenge L_w und Entfernung E von der Sprengstelle für massive Bauwerke bei Pfeilerabbruchsprengungen im Wasser

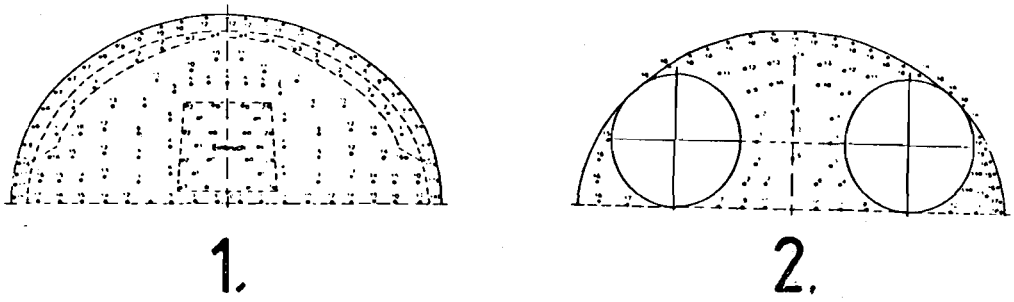


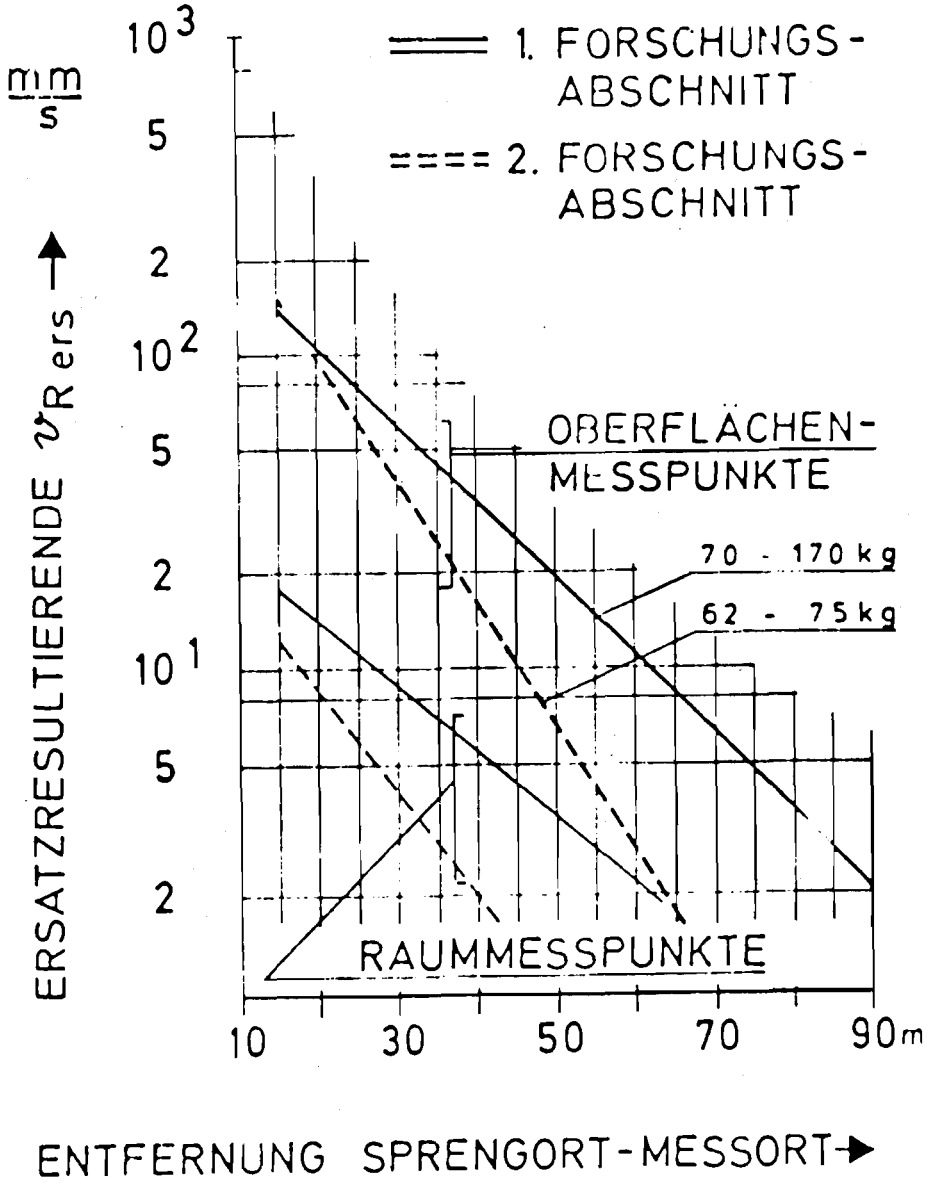
Abhängigkeit zwischen Schwinggeschwindigkeit v_{os}, wirksamer Ladernenge L_w und Entfernung E von der Sprengstelle für massive Bauwerke bei Unterwassersprengungen

[4-30]

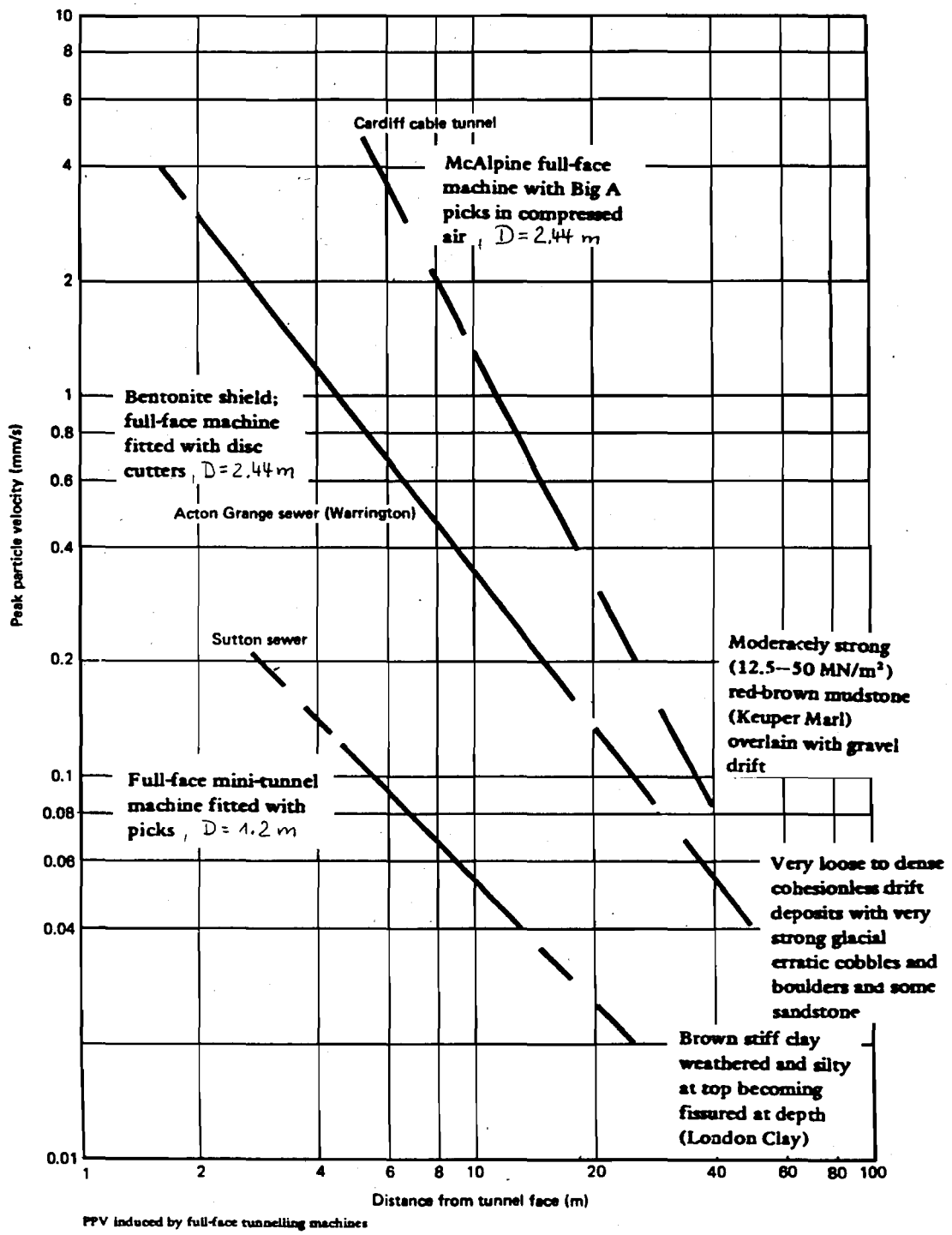
Emission und Amplitudenabnahme bei Unterwassersprengungen

Bild 4.22





Emission und Amplitudenabnahme bei sprengtechnischem Stollenvortrieb [4-22] LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.23



PPV induced by full-face tunnelling machines

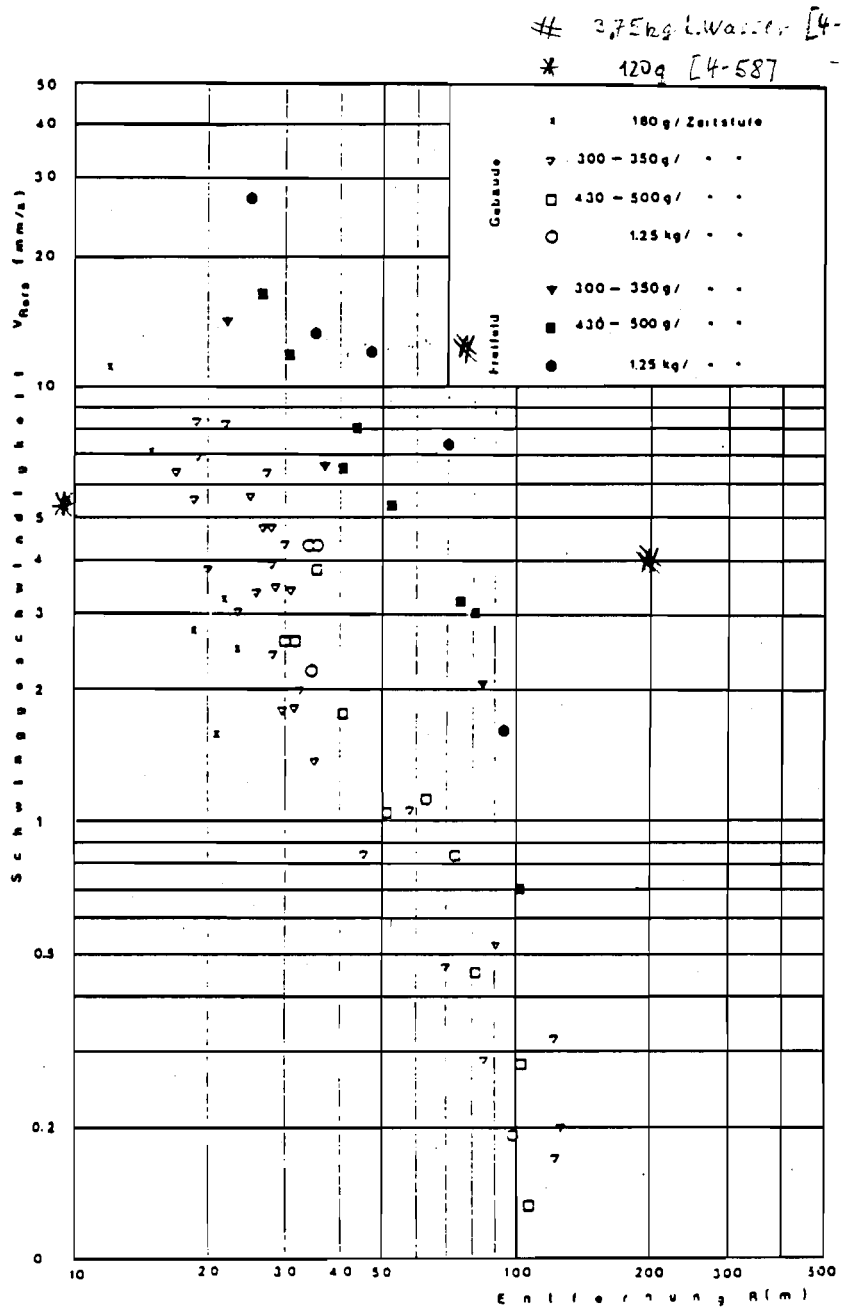
D=Tunneldurchmesser

[4-28]

Emission und Amplitudenabnahme für Tunnelfräsmaschinen

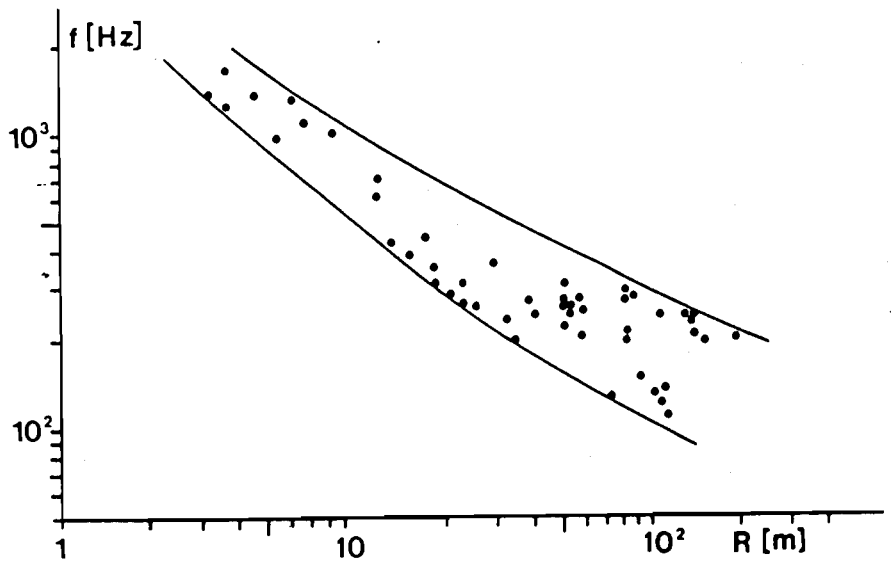
Bild 4.24

LIS-Bericht Nr. 107



[5-4] Ergebnisse von Erschütterungsmessungen bei Baugrubensprengungen

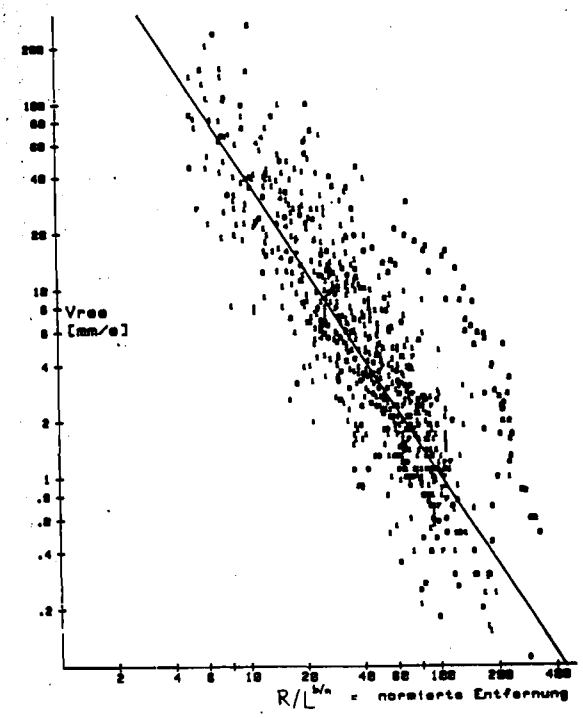
Emission und Amplitudenabnahme für Baugrubensprengungen LIS-Bericht Nr. 107	Bild 4.25



Frequenzabnahme im Nahbereich von Sprengungen
(Dolomit)

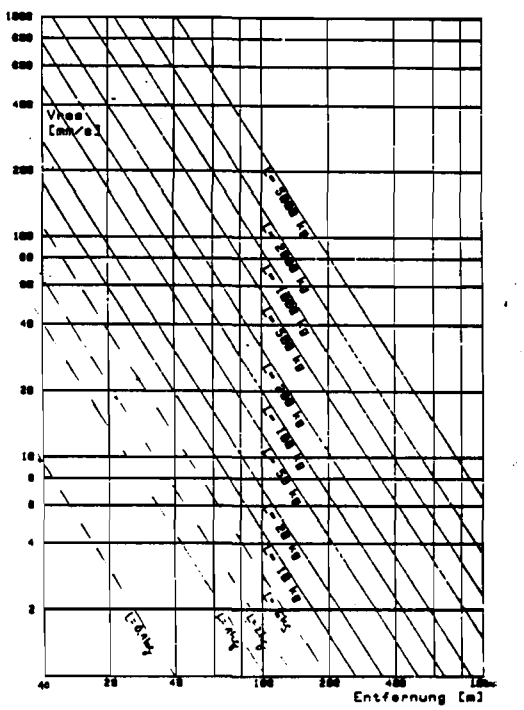
[5 - 11]

Frequenzabnahme im Nahbereich von Sprengungen LIS-Bericht Nr. 107	Bild 5.1

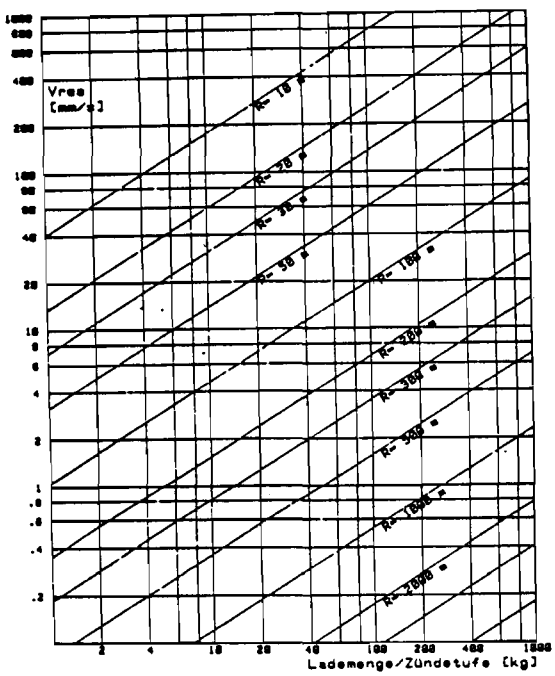


NORMIERTES ENTFERNUNGS-SCHWINGGESCHWINDIGKEITS
DIAGRAMM ALLE FREIFELDWERTE

[5-12]

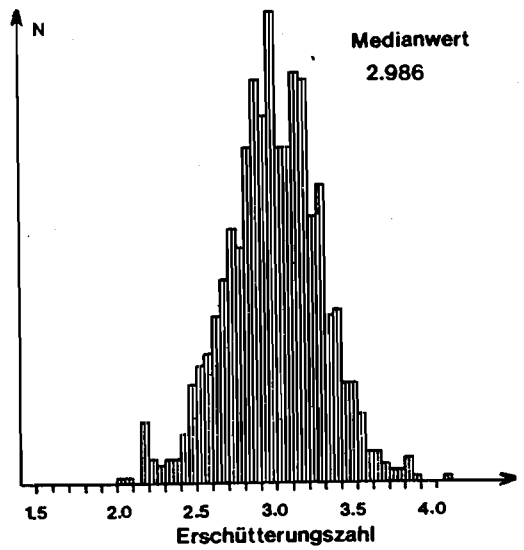


SCHWINGGESCHWINDIGKEITS-ENTFERNUNGS-DIAGRAMM
WAHRSCHEINLICHKEIT: 50%
k: 1529 b: .64 n: -1.58

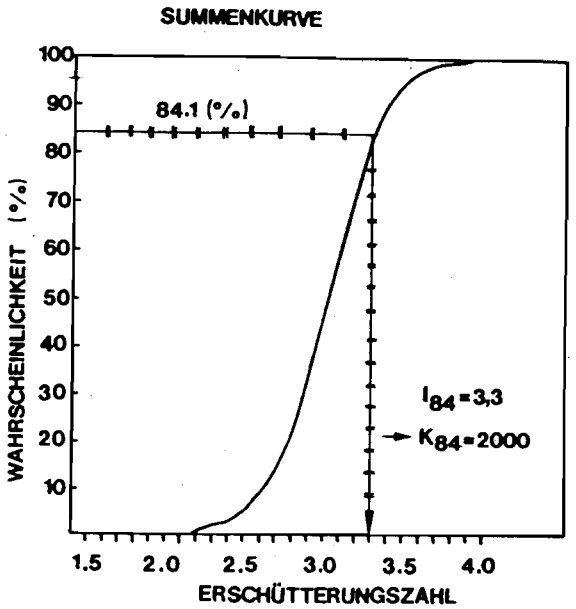


SCHWINGGESCHWINDIGKEITS-LADEMENGEN-DIAGRAMM
WAHRSCHEINLICHKEIT: 50%
k: 1529 b: .64 n: -1.58

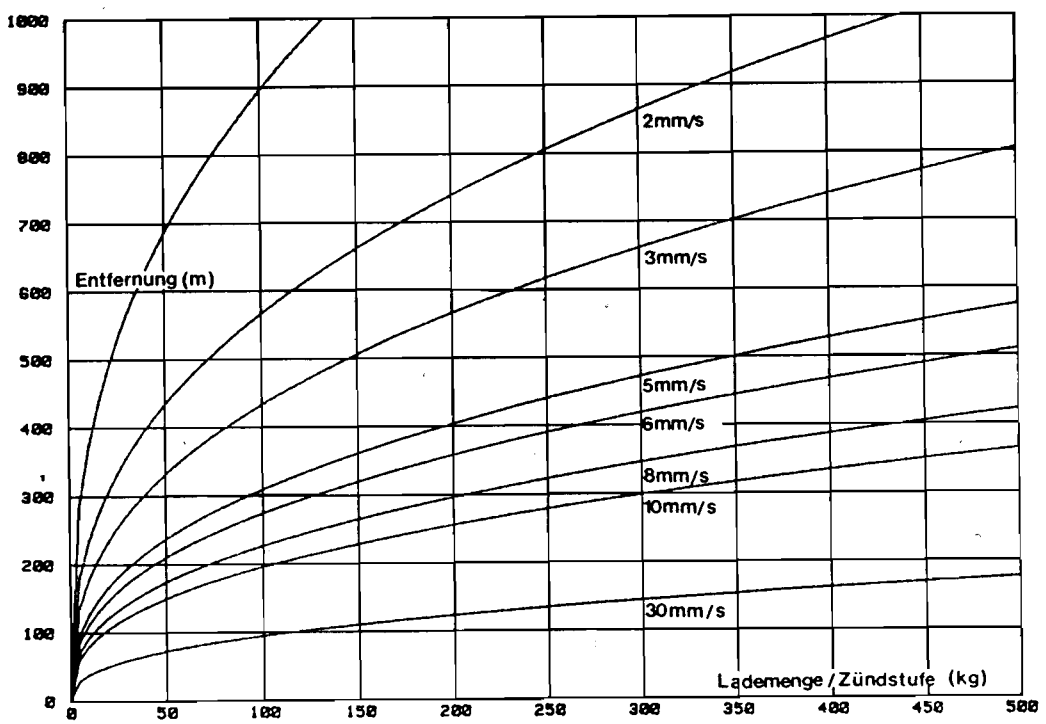
Abstands - Lademengen - Beziehungen für Sprengerschütterungen des Katasters Norddeutschland LIS-Bericht Nr. 107	Bild 5.2



Häufigkeitsverteilung der Erschütterungszahlen für Kalksteingewinnungsbetriebe



Summenkurve der Erschütterungszahlen für Kalksteingewinnungsbetriebe in Bayern sen. Für die »Unterschreitenswahrscheinlichkeit« von 84,1 % ergibt sich die Erschütte

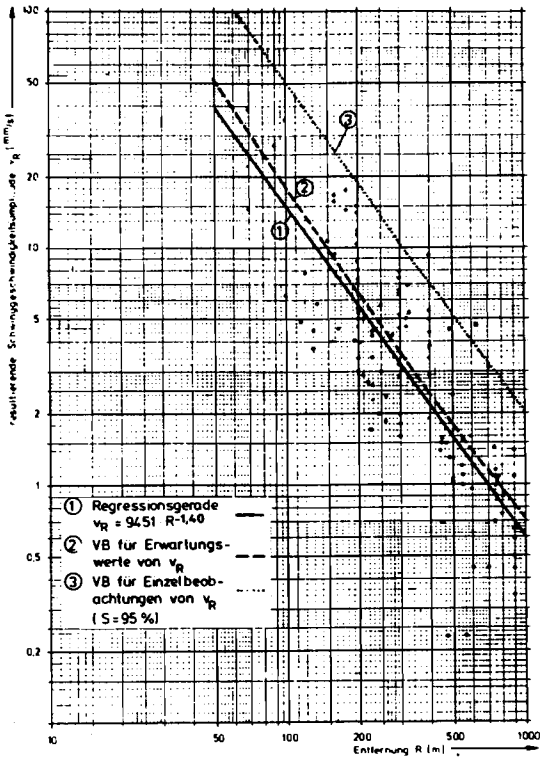


Entfernungs-Lademengen-Diagramm
k: 2000 b: .59 n: -1.52

Entfernungs-Lademengen-Diagramm für Kalksteingewinnungsbetriebe in Bayern und Niedersachsen für die »Unterschreitenswahrscheinlichkeit« von 84,1 %

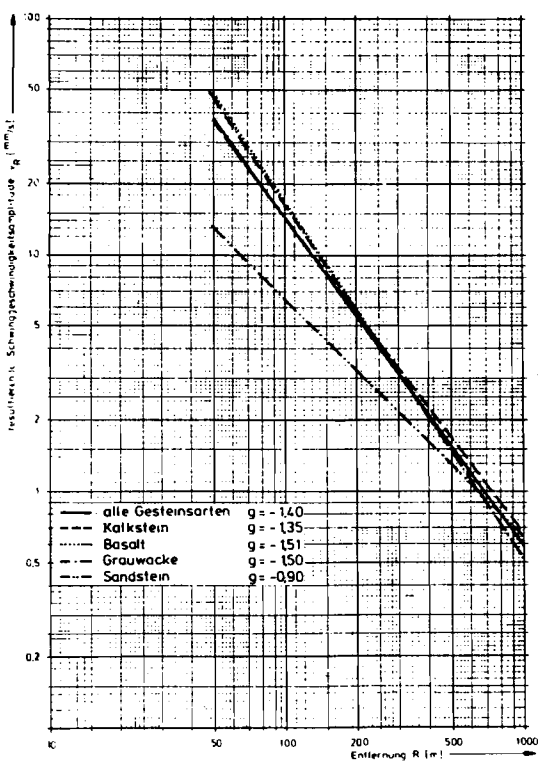
[5-13]

Häufigkeitsverteilung der Erschütterungszahl und Abstands - Lademengen - Diagramm einer bestimmten Unterschreitenswahrscheinlichkeit	Bild 5.3



(a)

Gebirgsart: Kalkstein-Basalt-Grauwacke-Sandstein
(v_R-Werte rechnerisch korrigiert; Ladungsexponent: 0,7)



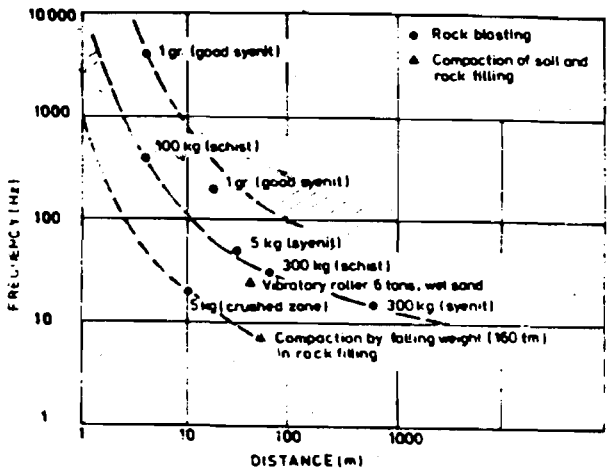
(b)

[5-10]

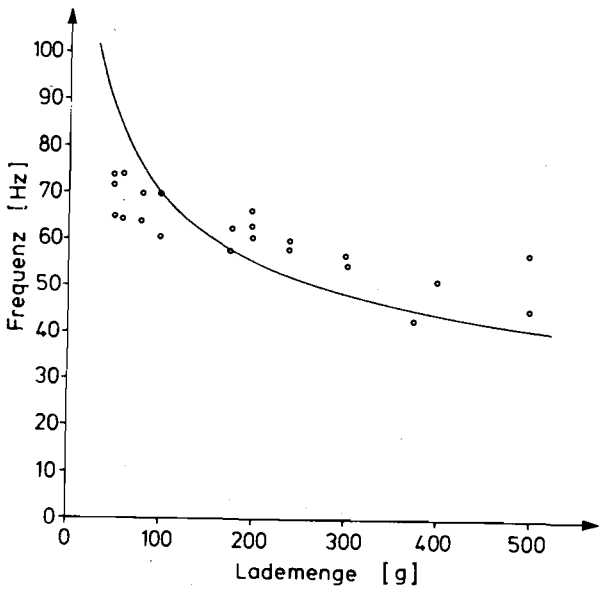
Vergleich der Regressionsgeraden mit dem im Steinbruch anstehenden Gebirge als Parameter
(v_R-Werte rechnerisch korrigiert;
Ladungsexponent f = 0,7)

Regressionsgerade und Vertrauensbereiche für Gebirge in NRW (a) und Einfluß der Gebirgsart(b)	Bild 5.4
LIS-Bericht Nr. 107	

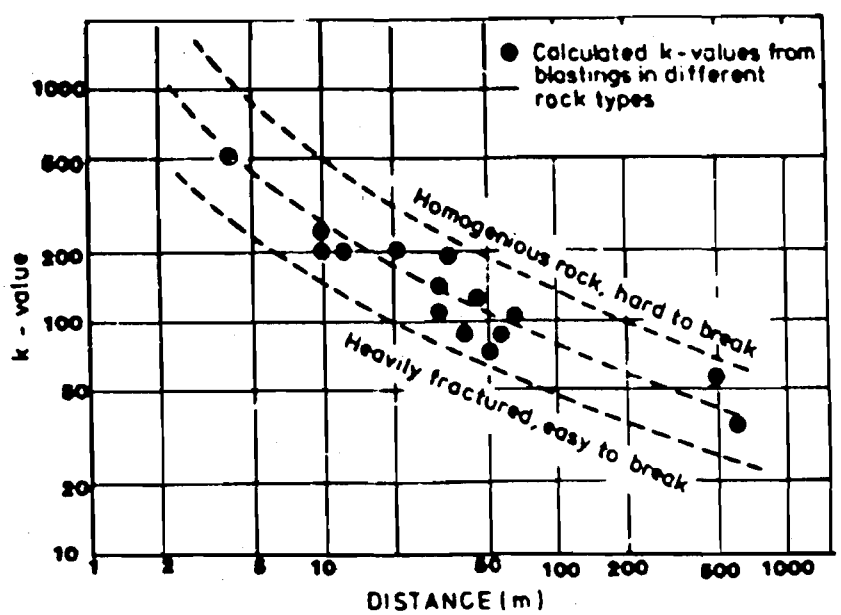
[5-14]



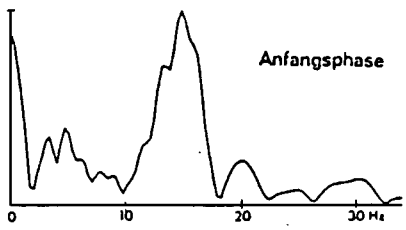
[5-18]

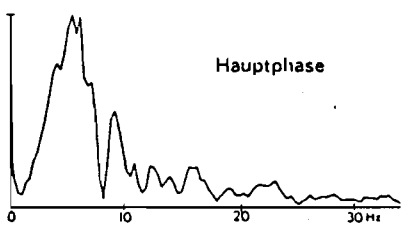


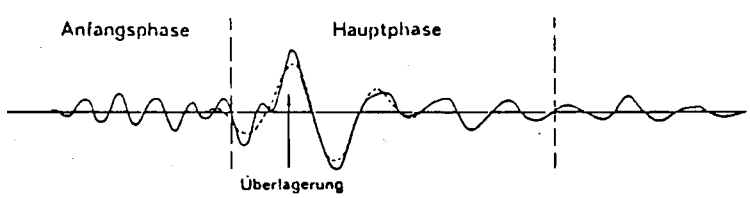
[5-14]



Frequenzabhängigkeit von Sprengerschütterungen bei unterschiedlicher Lademenge LIS-Bericht Nr. 107	Bild 5.5



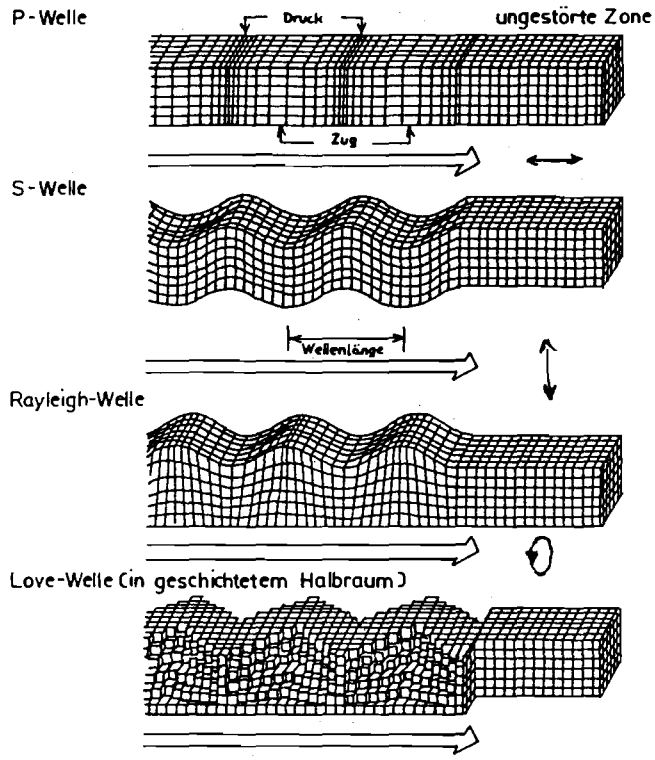




Beispiel für ein frequenzanalytisch aufbereitetes Seismogramm

[5 - 4]

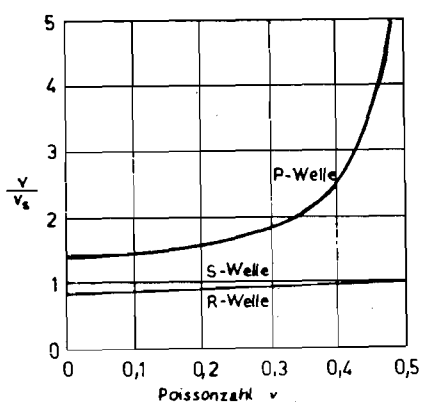
Beispiel für frequenzanalytisch aufbereitetes Seismogramm LIS-Bericht Nr. 107	Bild 5.6



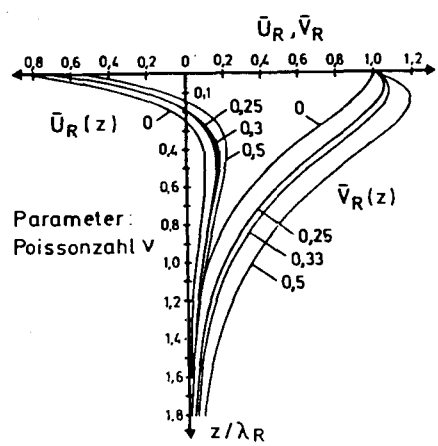
(a)

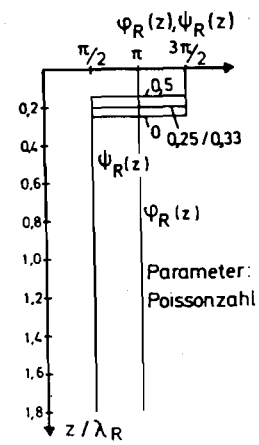
Darstellung der verschiedenen Wellentypen

(b)

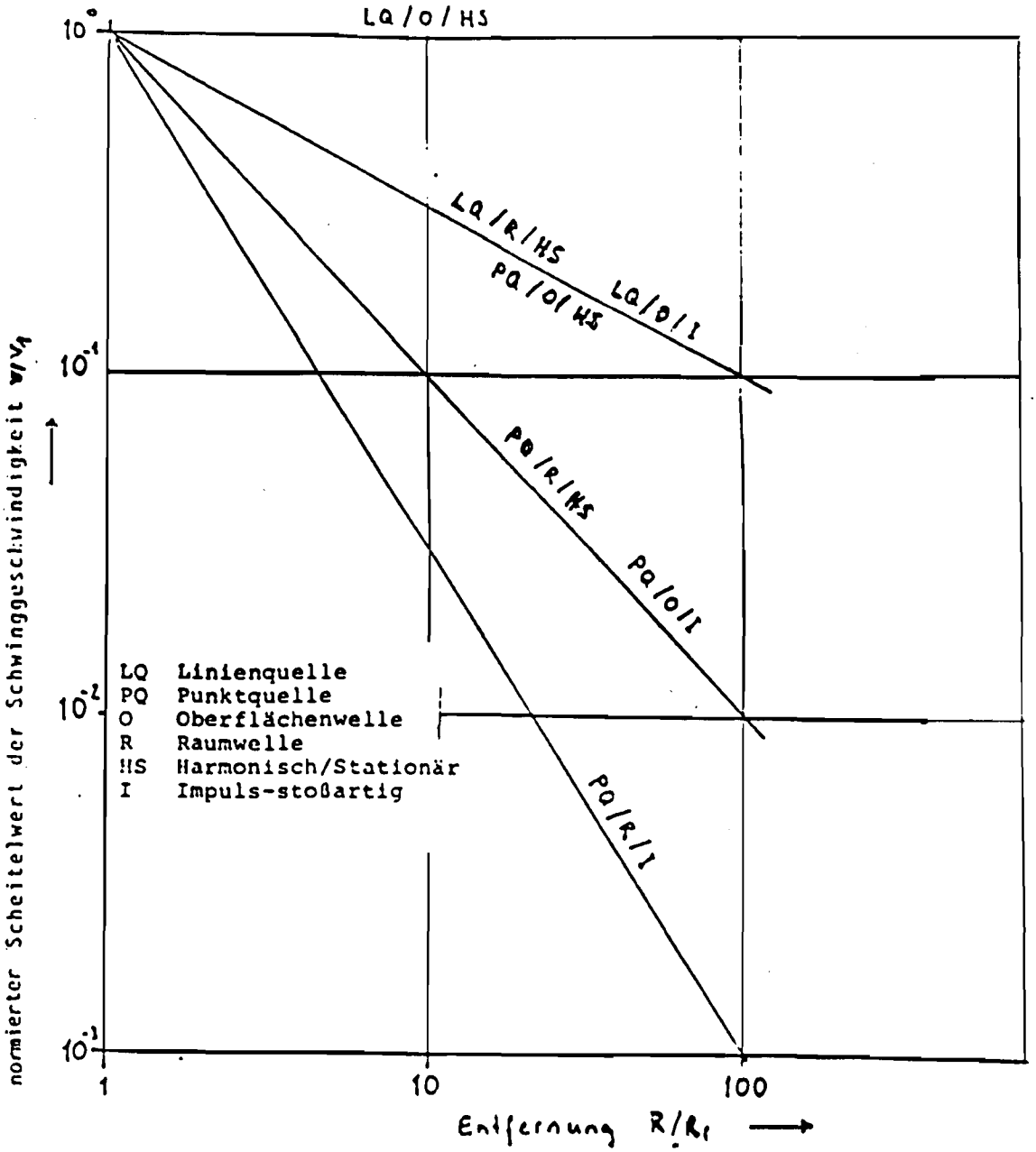


(c)





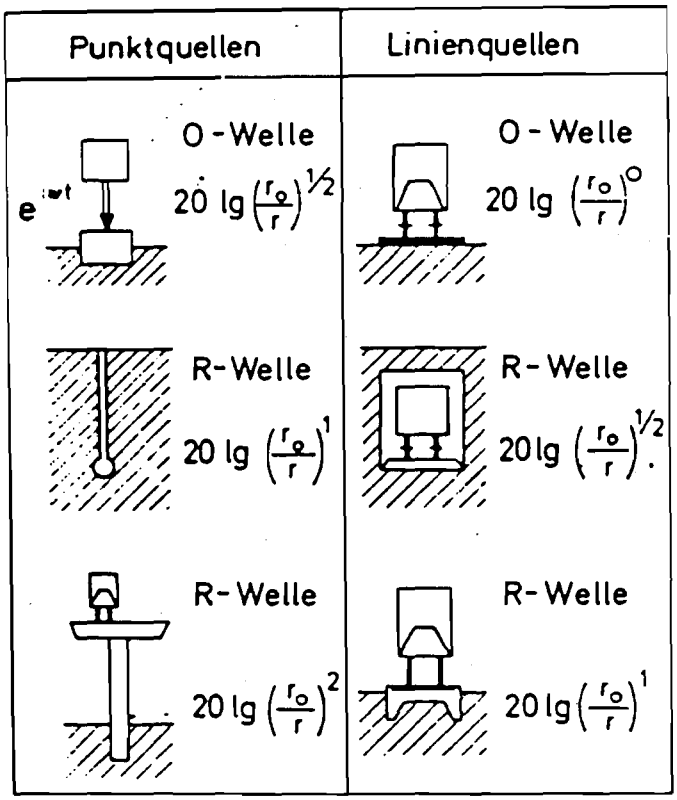
Seismische Wellen Formen. Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Eindringtiefe LIS-Bericht Nr. 107	Bild 6.1



Abnahme des normierten Scheitelwertes der Schwinggeschwindigkeit v/v_1 mit der Entfernung R/R_1 aufgrund der geometrischen Ausbreitung

[1-1]

Amplituden - Abnahme aufgrund der geometrischen Ausbreitung	Bild 6.2
LIS-Bericht Nr. 107	



[6-3]

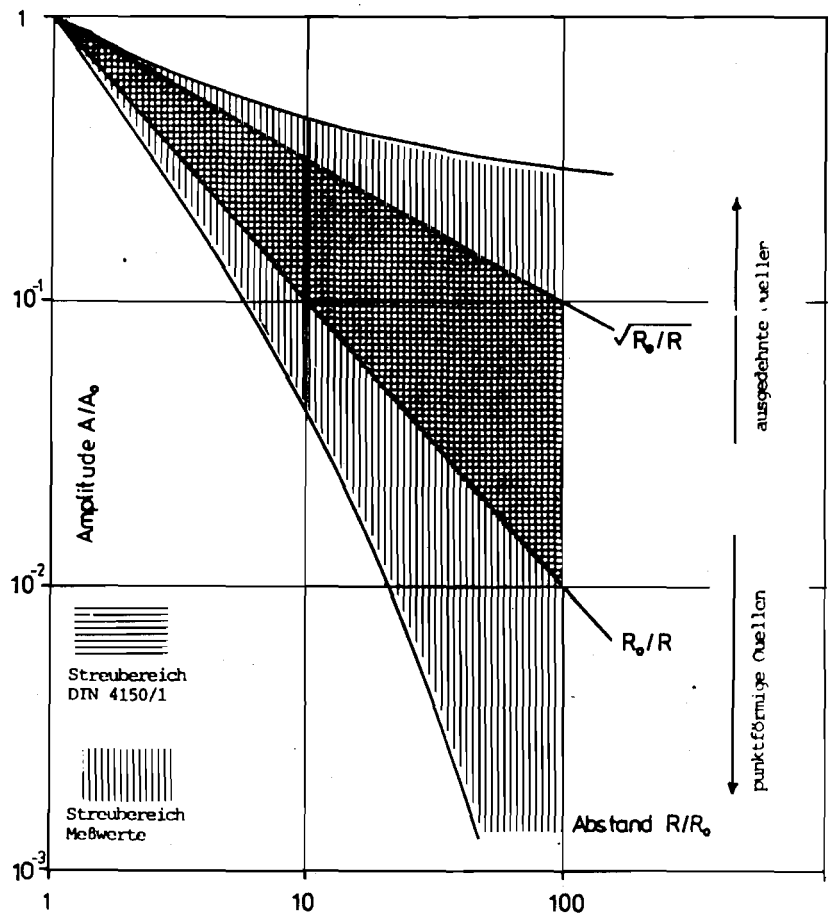
Geometrische Dämpfung im isotrop elastischen Halbraum für Punkt- und Linienquellen [4]
(O = Oberfläche, R = Raum)

Geometrische Dämpfung im isotrop elastischen Halbraum

Quellen-Form	Wellenart	Ort der Registrierung	n	Beispiel
Punkt	Rayleigh-	Oberfläche	0,5	Maschine
Punkt	Raum-	im Boden	1	Sprengung
Punkt	Raum-	Oberfläche	2	Brückenpfeiler
Linie	Rayleigh-	Oberfläche	0	ebenerdige Straße
Linie	Raum-	im Boden	0,5	Tunnel
Linie	Raum-	Oberfläche	1	Straße mit Gründung

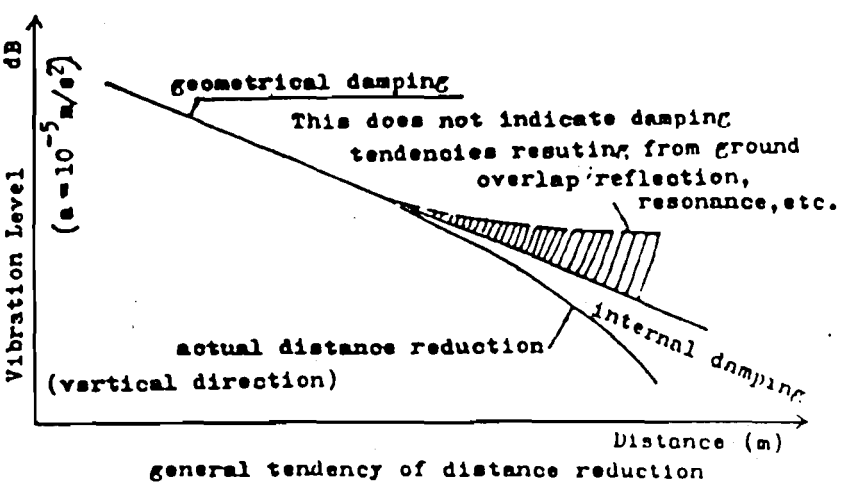
Geometrische Abnahme einiger physikalischer Beispiele

Bild 6.3



[6-5b]

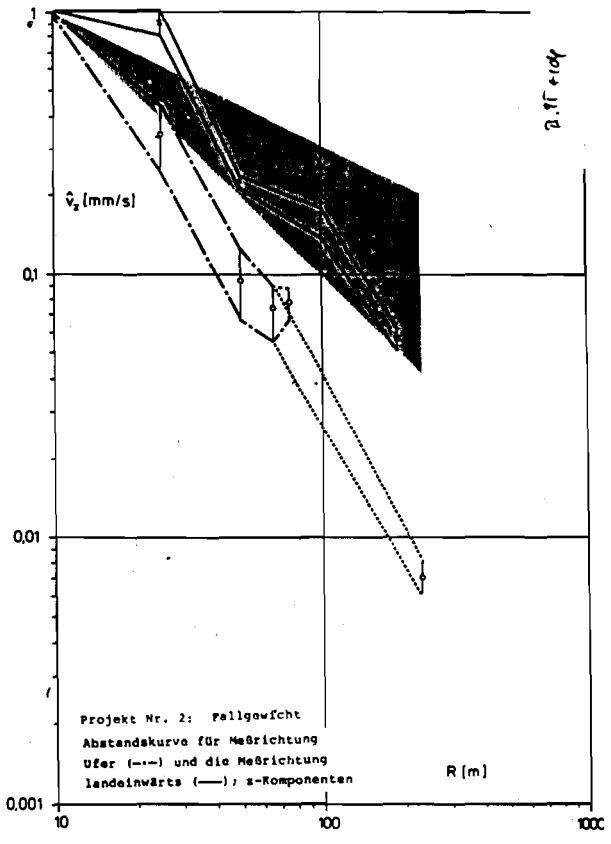
Abnahme der Erschütterungen für oberflächennahe Anregur und Ausbreitung - Streubreite der Meßwerte im Vergleic zur Angabe in der Vornorm DIN 4150/1, September 1975



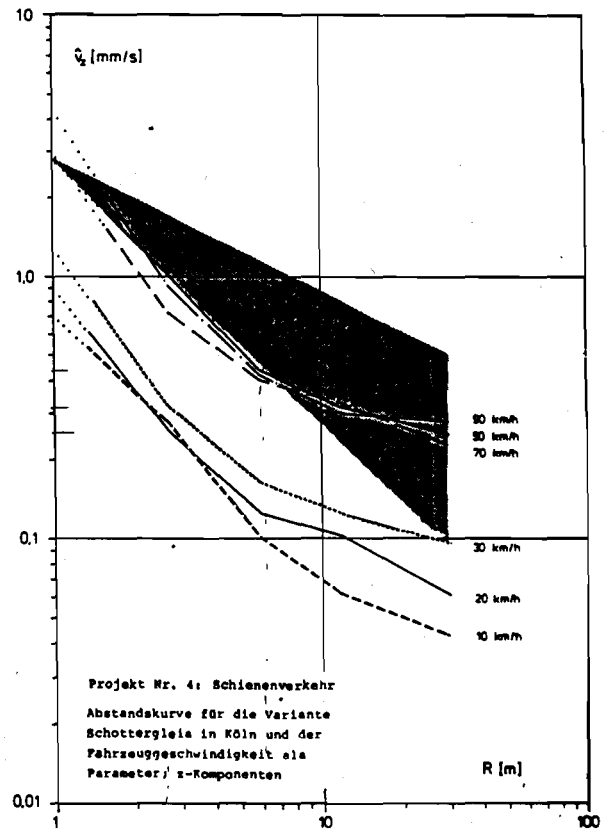
[6-4]

Amplituden - Abnahme Meßwerte bei oberflächennaher Anregung

Bild 6.4



[6-5a]



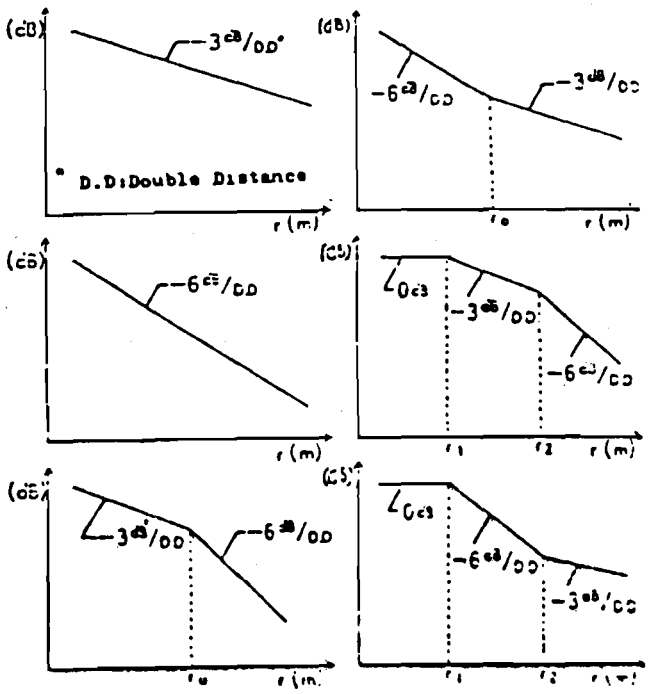
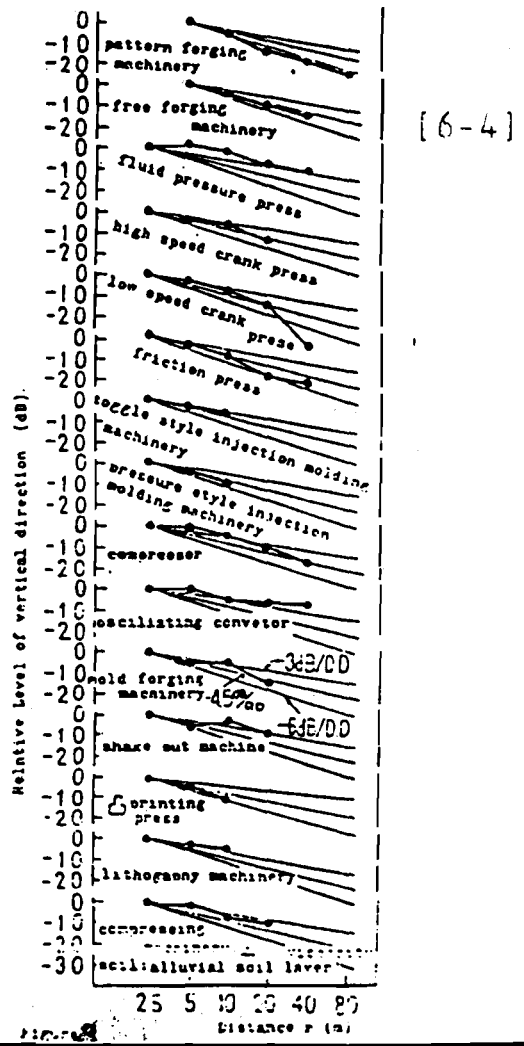


Figure 7 qualitative tendency of distance reduction

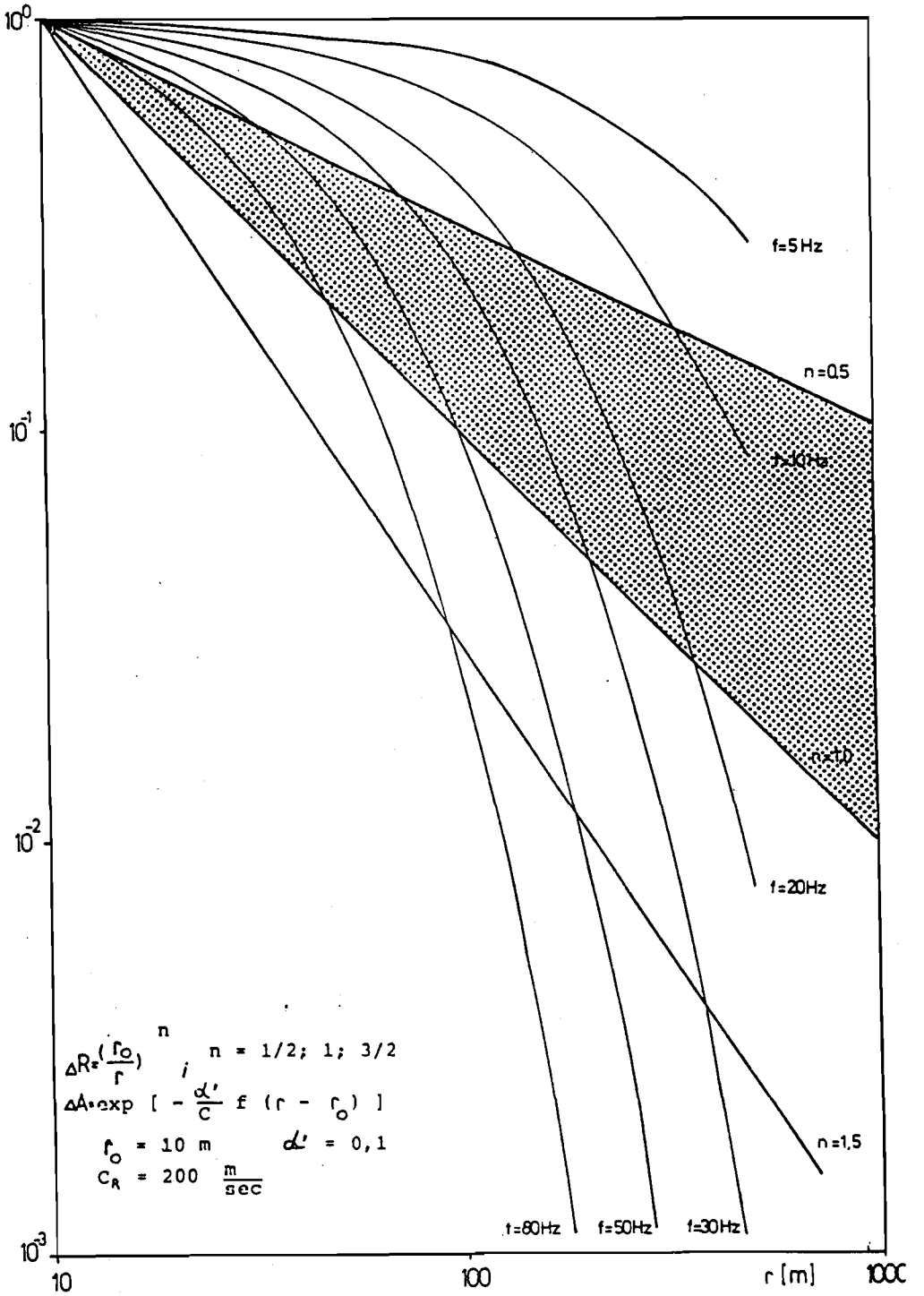


[6-4]

Regressionskurven geometrischer Ausbreitung und gemessene Beispiele	Bild 6.5
LIS-Bericht Nr. 107	

Vergleich von geometrischer Abnahme
$\Delta^R = F\ (r,n)$ und Beispiel zur Absorption
$\Delta^A = F\ (r, f, \alpha', c_R)$

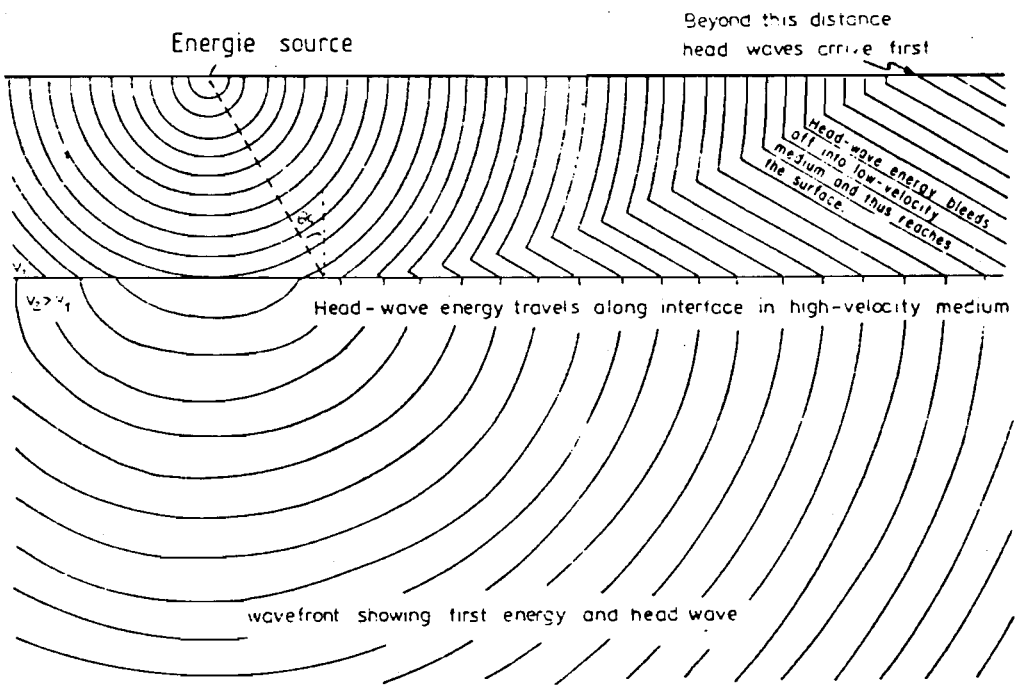
[4 - 52]



Vergleich von geometrischer Amplitudenabnahme und Absorption

Bild 6.6

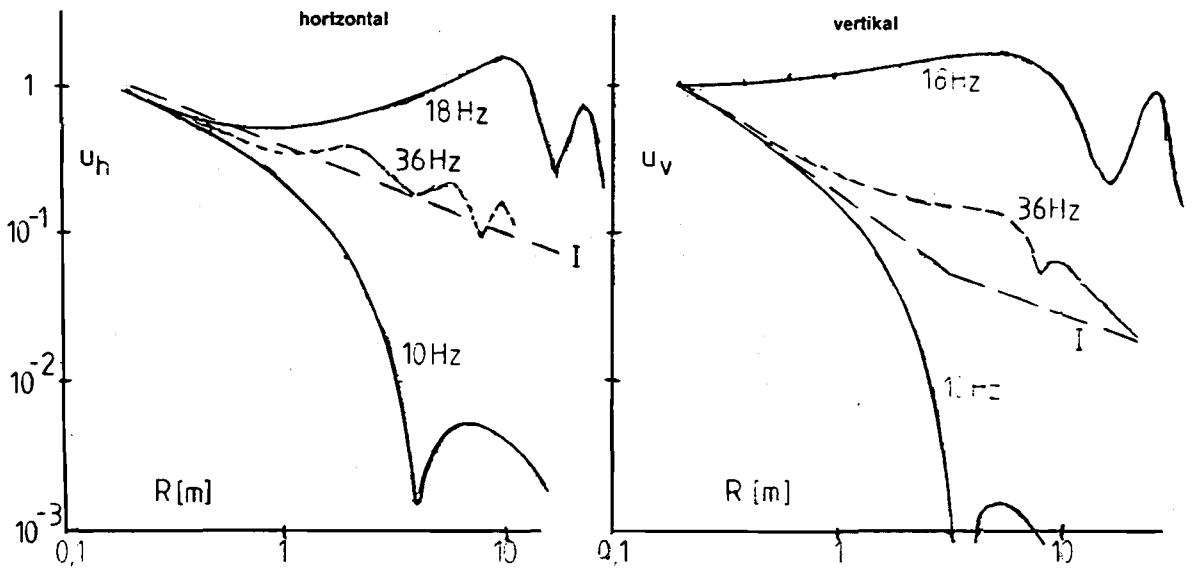
Entstehung einer kritisch refraktierten Welle (nach Sheriff)



[6-5a]

Kritisch refraktierte Welle (Kopfwelle)	**Bild 6.7**
LIS-Bericht Nr. 107	

a) Theoretisches Beispiel: Vertikale Punktlast an der Oberfläche der Schicht:
Erregung harmonisch mit 10Hz, 18Hz, 36Hz und impulsartig:(I)
Schichtdicke H=2.4m, Resonanzfrequenz f_g=18Hz [6-7]



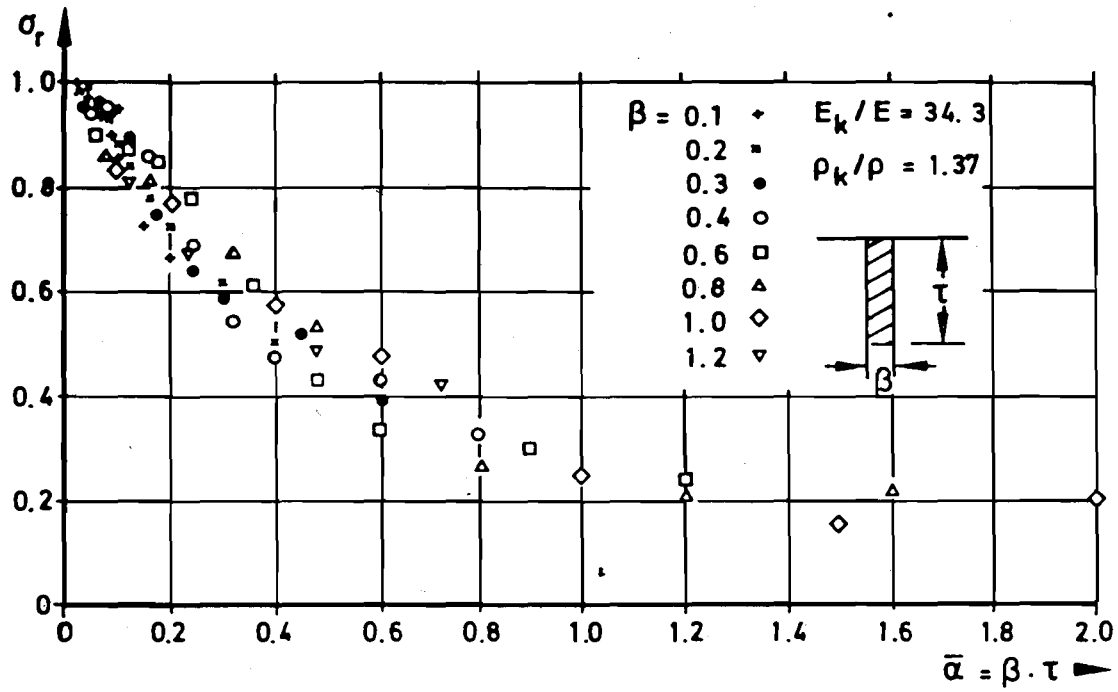
b) Abnahmeexponent n (Mittel von u_H und u_v) [6-7]

System	Erregung	Nebenbedingung	Exponent n
Halbraum	harmonisch	Nahfeld	1
		Fernfeld	0.5
	Impuls	-	0,5
Schicht	harmonisch	$f < f_g$	exponentiell
		$f \approx f_g$	0 für $R \leq H$ 0.7 für $R > H$
		$f \geq f_g$	wie Halbraum
	Impuls	-	1.15 für $R \leq H$ 0.65 für $R > H$

Relative Abnahme der Verschiebungsamplitude $u_{v,h}$ mit der Entfernung R in der elastischen Schicht

Bild 6.8

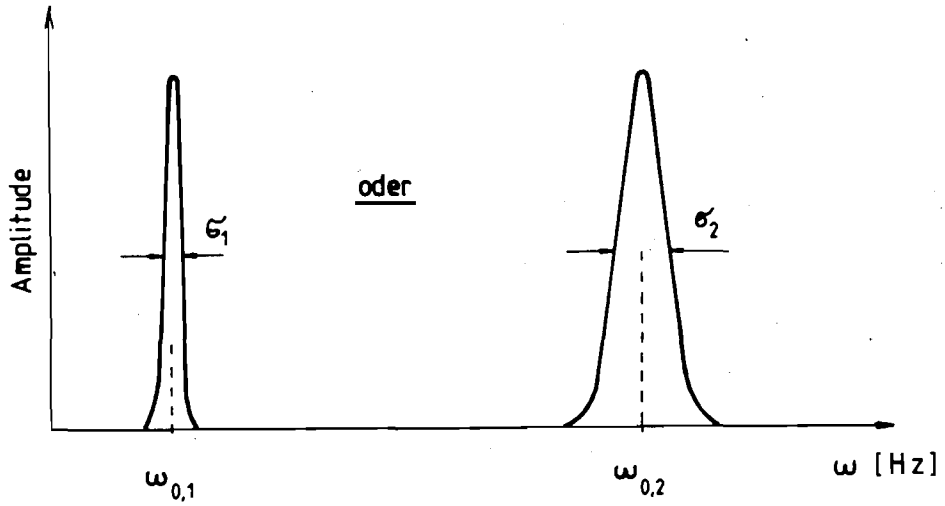
LIS-Bericht Nr. 107



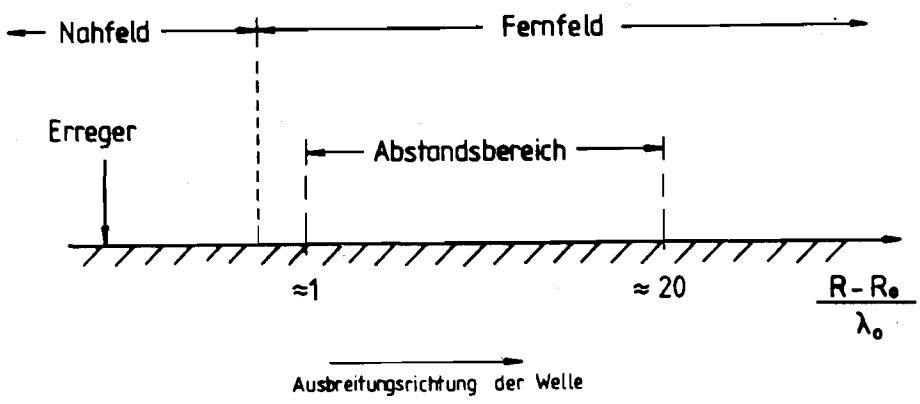
Amplitudenreduktionsfaktor von massiven Einbauten (Beton) im R-Wellenfeld (Fernfeld) in Abhängigkeit von der bezogenen Querschnittsfläche (FE-Rechnung)

[6-18a]

Amplitudenreduktionsfaktor von massiven Einbauten im R - Wellenfeld LIS-Bericht Nr. 107	Bild 6.9



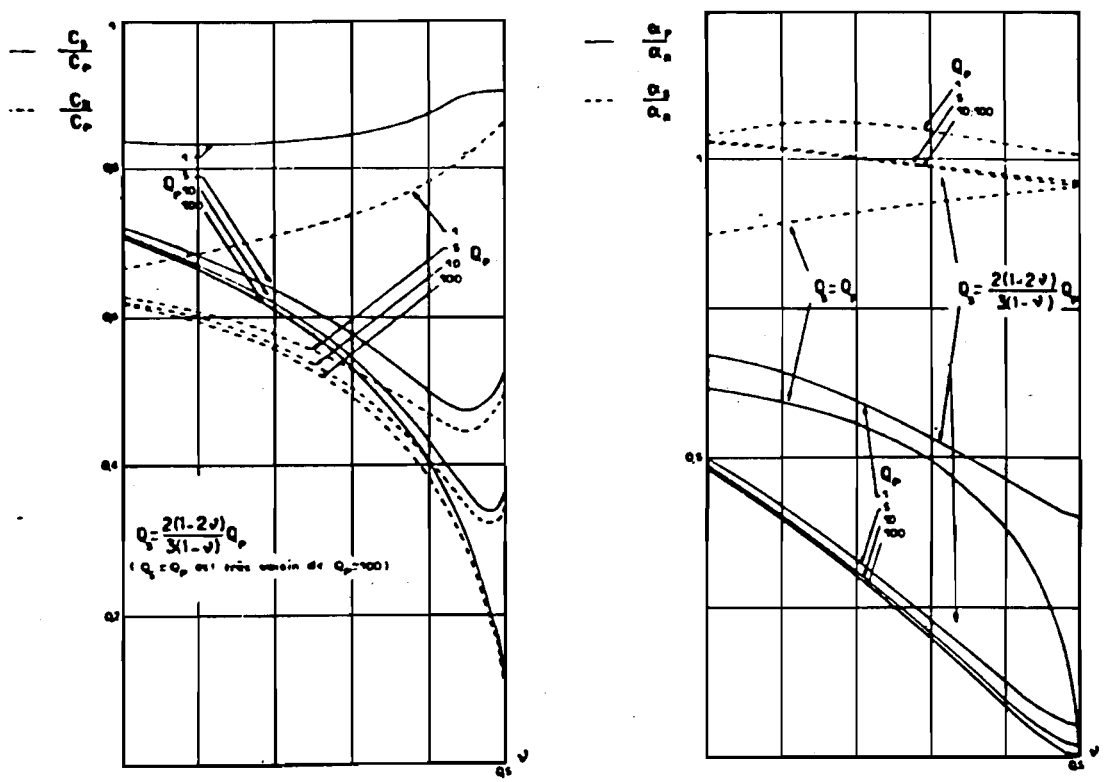
Einfaches Emissionsspektrum zur Anwendung in analytischer Formel nach: $1 \ll \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_0}{\sigma}\right)^2$



Abstandsbereich zur Anwendung in analytischer Formel nach: $\frac{R-R_0}{\lambda_0} \ll \frac{1}{\alpha'}\left(\frac{\omega_0}{\sigma}\right)^2$

[6-5b]

Nebenbedingungen für Amplituden - Abnahmegesetz einfacher Emissionsspektren	Bild 6.10
LIS-Bericht Nr. 107	



Verhältniswerte der Wellengeschwindigkeiten und Dämpfungskonstanten Q in Abhängigkeit von der Querkontraktionszahl ν

[6-17]

Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten und Dämpfungskonstanten	Bild 6.11

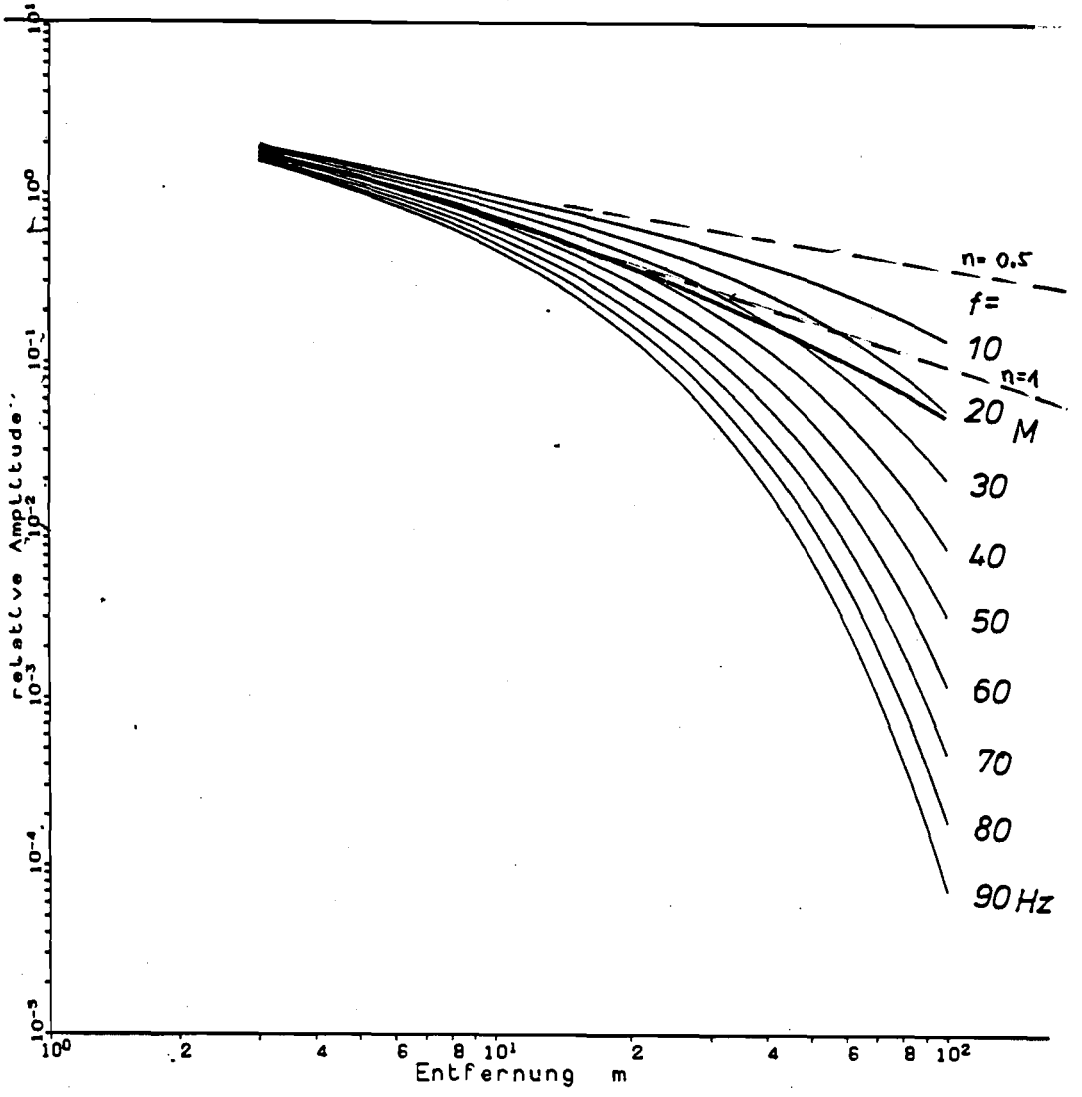
Amplitudenabnahme mit der Entfernung

2 Quellen, gleiche Phasen Boden :

f wird variiert vr = 200.0 m/s

L = 0.1 m D = 3.0 %

Bezugsamplitude: A(Punktquelle)



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

[6-13]

Amplitudenabnahme einzelner Frequenzanteile und des quadratischen Mittelwertes - bei breitbandiger Erregung	Bild 6.12
LIS-Bericht Nr. 107	

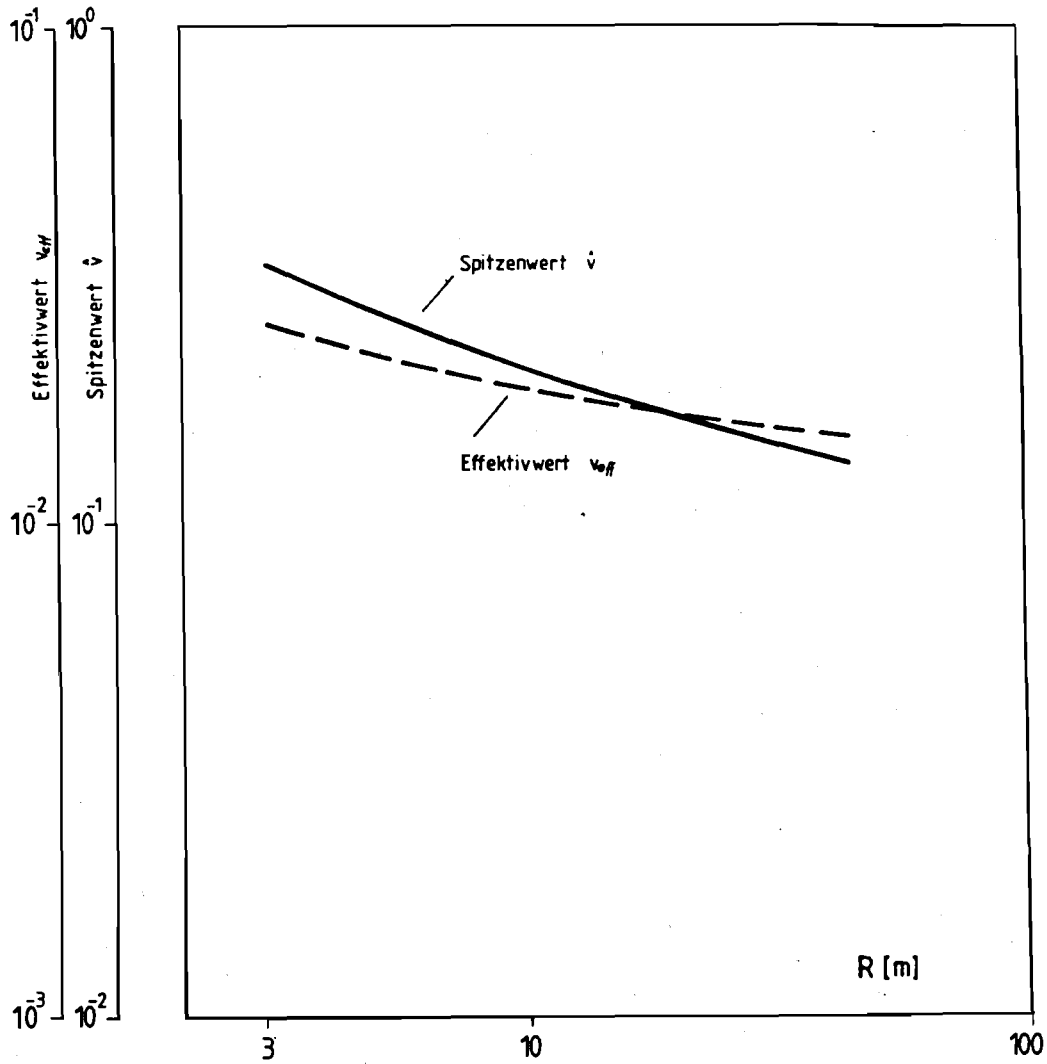


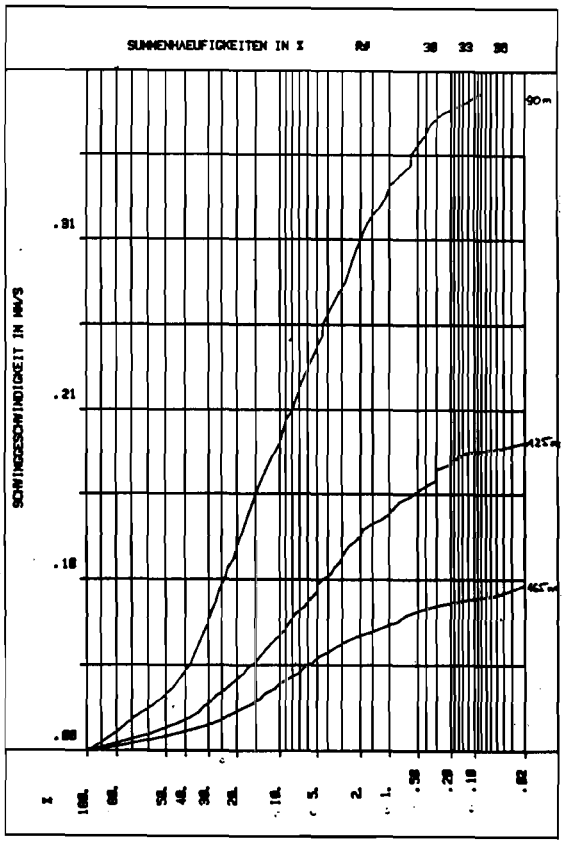
Bild 5.96: Abstandskurve für Spitzen - und Effektivwerte desselben Auswertezeitraumes

Beispiel: BAB Tieflage, vertikale Schwingungskomponente, Mittelungszeitraum 15 min.

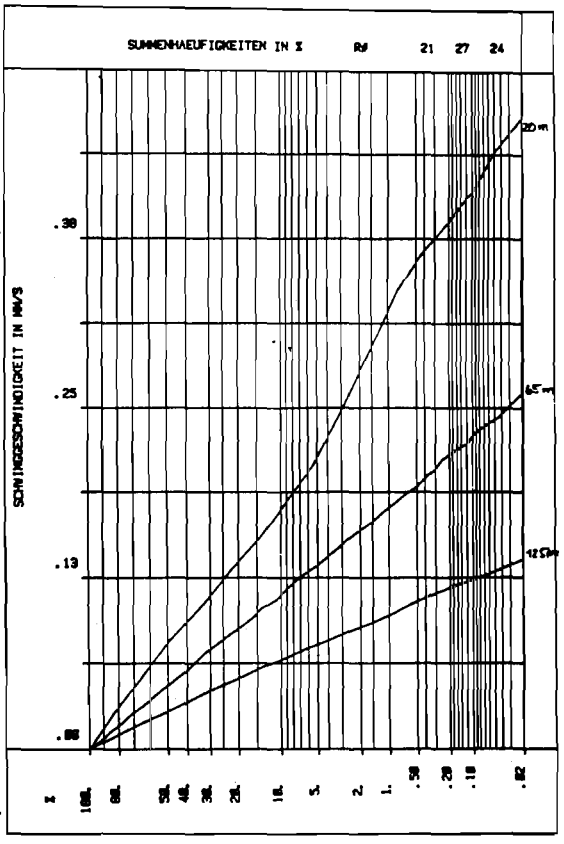
[6-5a]

Amplitudenabnahme für Spitzen - und Effektivwerte Beispiel Autobahnverkehr LIS-Bericht Nr. 107	Bild 6.13

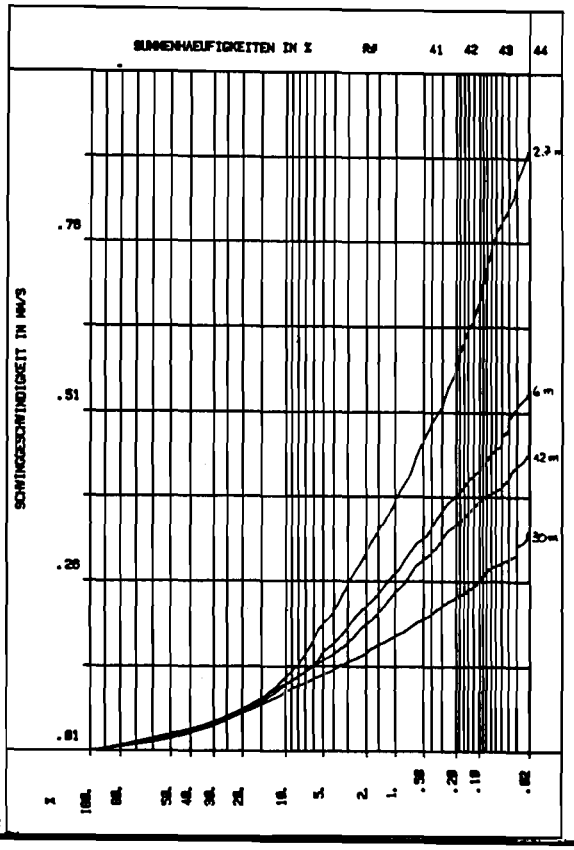
Projekt Nr. 1: Hammer
Überschreitungshäufigkeiten für die
z-Komponente der Schwinggeschwindigkeit



Projekt Nr. 3: Shredder
Überschreitungshäufigkeiten für die
z-Komponente der Schwinggeschwindigkeit

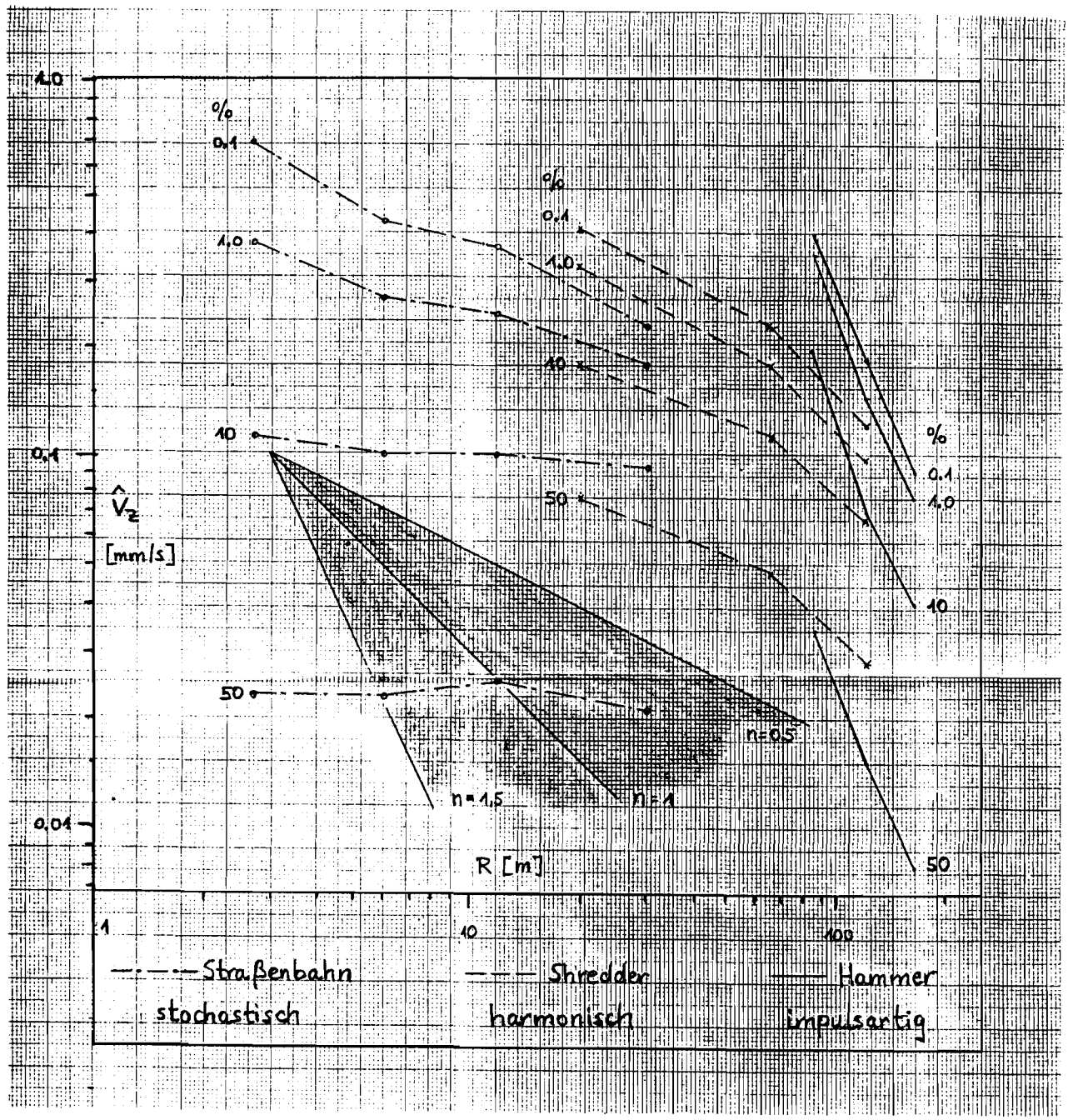


Projekt Nr. 4: Schienenverkehr
Köln / Schotter 50 km/h
Überschreitungshäufigkeiten für die
z-Komponente der Schwinggeschwindigkeit



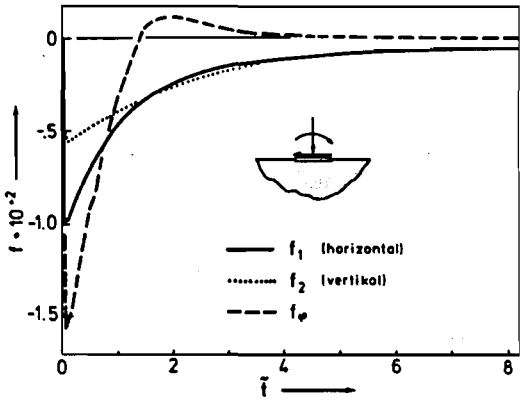
[6-5a]

Überschreitungshäufigkeit der Schwinggeschwindigkeit in in verschiedenen Abständen zur Quelle	Bild 6.14
LIS-Bericht Nr. 107	

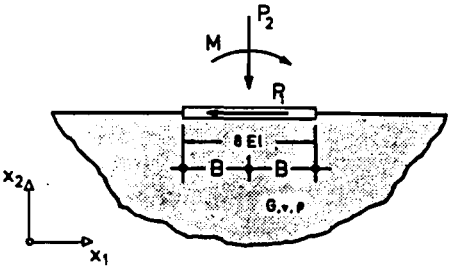


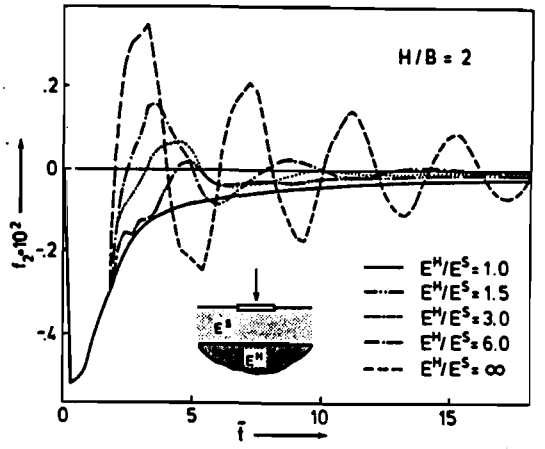
entwickelt nach [6-5a]

Amplituden - Abnahme für Überschreitungsfraktile verschiedener Erschütterungsquellen	**Bild 6.15**
LIS-Bericht Nr. 107	

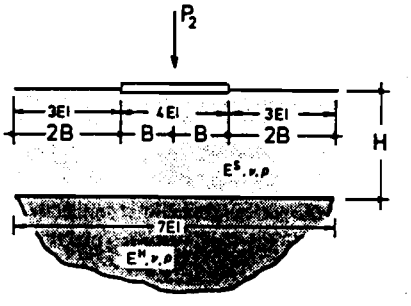


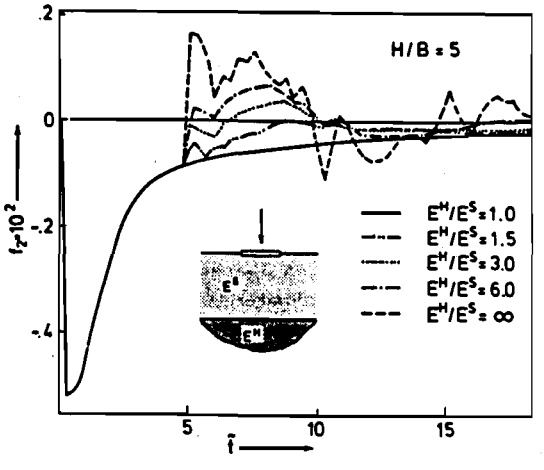
Zeitverlauf der Fundamentantworten auf einen Impuls





Vertikale Fundamentantwort auf Vertikalimpuls Abhängigkeit von Schichtdicke und *E*-Moduli

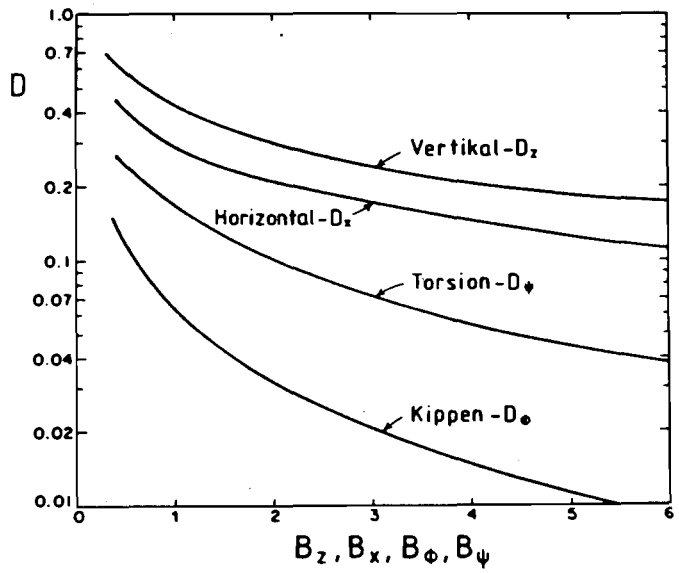




Vertikale Fundamentantwort auf Vertikalimpuls, Abhängigkeit von Schichtdicke und *E*-Moduli

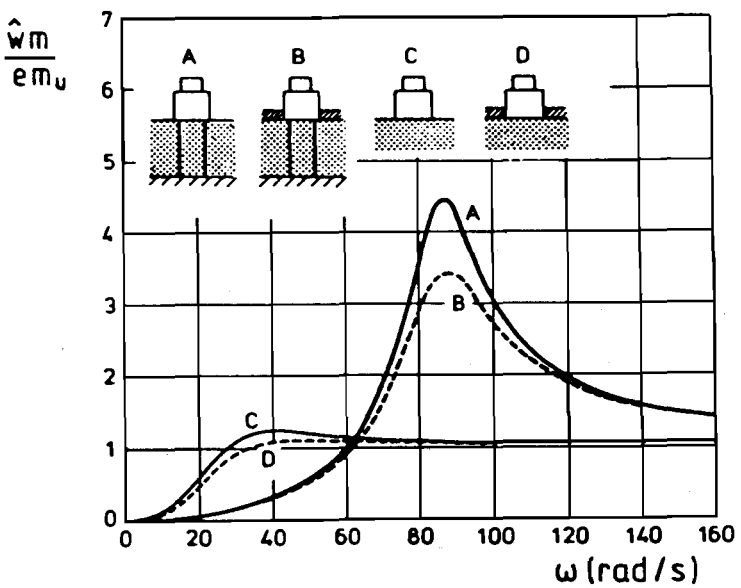
[7-4]

Zeitverlauf der Fundamentantworten auf dem Halbraum und auf der Schicht infolge einer Impulserregung	**Bild 7.1**
LIS-Bericht Nr. 107	



(a)

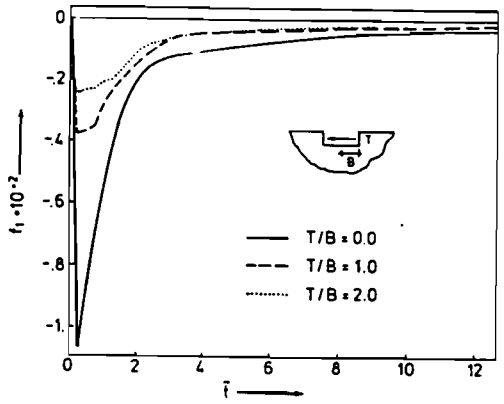
Lehrsche Dämpfungsmaße des Systems Fundament-Baugrund



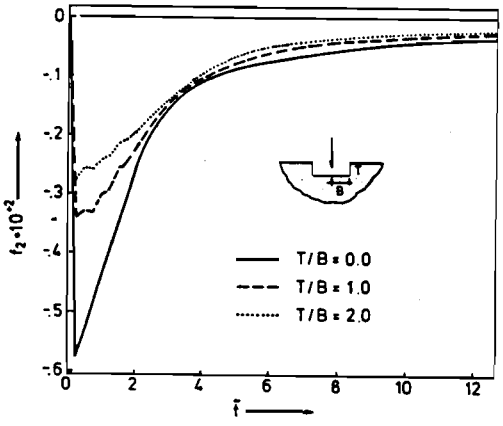
(b)

Amplitudengänge unwuchterzwungener Vertikalschwingung bei (A) Pfahlgründung (B) Pfahlgründung mit Einbettung (C) Oberflächengründung (D) Einbettung [7-16]

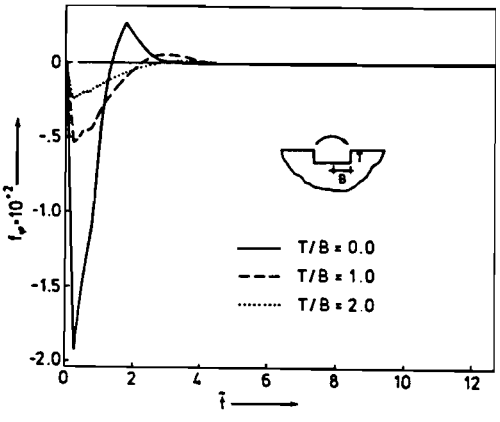
Lehrsche Dämpfungsmaße des Systems Fundament-Baugrund(a) und Amplitudengänge verschiedener Gründungsarten (b)	Bild 7.2
LIS-Bericht Nr. 107	



Zeitverlauf der Horizontalbewegung des Fundamentes, Abhängigkeit von der Einbettungstiefe T

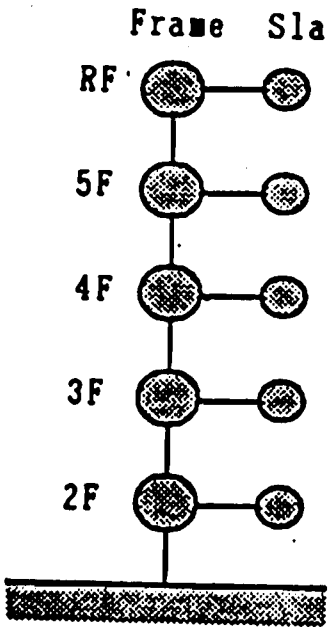


Zeitverlauf der Vertikalbewegung des Fundamentes, Abhängigkeit von der Einbettungstiefe T

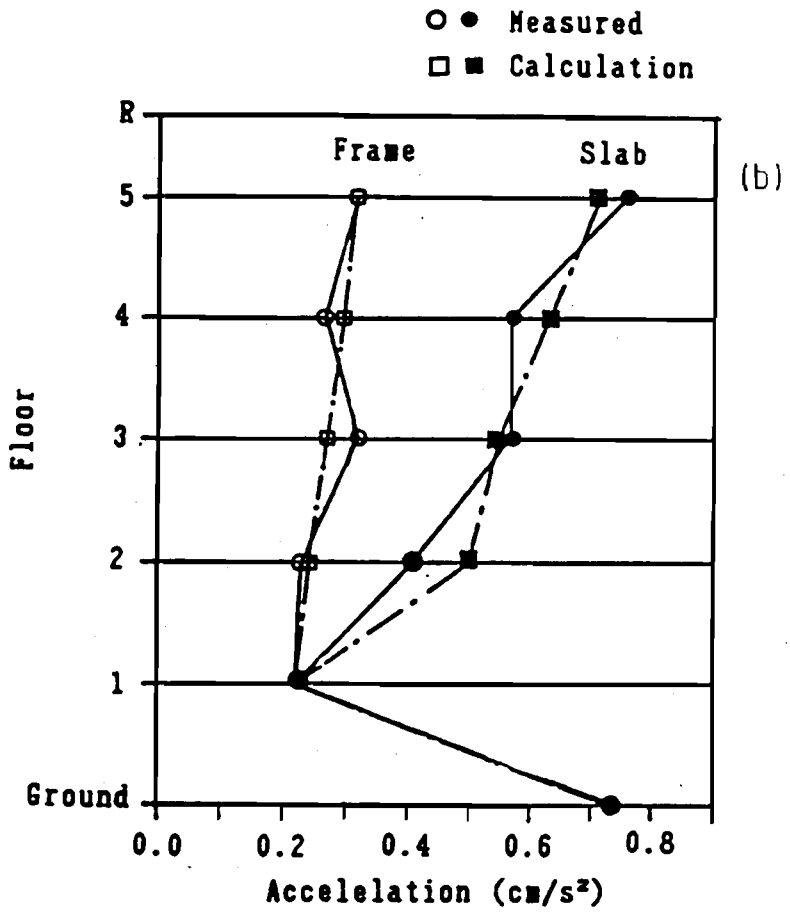


Zeitverlauf der Kippbewegung des Fundamentes, Abhängigkeit von der Einbettungstiefe T

[7-4]

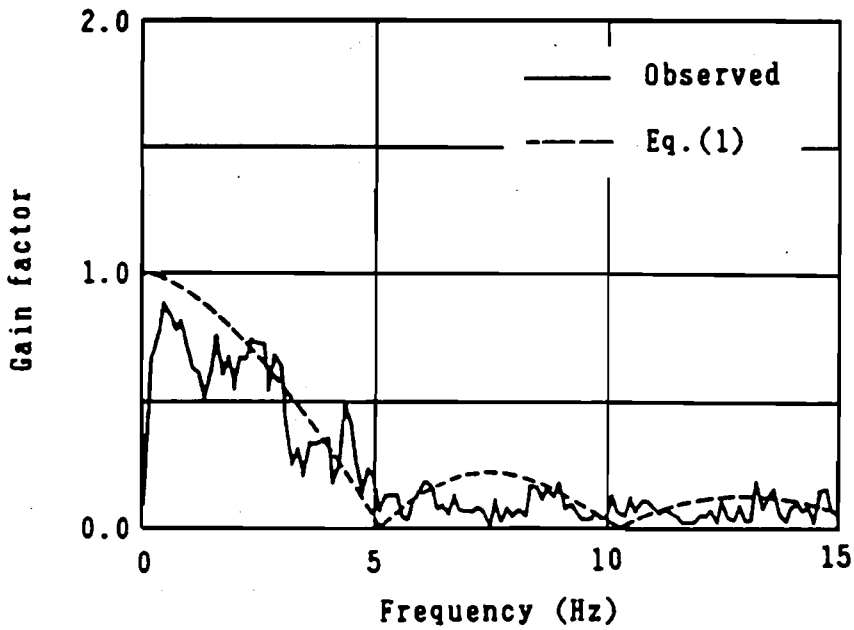


Lumped mass model



(b)

Comparison of maximum acceleration

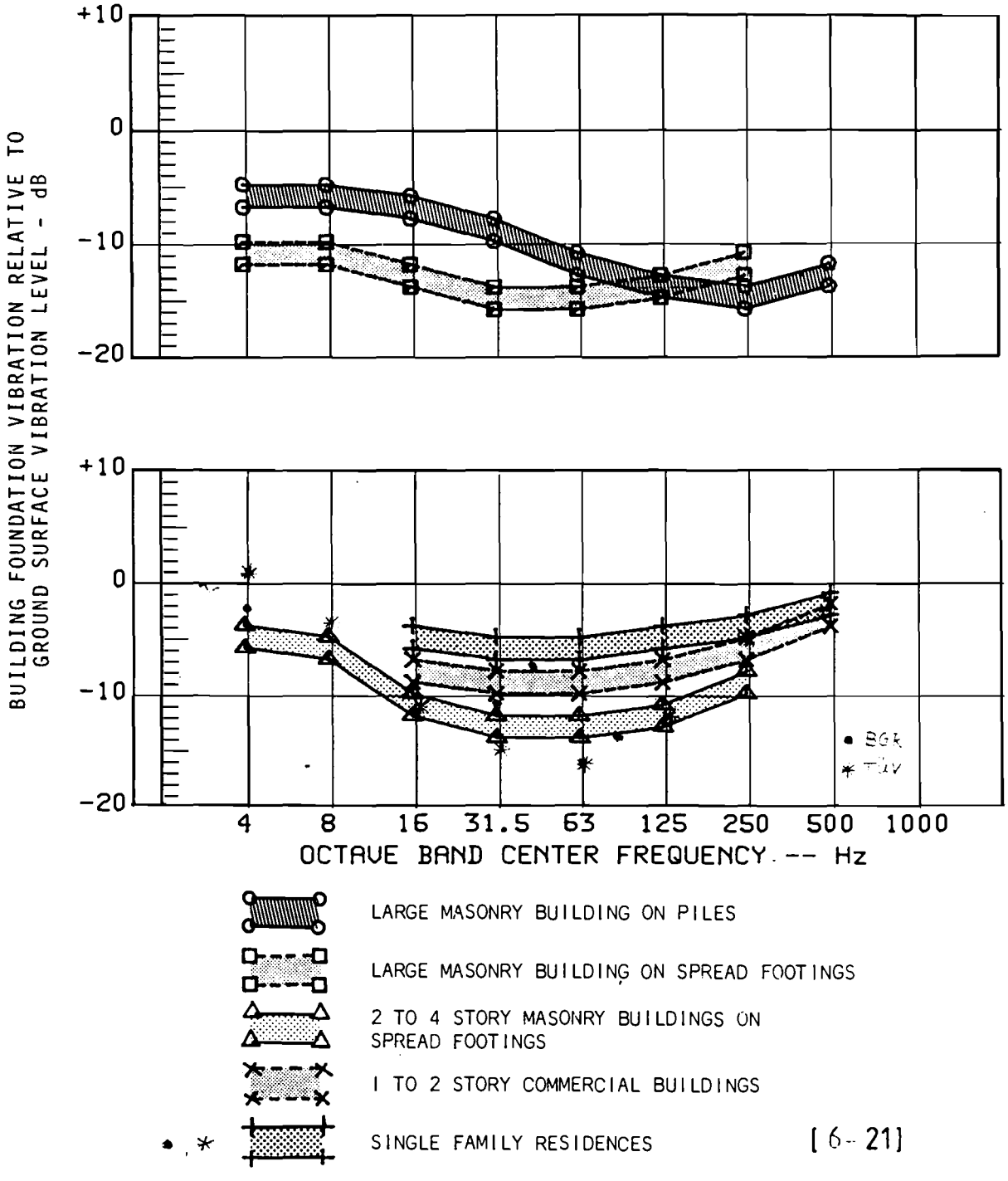


(a)

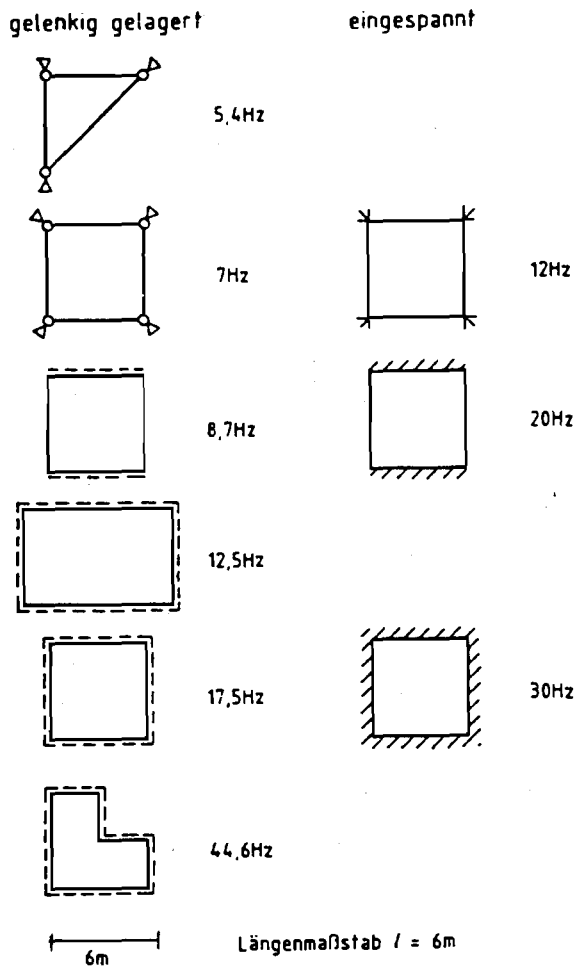
Frequency response function of the foundation to the ground

[8-43]

Gebäudeantwort bei breitbandiger, externer Erregung a) Tiefpaßfilterung durch das Fundament b) Verstärkung durch Geschoßdecken	Bild 7.4



Erschütterungsreduktion durch **Wechselwirkung Baugrund - Gebäudefundament** LIS-Bericht Nr. 107	**Bild** **7.5**



Längenmaßstab l = 6m

d_D = 0,2m Deckendicke

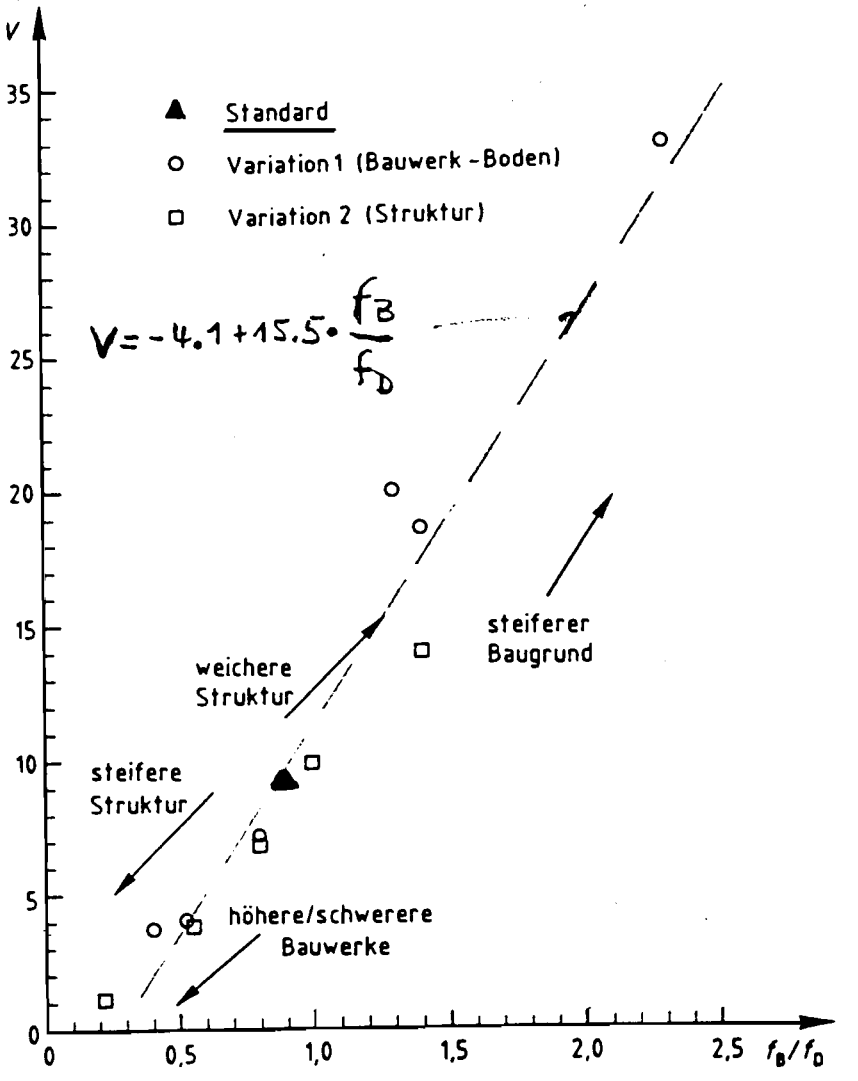
$E = 3\ 10^{10}\ N/m^2$

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

$$f_0 \sim \frac{d_D}{l^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad [8-10]$$

Eigenfrequenzen von Decken in Abhängigkeit von Form und Auflagerung

Bild 8.1



[8-10]

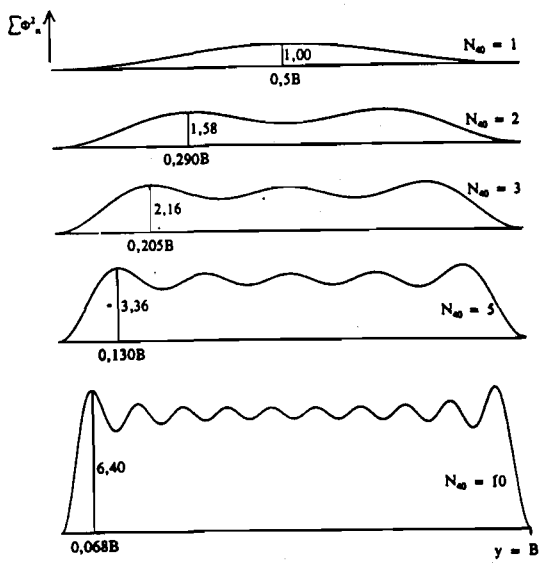
Abhängigkeit der Decken-Resonanzüberhöhung vom Verhältnis f_B / f_D

Bild 8.2

LIS-Bericht Nr. 107

Sum of the squares of mode functions for different numbers of modes N_{40}.

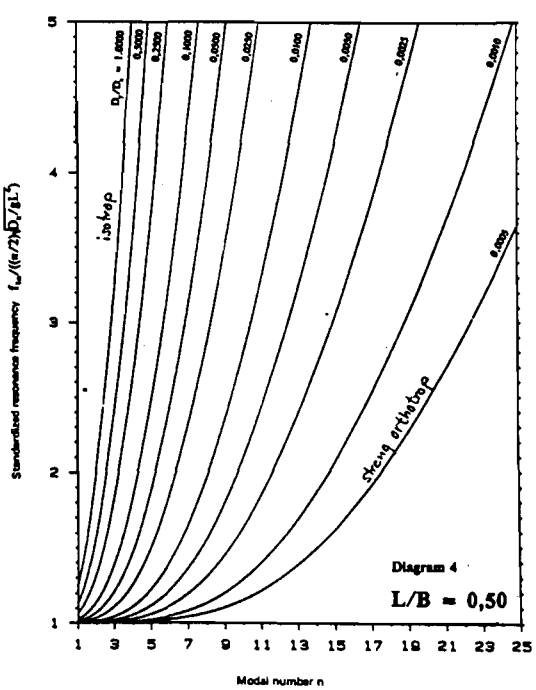
(b)



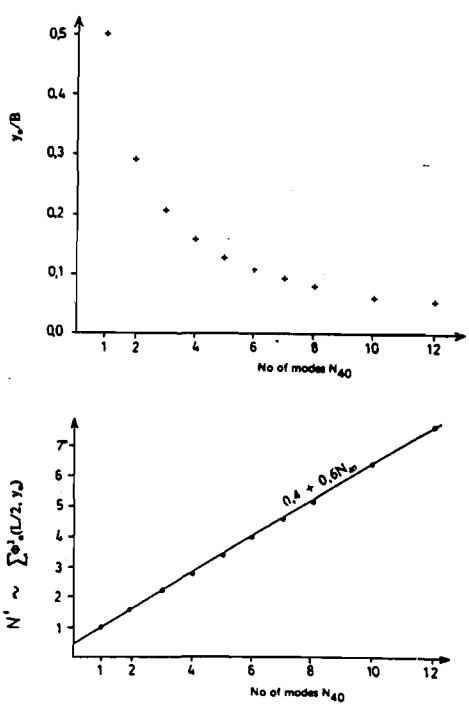
[9-41]

(a)

Resonance frequencies f_{1n} of the first order for rectangular orthotropic plate simply supported along all four edges.



(b)

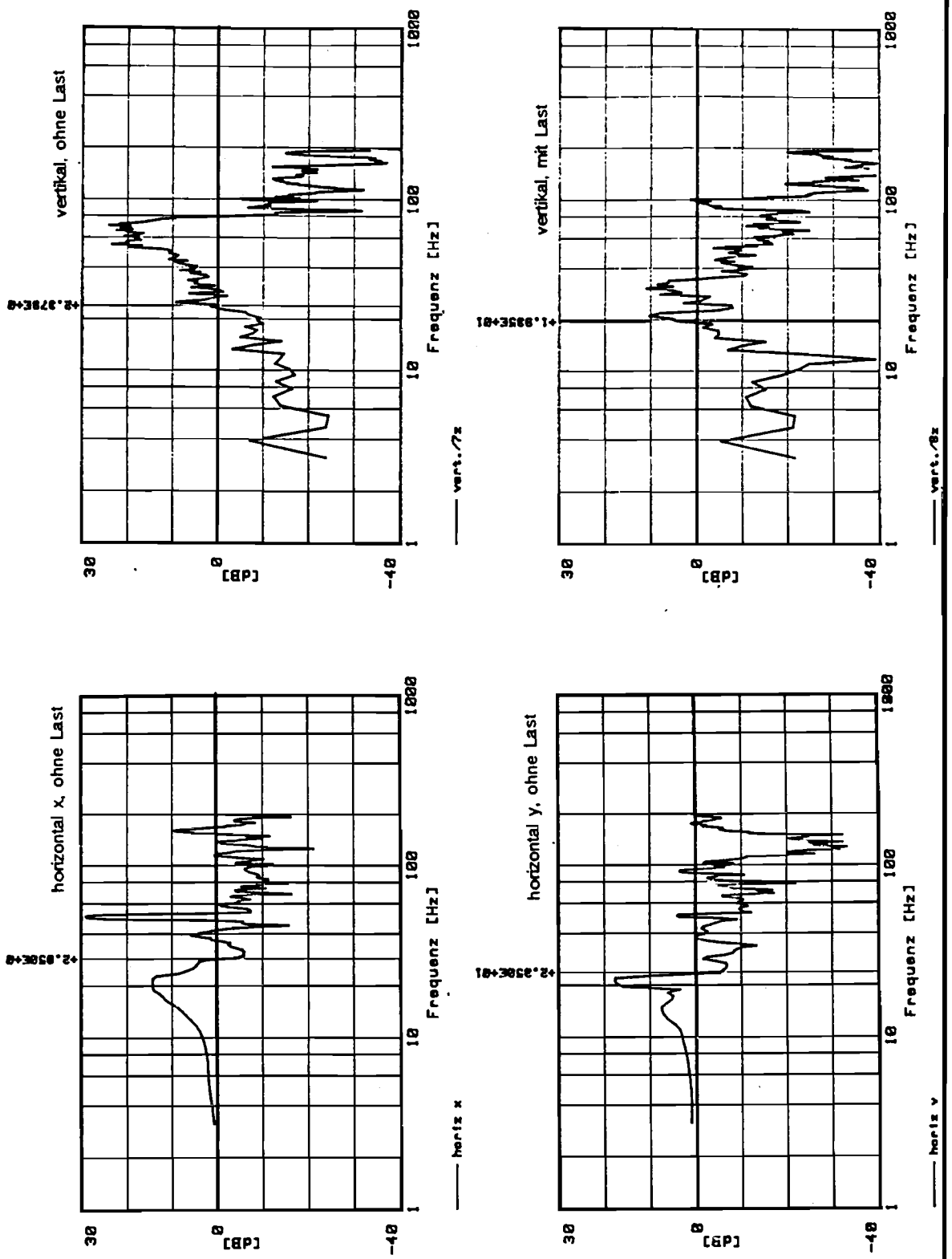


Deckenschwingungen infolge Impulserregung

a)Bestimmung der Resonanzfrequenzen

b) Position und max. Schnelle für Moden unter 40 Hz des empfindlichsten Plattenpunktes

Bild 8.3



Übertragungsfunktion Rohdecke zu Computer - Zwischenboden

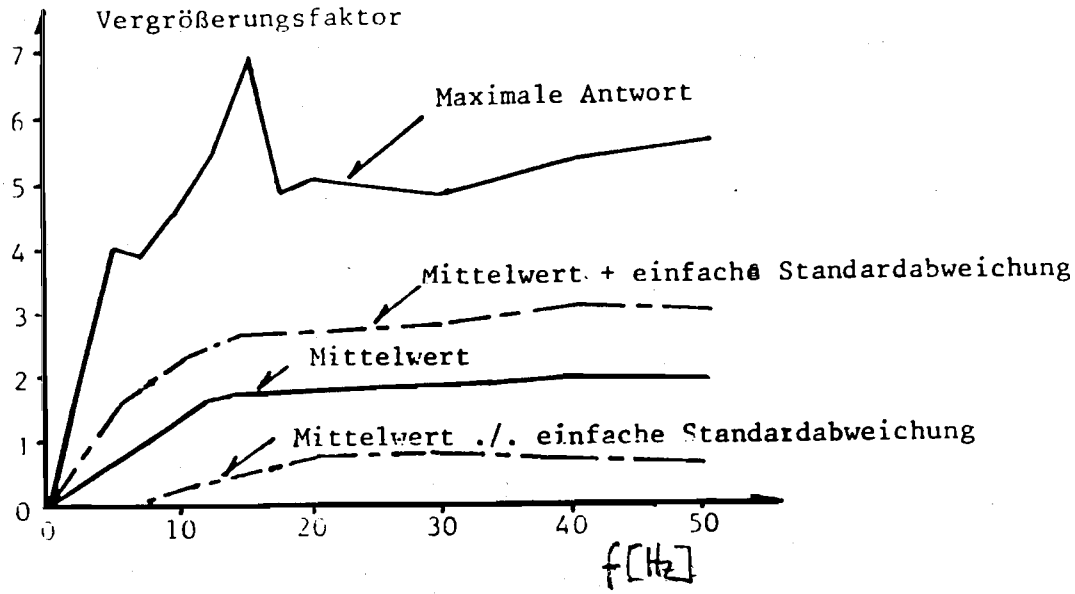
[8-13]

LIS-Bericht Nr. 107

Bild

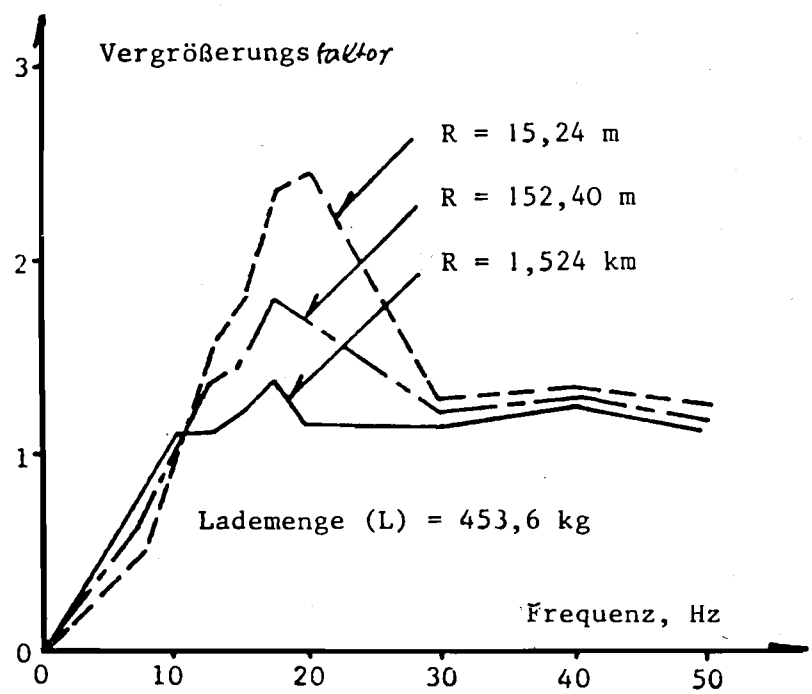
8.4

(a)



PSRV-Werte bei Sprengarbeiten, 5 % Dämpfung

(b)



[5-9]

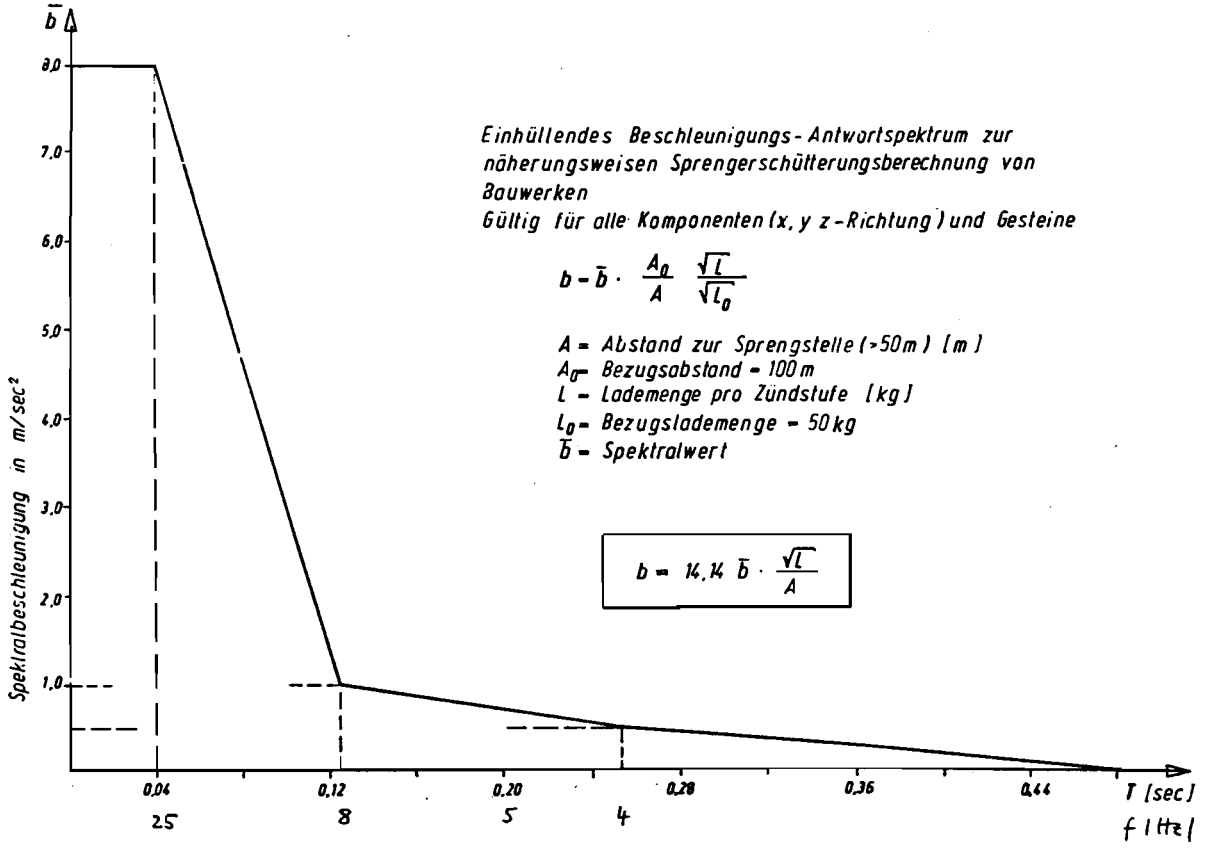
PSRV-Werte mit Abstand

Antwort-Spektrum-Methode

Überhöhungsfaktor Gebäudeantwort auf Freifelderregung durch Sprengungen (a)

und Änderung mit dem Abstand (b)

Bild 8.5



Einhüllendes Beschleunigungs-Antwortspektrum zur näherungsweisen Sprengerschütterungsberechnung von Bauwerken
Gültig für alle Komponenten (x, y z-Richtung) und Gesteine

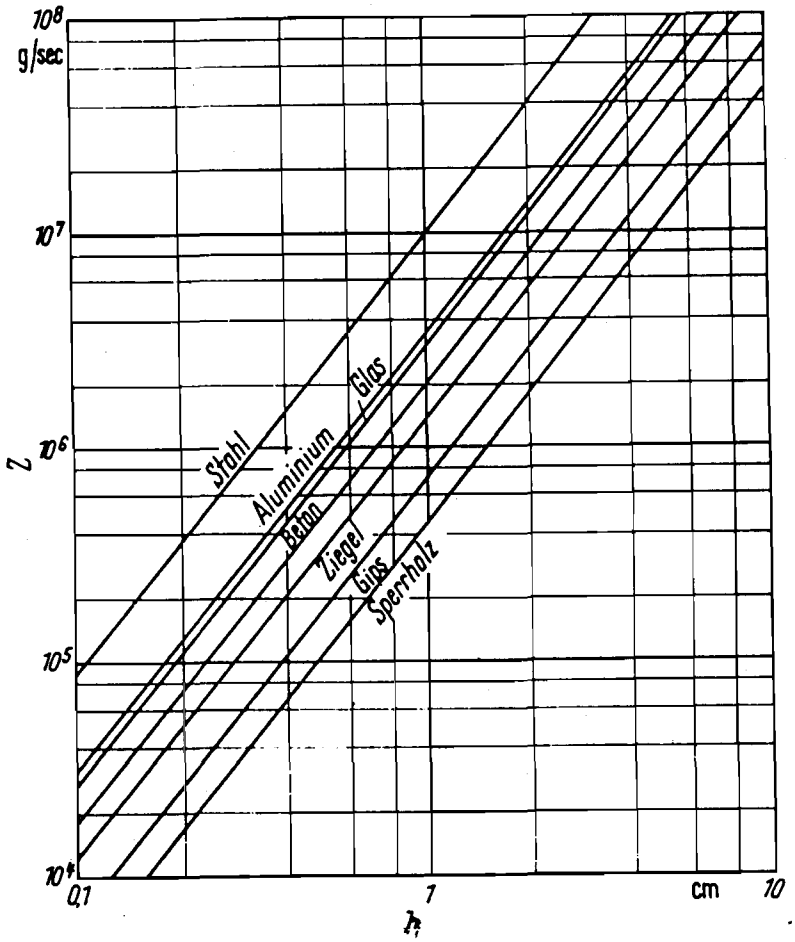
$$b = \bar{b} \cdot \frac{A_0}{A} \cdot \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l_0}}$$

A = Abstand zur Sprengstelle (>50m) [m]
A_0 = Bezugsabstand = 100 m
l = Lademenge pro Zündstufe [kg]
l_0 = Bezugslademenge = 50 kg
$\bar{b}$ = Spektralwert

$$b = 14{,}14\ \bar{b} \cdot \frac{\sqrt{l}}{A}$$

[7-13]

Antwort-Spektrum-Methode **Einhüllendes Beschleunigungs-Antwortspektrum für Sprengerschütterungseinwirkungen**	**Bild 8.6**



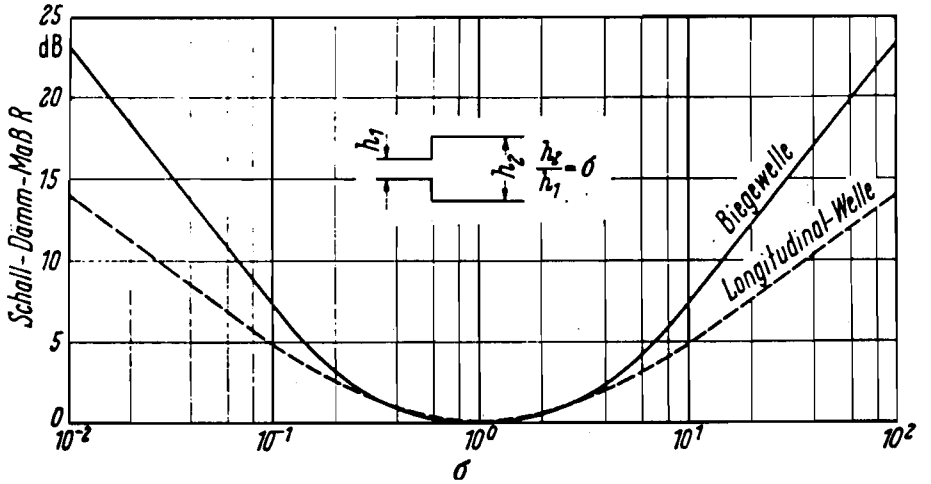
[8-23]

Biegewelleneingangswiederstände von Platten der Dicke h

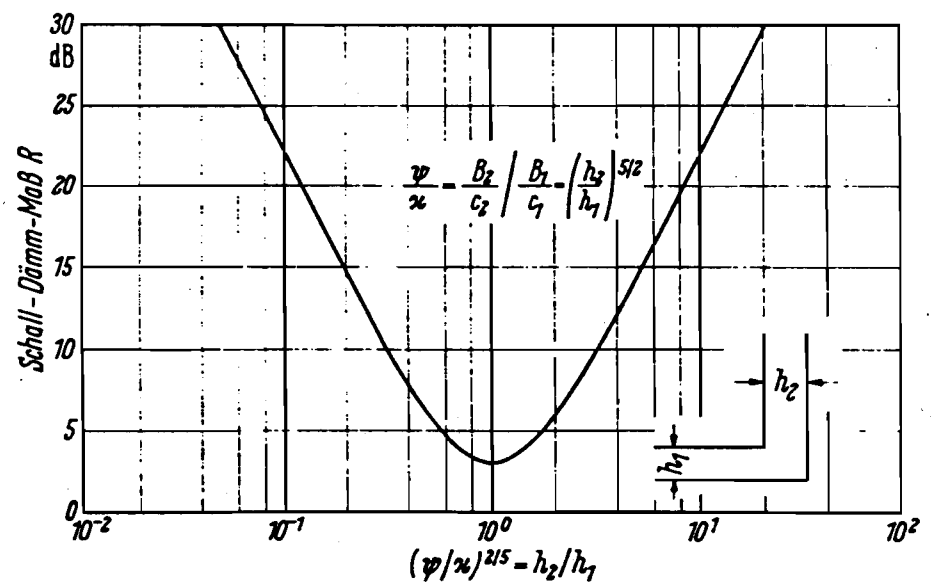
Bild 8.8

LIS-Bericht Nr. 107

(a)



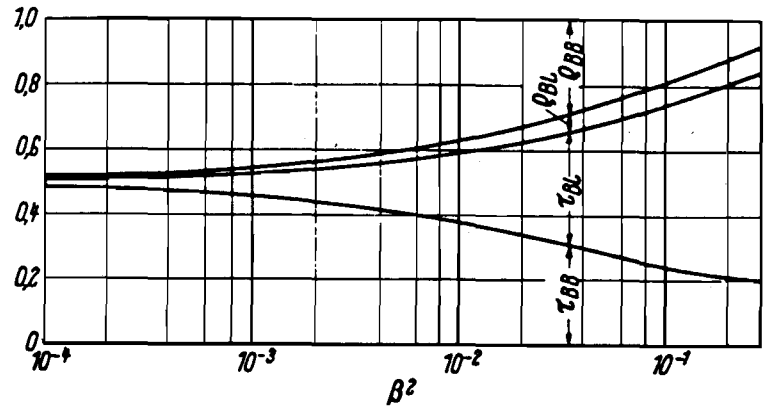
(b)



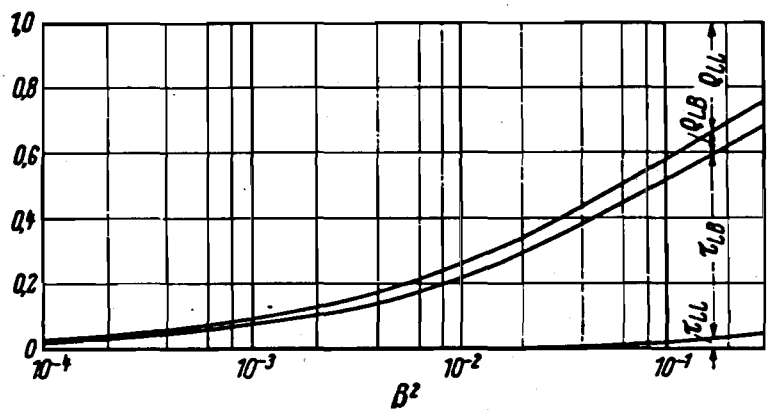
[8 - 2]

Schalldämm-Maß in Abhängikeit des Dickenverhältnisses a) Querschnittssprung, b) biegesteife Ecken LIS-Bericht Nr. 107	Bild 8.9

(a)



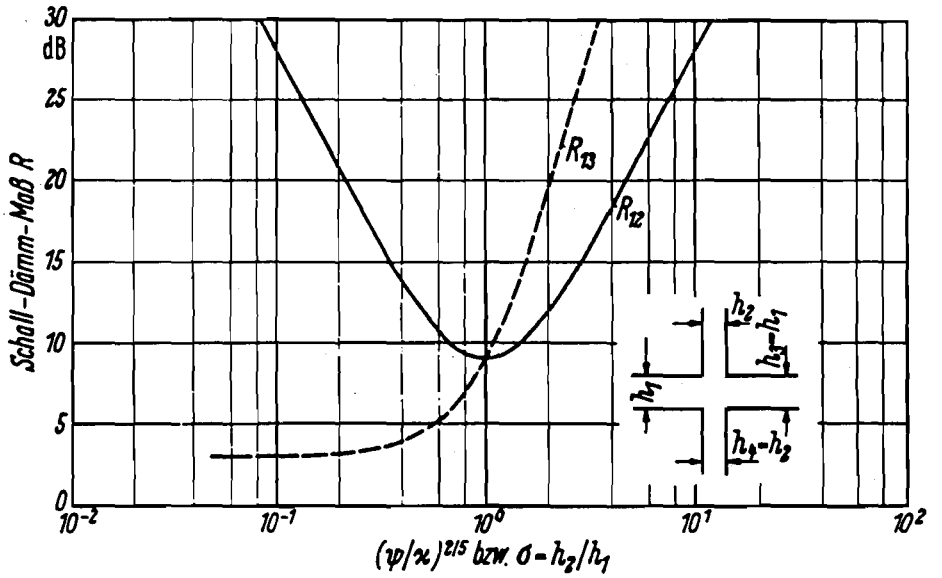
(b)



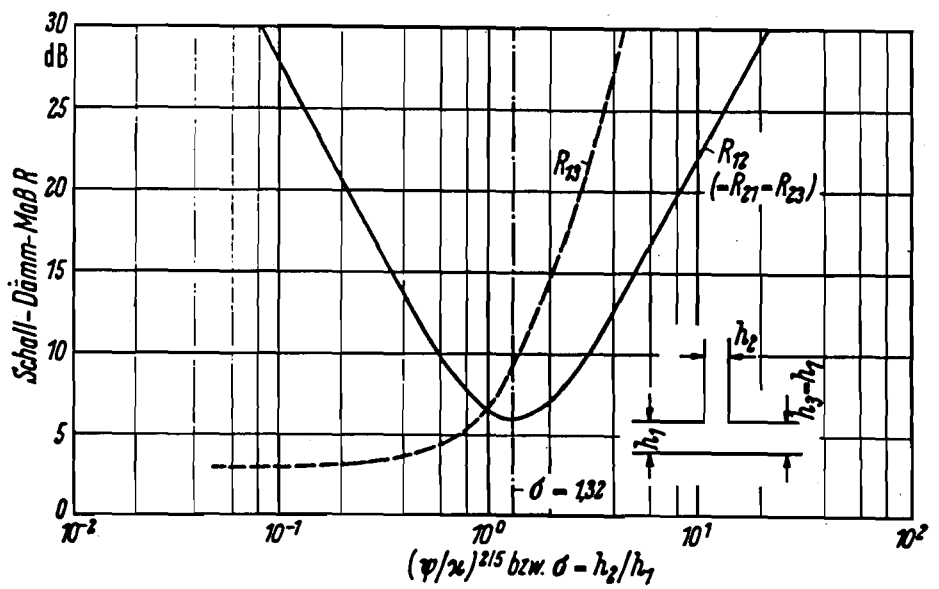
[8 - 2]

Energieaufteilung beim Auftreffen einer Welle auf eine biegesteife Ecke a) Biegewelle, b) Longitudinalwelle LIS-Bericht Nr. 107	Bild 8.10

(a)

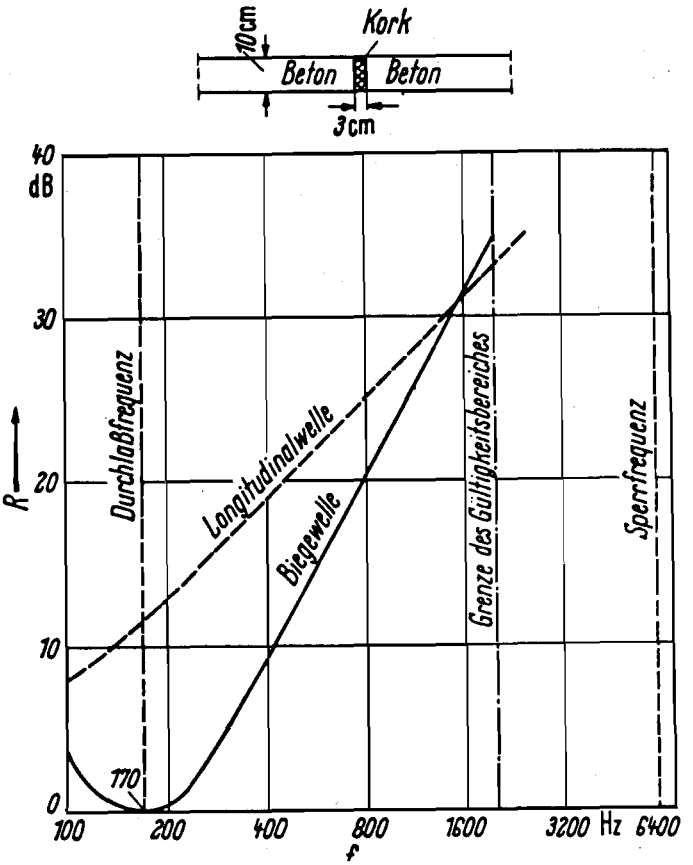


(b)



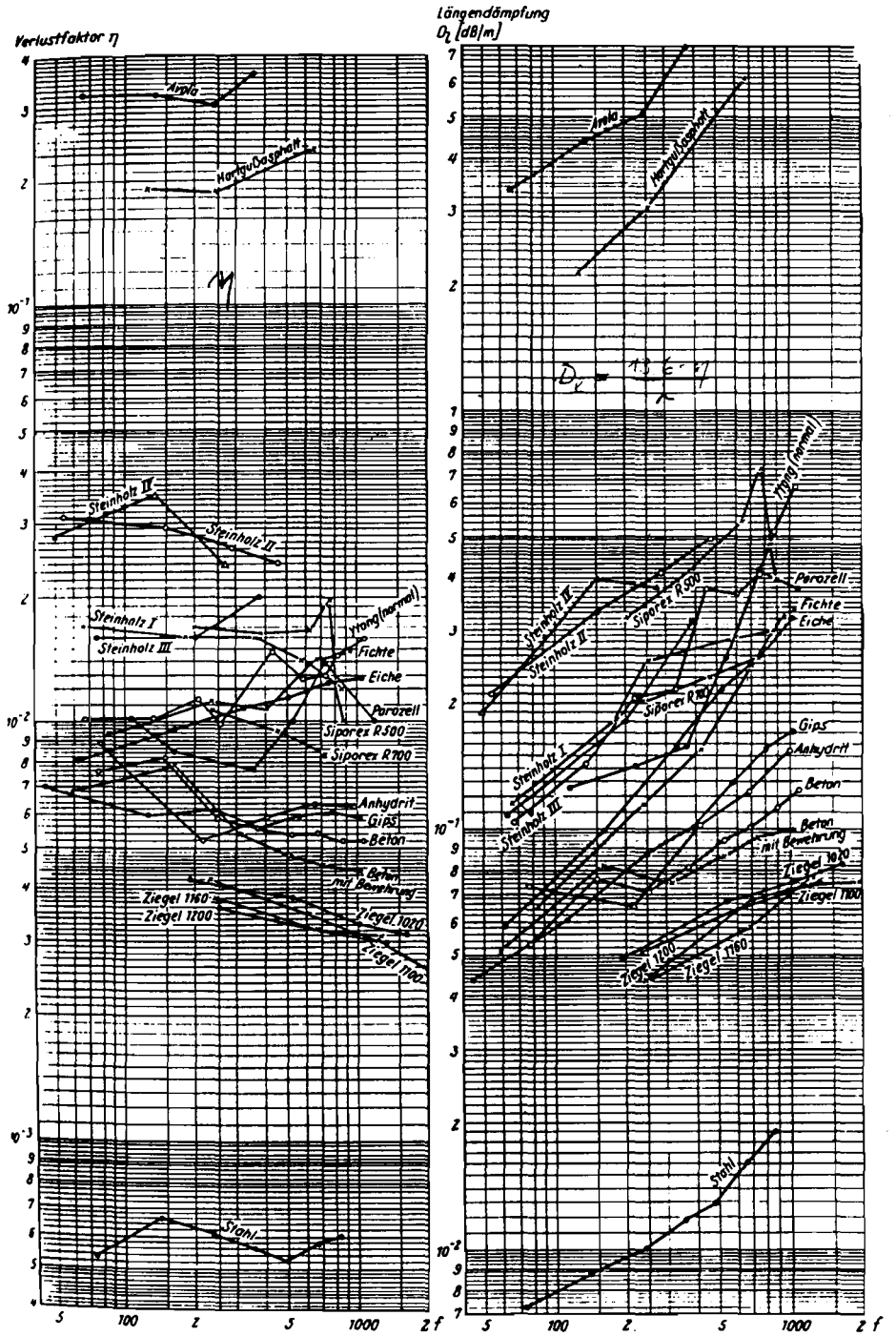
[8-2]

Schalldämm-Maß in Abhängigkeit des Dickenverhältnisses a) Wandkreuz. b)Wandabzweigung LIS-Bericht Nr. 107	Bild 8.11



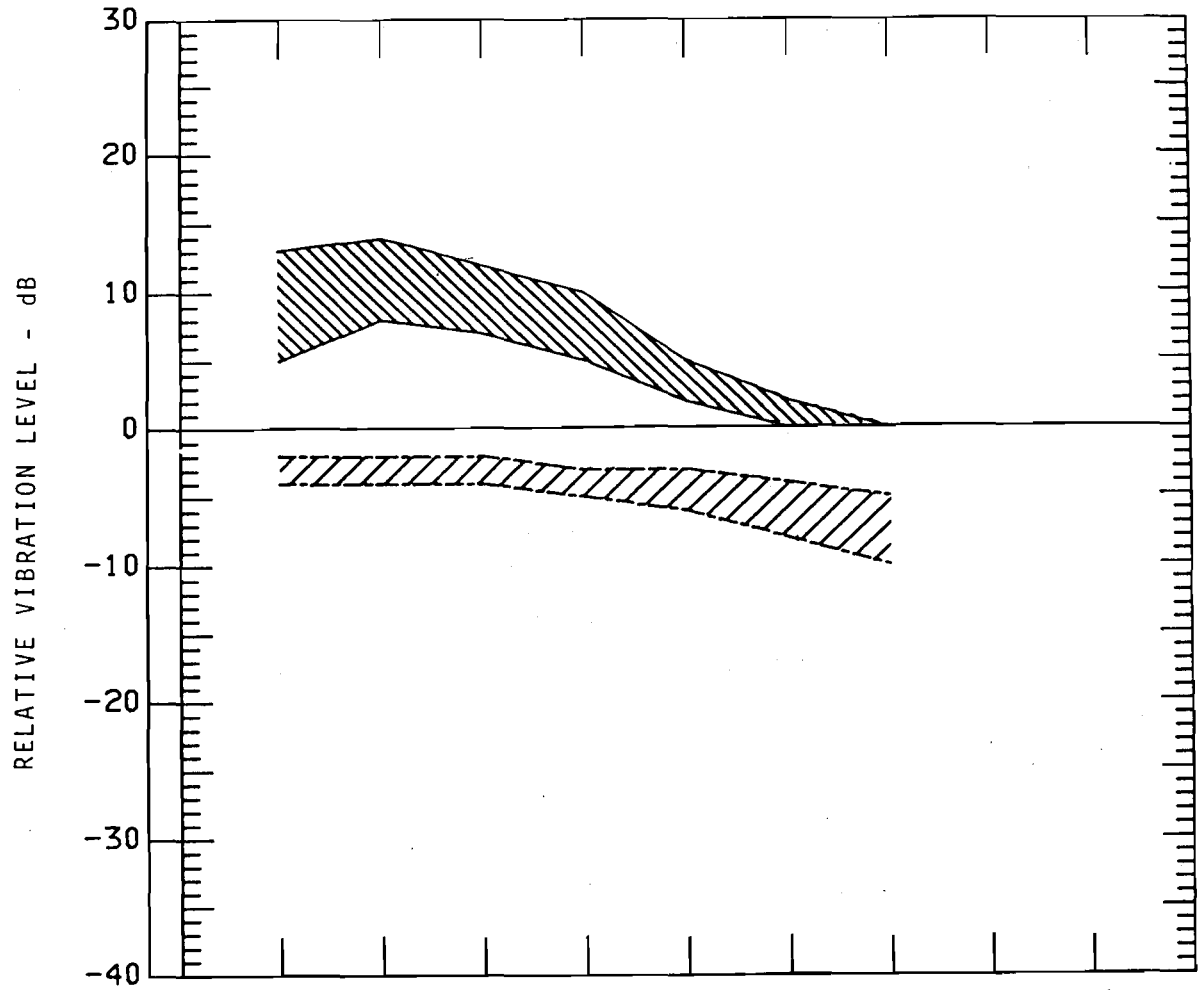
[8-2]

Schalldämm-Maß einer elastischen Zwischenschicht in Abhängikeit der Frequenz (Beispiel Kork) LIS-Bericht Nr. 107	Bild 8.12



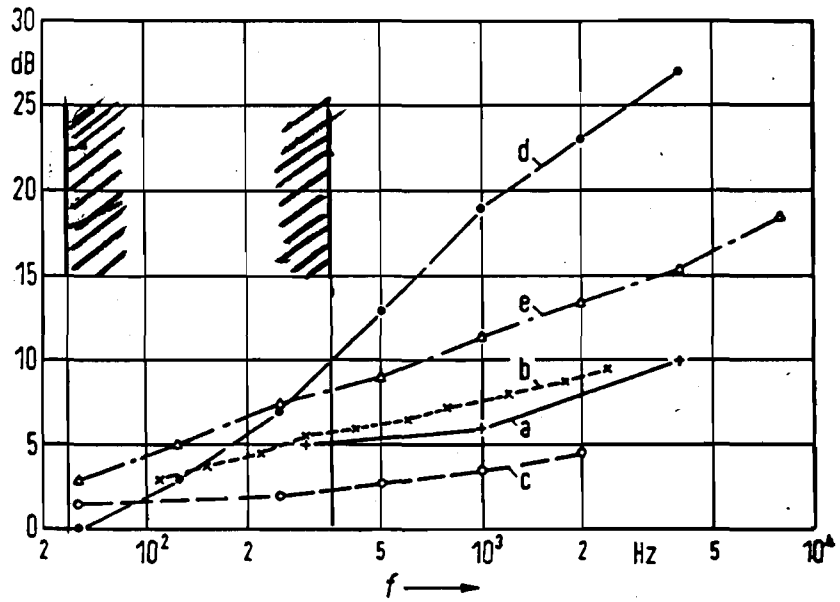
[8-33]

Verlustfaktoren und Längendämpfungen in Abhängigkeit von der Frequenz	Bild 8.13
LIS-Bericht Nr. 107	



[6-21]

Frequenzgang von Deckenresonanzüberhöhungen und Körperschalldämpfung pro Stockwerk LIS-Bericht Nr. 107	Bild 8.14



Körperschallpegelabnahme je Geschoß.

Kurven a bis c: Nächster Meßpunkt mindestens ein Geschoß von der Anregungsstelle entfernt.

Kurve a: 12 cm Stahlbetondecken, 24 cm Hohlziegelwände. Messungen ausgewertet über sechs Geschosse (nach [2]).

Kurve b: Wände aus Bimshohlblöcken. Messung über ein Geschoß (nach [3]).

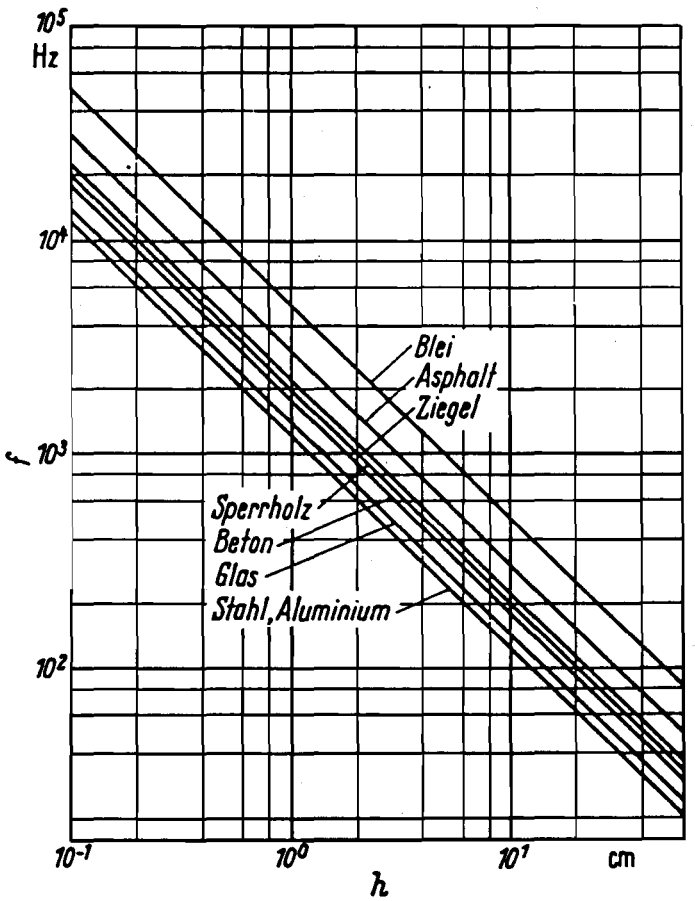
Kurve c: Stahlskelett-Hochhaus mit Stahlbetonwänden und -decken. Messungen ausgewertet über fünf Geschosse (nach [4]).

Kurven d und e: Stahlbetongebäude mit zwei Untergeschossen, Erdgeschoß und zwei Obergeschossen.

Kurve d: Boden des zweiten Untergeschosses angeregt. Differenz der Pegel von Boden und Decke im Fernfeld. (desselben Geschosses)

Kurve e: Pfeiler im zweiten Untergeschoß angeregt. Differenz der Pegel der ersten und zweiten bzw. der zweiten und dritten höheren Decke (Mittelwerte).

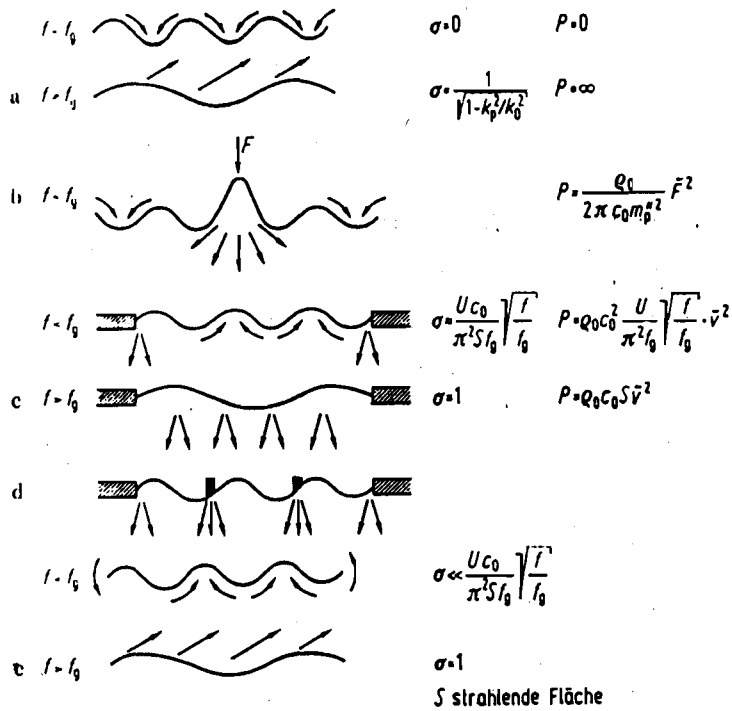
Körperschallpegelabnahme pro Stockwerk für verschiedene Bauwerksausführungen LIS-Bericht Nr. 107	Bild 8.15



[8-2]

Grenzfrequenz für Körperschallabstrahlung in Luft LIS-Bericht Nr. 107	Bild 8.16

(a)

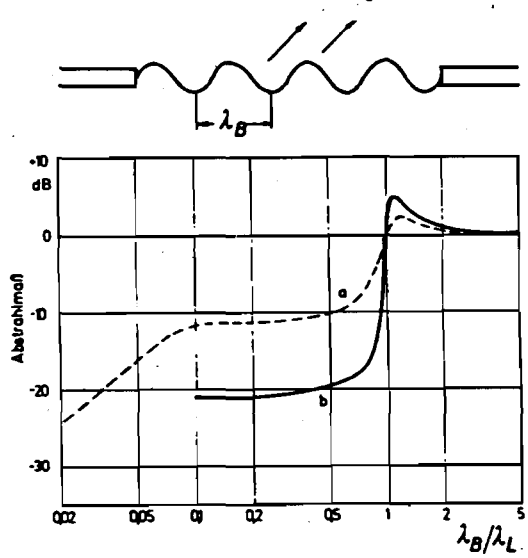


S strahlende Fläche
U Umfang

[8-36]

Abstrahlung von Platten. a) unendlich große Platte; b) punktförmig angeregte große Platte (mit Dämpfung); c) eingespannte Platte; d) Platte mit Versteifung, wie c) jedoch ist U der Umfang der Teilflächen S zwischen den Versteifungen bzw. dem Rand; e) freie Platte.

(b)



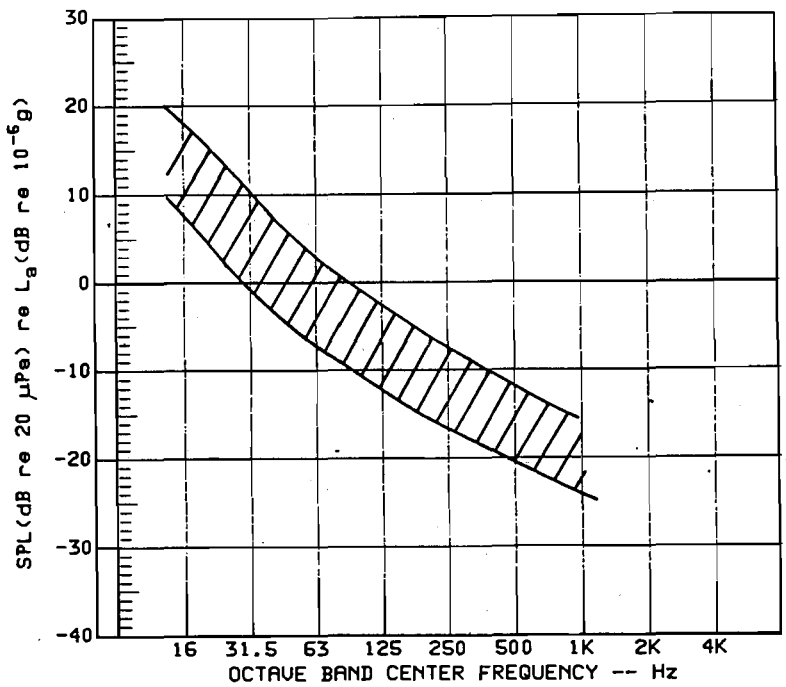
Schallabstrahlmaß von ebenen Platten, abhängig vom Verhältnis λ_B/λ_L

λ_B Wellenlänge der Biegeschwingungen
λ_L Wellenlänge des Luftschalls
a kleine Abmessungen
b große Abmessungen der Platte

[7-21]

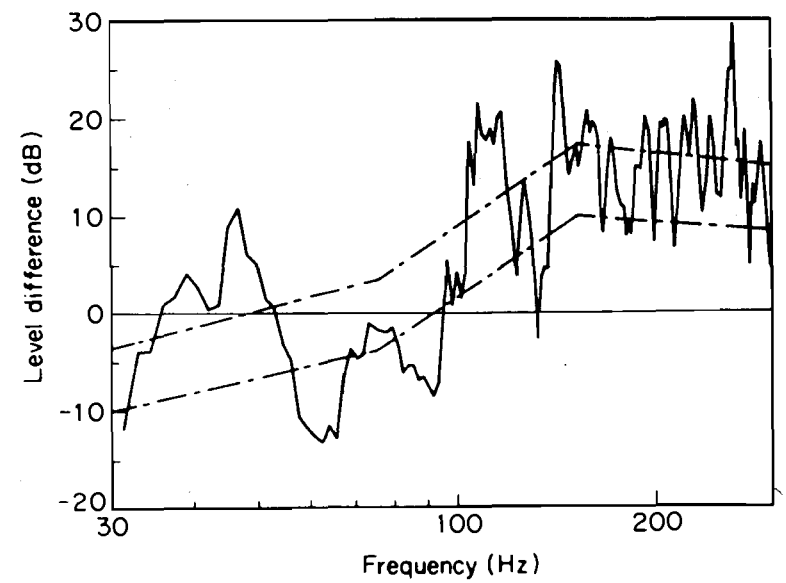
Schallabstrahlung von Platten a) Abstrahlgrad verschiedener Plattensysteme b) Abstrahlgrad in Abhängigkeit von λ_B/λ_L von kleinen und großen Platten	Bild 8.17

(a)



[6-21]

(b)



[6-22]

Verhältnis von Schallpegel und Beschleunigungspegel

(a) des Fußbodens.

(b) Pegeldifferenz Schalldruck und Schnelle des Fußbodens

Bild 8.18

LIS-Berichte

der Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus dem Untersuchungs- und Forschungsprogramm der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Sie werden - soweit nicht vergriffen - Interessenten auf Anfrage hin kostenlos zur Verfügung gestellt. Alle LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in zahlreichen Universitäts- und Hochschulbibliotheken zur Einsichtnahme und Ausleihe zur Verfügung.

Bestellungen sind zu richten an die

Landesanstalt für Immissionsschutz
L I S **Nordrhein-Westfalen**
Wallneyer Straße 6 D 4300 Essen 1 Tel. (0201)7995-0

Die Titel der LIS-Berichte Nr. 1 bis 50 sind in einem Prospekt nachgewiesen, der auf Anfrage gerne zugeschickt wird. Diese Berichte sind, bis auf teilweise noch verfügbare Überstücke, vergriffen.

Berichte-Nr. 51: (vergriffen)
Herpertz, E., J. Assmann, D. Krane, E. Hartmann, B. Steck, E. Brewig und J. Krochmann:
Messen und Beurteilen von Lichtimmissionen (1984).

Berichte-Nr. 52: (vergriffen)
Pfeffer, H.-U.:
Qualitätssicherung in automatischen Immissionsmeßnetzen.
Teil 3: Ringversuche der staatlichen Immissions-Meß-und Erhebungsstellen in der Bundesrepublik Deutschland (STIMES).
Ergebnisse für die Komponenten SO_2, NO_x, O_3 und CO (1984).

Berichte-Nr. 53: (vergriffen)
Beier, R.:
Zur Planung und Auswertung von Immissionsmessungen gemäß TA-Luft 1983 (1985).

Berichte-Nr. 54: (vergriffen)
Bröker, G. und H. Gliwa:
Polychlorierte Dibenzo-Dioxine und -Furane in den Filterstäuben und Schlacken der 12 Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen sowie einiger Sondermüllverbrennungsanlagen (1985).

Berichte-Nr. 55: (vergriffen)
Külske, S., J. Giebel, H.-U. Pfeffer und R. Beier:
Analyse der Smoglage vom 16. bis 21. Januar 1985 im Rhein-Ruhr-Gebiet.
Teil 1: Text- und Bildband (1985)
Teil 2: Meßergebnisse (1985).

Berichte-Nr. 56:
Splittgerber, H., M. Klein und P. Neutz:
Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle bei Einwirkung von Erschütterungen auf den Menschen - Beschreibung der Versuchsanlage - (1985).

Berichte-Nr. 57: (vergriffen)
Prinz, B., J. Hradetzky, H.-U. Pfeffer, H.W. Zöttl und H.-K. Lichtenthaler:
Forschungsergebnisse zur Problematik der neuartigen Waldschäden (1985).

Berichte-Nr. 58: (vergriffen)
Giebel, J. und W. Stramplat:
Untersuchung über die Eignung des Korrelationsspektrometers COSPEC V zur Bestimmung des Transportes von Schwefeldioxid bzw. Stickstoffdioxid (1986).

Berichte-Nr. 59: (vergriffen)
Prinz, B., D. Schwela, E. Koch, S. Ganser und T. Eikmann:
Untersuchungen zum Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Häufigkeit von Pseudokrupperkrankungen im Stadtgebiet Essen (1986)..

Berichte-Nr. 60: (vergriffen)
Manns, H. und H. Gies:
Ergebnis der Erprobung des automatischen Ozon-Meßgerätes Dasibi, Typ 1008 AH (1986).

Berichte-Nr. 61: (vergriffen)
Splittgerber, H.:
Messung und Beurteilung von Erschütterungsimmissionen - Vergleich verschiedener Verfahren - (1986).

Berichte-Nr. 62: (vergriffen)
Buck, M. und P. Kirschmer:
Immissionsmessungen polychlorierter Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane in Nordrhein-Westfalen (1986).

Berichte-Nr. 62: (vergriffen)
Buck, M. und P. Kirschmer:
Measurements of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Outdoor Air (1987).(Übersetzung des 1986 erschienenen LIS-Berichtes Nr. 62)

Berichte-Nr. 63: (vergriffen)
Giebel, J.:
Untersuchung über die praktische Anwendung eines numerischen Ausbreitungsmodells (K-Modell) für die Praxis der Immissionssimulation (1986).

Berichte-Nr. 64: (vergriffen)
Winkler, H.D.:
Thalliumemissionen bei der Zementherstellung - Ursachen und Minderungsmaßnahmen - (1986).

Berichte-Nr. 65: (vergriffen)
Wietlake, K.H.:
Erschütterungseinwirkungen durch Exzenter-Schmiedepressen und ihre Minderung durch Direktabfederung (1986).

Berichte-Nr. 66: (vergriffen)
Viertes Symposium über die Technik der Kernreaktorfernüberwachungssysteme am 8. und 9. Oktober 1985 in der LIS, Essen (1986).

Berichte-Nr. 67: (vergriffen)
Assmann, J.:
Hinweise zur Prognose von Geräuschimmissionen im Rahmen von Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (1986).

Berichte-Nr. 68: (vergriffen)
Manns, H. und H. Gies:
Erprobung des Schwebstaubmeßgerätes FH 62 I 3 m^3/h für die automatisierte Immissionsmessung (1986).

Berichte-Nr. 69: (vergriffen)
Beine, H.:
Phosphorsäureester und verwandte Verbindungen -
Umweltrelevanz und luftanalytische Bestimmung (1987).

Berichte-Nr. 70: (vergriffen)
Buck, M. und H.-U. Pfeffer:
Air Quality Surveillance in the State North-Rhine-Westphalia (F.R.G.).
(Vollständig neu bearbeitete Fassung LIS-Berichtes Nr. 46) (1987).

Berichte-Nr. 71:
Wefers, H. und H. Katzer:
Zusammenstellung von zusätzlichen sicherheitstechnischen Anforderungen an Anlagen zur Lagerung von druckverflüssigtem Ammoniak in Kraftwerken (1987).

Berichte-Nr. 72: (vergriffen)
Beier, R., J. Kohlert und M. Buck:
Entwicklung der Immissionsbelastung in der Umgebung der Aluminiumhütte im Essener Norden in den Jahren 1984 bis 1986 (1987).

Berichte-Nr. 73: (vergriffen)
Schade, H.:
Erstellung eines Emissionskatasters und einer Emissionsprognose für Feuerungsanlagen im Sektor Haushalte und Kleinverbraucher des Belastungsgebietes Ruhrgebiet Ost.
(1987).

Berichte-Nr. 74: (vergriffen)
Beier, R. und M. Buck:
Möglichkeit und Grenzen der Nutzung von Luftqualitätsdaten aus diskontinuierlichen Messungen gemäß TA-Luft (1988).

Berichte-Nr. 75: (vergriffen)
Koch, E. und P. Altenbeck:
Prinzipien des prophylaktischen Immissionsschutzes (1988).

Berichte-Nr. 76: (vergriffen)
Giebel, J.:
Eine vereinfachte Methode zur Immissionssimulation (1988).

Berichte-Nr. 77: (vergriffen)
Külske, S., R. Beier und H.-U. Pfeffer:
Die Smoglage vom 14. bis 22. Januar 1987 in Nordrhein-Westfalen und ihre Ursachen. (1988).

Berichte-Nr. 78: (vergriffen)
Geueke, K.-J. und H. Niesenhaus:
Bestimmung von Benzol in Abgasen (1988).

Berichte-Nr. 79: (vergriffen)
Wietlake, K.-H.:
Geräuschminderung durch Teilkapselung von Schmiedehämmern (1988).

Berichte-Nr. 80:
Krause, G.H.M. und B. Prinz:
Experimentelle Untersuchungen der LIS zur Aufklärung möglicher Ursachen der neuartigen Waldschäden (1989).

Berichte-Nr. 81: (vergriffen)
Goldberg, K.H.:
Untersuchungen zur Geräuschemission und -ausbreitung von Schußsignalen bei Kleinkaliberschießständen (1988).

Berichte-Nr. 82: (vergriffen)
Buck, M. und K. Ellermann:
Die Immissionsbelastung durch Benzol in Nordrhein-Westfalen (1988).

Berichte-Nr. 83:
Wefers, H., S. Delling und T. Schulz:
Hinweise zur Erstellung und Prüfung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen nach der Störfall-Verordnung (1988).

Berichte-Nr.84: (vergriffen)
Wefers, H., T. Schulz und R. John:
Hinweise und Suchstrategien zu den Stoffen der Störfall-Verordnung (1988).

LIS-Bericht-Nr. 84 wurde ersetzt durch den LIS-Bericht-Nr. 105 (1992)!

Berichte-Nr. 85:
Krause, G.H.M.:
Untersuchungen zum Vegetationszustand im Umgebungsbereich der nordrhein-westfälischen Aluminiumhütten mit Hilfe der Falschfarbenfotografie (1988).

Berichte-Nr. 86:
Katzer, H. und R. John:
Einsatz von Ammoniakwasser in katalytischen DeNO$_x$-Anlagen - Ergebnisse an einer Versuchsanlage - (1989).

Berichte-Nr. 87:
Kirschmer, P. und A. Gerlach:
Immissionsmessungen von Chlorkohlenwasserstoffen - Probenahme, Analyse, Ergebnisse - (1989).

Berichte-Nr. 88:
Euteneuer, U., H. Katzer und H. Wefers:
Sicherheitstechnische Überprüfung einer verfahrenstechnischen Anlage nach einem modifizierten PAAG-Verfahren am Beispiel eines Flüssiggaslagers (1989).

Berichte-Nr. 89:
Beier, R. und A. Doppelfeld:
Analyse der räumlichen Repräsentativität automatischer Meßnetze der Luftqualität (1989).

Berichte-Nr. 90:
Beier, R. und J. Kohlert:
Pilotstudie zur Überwachung von Tetrachlorethen in der Nachbarschaft von Chemisch-Reinigungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1989).

Berichte-Nr. 91: Buck, M. (Bearb.):
Asbest-Immissionsbelastung durch Abwitterung.
Fachkolloquium am 06. Juli 1989 in der LIS NRW, Essen,
Tagungsbericht. Gem. hrsg. von: Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Niedersächsisches Landesamt für Immissionsschutz, Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen (1989).

Berichte-Nr. 92: Kirschmer, P. und P. Eynck:
Meßverfahren mit automatisierter Probenahme zur Bestimmung von Aldehyden in der Luft (1989).

Berichte-Nr. 93: Ehl, W. und A. Ertl:
Kriterien-Katalog zur "Prüftiefe" bei Sicherheitsanalysen am Beispiel eines Flüssiggaslagers. (1990).

Berichte-Nr. 94: Manns, H., G. Nitz und B. Striefler:
Weiterentwicklung und Erprobung von Immissionsmeßverfahren für gesundheitsgefährdende organische Stoffe. (1990).

Berichte-Nr. 95: Splittgerber, H. und R. Hillen:
Wahrnehmungsschwelle für Ganzkörperschwingungen in sitzender Körperhaltung. (1991).

Berichte-Nr. 96: Mang, F. und F. Wolfmüller
Großvolumige Behälter zur erdgedeckten Lagerung von druckverflüssigtem Propan, Butan und Ammoniak (bearb. von W. v. Borries und H. Katzer).
(1991).

Berichte-Nr. 97: Hansmann, G. und H. Wefers:
Sicherheitstechnik bei Aktivkoksfiltern an Abfallverbrennungsanlagen
- Hinweise und Anforderungen aus der Sicht der Störfall-Verordnung
(1991)

Berichte-Nr. 98: Koch, E. und P. Altenbeck:
Umsetzung der Großfeuerungsanlagen-Richtlinie der EG in den Mitgliedstaaten.
(1992)

Berichte Nr. 99: Beisheim,K. , A. Ertl und H. Wefers:
Sicherheitsanalysen zu Pflanzenschutzmittellägern
- gutachterliche Bewertung zweier Beispiele.
(1992)

Berichte Nr. 100: Pfeffer, H.-U., H. Dobrick und R. Junker:
Qualitätssicherung in automatischen Immissionsmeßnetzen.
Anforderungen an die Telemetrischen Echtzeit-Immissionsmeßsysteme TEMES und MILIS in NRW.
(1992)

Berichte Nr. 101: Beier, R. und A. Doppelfeld:
Räumliche Übertragbarkeit und Interpolation von Luftqualitätsdaten im Meßnetz TEMES.
(1992)

Berichte Nr. 102: Essers, K.-H.:
Praxiserfahrungen mit dem LIS-Olfaktometer MEO-5.
(1992)

Berichte Nr. 103: Bröker, G., K.-J. Geueke, E. Hiester und H. Niesenhaus:
Emission polychlorierter Dibenzo-p-dioxine und -furane aus Hausbrand-Feuerungen.
(1992)

Berichte-Nr. 104: Manns, H. und H. Gies:
Erprobung des Schwebstaubmeßgerätes FH 62 I-N (1 und 3 m^3/h, geregelt) für die automatisierte Immissionsmessung.
(1992).

Berichte-Nr. 105: Howe, U., M. Mayer, T. Schulz und A. Ertl:
Hinweise und Suchstrategien zu den Stoffen der Störfallverordnung.
(1992)

Hinweis:

Die Grundlage des LIS-Berichtes bildet eine ständig fortgeschriebene PC–Organismen- und Stoffliste mit modularem Aufbau (mit mehr als 30 Einzellisten) die von der LIS mit Hilfe einer relationalen Datenbank für Personalcomputer erstellt wurde. Die PC-Organismen- und Stoffliste kann auf PC mit Festplatte und dem Betriebssystem MS-DOS (IBM-kompatibel) betrieben werden. Sie wird im Auftrag der LIS von der Fa. Colman Computer Service, Brunnenstr. 61 - 65, 4300 Essen, Tel.: (0201)87206–0, Telefax: (0201) 784559, für DM 195,-- vertrieben!

Berichte-Nr. 106: Köth-Jahr, I. (Bearb.):
Sachverständigenanhörung zum Thema "Immissionsbedingte Materialschäden". Tagungsbericht (Wortprotokoll) der Veranstaltung vom 27. bis 29. Mai 1991 in Essen. (1992).